《森林火灾遥感监测评价——理论及技术应用》
编辑委员会

主　　编　赵宪文
副 主 编　周万村　易浩若
编　　委　（以姓氏笔划为序）
　　刘琼招　宋启聽　纪　平
　　周万村　易浩若　赵宪文
　　游先祥　高世忠　彭世揆
　　蔡登逊
责任编辑　李德林

序

20多年来，航天和航空遥感技术取得了重大进展。在资源环境方面得到日益广泛的应用。“八五”期间国家为进一步促进遥感技术的实用化，将“遥感技术应用研究”列为国家重点科技攻关项目。目的是对国民经济发展有重大影响的主要农业作物产量估计和重大自然灾害监测提供一个可运行的技术系统，同时对遥感应用的基础理论及带有前沿性和方向性的问题进行研究，从而为“九五”做好理论和技术储备。

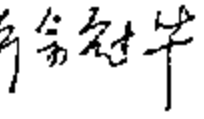
重大自然灾害监测是遥感技术应用项目的重要组成部分，其目标是在已有的科研成果和技术条件的基础上，通过对全国灾害危险分区评价、灾害发生背景数据库的建立、灾害行为监测评价模型研究、遥感应用技术支持系统等课题的支持下，进行灾害遥感监测评价综合试验与试运行服务，这个课题将充分发挥遥感技术在防灾、抗灾和救灾等减灾活动中的作用，为实现我国政府在国际减轻自然灾害10年活动中提出的“到本世纪末，最终达到减少自然灾害损失30%的目标”做出积极贡献。

西南地区是我国第二大林业基地，幅员辽阔，居住着30多个少数民族，是许多珍贵生物物种的生存地。由于自然环境和人们生产方式的缘故，森林火灾频频发生。这个专题的研究，对保护我国西南地区宝贵森林资源有重要意义。

本专题从1991年9月开始，参加课题的有6个单位，近40名有高级职称或硕士学位的科研人员，经过4年的艰苦工作，建立了森林火点监测的数学模型和覆盖面积达90万 km^2 的数据库。为该地区森林火灾的监测奠定了技术基础，同时组织了3次火烧试验。在崇山峻岭中不畏艰苦收集大量第一手资料，研究了林火行为特征，在上述一系列工作基础上，最终提交了行之有效的、可靠的运行系统和一批有深度的研究论文。本书汇集了这些论文，它是科学工作者几年来辛勤工作的结晶。

通读本书，感到它在科学性、实用性以及研究的系统性方面均具特色。如航天—航空—地面相配合监测林火技术体系的建立、林火信息提取、遥感信息与环境因子的相关分析、面向林火的早期报警系统、火灾损失评估数学模型、专家系统、智能化技术应用和一系列指标体系的建立，都不乏有精彩论述，比“七五”的类似研究成果上升了一个台阶。

本书是课题组全体同志团结奋斗协作攻关的宝贵成果，是对我国遥感学科发展的贡献。对本书的出版表示热烈的祝贺！



1995年9月9日

目　录

序 徐冠华

森林火灾遥感研究的新进展 …… **赵宪文** (1)

西南林区自然环境与社会经济概况 …… **周万村**(12)

1. 中国森林火灾危险分区评价的研究 …… 刘琼昭等(13)
2. 中国森林火险区划图的编制 …… 周万村等(24)
3. 林火灾害的分类分级和危险度评价研究方法 …… 邹仁元等(28)
4. 地理信息系统(GIS)支持下的小区域森林火灾区划方法研究 …… 张振威等(36)
5. 西南重点林区火灾背景数据库建立与管理 …… 于　芳等(42)
6. 林火遥感监测系统 …… 易浩若等(48)
7. 西南林区火灾报警系统——人工神经元网络专家系统的研究 …… 纪　平等(54)
8. 基于微机 VGA 卡的遥感数据彩色合成显示 …… 张艳忠等(61)
9. 地理信息系统支持下的卫星监测林火方法 …… 何筱萍　(65)
10. 林火识别专家系统的研制与验证 …… 易浩若等(69)
11. 西南林区火灾预报方法研究 …… 赵宪文　(76)
12. AADS－1268 多光谱扫描数据在林火监测中的应用 …… 蔡登遵等(87)
13. 应用红外遥感的森林火灾监测及灾后生态初步评估的研究 …… 游先祥等(97)
14. 林火仿真系统模型 …… 彭世揆等(102)
15. 西南林火计算机仿真系统的研究 …… 蔡炳峰等(105)
16. GIS 支持下的林火扩展模拟研究 …… 高　峰等(121)
17. 林火灾后林木死亡率的估测 …… 蔡炳峰等(128)
18. 用 TM 数据进行林火灾害信息提取及损失评估方法的研究 …… 孙小兵等(132)
19. 森林火灾后生态因子及生态变化遥感调查结果的分析 …… 高世忠等(141)
20. 遥感在森林火灾后生态变化动态监测研究中的应用 …… 高世忠等(148)
21. 遥感与模糊评判在森林火灾后生态监测评价中的应用 …… 范建容等(157)
22. 干旱河谷云南松林火灾及生态因子的评价 …… 游先祥等(164)
23. 林火对云南松林土壤性质的影响 …… 唐季林　(172)

附录

世界林火研究最新动态 …… 赵宪文等(178)

"西南林区等火灾监测评价系统"使用说明书 …… 易浩若　(183)

"西南林区等火灾监测评价"专题参加人员名单 …… (194)

Summary …… 彭世揆译(195)

森林火灾遥感研究的新进展

赵宪文
（中国林业科学研究院资源信息研究所）

引　言

森林和火在人类进化史上都起到了至关重要的作用，森林曾是人类祖先的庇护所，火则使人类改变了食物的食用方式，从而引发了一系列的历史变化。我们所要探讨的问题是，火对森林毁坏，以及如何阻止其发生，使森林与火都为人类所用。

全世界每年发生林火几十万次，受害森林面积达几百万公顷，要烧掉世界森林面积的千分之一。由于气候的变迁，近年来世界范围内大火连天，伴随干旱而来的火魔损坏了大片森林、农田，驱赶着人们离开了家园，破坏了环境，破坏了原本宁静的生活。据统计位于地中海的希腊近年来森林火灾大发生，1993 年创造其历史上最高记录。1993 年美国火灾损失森林面积 84000hm²，162 人死亡，1241 栋建筑被毁，损失 5 亿美元。特别值得注意的是 90 年代后期随着干旱的到来，火灾从非洲东移，从北向南移，从欧亚大陆转向东南亚，使数百万公顷热带林破坏，严重损害整个东南亚地区乃至全球的生态平衡，已引起各国对林火的重视。

一、背　景

中国是一个少林国家，在世界覆盖率排序表上中国占第 120 位，然而这么少的资源却还屡遭林火袭击。

中国是森林火灾多发和损失严重的国家，1987 年的大兴安岭大火已震惊世界。据 1950—1989 年全国森林火灾资料分析，40 年来共发生森林火灾 63 万多起，总过火面积 3500 多万 hm²，烧毁林木 9.9 亿 m³，价值 1500 亿元(人民币)。平均每年发生森林火灾 15800 多起，平均每年森林过火面积近 90 万 hm²，平均每年森林火灾面积占全国森林总覆盖率的 8‰左右；为世界平均水平的 8 倍，平均每十万公顷森林面积发生森林火灾次数为 12.7 起，每十万公顷森林平均年过火面积为 721.7hm²；全国平均每次森林火灾的面积为 56hm²，如以每公顷损失 20m³ 来估算，林木损失 7 亿 m³。频繁发生的林火，使我们花大量人力、财力恢复起来的森林资源毁于一旦。上面提到的大兴安岭大火，一个月内过火面积达 100 多万 hm²，给国家造成巨大损失。据统计大兴安岭地区自开发建设到 1986 年末，林火损失的森林面积为同期有效人工更新面积的 13.7 倍。因此，防止森林火灾、减少林火损失是恢复我国森林资源刻不容缓的任务。

西南地区是我国第二大林区，通常指云南、四川、贵州，该区也是森林火灾频繁发生地区，云南保山地区 1971—1985 年共发生林火 3800 次，烧去同期造林面积的 44.02%，而在少林的四川盆地 1983—1987 年统计发生林火 139 次。贵州 80 年代森林火灾平均毁林 173km²，占有林地面积 6‰，对覆盖率不高的贵州这损失就不少了。1988 年春防期间，全国森林火灾毁林率

0.42‰，贵州为 4.6‰，全国发生特大、重大森林火灾 107 起，其中贵州为 59 起，占 55%，居全国之首。

森林火灾毁坏森林，破坏生态环境，影响人民群众正常生活，给国民经济造成损失，做好林区火灾的预防、监测和损失估计，是减轻灾害，协助灾区人民重建家园的有力保障，是林业和遥感工作者的迫切任务。

由于现代遥感技术与地理信息系统相结合所具有的优势和潜力，在火灾发生前可以根据气候、可燃物积累和含水量，林木组成等因子预测可能发生的地区、时段和火险等级，采取必要的防范措施减少火灾造成的损失。在火灾发生时，可监测其进程和趋势，及时为灭火指挥机关提供第一手资料，帮助他们有效地组织扑救，在灾后可迅速查明损失，以便组织救灾，恢复生产，同时对更新及生态环境的变化进行监测评价。

西南林区相对比较闭塞，经济落后，交通不便，居住着众多少数民族。

本专题以西南林区作为研究重点，还在发展边区经济，增进民族团结，稳定边疆，有着不可忽视的作用。

二、攻关目标

本专题旨在"七五"已有的科研成果和技术条件的基础上建立全国林火分类分级标准，进行全国林火危险程度分区评价，通过森林火灾背景资料数据库的建立，火行为和火灾监测评价模型的研究，在"遥感应用技术支持系统"课题的支持下，进行西南林区等火灾宏观监测和早期报警，林火蔓延，及发展趋势监测和评价，火灾发生后损失评价和减灾辅助决策，其最终目标是建立一个快速、机动、准确实用的"林火监测应用技术系统"，以充分发挥遥感技术在防灾、抗灾和救灾等减灾活动中的作用，为减少我国森林火灾，保护自然资源和生态环境做出贡献。

攻关内容 本课题在"七五"期间已有初步工作基础，但尚未形成完整系统。在"八五"期间，应在本项目"灾害和估产遥感技术支持系统"的支持下，组装形成相应的林火遥感监测评价应用系统，兼顾快速监测评价、基础研究、早期报警及灾后生态变化监测评价技术的发展，其主要研究内容：

1. 林火分类分级标准和全国林火灾害危险程度分区评价，绘制 1：400 万全国林火灾害危险程度分区评价图；

2. 西南林区火灾背景数据库及危险区划分；

3. 气象卫星林火宏观监测及早期报警技术；

4. 森林火灾红外快速监测分析判读技术；

5. 森林火灾行为、损失评价及减灾辅助决策模型；

6. 森林火灾后更新及生态变化遥感监测评价技术；

7. 森林火灾遥感综合试验及技术系统试运行。

技术关键

1. 火灾实时检测与鉴别。通过研制应用气象卫星数据的火灾自动识别专家系统与背景数据库，发现火点、辨其真伪、准确预报。

2. 林火行为研究，应用遥感计算机技术进行火场动态仿真，研究火场扩展规律。

3. 遥感图像火灾快速识别和估计技术(NOAA AVHRR、TM、机载设备所获得图像)，在

背景库支持下，估计损失(面积和蓄积)。

4. 森林火灾红外快速监测分析判读技术。

5. 用多种遥感信息源，进行更新过程和动态研究，在信息系统支持下，研究火灾后环境质量评价的遥感方法。

三、技术路线

1. 立足于NOAA和背景库，在专家系统的支持下，准确测报发现火灾，必要时采用航空遥感手段，在其它信息源和各种模型的配合下，进行损失估计，灾后更新与生态变化评价以及火行为研究。

2. 本课题攻关在"灾害和估产遥感技术支持系统"的支持下进行，其研究成果将逐步沉淀在支持系统上，形成火灾监测评价应用系统。在本项目总体组统一调度与安排下，开展综合试验和试运行服务。

3. 按项目统一规范、标准和进度要求，以及有关的约束条件，安排和开展本课题的各种工作，包括建背景库、模型研究及技术方法攻关，综合试验和试运行，在西南重点林区选择两个典型试验区，除宏观监测外，一切模型建立和研究均在典型试验区内进行。

4. 充分发挥各参加单位现有技术系统作用，逐步集成到技术支持系统上去。

5. 火灾遥感监测评价综合试验和运行的工作流程：在全国火灾危险程度分区评价基础上，利用气象卫星及背景库在专家系统支持下，对火灾多发和危险地区进行(火灾高发季节)逐日监测和早期报警，及时准确地判断灾害的发展，严重程度及分布地区，然后，据灾害的级别和减灾的需要，利用陆地卫星或尽可能地特具有高精度定位、全天候作业和快速响应能力的灾害遥感飞机系统，派往火灾现场，通过遥感数据传输系统，将飞机获得火灾实况传到火灾分析处理中心和各级减灾指挥机关，这些数据与事先建好或快速建成的各种数据库中的数据匹配，并通过研制的各种分析评价模型和减灾辅助决策模型加以综合分析处理，提出对策方案，供各级指挥机关参考、选用，使灾害达到最小程度。在火灾后相当长的一段时间里，用各种遥感技术手段(主要是TM)进行更新及火灾对生态环境的影响和恢复状况监测，以评价各种减灾措施的生态效应。子专题分解，见下表：

85—724—01—03专题分解表

子专题名称	起止年限	考核目标	攻关内容
(1)林火分类分级标准和全国林火灾害危险程度分区评价	1991—1993	建立分类分级标准和火险分区评价	确定分级依据和危险程度划分原则
(2)西南林区等火灾背景数据库及危险区划分	1991 1992	建立1:50万林火背景数据库，包括森林分布图、交通、地形、土地利用、气候、社会经济数据等在林火高危险区输入1:5万林相图和各种数据	提出基于物理和数学的危险区划分模型
(3)林火卫星遥感监测及早期报警技术	1991—1993	建立林火卫星遥感监测及早期报警技术方法和软件系统	(1)亚像元火点识别 (2)建立专家系统提高火灾报告准确率 (3)火场图像增强技术

（续）

子专题名称	起止年限	考核目标	有关内容
(4)森林火灾红外遥感快速监测分析判读技术	1992—1993	提交成套技术方法和软件	火灾与生活生产用火的鉴别技术
(5)林火行为损失评价及成灾辅助决策模型	1991—1993	提交相应应用模型和软件	(1)林火行为动态仿真 (2)对各种遥感图像火损面积估算，重点区进行面积、蓄积损失估算
(6)森林火灾后生态变化遥感监测评价技术	1992—1993	提交成套技术方法和软件	(1)研究基于遥感资料的森达更新过程模型 (2)用遥感资料评价环境变化的方法和标准
(7)森林火灾遥感综合试验	1993 1995	每年利用气象卫星进行火灾宏观监测并根据需要进行大型试验并提交作业方案技术规程，完成考核目标	(1)24小时进行快速林火应用系统的联调运行 (2)与现有系统的协调

四、考核目标

(一)数据库及图

1. 绘制1∶400万全国林火灾害危险程度分区评价图。

2. 建立1∶50万西南重点林区火灾背景数据库，包括森林分布图、地形、交通、土地利用、气候和社会经济数据等。

3. 在林火高危险区(试验区)输入1∶5万林相图取代森林分布图。

(二)响应时间

1. 收到林火航天遥感图像1—2天内给出火灾损失的初步报告。

2. 两周内提出详细报告。

3. 精度：①林火报准率80%；②初步报告中面积和程度分级精度85%以上；③详细报告中面积和程度分级精度90%以上，蓄积损失精度85%以上。

五、主要成果

1. 提交1∶400万中国森林火险危险分区图；1∶1200万中国森林火灾损失分区图；1∶2000万中国林火成因分析图；中国林火发生季节分析图；中国森林火险程度图；中国历史森林火灾分布图。

2. 提供1∶50万重点林区火灾背景数据库；1∶5万高发区(试验区)背景数据库。

3. 林火早期发现，快速评估运行系统。

4. 红外遥感火灾识别技术。

5. 灾后生态环境评估方法与软件。

6. 已发表论文20篇。

7. 研究报告及文集一本。

六、森林火灾遥感研究技术进展

森林火灾的研究在我国已有不少年，涉及火灾各个侧面的论著不少，但是从遥感角度系统地研究还不多见，攻关课题的优势在于可组织协调各方面的专家，从一个比较大的规模去系统地研究。通过全体攻关科研工作者的协同工作，课题已顺利完成并且显示出在以下方面有了进展。

(一)系统地研究了森林火灾全过程

研究的系统性体现以下几个方面：

1. 本次研究从火灾的危险预报→火灾的早期发现→火场仿真→快速评估(航天、航空)→灾后生态评估，都有所涉及。现将与研究内容相对应的研究论文及主要进展叙述如下：

(1)林火危险预报

A. 林火危险区的区划　摒弃了分层套迭的传统作法，而是用综合评判和得分的办法按格网编图，便于数据更新，同时在 GIS 支持下进行了区划方法的研究(见论文1—4)。

B. 在林火危险预报方面首次提出了直接用航天遥感数据估测枯落物量的思路和方法，并用马尔柯夫随机过程和自回归方法宏观地分析了西南地区林火的规律，还对森林火灾与厄尔尼诺现象的关系进行了初步探讨(见论文11)。

(2)火灾的早期发现

用专家系统的知识，在背景库的支持下，使森林火灾的遥感预报水平有了很大提高(从10%提高到80%)，解决了林火与非林火的界定问题(见论文5—10)。

(3)火场仿真与快速评估

A. 采用容易获取的因子对林火蔓延构成综合指标，并以背景库为依托，可及时显示火场状况、反应迅速，为组织扑救提供了依据。在 GIS 支持下建立模型并用数字反演技术，对林木死亡率，火灾面积提出了及时的较准确的估计方法，为专题的快速评估提供了依据(见论文14—18)。

B. 机载红外遥感技术在快速评估中有着不可替代的作用，本次研究中所采用的 AADS—1268多光谱扫描仪数据用于林火监测对于我国林业尚属首次，它可测定0.3m×0.3m 的火点。所采用的火—热特征模型和快速判读分析技术，颇具新意，而且有效(见论文12—13)。

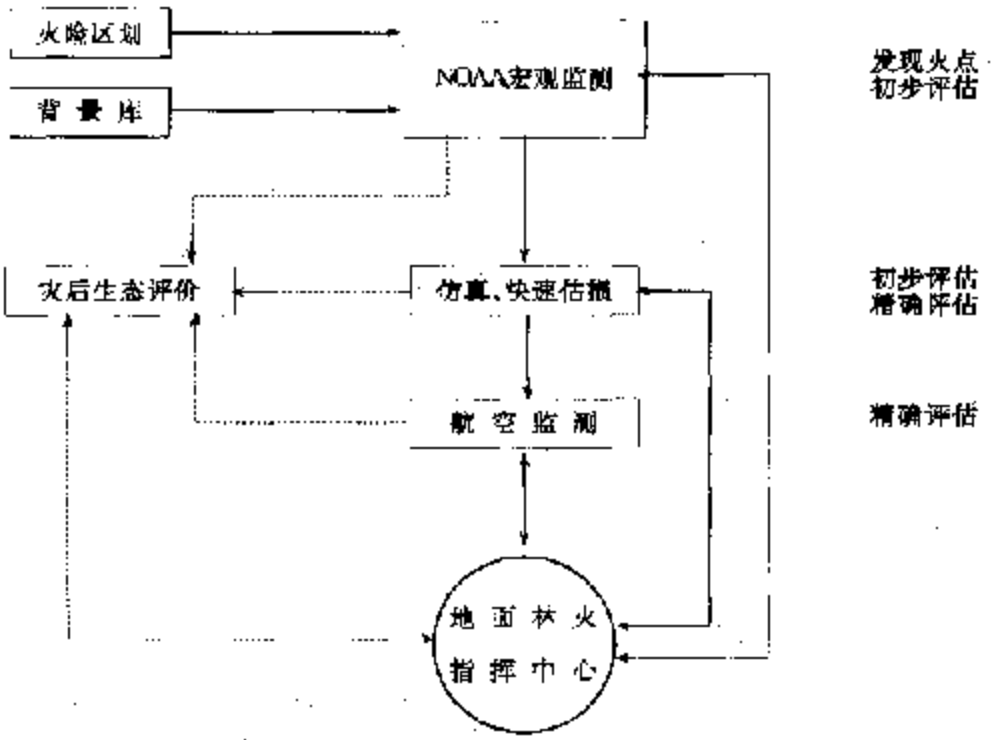
(4)灾后生态评估

用植被指数方法代替传统的野外调查，提出了遥感动态监测森林生态环境(森林火灾后)变化、评价的模型，填补了我国在这方面研究的空白，很好地把林火、生态环境变化和更新，用遥感和模糊评判的方法给予概括(见论文19—23)。

2. 专题完成了地面→航空→航天多平台监测体系，实现了从微观→宏观的林火监测研究。

(1)专题的设计充分体现了航天、航空相结合的建立不同层次林火监测体系的构想：即在森林火灾高发季节，实行航天遥感的24小时监测，一旦发现火情即立刻定位，进行初步评估，然后派有快速响应能力的飞机获得进一步信息以便详细评估，在此过程中将随时与指挥机关配

合使火灾损失达到最小，具体构想请参考下面的框图。



据课题完成情况已全面实现了上述目标。具体保证指标如下：

①NOAA 宏观监测在背景库支持下，可识别小于1hm²的林火，经1994年和1995年试运行验证，林火报准率已达80%。

②火场仿真既能对林火作出迅速反应，又可依照林火发生发展的先后顺序全过程动态地展现在林火扑救指挥者面前。林火强度、蔓延趋势的显示为扑救林火路线选择提供支持。

在 GIS 支持下，结合信息提取技术可准确估计出火损面积、蓄积，精度达到95%和85%。

③航空监测的研究可识别0.09m²的火点，这是保证准确评估的基础，况且本专题研究了校正、图像处理和面积统计的一套方法，为准确评估打下了基础。

④火后生态评估　据现地16块火烧迹地对本专题所提出的方法检验结果，表明完全符合实际，达到攻关要求。

(2)本专题从微观到宏观系统地对林火进行了研究。这在以前因缺乏研究手段，使研究者感到十分困难，而这次研究从0.09m²火点识别研究→几十公顷的火后生态评价→一个省的火灾趋势分析→90万 km² 火灾背景库的建立→全国火灾危险区划→与全球厄尔尼诺现象的相关分析，在整个系列研究中无一不体现模型与遥感手段相结合方法之所在。

(3)各种信息源在监测过程中，充分发挥其优势，形成了有机的整体，实现了对林火监测。

①NOAA 的时效性，是其它数据无法比拟的。实践表明，只有 NOAA 数据才能对瞬时即变的灾害起到即时监测。实践证明 NOAA 数据加上本专题形成的一套处理技术可以保证不遗漏公顷级以上的林火。

②TM 影像，以其丰富的信息量为精确评估和生态恢复监测提供了支持，在本专题所提供的技术保证下，其对火损的估计可达合同要求，对生态恢复的评估与现地相符。

③11波段扫描系统及其图像，其机动性和准确性已是不言而喻的，而且其波段设置也覆盖

了 TM 和 NOAA 的波段范围，信息丰富，十分匹配，为遥感资料的配合使用提供了方便。

(二)遥感方法在林火监测中应用有了新进展

如上所述，在本次系列研究中广泛地采用了遥感方法和数据，从而使火灾的研究拓宽了视野，使高科技进入了火灾监测领域，提高了监测水平，同时也使遥感本身得以发展。

1. 智能化的林火信息提取技术，兼有图像处理和专家知识并将定性与定量因子相结合。

(1)关于 NOAA 数据的林火信息增强方法归纳如下：

①3、2、1三通道数据分别线性拉伸可得到满意结果。

②3、4通道的线性组合，可以抑制裸地反射对火点的干扰。

③用3通道值求地表温度，生成热图像的转换计算应考虑光学路径纠正和该值的饱和问题。

④给出了用二通道值空间变化异常和时间变化异常识别地面亚像元的判别方法。

⑤专家系统的应用和背景库的支持改善了林火识别精度。

(2)关于 TM 影像的森林火灾信息提取方法

①本研究提出了两种线性组合方案从而达到拉大火区与背景差别，并达到减弱植被信息和湿度信息干扰的目的。

②在灾区内为了区别灾害程度，采用了似然差分法和植被信息法。

③因采用了上述方法使灾害损失面积估计精度达95%以上，烧死率的研究使得蓄积估测精度更加符合实际。由于本项研究奠定了 TM 图像在精准评估火损中的地位。

(3)航空热红外图像火信息的提取技术

这方面的技术，特别是针对林火的信息提取是初步探索，但也归纳出了行之有效的办法，要点如下：

①为划分各物体，避免众多物体的记录值达到饱和，最好选择夜晚和黎明飞行。

②在分离地物的过程中依靠多波段信息间的计算是非常有效的。

③通常10和通道9的差值计算，可作为区分火、热点的依据，并提出了修正系数法。

④热红外、近红外与可见光波段的比值图像组合，便于火损评估。

⑤本专题提出了一套快速分析方法为快速准确评估打下了基础。

实践表明上述方法是行之有效的。

2. 遥感数据与火灾参数的相关分析，为遥感应用拓宽了道路，在灾害损失评估、生态变化评估以及可燃物堆积等研究中都采用了遥感数据与火灾参数的相关分析。

(1)在灾害损失评估研究中，利用遥感数据的增益原理与火灾痕迹的相关分析，从而找到由遥感数据估计火灾损失面积的有效方法。在研究火灾损失率中，用灾后单时相 TC 变化后的 TC2图像很好地解决了灾害像元比率求算，从而实现了定量化评估。达到合同要求，这是一个进步。

(2)在灾后生态评估中，以森林光谱特征为指导，找出不同时相遥感图像上的影像特征(形态、结构、色调、灰度)变化与常规调查数据的相关性，证实了 TM 图像对森林火灾后生态变化的趋势和动态特征反映有较强的敏感性和可靠性，因而通过用遥感数据作出的植被指数和比值，导出了监测评价灾后生态变化的方法。

(3)在估计森林内地被堆积物的贮量时，基于以往的研究，通过建立遥感数据(多波段密度

值、比值项及某些遥感可判读因子）与森林蓄积量的相关关系，进而据生态学知识，由干材与叶重的关系求出叶重，找到推算枯落物贮量的方法。

(4)在机载多波段扫描探火研究中，建立了扫描数据与地面火焰的关系式，从而很容易识别出小林火、大林火、炼铁厂与其他地物，并可显示出来，使温度异常值和图像相对应。

上述工作为航天遥感数据在林业中应用进行了有意义探索，开拓了领域，有些工作是开创性的。

(三)在数学模型和计算机技术应用方面的进展

1. 众多数学模型的应用使得本项研究工作向定量化迈进一步。学科中定量因子、模型的广泛应用标志着学科的进步，而在本次研究中，研究人员在这方面作出了许多努力，并取得丰硕成果，充实了遥感应用理论的研究，并为遥感在林业中的应用拓宽了道路。

①在林火蔓延机理研究中，采取在计算方向上求其分量再进行非线性拟合求算的方法，用状态方程建立了林火行为的系统模型，不仅便于预测和仿真而且可以实时地调整系统，并对著名的 Rothermel 模型进行了修正，避免实际应用时需大量输入参数之繁琐，加入了经验公式，使其更为实用。

②在火险区划中建立了火险指标有权累加模型，有效地表达了数据库中数据所隐含的火险情况空间分布。

③林火灾后林木死亡率的估测建立在林火行为特点和林分状况的基础上，在林火强度给定的条件下，估计烧焦高度，得到不同烧焦高度的林木株数分布模型，再由不同烧焦高度林木死亡率估计全林林木的死亡率，其研究成果对林火后的林木更新具有现实意义。

④在灾后生态评价中，采用多层次模糊综合评判的方法建立了火灾后生态环境综合评判模型，反映迹地更新的总体效果和生态变化的最终可能趋势。继而引入时间序列建立了动态评估模型。

⑤在火险预报中，建立了立木蓄积求算叶重的关系式并建立枯落物随时间积累模型，为预报某地区的火险提供了定量的依据。

⑥在航空热红外图像研究中，建立了火—热模型，考虑了多波段信息组合，并构造了反映地物分异程度的线性和非线性修正系数，从而使模型更符合实际，由此模型所得到的 FWB 图像可快速估算火点面积。

2. 计算机技术在林火监测中的进展

①在林火仿真研究中，应用栅格化属性数据，基于火蔓延过程的外延特性和最快路径特性，提出了边界外延算法，并在数据结构，过火标志设立和边界栅格鉴别，地形因子及背景显示等方面都作了精心安排，对于同一区域的多点火源也能同样进行计算和蔓延显示。

②在火灾报警系统的研究中，提出了人工神经元网络模拟林火模型的思想，并在利用 NOAA/AVHRR 数据的基础上给出了网络的拓扑结构及林火数学模型，构造了基于人工神经元网络的专家系统，给出了知识获取算法及推理机制。专家系统的正确使用以及背景库的支持大大提高了林火报准率。

③林火背景库是林火预警评估的重要依托。该项目入库数据是最新科研成果，包括几十种与林火有关的空间数据和属性数据，采用1:50万双标准纬线正轴等角圆锥投影，覆盖西南林区90万 km^2 的面积，占用60M 贮存空间。因原始资料不整齐，再处理工作量大，数据量超过微机

处理负荷，增加数据库管理软件的设计难度。此外还制作了1:5万的林火高发(试验)区的背景库。

本专题背景库具有小系统处理大数据的优化设计方法与特点，自行开发研制一整套数据库管理软件系统使得本库具有连通不同格式数据与多图操作、多方位查询等特色。

④提出了一个新算法有效地解决了遥感数据在微机 VGA 卡上的彩色合成显示，与25—bit 真彩色卡显示的三波段合成图像效果近似，但成本极低，在本项目中 NOAA 数据的显示处理部分得到良好的应用。

此外，在实际应用中，为了快速显示和保存显示结果，还开发了生成 RGB 彩色文件的程序，它可将三波段数据变成一波段进行彩色显示，节省磁盘空间。

(四)形成了一个运行系统

"八五"攻关项目要求每一个专题必须提供一个可运行可操作的系统，本专题从框架设计、方案制定、系统集成以及综合试验和试运行无一不是围绕这一目标。

1."应急方案"体现了可运行系统的思想。灾害一般都是突发的，因此在接受"八五"攻关任务时就随时有"应急"的考虑。课题总目标对各灾种要求1—2天内提出初步损失评估报告，2周后给出详细报告，显然现在的系统是可以随时启动的。在当时的"应急"状况下，在本系统尚未研制成功时，仍然按航天、航空两个层次在信息源、数据处理、快速评估方法及内容，和组织调度方面作出了具体安排，编写了"应急方案"。1995年5月31日西藏江达县发生林火，本系统快速启动二天之内，向国家科委提交了评估报告，为国家正确估测火灾形势提供有力支持，体现了本专题"应急"的指导思想。

2.可运行系统深层内涵是准确、无误，而不仅限于可快速启动。本专题所提供的系统是有较丰厚的基础研究作依托的，所以才能有效、准确地进行评估，例如：本专题的早期报警技术软件经两年试运行报出168场火，实践表明林火报准率已达合同要求，是一个可运行可操作可以信赖的软件。该软件是在研究了林火专家系统识别技术，火场图像增强技术，以及亚像元火点识别技术后形成的。同样本专题的背景库、灾害评估、生态评估软件都具有这些特征，是一个可靠的运行系统。

3.建立了一系列指标体系。一个完整可运行、可操作体系。建立一整套指标体系是不可缺少的一个重要方面。

①在林火行为研究中，考虑到容易获取，定义了温湿系数、可燃物系数、地形系数，这些都是在参考前人研究的基础上进行了修正或结合本区情况进行了拟合，实践表明这些指标的确定和应用使模型更符合本区情况，程序运行更可靠。

②改变了以往用火行为因子中的蔓延速度和林火强度估测平均烧焦高，再用平均烧焦高来估测林木死亡率的方法，而是通过建立两类关系：A.不同烧焦高度级的林木被烧株数分布，B.用不同烧焦高度级的林木死亡率。根据这两种关系进一步求出各烧焦高度级上的林木死亡株数，来得出林木死亡率指标。

③在生态环境评价中，从容易获取和遥感数据可及的众多因子中筛选出了林分、土壤、地形和林木受害程度的4个方面有制约性的8个主导因子作为生态监测评价因子。

结合本区的实际情况和多年的经验确定了评价标准。

4.在1:400万全国林火危险分区评价研究中，从6大要素各分3个等级的指标体系，计算出

每一个网格的综合得分值然后表示在一张图上，进行了林火危险区划指标综合的空间表达，兼顾林业和遥感两专业特点，此项工作利于林火灾害分区与中国综合自然灾害区划接轨。

七、西南林火状况浅析

本专题背景库所覆盖西南林区是西南重点林区，而且基本上是林火危险大的区域。本专题主要研究区在本专题所作的火险区划中分别属于下列区域。

$\mathrm{IV_A}$9南盘江用材林火险性大亚区；

$\mathrm{V_A}$24横断山水源林用材林森林火险性大亚区；

$\mathrm{V_A}$25滇西南用材林经济林森林火险性大亚区；

$\mathrm{V_A}$26高山峡谷水源林用材林火灾危险性大亚区。

由此不难看出这是我国西南重要林业基地，还是许多珍贵树种的生长地，许多地方交通不便，因此火灾的防范监测就格外显得重要，在本区由于冬旱($\mathrm{V_A}$21)、春旱($\mathrm{V_A}$25)、焚风($\mathrm{V_A}$19)和处于雷击带($\mathrm{V_A}$24)，加上本区众多少数民族的耕作习惯，所以本区火灾极为频繁。1986年3月下旬—4月，云南安宁青龙寺和玉溪市刺桐关先后发生两起森林火灾，受害面积200多 $\mathrm{hm^2}$，共出动1.5万多人扑火，直接损失300多万元，扑火人员被烧死80人，烧伤近万人。

在云南省森林资源丰富的中甸，据1976—1989年资料统计共发生林火8500次，总过火面积36000$\mathrm{hm^2}$，年均受害2400$\mathrm{hm^2}$，年均损失4750万元，四川省金川县1980—1986年的7年共发生林火92起，烧毁幼树69430株。1984年3月21日、22日云南腾冲县连续发生4起林火，由于地势险恶，连续6夜6天才扑灭，共损失111.56万元。

这些事实令人触目惊心，在1994—1995年系统运行期在本区每天NOAA图像上看到的火点多如天上的繁星，光挑选出大的就报出近170场火。

西南地区是我国森林宝库，却峰火连天，扑救条件比较恶劣，无疑本监测系统责无旁贷，将为西南地区林火监测作出贡献。

八、效益及前景

据统计我国每年平均森林火灾15000起，其中重大、特大林火100多起，平均受灾面积为100万 $\mathrm{hm^2}$，按每公顷火灾损失20$\mathrm{m^3}$，每立方米木材150元计算，每年由森林火灾造成的直接经济损失为30亿元，如果以此为基数，通过准确及时的林火遥感监测评价和减灾辅助决策使火灾损失减少10%，每年其经济效益即为3亿元，无疑本专题提供的运行系统可为减灾作出贡献。所建立的一系列模型和方法将为林火的深入研究提供支持，填补了某些研究的空白，充实了遥感应用理论。森林资源是国家的主要自然资源，与国家建设和人民生活息息相关。众所周知，林业是农业丰收的保障，林业的稳定发展对保证农业发展、社会稳定和我国经济战略目标的实现都有十分重要的意义。

森林资源不仅可为国家经济建设、人民生活提供各种林产品，而且对保持生态平衡、防风固沙、防止水土流失、水源涵养、改善人民生活环境都有重要意义。森林火灾的发生不仅会造成直接经济损失，而且会破坏生态环境，因此，森林火灾的遥感监测和分析评价，将减少火灾损失，保护生态环境，并有助于灾后灾区生态环境的恢复和重建。本系统虽然重点是西南林区，但

在其他地区也有指导作用和实用价值，如1994年红花尔基(内蒙古)大火的预报，1995年昆明郊区大火的预报评估，黑龙江大杨树大火，特别是1995年5月31日对西藏突发林火的监测都是成功的。

结束语

1991年在写可行性报告时的情景就像在昨天一样，当时对本专题的轮廓还是模糊的，结果是未知的，今天可以在此宣布：专题已经全面、高质量地完成了，这是4年多来主管部门、上级课题的指导和关怀，特别是全体专题参加人员通力协作的结果。

专题人员不计报酬，夜以继日地工作；在崇山峻岭中冒雨收集第一手资料；查遍千百篇文献；建立起可靠、科学的方法和模型，留下了宝贵的精神财富。

专题为提高研究水平，组织了3次与飞行器同步火烧试验，组织专题工作会4次，在这些活动中各单位努力协作，积极想办法、出主意，使工作顺利进展，如在火烧试验中，采用自制温差电偶测定火场温度梯度变化；用生物电流计测定树木生存状况；跑遍北京，借来红外温度测定仪，用于火场温度测定，……这些都为课题组织和友好协作留下了难忘的记录，为今后合作打下了坚实的基础。

在此，中国林业科学研究院资源信息研究所、中国科学院成都山地灾害与环境研究所两个主持单位向所有关怀、支持，为此专题作出过贡献的人们表示感谢。

西南林区自然环境与社会经济概况

周万村
（中国科学院成都山地灾害与环境研究所）

我国第二大林区——西南林区分布在四川、云南、贵州和广西4省（自治区），即通常所指的西南地区。

西南地区面积137万 km^2，地形复杂，西北高、东南低，跨越我国地势的三级阶梯。第一级阶梯大致在四川青川、雅安和云南丽江、兰坪一线以北，地面海拔大都在4000m 以上。第三级阶梯在广西三江、河池和百色一线东南，平原海拔大都在200m 以下，山脉海拔高一般在500—1000m。第一、三级阶梯之间的广大地面为二级阶梯，地面海拔大部分为1000—2000m。由于新构造运动活跃，流水侵蚀切割以及其它外力作用强烈，使西南地区地表崎岖起伏，高差悬殊。高原、山地、丘陵分布广，平原面积相对狭小。该区地貌可分为5个区，即川西、滇北高原、四川盆地及盆周山地、云贵高原、滇西山地和广西盆地。

西南地区有我国江河之源的说法，我国有名的长江、黄河、珠江、澜沧江、怒江、伊洛瓦底江和红河都发源或流经本区，并构成各自水系。长江、黄河、珠江、红河、澜沧江等水系注入太平洋，怒江和伊洛瓦底江注入印度洋。河流密度大，据不完全统计，区内流域面积50km^2以上的河流有4000多条，而大于1万 km^2的有40条。河流大多水量大，在横断山区，高山峡谷，流水湍急，惊险壮观。除河流外，西南也是我国湖泊分布较多的地区之一。自然湖泊面积约13万多 hm^2，面积较大的有滇池、洱海、抚仙湖、邛海、泸沽湖等。人工湖泊（水库）面积33万多 hm^2。

西南地区特殊的地理位置和地势，既受东亚季风和印度季风影响，又受青藏高原环流系统影响，由于幅员广阔，地形起伏大，形成了复杂多样的气候类型，类型之多居全国之冠。本区的气候特点是：气候区域差异大，垂直变化显著，气温年变化小，气温日较差西部大东部小，冬季干燥，夏季多雨，秋雨绵绵，雨热同季，冬春水热矛盾突出。本区年平均气温0—22℃，由南往北降低；大部分地区降水量在600—1600mm，自东南、西南往西北减少；全年日照大部分地区在1000—2600小时，日照时数西部多于东部；全区相对湿度年平均在60%—80%之间，和日照相反，东部明显大于西部。

西南地区是我国自然资源最丰富地区之一，不但有丰富的能源，如云南、贵州等地丰富的煤炭资源，四川盆地天然气基地和最为富足的水能资源，而且有种类繁多的矿产资源。

西南地区山多地少，地形、地质条件复杂，50年代前交通十分落后，“蜀道难，难于上青天”是十分生动真实的写照。50年代后西南交通条件得到根本性改变，铁路运营里程已超过7700多 km，南昆、宝成复线和成达线正在施工修建；公路通车里程达22万多 km，西南地区第一条高速公路成渝线已试运行；内河运输通航15000多 km；航空也有很大发展，先后改造、扩建了成都、重庆、昆明、南宁、桂林等20多个机场，全区各省同全国主要城市都有直达航空线，还有成都、昆明、桂林直达香港，昆明还开通了国际航线。但在森林主要分布的山区交通仍然相对落后，不少地方还相当困难。

西南是我国多民族居住地区，少数民族达34个，主要有回、壮、彝、藏、蒙古、布依、苗、上家、满、白、瑶、纳西、景颇、傣等族，总人口约2.3亿。汉族主要集中在四川东部盆地、黔东北、桂东南，占全区汉族人口2/3，少数民族主要分布在川西、滇北高原、滇西山地、云贵高原、广西盆地的大瑶山和十万大山以西，森林分布广泛的地带多是少数民族聚集的地方。西南地区人口文化素质低于全国平均水平，初中以上各层次文化程度的人口占地区总人口的比例都低于全国水平。文化落后是由历史的、地理的等诸多原因造成的，50年代后，各级政府高度重视提高西南地区人口文化素质，加强扫除文盲和普及教育的力度，但文化教育落后的状况不可能在短时期内改善。文化素质水平的高低决定了科技力量的强弱，而科技力量的强弱决定了经济发展水平先进与滞后。西南地区的社会经济发展只有从根本上提高全地区（特别是少数民族地区）人口文化素质才能迈上一个新台阶。

西南地区兼有沿海、沿边和内陆的特点，复杂的地形，类型多样的地貌，优越的气候条件，丰富的自然资源以及众多的人口和较低的文化素质，综合影响了该区社会经济发展，形成了具有占全国较重要份额的经济、技术实力，又具有相对落后的经济结构。

全国40个主要工业门类中，西南地区有22个门类具有明显的相对优势，如石油、天然气开采、煤炭、黑色金属矿采选、冶炼及加工，有色金属矿采选、冶炼及加工，盐业、木材采运、烟草加工业、食品、电子工业、机械加工业等。西南的农作物种植业、林业、畜牧业在全国农业五大部门中优势突出。西南以占全国1/7的土地面积养育着全国1/5的人口。西南的水稻、油菜籽、甘蔗、薯类、烟叶、桑蚕茧、茶叶等产品产量均占全国很大的比重，其中薯类产量占全国1/4以上，烟叶为全国最大产区，甘蔗为全国最大产区之一，橡胶、生漆、松脂、油桐籽、核桃等林产品产量占全国20%—30%，其中橡胶占全国1/5，油桐籽为全国最大产区；畜牧业的饲养量约占全国1/4—1/3以上，其中大牲畜产量占全国1/4，牛产量居全国之冠，役畜产量约占全国1/4，养蜂为全国最大产区，猪肉产量居全国首位。整个大农业除渔业和副业外，西南地区均具有绝对优势或相对优势。

西南地区现在的经济实力虽然在全国占有一定的份额，但从总体上看该区仍是我国目前较落后的经济区域。西南各省区的财政收入困难，有相当一部分县（市）需靠补贴，尤其是在少数民族集中的山区。全国集中连片的18个贫困地区，西南就有5个，贫困人口占同期全国贫困人口总数约49%，西南地区经济落后的根本原因在于人口文化素质不高，科技力量相对不足且地区和行业分布不平衡；人口基数大，增长过快。预计本世纪末，西南地区的人口将达到2.45—2.5亿，这是该地区社会经济发展中面临的最严峻的问题。虽然50年代后西南地区的交通、信息设施得到了根本改善，但仍然相对闭塞，尤其是以铁路和公路为主的川、滇、黔，每到雨季铁路、公路交通常因滑坡、泥石流等灾害的发生而中断，制约社会经济的发展。

西南地区有丰富的自然资源和相对优越的科技力量和初步形成的现代化工业体系，这些是该地区具有广阔发展前景的“硬”“软”环境条件。环境的变化直接影响社会经济发展，其变化有的来自外部力量的推动，有的则是内部自身的改变。日新月异的科技进步大大缩短了社会经济发展的变化过程，甚至会改变一个地区经济发展的功能和性质。西南地区只要加强自身的“造血”功能，严格控制人口增长，努力提高人口文化素质，逐步增加经济活动的科技含量，打破封闭、半封闭状态，合理利用自然资源，恢复和保护好生态环境，在一个不太长的历史时期内，虽然不能发展成为我国经济最发达地区，但发展为我国一个经济发达地区是完全可能的。

1. 中国森林火灾危险分区评价的研究

刘琼拓　邹仁元　周万村　黄丽蓉
（中国科学院成都山地灾害与环境研究所）

一、森林火灾危险评价

中国森林处于世界火灾严重的地带上。在北温带地区的森林占世界森林面积的40%以上，那里的树木生长比较缓慢，因雷电引起的自然火也很少见。但由于夏季和冬季的干旱以及强劲的风势可以导致大面积的危险火灾。1987年发生在我国黑龙江的特大森林火灾，烧毁了133万hm^2森林（其中包括87万hm^2针叶林）。1988年发生在美国的火灾，破坏了40万hm^2的林木及其他有林地。1982—1983年森林火灾使印度尼西亚350hm^2森林受到破坏。被称为地球之肺的亚马孙河森林，每年也要消失几百万公顷。

世界上各国都非常重视火险区划工作，并采取了多种多样的方法进行研究。

早在40年代原苏联的梅列霍夫将世界划分5个火灾带：①有些地区森林火灾季节主要发生在夏季；②有些地区森林火灾也发生在夏季，但由于气候湿润，火灾表现不明显；③森林火灾季节主要发生在冬季；④森林火灾发生在冬季，但表现不明显；⑤热带雨林地区，由于降水量多又分布均匀，气候常年潮湿，因此没有明显的森林火灾发生。

70年代美国在南方林区，以县为单位，按火源出现等级划分了7个等级。并用不同颜色表示火险等级。加拿大按月火灾危险天气指标，将加拿大划分为7个带，并绘制了加拿大森林火灾分布图。

世界上各地每年发生林火多达20万起，损失森林面积约1/1000。

我国对森林火险区划的研究起步于50年代中期。1991年林业部调查规划设计院根据森林燃烧环，正交设计和数量化理论，以县（林业局）为单位，划分了3个火险等级，并在全国推广实施。

1993年东北林业大学郑焕能、姚树人以大的生态系统为单位划分不同的火险性区。在进行火险区划时，把燃烧物质—可燃物类型，火环境—火灾主导因素和火行为统一起来进行研究。根据10项指标，将我国森林火险区划为：Ⅰ类高火险区，寒温带针叶林高火险区和西亚热带常绿阔叶林高火险区；Ⅱ类火险区：温带针叶阔叶混交林火险区和东亚热带常绿阔叶林火险区；Ⅲ类一般火险区：热带雨林、季雨林一般火险区、暖温带落叶阔叶林一般火险区、温带荒漠植被一般火险区和青藏高原植被一般火险区。

此区划相当于林业部提出的区划标准，火险性大即高火险区，火险性中即火险区，火险性小即一般火险的分布范围。

（一）林火危险分区的目的、方法

本次中国森林火险分区建立在火险区划的基础上，其主要目的是为火灾监测服务，要解决

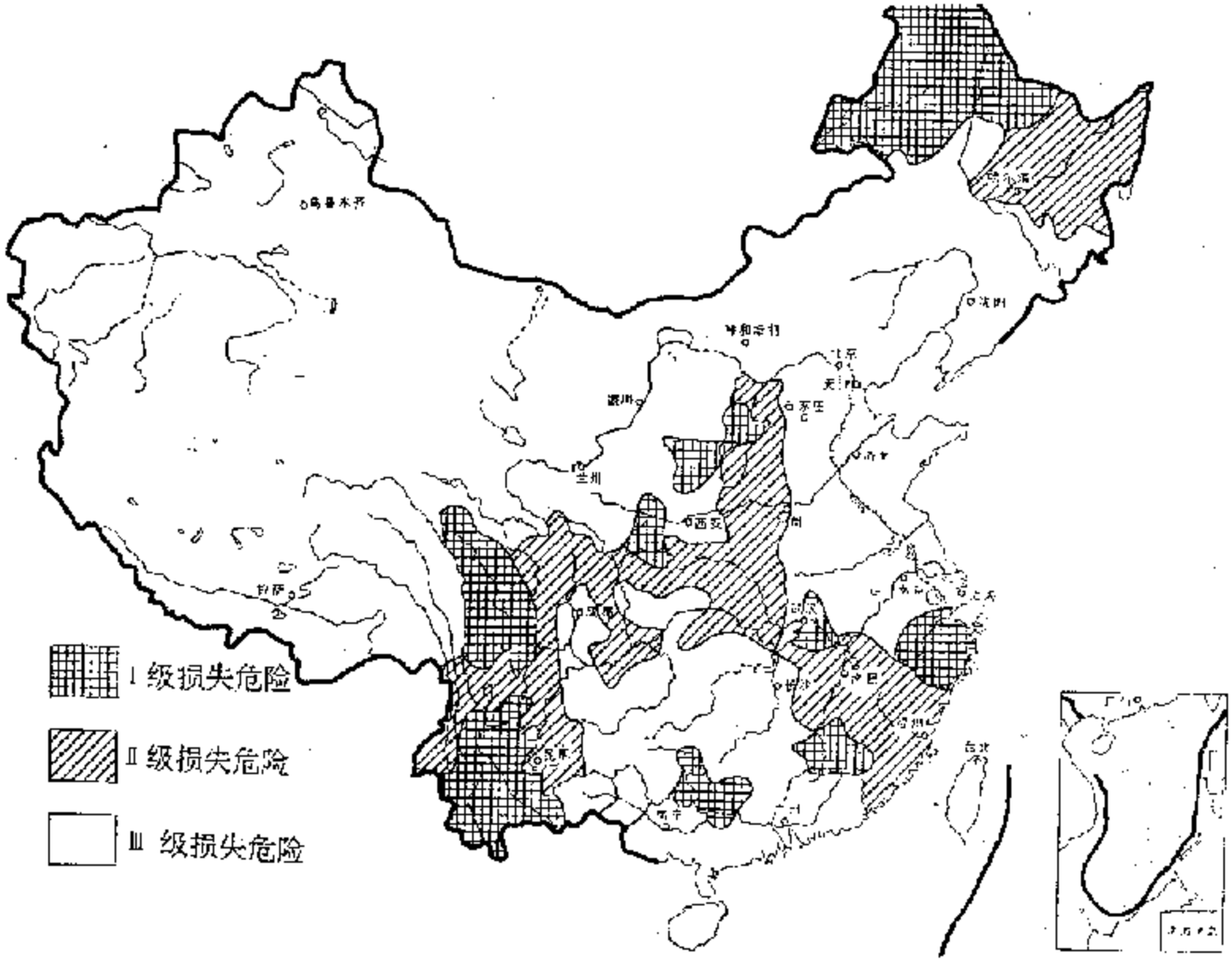


图 1　中国森林火灾损失分区图

的问题：①遥感监测火灾区域在哪里？尤其是要求指出林火危险严重区所在地；②遥感监测火灾在什么时候？要求指出那里的火险期。另外要求在全国范围内一旦发生火点，就能及时定位，查出或快速计算出林火所在地的火险等级。

根据分区的目的，确定分区的方法，为了便于分区评价，先区划后分区，有利于数据叠加，拟按格网表示（每一小格 5mm×5mm）。而火险等级综合评价按每小格 15mm×15mm，可以省工省时。为了按县为单元评价的需要，加上县界作为区划单元。

（二）分区的原则、技术路线

1. 分区原则

（1）综合的原则，森林火灾拟按成因分类，依据多因素进行综合，因素愈多分类更接近实际，考虑计算分析工作量，在划分区域危险程度时，着重考虑区域内所占重要作用的因素。

（2）加快估测的原则，对于新发现的林火点及时定位，快速估测出该火点所属何种林火危险等级，便于确定采取何种形式的灭火措施。

（3）宏观地带差异的原则，由于林火生长与发生火灾与区域自然条件紧密相关，区域所处纬度、海拔高度、水、热、风等环境条件都应作为分区重要依据，中国林火危险分区要特别注意与中国森林区划相符合，依照六大火险因素与林木的蓄积、立地条件进行综合区划而确定分区的范围，并考虑历史林火危害状况，具有一定的多发性与继承性，作为补充条件。

2. 技术路线

森林火险区划的标准是由林业部森林防火办公室提出，并委托林业部调查规划设计院于 1991 年制定。标准由“全国森林火险因子得分表”和“全国森林火险区划等级标准”构成。如表 1 和表 2。

表 1　森林火险因子得分表

火险因子	级别标准	得分值
树种组燃烧类型	难燃类 可燃类 易燃类	−0.13 0.07 0.21
农业人口密度（人/km²）	≤50 51—100 ≥101	0.00 0.31 0.15
防火期平均降水量（mm）	≥53.0 53.9—24.6 ≤24.5	0.00 0.08 0.27
防火期平均气温（℃）	≤7.5 7.6—14.0 ≥14.1	0.00 0.19 −0.09
防火期平均风速（m/s）	≤1.7 1.8—2.8 ≥2.7	0.00 0.12 0.24
路网密度（m/km²）	≤160 161—250 ≥251	0.00 0.15 −0.00

表 2　林火灾害危险度评价等级表

火险等级		得分值代数和×森林资源数量	标准分值
I	森林火灾危险性大	得分值代数和×有林地与未成林地面积之和(万 hm^2)	≥10.5
		得分值代数和×活立木总蓄积量(万 m^3)	≥420.0
II	森林火灾危险性中	得分值代数和×有林地与未成林地面积之和(万 hm^2)	4.2—10.5
		得分值代数和×活立木总蓄积量(万 m^3)	210.0—420.0
III	森林火灾危险性小	得分值代数和×有林地与未成林地面积之和(万 ha)	≤4.2
		得分值代数和×活立木总蓄积量(万 m^3)	≤210.0

方案的使用说明：

(1)根据评价地区各项火险因子的实际数值与表 1 中的级距对号，相应的得分值累加，得出代数和。

(2)得分值代数和分别乘以评价地区的有林地与未成林地面积之和活立木总蓄积量，把得出的两项分值与表 2 中的等级分值相对照，取其中对应值高的作为该地区的森林火险等级。

(3)如果该地区内有国家级游览风景区、自然保护区、森林公园，其火险等级可晋升一级。

林火灾害危险度评价方案(以下简称方案)，由森林火险因子得分表(表 1)和林火灾害危险度评价等级表(表 2)组成。为了使方案具有实用性，在以后的森林防火工作中能按标准，既要考虑到方案在我们能收集到的数据资料、图件、文字资料的支持下，得以实施，对全国林火灾害危险度作出了合理的分区评价，又考虑到方案能和标准协调的问题，方案要向标准靠拢，尽

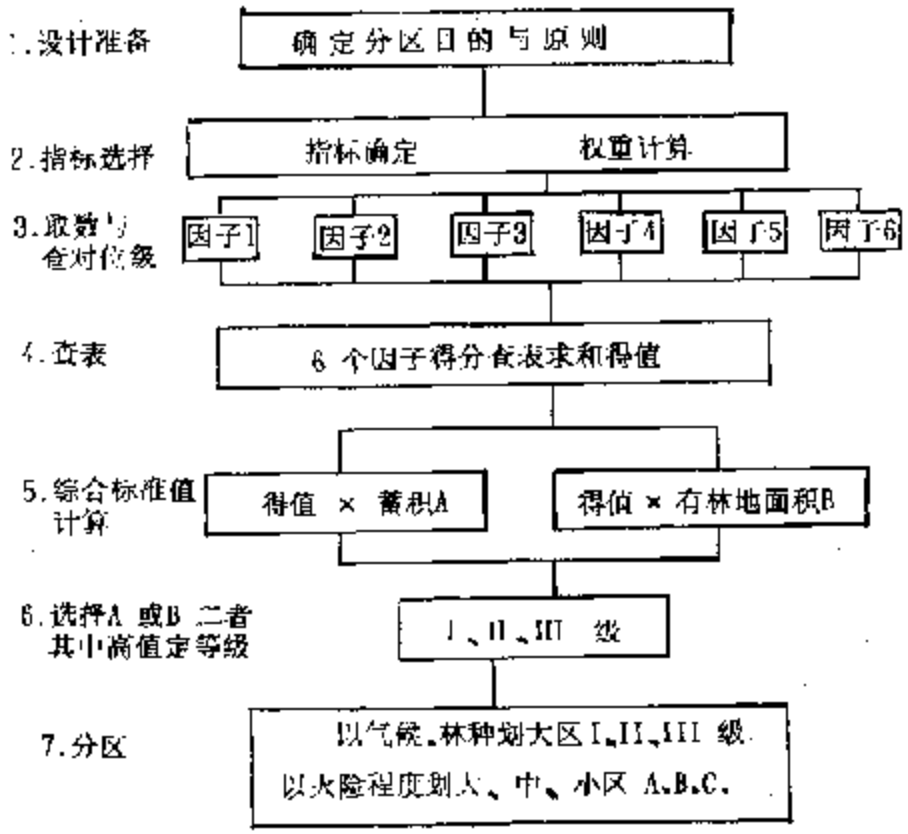


图 2　分区评价的技术路线程图

量套用标准中的规定内容和指标。方案则是在1：400万全国行政区划图上，以60km×60km的方格网作为最小评价单元，收集数据资料就没有受县级为统计单位的限制，收集数据资料的尺度就大大放宽了。县级、地区级和省级的统计资料都可以用。显然，方案要比标准粗略一些。

技术路线按图2进行。

(三)分区命名

根据森林火险区环境的差异性和所处自然地带、林种用途的特点，多种因子综合结果得出的林火危险等级来命名。

一级区：大区的地理位置、气候带、林种的用途、森林火险等级。以Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ、Ⅴ表示。

二级区：亚区的地理位置、林种的用途、森林火险等级。在罗马数字的下角标A、B、C表示火险性大、火险性中、火险性小。下标1、2、3……27为区域顺序号。

共分5个大区，27个亚区。见图3。

图3的中国森林火险分区命名如下，其图见下页。

Ⅰ东北中温带偏湿用材林防护林森林火险性大区

- $Ⅰ_{A1}$ 大兴安岭用材林森林火险性大区
- $Ⅰ_{B2}$ 长白山用材林水源林森林火险性中区
- $Ⅰ_{C3}$ 松辽平原农田防护林森林火险性小区
- $Ⅰ_{A4}$ 冀辽用材林森林火险性大区

Ⅰ北方暖温带湿—干水源林农田防护林森林火险性小区

- $Ⅰ_{C5}$ 华北农田防护林森林火险性小区
- $Ⅰ_{B6}$ 鲁中南水源林森林火险性小区
- $Ⅰ_{C7}$ 黄土高原水源林森林火险性小区
- $Ⅰ_{C8}$ 河西走廊农田防护林森林火险性小区

Ⅱ新疆暖温带极干防护林森林火险性中区

- $Ⅱ_{B9}$ 阿尔泰山防护林用材林森林火险性中区
- $Ⅱ_{C10}$ 天山水源林火险性小区
- $Ⅱ_{C11}$ 南疆盆周绿洲防护林森林火险性中区

Ⅳ南方亚热带潮湿用材林经济林保护林森林火险性中区

- $Ⅳ_{B12}$ 秦巴山地水源林用材林火险性中区
- $Ⅳ_{B13}$ 大别山—天目山水源林经济林森林火险性中区
- $Ⅳ_{B14}$ 浙江沿海防护林经济林森林火险性中区
- $Ⅳ_{B15}$ 台湾用材林经济林森林火险性中区
- $Ⅳ_{C16}$ 四川盆地水土保持林经济林森林火险性小区
- $Ⅳ_{C17}$ 湘赣闽用材林防护林水土保持林森林火险性小区
- $Ⅳ_{C18}$ 黔中用材林水土保持林森林火险性小区
- $Ⅳ_{A19}$ 南盘江用材林森林火险性大区
- $Ⅳ_{A20}$ 南岭防护林用材林水源林森林火险性大区
- $Ⅳ_{B21}$ 西江用材林经济林森林火险性中区

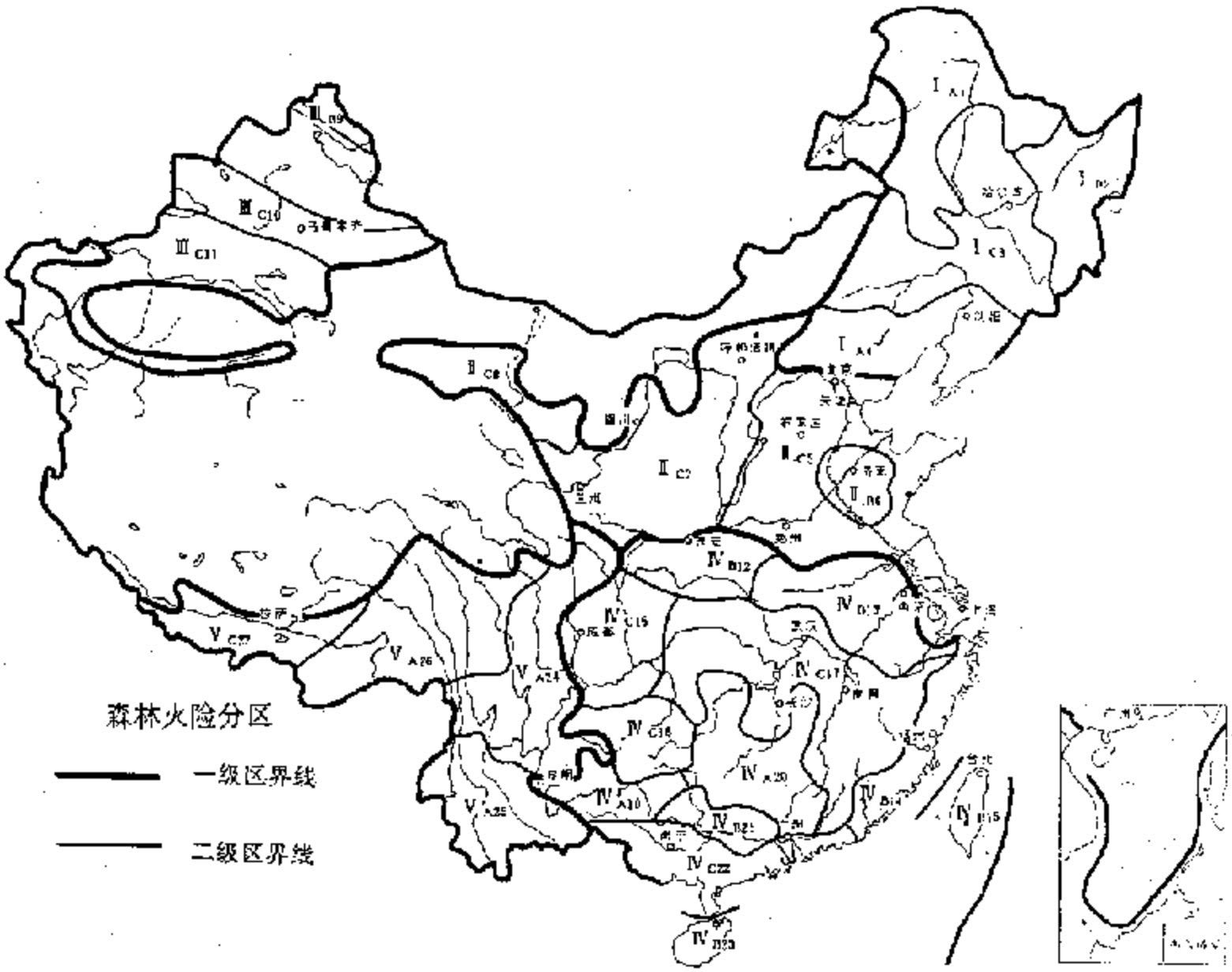


图 3　中国森林火险分区图

IV_{C32} 闽粤桂防护林用材林森林火险性小区

IV_{B33} 海南岛热带保护森林火险性中区

V 西南高原温带亚热带潮湿防护林用材林

森林火险性大区

V_{A24} 横断山水源林用材林森林火险性大区

V_{A25} 滇西南用材林经济林森林火险性大区

V_{A26} 高山峡谷水源林用材林火险性大区

V_{C27} 雅鲁藏布江水源林用材林森林火险性小区

二、森林火灾损失危险评价

我国森林火灾损失严重性。根据联合国粮农组织1988年公布的欧洲、北美部分国家的火灾统计资料，结合我国发表的资料，从林火发生率、森林燃烧率、林火经济损失以及林火控制和预防费用投资等几个方面，分析各国近几年林火损失情况，从中总结规律，探讨适合我国国情的控制林火对策。

林火发生率和森林燃烧率是衡量某一地区和国家林火出现频度和火烧地面积大小的重要指标。1983—1985年平均林火次数和火烧面积如表3。

表3 欧洲、北美、中国林火发生率、森林燃烧率比较表

国家、地区	森林面积（万hm^2）	林火次数（次）	火烧面积（hm^2/年）	发生率（次/年/10万hm^2）	燃烧率（hm^2/年/10万hm^2）	每次火烧面积（hm^2）
欧洲	15890	36200	64500	28.6	406.0	17.820
北美	80707	147700	2288600	18.3	286.3	15.495
中国	11520	14525	810000	12.7	703.1	55.380

从表中看出北美洲（美国、加拿大）不论从林火发生次数或火烧林地面积（绝对数）都比较大。欧洲的林火发生次数比中国多，但每次火烧林地面积都小于中国。

从林火发生率比较可知：欧洲的林火频度最大（0.228），其次是北美（0.183），中国最低（0.127）。欧洲具有较长的开发历史，人口密度大，交通便利，而且不存在边远地区，因此，频繁的人为活动必然导致频繁的人为火发生（欧洲人为火源占总火源的97%，自然火源占3%），这也是为什么欧洲发生率高的主要原因。北美洲多数地区交通也比较方便，火源复杂。但在加拿大自然火占的比重较大（41%）；美国自然火源占8%，而且多发生在边远地区。

再来分析森林燃烧率，中国为703.1，居首位，欧洲次之为406.0，北美洲最小为286.3。显然，我国对林火控制能力低。而且我们的几个火灾区道路网密度极低，从发现到扑火队伍抵达火场均需几小时，甚至超过24小时，因此造成了我国林火发生率虽较低，而成灾率较高，进而森林燃烧率也高。从平均每次火烧林地面积的比较也能看出，中国为55.380hm^2，欧洲为17.820hm^2，北美为15.495hm^2，林火发生高低主要反映林火出现的频度，而森林燃烧率的高低是森林资源损失程度的重要标志。

林火直接经济损失分析，林火直接经济损失包括的面很广，各国采取的计算方法也不甚一致，但主要是根据林火烧毁和烧伤树木的材积计算的，有些国家也把整地造林费、森林抚育费

计算在内。下面列举了1983—1985年3年损失情况，中国的统计数字是按火烧每公顷林地林价2000元人民币计算的。

林火损失统计(1000美元)

	1983年	1984年	1985年
西班牙	180137	201225	416925
加拿大	82278	101768	56536
中国	236559	182796	112903

可以看出，我国每年由林火造成的森林资源损失是相当严重的，约为加拿大的两倍多。这对我们这样一个森林覆盖率低、森林资源严重不足的国家来说是一个相当严峻的问题。

我国森林火灾损失危险评价的艰巨性。我国幅员广阔，又是一个多山的国家，高山峡谷，高差悬殊，从北到南自然地带复杂，经济开发差异较大，抵御林火能力大小不一，给林火损失评估增加了难度。评估难度在于：

1. 评估技术系统复杂，林火灾害涉及面广，层次又多。林火灾害评价前期基础工作作得不够，资料规格不一致。

2. 价格的拟定，统一计价的时间，多种评价单位的协调。

3. 作为林火分区评价的资料，各地区积累不平衡，缺乏完整性，由于大量灾害数据保密，获取数据资料有限，就影响了可靠性的检验。

本专题研究，在系统上要考虑评价的特点，但也根据实际情况出发，就已掌握的统计灾害资料，进行粗略估算我国林火损失，用以了解我国区域损失的差异。待将来逐步完善，以满足宏观决策、防灾减灾的要求。

4. 目前尚缺乏准确的森林火灾公开统计数字，对全国林火损失估价，许多地区缺乏可信数字。对森林造成的危害只能进行近似估价。通常认为森林综合效益的损失最为严重，对它难以作出评价。

小气候改变，生态环境的恶化以及对周围的工农业生产的影响等等，这些损失目前不能计量或难以达到满意的精度。

林火损失危险区划，必须建立在正确计算森林火灾经济损失额的基础上，在研究森林火灾经济损失额计算方法时，应该遵循的原则。

森林经济损失评估的原则，是由于森林资源再生产的特点决定的，拟定的原则是：

1. 科学合理，简便易行。拟定的方法应是依据我国营林生产是商品生产，森林资源是营林生产最终产品和森林火灾经济损失价值主要是森林资源价值损失的基本原理。同时，根据森林火灾的特点，在损失分类上突出了重点，计算损失项目不繁，计算方法力求简明适用，比较客观地反映了森林火灾经济损失的实际情况。

2. 与国家现行政策、标准相协调。在制定森林火灾经济损失额计算方法时，除了充分反映森林火灾特点外，对现有可以借鉴的政策、标准和规定进行充分研究，吸取经验，为我所用，以利该方法在现时条件下尽快应用于实际。

3. 突出重点，逐步到位的原则。森林火灾经济评价方法的研究既是一个理论问题，又是一个实践性很强的问题，涉及面广，需要解决的问题很多。因此，一次研究不可能把所有的问题都解决，只有采取各个击破，突出重点，首先解决最主要的问题，尔后继续研究，逐步完善。

4. 先进性原则。在研究和制定森林火灾经济损失额评估方法时，既要考虑我国林业目前

的实际，同时又要追踪国内外有关灾害经济损失评估的最新信息，使我国森林火灾经济损失计算方法，不但适应我国森林资源管理水平的现状，而且从长远看还要符合森林资源管理科学化、现代化的要求。

分区的方法与步骤如下(图 4)：

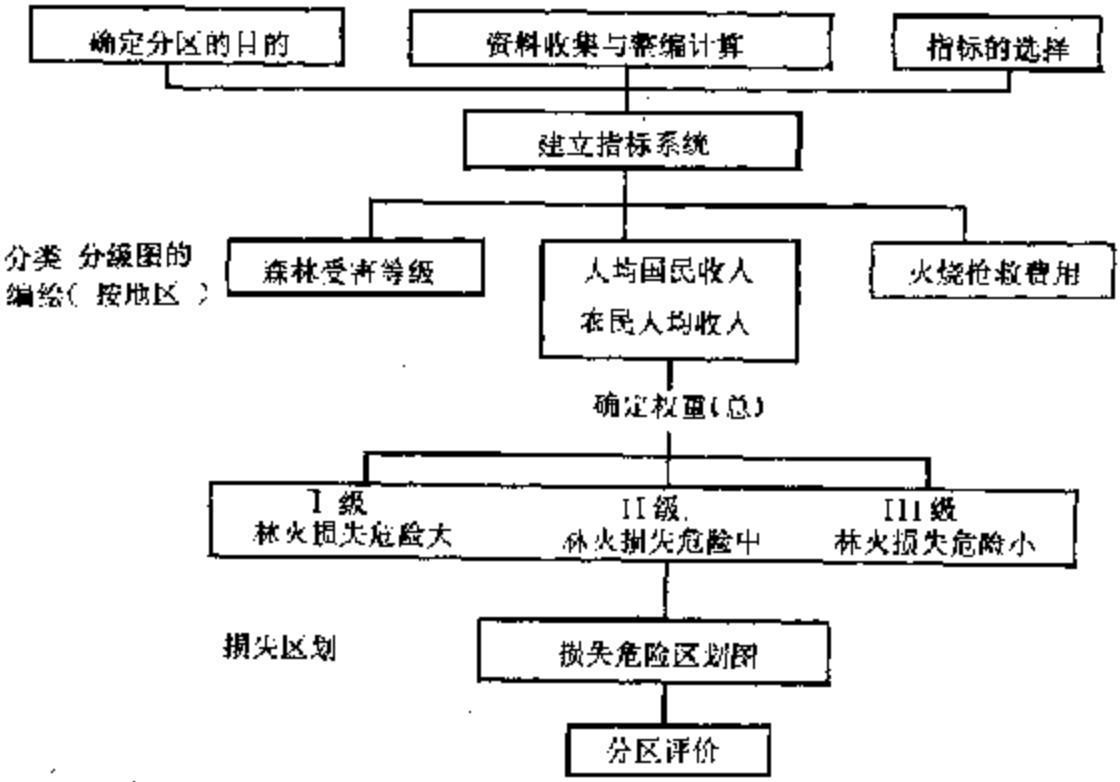


图 4 森林火灾损失危险分区的方法

本次评价属于区域灾害损失危险评价，在一定时段林火灾害损失危险的评价。在区域范围内 1 年，1 个县内发生的火点，在区域范围内 1 年，数个火点在地区范围波动，林火灾害损失对灾害对象的影响来评定，未考虑受灾对象的抗灾能力和灾后恢复的难易程度。

本次损失分区是现势评估，与中国森林火灾危险分区相匹配，主要损失内容选择林木损失及扑火的用工日，对灾区社会损害和程度，即国民收入、工农人均收入、农民人均收入等 2 个指标。

损失指标的确定

1. 林木损失的计价与等级　我国采用按一次性计价，国家规定一级按 50 万元计，二级按 30 万元计，三级按 5 万元计价，这种估价偏低。根据郎雪颖等在中国林火损失分析一文列出 1983—1985 年 3 年中国统计数字是按火烧每公顷林地价 2000 元人民币计算的。本次评价采取林火损失危险划分三级计价：I 级损失 1000hm² 按 200 万元计；I 级损失 100hm² 按 20 万元计；II 级损失 10hm² 按 2 万元计价。

2. 社会经济条件　因为林火灾害必然引起社会经济收入减少。主要选择人均国民工农收入(元/年)和农民人均纯收入(元/年)。数据选自 1987 年国务院人口普查办公室、中国科学院地理研究所编制的中国人口地图集“中国人均国民收入”和“中国农民人均纯收入”两幅图的分

级合并而成。以 1982 年人均国民收入每人平均工农业总产值计。按 1980 年不变价格计算。

社会经济分别按三级计价：

人均国民收入按一级＞1000 元/年；二级 501—1000 元/年；三级≤500 元/年。

农民人均纯收入按一级＞500 元/年；二级 201—500 元/年；三级≤200 元/年。

这二项指标的损失量较小，把这二项指标合并计算。

3. 救火经费　主要选择了扑火经费，扑火经费我国 1980 年初防火经费，包括基本建设投资和扑火经费两项合计平均每公顷投入 0.186 元人民币，均比其他国家低。若以扑火每 1 工作日按 10 元计。扑火工作日按三级计价：

一级＞40 万元；二级 20.5 万元；三级 1 万元。

林火损失参评因子的权重，利用正交设计计算得到林木损失占 0.85，社会经济（人均国民收入与农民人均收入）占 0.038，扑火费用占 0.112。

评价模型

森林本身承受灾害的能力大小，受灾应急时扑火投入，还须考虑灾区社会经济发展水平，林火损失综合评价模型为：

$$FFDI = \sum_{i=1}^{m} W_i Y_i$$

式中：$FFDI$ 为森林火灾承灾力综合指数；

W_i 为参评因子权重；

Y_i 为参评因子评分得分；

m 为参评因子的种数。

林火损失等级划分

等级	Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ
$FFDI$	170	18	2
百分比	90	9	1

根据搜集到 14 个省（自治区）的林火损失资料，编制中国森林火灾损失分区图，见图 1，待以后逐步完善。

参 考 文 献

[1] 郑焕能，姚树人. 我国森林火险区区划的研究. 森林防火，1993 年第 1 期

[2] 中华人民共和国林业部. 全国森林火险区划等级. 林业部调查规划设计院，1991 年 12 月

[3] 邵雪源，薛　逸，刘　彤. 80 年代欧美及中国林火损失分析. 森林防火，1990 年第 3 期

[4] 孔繁文，高　岚. 对森林火灾经济损失额计算方法的研究. 灾害与灾害损失评估，兰州大学出版社，1992

[5] 王文楷，张厚宇，姚松林. 农田承灾力综合评价与分区（以河南省为例）. 自然灾害学报，1994 年 1 月，3 卷 1 期

2. 中国森林火险区划图的编制

周万村 · 刘琼韶　邹仁元　黄雨蓉
（中国科学院成都山地灾害与环境研究所）

我国是一个森林火灾发生较频繁、损失较大的国家，尤其是西南、东北和华北林区，防火护林任务重。中国森林火险区划图的编制是一项支持林火监测评价的基础性和应用性强的课题，也是国内一次新的尝试。我国幅员辽阔，地形复杂，影响森林火灾的自然因子空间差异大和社会因子千差万别且变化快，加大了林火危险性综合分析研究和标准统一的难度；另一方面由于地图比例尺的限制，影响到在反映林火危险性的分级和区划上，做到宏观的统一和微观的协调。如何解决这些矛盾，除掌尽可能占有详实资料数据基础上进行科学的火险性评价和区划外，编制方法亦是关键的一环；有必要予以认真的研究和探讨，以期使火险区划图能较好地发挥其支持林火监测预报的功能。

一、全国森林火险的综合分析评价和区域划分

森林火险性正确的分级和区域划分是编制好森林火险区划图的基础。

1. 影响森林火险的主导因子和一般因子的分析

林种和林相及其立地条件和环境不同，影响森林火灾的因子也不同。但在影响森林火险的诸多因子中，不同区域的主导因子和一般因子，直接因子和间接因子不尽相同，缓变因子和突变因子的区分和转化，因子之间是如何相互影响，又怎样形成具有明显时空分布特点和动态变化的系统以及对林火影响强度，这些都是要在森林火险分级和区划前确定的。以往国内许多专家已对影响森林火灾的因子进行了综合分析研究，对全国或某些林区的火险性划分了等级，研究划分的方法有多种，指标（标准）也不尽一致，但都离不开重点评价气象和植被状况以及人的生产和生活活动，即主导因子。在当代，由于生产和生活节奏的加快和方式的变化，规模加大，一般来说都增加了对森林火灾影响强度，因此在继续搞好影响森林火险自然因子的基础上，应该加强对社会因子的研究。如旅游区、狩猎区和刀耕火种尚存的少数民族生产生活的山区，这些随机多变的因子，必须及时掌握其动态变化，灵活处理。

我国地域宽广，区域自然条件差异大，有些因子因其所处的区域不同对影响森林火险性的作用而不同，如地形在干热的高山峡谷攀西地区是主导因子，而在平原和浅丘地区则为次要因子。

2. 绘制影响森林火险性的单因子图

按不同形式（线划，线划加分层设色或线划加几何图形）绘制影响森林火险性的单因子图，不仅要绘出各因子分布状况和标示出数据和峰值，还要根据各因子对森林火险性影响的大小给予影响强度值（区划参数值），如森林（含林分、林种、树种、覆盖率、可燃性等）分布图、气候图（降水量、气温、空气湿度、风速、风力、风向）、交通图（公路、铁路为主要干线，机耕路，公路交通

等时线等)、人口密度图(还可绘制区域人口文化素质结构图)、地形图(坡度分级、坡向和高程)、历年或近几年累计(或平均)林火发生次数和损失(火烧强度)图等。

3. 森林火险性分级和命名

全国森林火险性分为4级,即1级危险性大,2级危险性中,3级危险性小,4级无危险性。分级依据是森林分级单元经综合评价所得火险分值。名称按不同成图比例尺和不同用途以该分类单元所处的地理环境特点和林种、树种来区分,如四川省可分为攀西中山1级火险性大区,川西高山峡谷2级火险性中区,盆地3级火险性小区和川西北台地4级无火险性区。根据需要进一步描述再冠以气候类型,如攀西中山干热河谷1级火险性大区,或冠以林种、树种,如川西高山峡谷水源林用材林1级火险性大区。总之,区划名称既要易读直观,又要使分区单元的属性和特点明确,不但要使不同级火险的差异一目了然,也要有利于区别同级火险区的差异,也就是说在统一的前提下尽量做到表示的层次多一些,使内涵和表现力更加丰富,并和区划图的编制和表示方法相协调,以保证区划图的应用效果。

经过火险性综合分析评价和多项编图试验,全国森林火险区划图的分级分区以5个大区和27个亚区为宜(见本集中"中国森林火灾危险分区评价的研究")。27个亚区的火险分级大多数都和所在的大区相一致,少数和大区火险分级不同的亚区是由其独特的区域环境所形成,如划归南方亚热带潮湿用材林经济林保护林森林火险中区的四川盆地水土保持林经济林,由于盆地地形条件形成的冬暖潮湿气候,森林火险性小。

4. 森林火险性区划

森林火险性区划由小单元小区划向大单元大区域过渡,由单因子分析到多因子综合。前面提到的全国森林火险性5个大区和27个亚区就是在此基础上产生的。

首先把影响森林火险的各单因子图比例尺统一化,再进行叠加。在森林面积大、林分、林种和树种类型多以及地形复杂的地区,可先将森林分布图和地形图叠加,以森林分布及类型界线为基本区划界线框架,以地形类型分级界线为辅助区划线,产生过渡型区划面积单元(图斑),然后再和其它单因子图叠加;在森林分布少和地形平缓地区,所有单因子图可以一次性叠加,仍以森林分布及类型界线为区划基本界线框架,产生森林火险性区划图斑。每一个区划图斑内都能查找出各因子(含自然和社会)对森林火险性影响强度(分)值,经过计算,每个图斑都可以得到森林火险分值,再根据森林火险性分级标准,给每个图斑定级和命名(命名方法在3中已述)。

由于单因子图和叠加图为过渡性编制图件,比例尺较大,第一阶段的区划图斑也较小,难以在成图比例尺图上表示,因此需要制图综合(取舍)和归类,综合和归类的原则是既要反映区域特点,又能和全国森林火险性区划标准相协调。

二、中国森林火险区划图的表示方法

中国森林火险区划图是专业性很强的专门图,以支持和辅助全国森林火灾监测评价为目标,其科学性和实用性不仅取决于森林火险性评价和区划恰当与否,还依赖于图的编制和表示方法。表示方法既要符合科学性、逻辑性和协调性,还要兼顾图形直观易读。目前,全国森林火险区划图的编制还没有标准化和规范化,不能适应建立全国森林火灾监测和管理信息系统的要求。根据全国森林火险区划图的特点和需要,我们设计了多种表示方案,经过试验比较,决定

根据不同的使用方式选用以下两种方法：

1. 面状符号(线划)加栅格法

这种方法分2个平面(层次)表示，第1平面以定位和定性的方式表示森林火险区划，以分级界线和不同颜色来区分，具有明显的地域和地理分布特点。火险期用文字注记，帮助读者对全国森林主要火险区有一个时空性认识。第2平面用栅格表示最近4年森林火灾面积累计数和成、幼林损失比例。用4年森林火灾面积累计数的原因是时间跨度和表示数(图斑大小)较适宜，用1年中森林火灾的次数相对较少(或无林火发生)和林火损失面积哪怕是大火损失面积在1：2000万图上也不易表示，而4年累计数不但改善了要素上图表力，也加强了主要森林火险区(危险性大和危险性中区)历史森林火灾的可比性。即使这样仍不能按比例上图。这是因为：1：2000万图上栅格尺寸以5×5(mm^2)为宜(若栅格尺寸太小影响图的清晰和易读性)，实际面积为10000hm^2，而按森林火灾损失面积分级人为林火大于800hm^2为特大森林火灾，800—400hm^2为大火，小于400hm^2为一般火灾，自然林火大于400hm^2为大火，小于400hm^2为一般火灾。根据我们对全国近年来森林火灾损失面积统计，各危险性大区4年特大或大火森林面积累计损失很少超过10000hm^2，绝大多数都小于10000hm^2，即不足一个图斑(栅格)，若按比例上图，斑块太小，直观性和易读性都差。因此，为了改善视觉效果而采取扩大表示的方式，网格并不体现实际面积，仅代表比例关系。森林火灾损失面积和林火灾种则采用点线符号或颜色来表示和区分，如红、橘红色分别表示自然(雷击)林火损失面积大于400hm^2/4年和小于400hm^2/4年，而紫、绿、黄则分别表示1000—800hm^2/4年、800—400hm^2/4年和400hm^2以下/4年的人为林火损失面积。每个网格中的数字代表森林火灾发生的主要月份。

两个平面(层次)的叠加基本上反映了我国森林火险性区划和近4年累计林火损失面积及分布状况和规律。另外，1级森林火险性大区内图斑和林火损失大的栅格(图斑)重合部分，说明该地区不仅森林火险性大，而且森林火灾频繁或林火损失面积大，是特别重点防火区，应该严加监测和预防。1级森林火险性大的图斑和林火损失面积小的图斑重合部分则说明该地区虽然森林火险性大，但由于森林防火工作做得好或影响森林火灾的可变性主导因子(如气候)的周期性变化，使林火发生的次数减少和损失面积减小，但仍是重点森林防火区。3级森林火险性小区的图斑和森林火灾损失面积小的图斑叠合部分则是一般防火区。一般情况下，4年累计森林火灾面积大的图斑都位于1级森林火险性大的区内，但1级森林火险性大区内不一定林火发生频繁或火灾损失面积大，体现了森林立地客观自然条件和社会因素对森林火险性影响的辩证关系。

上文图3就是用面状符号加栅格法编制的中国森林火险分区图。原图比例尺为1：2000万，此图为缩小图，有些表示内容已删减。

2. 面状符号加几何图形法

面状符号的表示方法和内容如上所述，仍为第1平面(层次)。第2平面以同心圆表示近4年累计森林火灾损失面积、损失成幼林比例和林火主要发生的月份。以外圆直径的大小表示林火损失面积(公顷/4年)，内圆以2种颜色(如绿、黄)分别表示林火发生类型(自然、人为)，圆弧等分为12个间隔，按顺时针方向表示12个月，林火多发季节(月)在相应的间隔中用颜色或点线示出，圆心位置坐落在林火发生的中心，内圆还用点或线表示林火损失的成幼林比例。

几何图形法简单直观、易表示，而且形象、重点突出，如圆周最大的地方自然表示该地区是森林火险性大1级区，又同时提示人们这里不仅是1级火险区，而且是曾经多次发生森林火灾

和损失面积大的地区，因此是重点监测的防范区；相反，直径越小，森林火险性也相应减小，过渡自然，可比性强。缺点是森林火险区划图斑小的区域和林火频繁或森林损失大的地区，由于图斑载负量大，致使图的清晰性和易读性受到不同程度的影响，使用效果也因此受到削弱。

表示方法应和制图比例尺的大小相协调，比例尺在某种程度上影响或决定不同表示方法的优劣。

3. 应尽快制作中国森林火险区划电子地图

90年代已进入信息社会，电子式信息的发展日新月异。为了使支持和辅助林火监测预报的中国森林火险区划跟上时代发展的需要，就必须在建立影响森林火险性因子数据库、基础库和知识库的基础上制作中国森林火险区划电子地图，也就是说建立中国森林火险地理信息系统，使影响森林火险性的自然和社会因子地理坐标、时空分布、数量、属性等便于查询、检索，并且利于灵活运用不同的方式分析、评价和分类分级、修改和实时更新，如单因子或多因子叠加显示和分析，火险区划图可根据不同要求，用不同比例尺的区域显示，从而以快速简捷的方式并通过联网为各级护林防火领导部门提供多因子、多层次、动态的空间型决策支持信息。

三、结　　语

中国森林火险区划图的编制是一项工作量大、系统性和应用性均较强的课题。由于区域性自然条件和社会经济水平及状况的巨大差异，使评价影响森林火险性的标准较难统一；全国森林分布、森林火灾发生次数及频率的不平衡，给区划图的编制和表示方法也带来一定难度。合理解决这两个矛盾，是使全国森林火险区划图的编制走向标准化和规范化道路的必由之路，而标准化和规范化的制定也必须兼顾建立全国森林火险区划信息系统技术要求。

3. 林火灾害的分类分级和危险度评价研究方法

郎仁元　孙育秋
（中国科学院成都山地灾害与环境研究所）

一、国内外研究现状

林火灾害分类分级和危险度的评价作为定量定性的方法论，能为林火预测、防护和控制提供可靠的科学依据。鉴于这项工作的理论意义和生产实用价值，国内外林火研究人员在从实验室到外场观测的大量试验应用中做出了重大的努力。

自本世纪初美国林务局(U. S. Forest Service)开始着手建立大规模防火组织并进行林火危险度系统的研究以来，森林火险等级的测定、森林防火季节定时火险预报正逐步在世界范围推行。虽然各国使用的火险分级方法有30余种之多，但预报方法基本上可归为直接测定法和间接测定法两大类。直接测定火险级法在美国、加拿大普遍使用，包括美国中部山区森林放牧试验场发明的8型长形森林火险尺，美国J. B. Melin发明的计算尺式森林火险尺，以及美国东南森林试验场发明的8—100—0型森林火险尺。间接测定法在我国、前苏联、日本、瑞典和法国常常使用，包括原中国科学院林业土壤研究所制定的着火指标与蔓延指标法，聂斯切洛夫在欧洲平原森林中试制的综合指标法，日本山久尚设计的实效湿度法，法国包德留尔(C. Bordreuil)等人提出的土壤湿度法和美国林登木思(C. W. Lindermuth)提出的干燥指标和蔓延指标法等。

为了较科学、较全面客观地反映出实际状况，当今世界有林国家在进行林火分类分级的森林火险等级系统研究中，对火险因子进行了多种考虑，它们结合了本国(地区)森林火灾的特点，设计出许多的不同特点的系统方案。

美国火险等级系统包括4种指标，即人为火发生指标(MCOI)，雷击火发生指标(LOI)，燃烧指标(BI)和火灾负荷指标。该系统的优点在于输入因子考虑比较全面，包括气象、地形和植被等；工作比较细致，将人为火发生和雷击火发生分别考虑；4种指标均用依据于实验室试验的物理模型和数学模型计算获得。

加拿大森林火险级系统包括林火天气指标系统和林火行为预测系统两个部分，前者由3个最初的、2个中间的和1个最后指标组成。其等级系统的特点是通过大量的外场观测将数据作数理统计分析，即在选择的地区内，把收集到的野外数据，加上天气、可燃物含水量和火行为的综合考虑，建立经验曲线再通过制表、数学方程式的建立等进行计算机运算。

澳大利亚火险等级指标的设计类似美、加等国，它包括对3种可燃物类型的3个水分含量的测定。McArther(1966,1967)提出的用于桉树林的系统应用比较普遍。

前苏联广为使用的火险级指标是根据聂斯切洛夫研究基础上采取的点火指标，因子有温度、降雨后的天数和露天温度等3个。Gritsemko 1962年对该系统进行了一些修改。这种系统

计算很简单，但方法不精细。

瑞典、法国、日本等国也都发展了自己的火险等级系统，这些系统和前苏联系统一样，主要优点就是简便，但指标考虑都不够精细，忽视了可燃物类型和地形等对火险的影响。比较起来，美国、加拿大和澳大利亚的研究更加成熟和深入，有关系统因子比较全面，且指标已不局限于定性范畴，也开始具有明显的定量化特征。

森林火险区划是另一含义的森林火险工作，可为设置长远的或永久的防火设施提供科学依据。这一工作在世界各国有不同程度的开展，但完成国家级统一方案研究和制定的并不太多。我国森林火险区划工作，1949年后已在全国重点林区先后进行，为了建立和完善各地区及全国森林综合防火体系，使全国森林火险区划规范化、标准化，林业部调查规划设计院受林业部森林防火办公室委托，于1991年提出了《全国森林火险区划标准》以供实施。

二、林火灾害的孕育环境分析

森林火灾的发生和发展，除火源存在的原因外，与森林特性、气象状况及地形条件有着十分密切的关系。

（一）森林特性与森林火灾

森林火灾的危险性，首先取决于森林中可燃物的性质，同时亦与地被物种类、森林树种、树龄、林相和疏密度密切相关。森林火灾一般先从第一燃烧物，即地被物开始燃烧。地被物由于种类和性质上的差别，可燃性程度亦有不同。例如草本植物（尤其是杂草类），属1年生或多年生的物种，进入冬春，新草未生之前，都已枯萎变黄，极易着火。苔藓喜生在土壤湿润的地方，火灾危险性较小，但混生沙草的沼泽地（如我国东北的塔头草），则燃烧性很大，还可能发展成为地下火。在一些森林中，攀附林木的苔藓植物大量生长，常触及地面，干燥之后，极易成为引火之物。下层低矮灌丛和半灌木类只有在干燥季节易遭燃烧，由于位居地被物与林木之中间层，一旦着火，上层林木即刻殃及。林中未经腐烂的枯枝、枯叶及林木枯株、采伐废材，多散布于林地各处，含水量较少，极易燃烧。森林残物种类不同，燃烧程度也不一样，如云杉林残物，因带有大量分枝，燃烧起来十分凶猛；松杉林、白桦林的残物也易着火，而一般阔叶林残物就差一些。普遍规律是，林木枯株和采伐废材大量堆积的林地，一经着火，则火势强盛，很易酿成巨灾，其燃烧温度可高达900℃以上，并往往引发树冠火。

林木作为森林火灾的第二燃烧物，其危险性因森林树种的不同而不同。针叶林的树干和枝叶含有较多的油脂，易于着火，它们的地被物可燃性也很强，这类林木有马尾松、落叶松、红松和各种杉木等。也有一些针叶树如银杏、金钱松等，由于叶子含水分较多，林下落叶常处于湿润，可燃程度较小。保持大量水分的常绿阔叶树种叶多肥厚，有较强的耐火能力，但樟树和桉树等一些树种，树木里含有油脂，容易引火成灾。

林木孕育火灾危险的程度，还与森林树龄、林相和疏密度有很大的关系。幼龄林如发生地表火，容易酿成树冠火；中龄林抗御火灾能力较强；老龄林虽然抗御能力较弱，但对于那些比较稀疏的整过枝的树林，不易形成树冠火，一般以发生地面火为多。从树种来说，针阔混交林的耐火力或防火力，一般均比纯林为强。但不论是何种林分组成，如林内存在复层和多层结构，均易使地面火转变成树冠火。林木疏密度良好的森林，林内湿度大，地被物亦含较多水分，不易着火

燃烧。不过，由于树冠密集相连，一旦发生树冠火，极易扩展，疏密度小的森林，在风和阳光的侵袭下呈干燥状态，十分容易引发火灾。至于疏密度中等的森林，因为具备一定的燃料密度和较干燥的林内条件，树冠火蔓延起来非常迅速。

(二)气象状况与森林火灾

空中水气含量多少，即空气湿度直接影响森林火灾的发生。如果空气湿度小，林中可燃物质的含水量就小，发火点也低，就容易发生森林火灾。反之，如果空气湿度大，可燃物质含水量就大，发火点也高，发生火灾的危险性就变小。据国外有关数据：空气相对湿度减至50%—60%时，其危险率约增加2.5倍，降至40%时，约增加1.5倍；如相对湿度在80%以上，则极少发生火灾。而影响空气湿度的一个重要因子就是气温，例如，1m³容积的空气在海平面气压和0℃时就达到饱和状态，即相对湿度为100%，而在同一海平面气压下，当温度上升到20℃时，相对湿度仅为28%。可见，气温的高低会直接影响空气的湿度，进而影响到森林火灾发生的可能性[1]。

降雨或降雪可以减少森林火灾的危险性，它们除直接增大空气湿度外，而且能淋湿林木、地被物和土壤，正在燃烧的大火由于一场大雨往往熄火。事实上，凡属雨季或降雨较多的月份，森林火灾极少发生；相反，降雨量较少的季节、火灾发生的可能性很大。我国南方和北方森林火灾危险期不尽相同，南方各地冬春季节，天气干旱，草木大都干枯，这一时期林火容易发生；在北方，多雨的夏季和积雪的冬天不易引发火灾，而干旱的春季和秋季则是最易发生林火的季节。

风对森林火灾的发生和蔓延影响相当大。风不但能减小林内湿润度，提高发生火灾的危险性，且有推动火焰及灼热空气向前移动，扩展火势的作用。火焰受风的吹拂会越来越强，许多地面火借助风势很快引发树冠火。此外，风力越大，空气对流越强，形成的旋风可把燃烧物抛向四处，引起新的着火点。

(三)地形条件与森林火灾

地形作为一个基本环境因素，对各地气候和植物群落的形成具有重大影响。因此必定关系到森林火灾的发生发展，这就是所谓地形宏观影响。局部地形条件对林火的危险同样客观存在。例如，当湿润气流越过山岭后，往往形成下沉的旱热风，如果这里的地面生长着森林，火灾发生的危险性就会大大增加。在丘陵山区，由于太阳辐射引起谷间风的流动日夜变化，对火的蔓延起着推波助澜的作用。一般来说，地形坡度愈大，危险性也愈大。此外，地形坡向不同，对火灾危险的影响亦大不一样，这主要是各方位的气候互不相同，从而影响燃烧物的含水量及当地气温。普遍规律是，向阳坡比阴坡干燥，这里的森林较易着火。除了上述情况外，由于地形条件往往是通讯、交通、人口及社会经济活动等的重要制约要素，对产生火源、防火及扑救措施等有重大影响，从而也决定着不同地形区森林火险度大小的不同。

三、林火发生原因和种类

(一)林火发生原因

火源是燃烧三要素之一。森林起火是受火源预热达到燃点的结果，没有火源，森林是不会

自燃的。在有利于森林燃烧的条件下，火源是发生林火的主导因素。火源不同，引起的林火种类也不相同。研究火源，掌握林区用火状况和规律，这对控制森林火灾的发生有着十分重大的意义。

1. 火源分类

据调查，全国林区的火源有几十种之多，可概括为人为火源和天然火源两大类。

(1) 人为火源　林火大多数是由人们用火不慎而引起的，人为火源很复杂，按其性质又可分为以下几种。

① 生产性火源：农、林、牧业生产用火，如烧荒、烧垦、烧灰积肥、烧田埂、烧牧场、炼山、火烧清理林场、烧防火线等；林副业生产用火，如烧炭、烧砖瓦、烧石灰、狩猎、烘蘑菇等；工矿运输生产用火，如火车和汽车漏火、爆破开山、林区冶炼等。

② 非生产性火源：野外吸烟、烧火取暖、烧火做饭、熏蚊虫、烧纸、放鞭炮、小孩玩火等。

③ 坏人放火破坏。

此外，在国境地区还要警惕外来火。

(2) 天然火源　它是自然现象，主要有雷电火、泥炭自燃、火山爆发、陨石坠落、滚石火花等。天然火源很少，在我国除个别地区外，大约占总火源的1%。

2. 火源分析

火源分为火种和走火途径。引起林火所表现的火的类别称为火种，走火途径是指火成火的具体过程。换句话说，有了火种，没有走火途径，也不会引起森林火灾。根据多年的森林火灾资料分析，主要火源的走火途径是：[2]

(1) 各种烧垦烧荒　火场火焰直接蔓延到林区，火星飞入林中；火炭和已着火的松果滚入草丛，已烧着的牛粪和杂草被风卷进林中。

(2) 烧灰积肥　火堆靠近草木，火星飞入林中；已着火的松果和杂草被风吹进林中；灰烬复燃。

(3) 烧木炭　烟囱喷火或窑门漏火；炭窑崩裂飞火；未熄灭的木炭在运输途中复燃。

(4) 机车走火　烟囱飞火星，炉底漏火，排气筒冒火星，过负荷发热，电池管冒火花，旅客向车厢外乱抛烟头。

(5) 打靶及爆破　照光弹落入草丛；弹头填充物着火；枪口喷火；导火索引燃干草或树枝；爆炸飞火。

(6) 吸烟　乱丢烟头；乱倒烟灰；乱丢划燃的火柴梗；生篝火吸烟；把燃着的烟卷放在干柴干草上。

(7) 野炊　炉灶漏火，烟囱喷火，炉灶紧靠可燃物；油锅起火；火星飞散到林中；火焰接近草木；火炭落入草丛；余火灰烬复燃。

(8) 烧火　火堆接近草木，火星扩散到林中；火炭落入草丛；已着火的柴草被风卷进林中；余火灰烬复燃后扩散。

(9) 照明　火把接触草木，火星飞散到林中；火炭落入草丛；蜡烛倒伏接触草木，汽灯或油灯喷火，用汽油或混合油照明；乱丢火柴梗，灯笼着火后乱抛。

(10) 雷电火　雷击枯立木起火；雷击建筑物起火；闪电接触草地起火，球状闪电接触树冠起火。

还有许多走火途径，这里不再赘述。我们的防火措施，就是要千方百计地切断走火途径，以

解决用火与防火的矛盾，把森林火灾的发生控制在最低的限度内或完全杜绝森林火灾的发生。

（二）林火种类[30]

根据林火燃烧状态，即燃烧部位、蔓延速度、受害部位和程度等来划分林火种类。

1. 地表火

火沿林地表面蔓延，火焰高度低，烟为灰白色。烧毁地被物，危害幼树、灌木、下木，烧伤树干基部和露出地面的树根。影响树木生长，引起森林病虫害，有时造成大面积林木枯死，改变森林生态系统。但轻微的地表火，也能起到烧除林下杂物，促进林木健康生长的作用。在各类火灾中，以地表火为最多，按蔓延速度和危害性质不同，又可分为两类：

（1）急进地表火，火焰蔓延速度快，通常每小时蔓延几百米。这种火往往燃烧不均匀，常留下未烧的地块、有的乔灌木未烧伤，一般只烧掉林下的枯枝、落叶和杂草，对森林危害较轻，火烧迹地为长椭圆形或三角形。

（2）稳进地表火，火焰蔓延缓慢，一般每小时几十米。能烧毁所有地被物以及幼树和灌木，有时连乔木低层枝条也被烧毁。燃烧时间长，温度较高，燃烧彻底，对森林危害较重，其火烧迹地为椭圆形。

据调查，遭受地表火的林木死亡率，成林为5%—15%，幼林在60%以上。

2. 树冠火

树冠火是林下植被到树冠的剧烈燃烧。它是由地表火遇强风或遇到针叶幼树群、枯立木、风倒木或低垂树枝等从树下烧至树冠，并沿树冠顺风扩展。在火头前，经常有燃烧枝丫、碎木和火星，加速火灾蔓延。上部烧毁树叶、树枝和树干，下部烧毁地被物、幼林和下木。烟为暗灰色，多发生在长期干旱的针叶幼林、中龄林、异龄林及可燃阔叶林，按其蔓延方式分为连续型和间歇型。

（1）连续型　针叶林树冠连续分布，火烧至树冠并沿树冠连续扩展。按速度又分为两种：

① 急进树冠火（又称狂燃火）：火焰跳跃前进，顺风每小时可达8—25km以上，形成向前伸展的火舌。烧掉针叶或小枝，烧焦树皮和较大枝条。火烧迹地为长椭圆形。

② 稳进树冠火：火焰全面扩展，又称遍燃火。火烧较慢，顺风每小时可达5—8km。能烧毁树枝和大枝条，烧尽林内枯立木，是危害最严重的火灾。火烧迹地为椭圆形。

（2）间歇型　针叶树冠不连续分布，由强烈地表火烧至树冠，因树冠不连续，又降为地表火，这样互为影响，形成间歇状态。

据调查，遭受树冠火的林木死亡率达80%以上，是毁灭性灾害。

3. 地下火

发生在东北原始林区或四川高山地区等气候寒冷能形成泥炭层或腐殖质层的地方。林地腐殖质层或泥炭层燃烧，通常看不见火焰，只见冒烟，一直烧到矿物质层和地下水的上部。地下火蔓延缓慢，温度较高，持续时间长，有的长达几个月以上。由于地下火是在泥炭层、腐殖质层蔓延，把树根烧坏，所以地下火烧过后，有大量树木枯倒。这种火多发生在干旱季节针叶林内，其火烧迹地呈环形。

森林火灾以地表火最多，约占90%以上，树冠火次之，地下火较少。

四、林火对森林的危害与影响

森林是关系国计民生的重要资源。在当今世界上，许多国家对森林资源的保护和发展都作为重要国策。火灾则是森林的大敌，在破坏森林诸因素中，它是相当严重的。

（一）林火危害

火灾能使成片的森林毁于一旦，给林分和森林生态系统带来严重的危害。

1. 火灾对林木的危害

林火能烧毁森林，破坏森林结构，降低林分密度，延长森林更新期。林火会引起树种更替，常常是低价值的荒草坡、灌木林或次生阔叶林更替珍贵的针叶林或常绿阔叶林。如东北东部的一些红松原始林区，经过火烧后，红松及其他针叶树消失变为阔叶林，再经多次火烧变为多代萌生蒙古栎林，如果继续遭受火灾的破坏，逐渐演变为荒山荒地。又如西南林区的木里、盐源、理塘、德格、雅江等地，以云、冷杉为主的林区，烧一片就丢一片，变为荒山秃岭，森林极难恢复。

2. 火灾对森林生态系统的危害

(1) 森林是维持生态平衡的主体，它在保持水土、涵养水源、调节气候等方面有着特殊功能。强烈的火灾能烧毁大片森林，破坏郁闭度，烧毁地被物，使土壤裸露。从而大大降低了森林保持水土、涵养水源的作用，造成河流泛滥，甚至山洪暴发；同时由于森林环境受到破坏，也失去了森林调节气候的作用，直接影响农业稳产和高产。

(2) 火灾直接危害林内动植物的生存。林火烧毁林下经济植物和药用植物，烧死或驱走林内珍贵鸟兽。如东北的三宝之一紫貂生活在偃松林，一旦偃松林被火烧毁，紫貂立即消失。又如云南省西双版纳自然保护区，由于火灾，已使生活在这个地区的世界稀有的白象失踪了。

(3) 林火使森林贮存的大量能量突然释放，破坏了森林生态系统，使生态系统内部失去平衡，引起生态系统内的生物、生态因子混乱。往往需要经过几十年或更长的时间才能恢复。此外，林火还产生大量烟雾，污染了森林环境，也引起人类生存环境的恶化。

（二）火灾对森林的影响

1. 火灾对林木的影响

林火产生高温，使林木细胞原生质凝固而死亡。火对林木的影响，主要决定于致死温度和持续时间。不同温度的持续时间与针叶树受害的关系如下：49℃，一个小时死亡；52℃，几分钟死亡；60℃，半分钟死亡；64℃，立即死亡。

影响树木损害的因素有：开始温度；树木大小和它的形态；树皮厚度和结构；枝条的生长情况；根系深浅；土壤上的有机质；叶的可燃性；林分特征。以上诸因素可以用来确定树种抗火性。

东北林区主要树种抗火性顺序排列如下：

针叶树（大→小）：落叶松→樟子松→红松→鱼鳞松→红皮云杉→杉松→臭冷杉

阔叶树（大→小）：蒙古栎→水曲柳→核桃楸→黄波罗→桦树→榆树→槭树→杨树→椴树→柳树

南方主要树种抗火性顺序排列如下：

针叶树（大→小）：云南松→高山松→思茅松→落叶松→马尾松→杉木→云杉→冷杉

阔叶树(大→小)：木荷→桤木→樟树→栓皮栎→木棉树→杨树→高山栎→柳树

火灾对林木生长发育的影响，主要决定于火的强度和树木的年龄，通常对人工针叶幼林危害严重，甚至完全死亡(1—15年马尾松几乎完全死亡)。对中龄林的影响，表现为受害林木在1—5年内生长明显下降，以后逐渐恢复正常生长。

2. 火灾对森林病虫害的影响

森林经火烧过后，未被烧死的林木生长衰退，为大量发生病虫害造成有利环境。如小蠹虫以火烧迹地为发源地，以受伤生长衰退的林木为寄主，使受伤林木再次遭受蛀虫危害，造成大量死亡，变为枯立木。由于大量枯立木的存在，则又容易再次发生火灾，形成恶性循环。林火过后，树木根部和树干基部常被烧伤，极易感染腐朽病菌，造成根基和干基腐朽，会引起树木干枯而死亡。

3. 火灾对森林土壤的影响

(1)对土壤物理性质的影响：林火能烧掉土壤有机质，破坏土壤团粒结构，降低土壤保水性能，使土壤结构变得紧密，渗透性减弱。因土壤渗透性减弱，使得低洼处地下水位升高，可引起沼泽化。火灾烧毁森林，使林地裸露，造成严重土壤冲刷。有人做过试验，雨水对火烧迹地土壤冲刷比对灌木丛地的冲刷快30倍。火灾后，林中空地增多，林内光线增强，林地表面又存在大量木炭，使得土壤表层增温，蒸发加快，加速林地干燥，不利于森林天然更新，而有利于喜光杂草发展。因此，反复发生林火，使林地演变为荒草坡。

(2)对土壤化学性质的影响：林火温度可高达800—900℃，烧掉了土壤腐殖质，氮全部损失，无机盐钙、磷、钾变为可溶性，易被雨水流失或被淋洗到土壤下层，造成损失，降低了土壤肥力。

(3)对土壤微生物的影响：林火可使土壤表层3—5cm内，温度90—95℃，造成大量生物与微生物死亡。同时，土壤物理性质变坏，土壤板结，也不利于生物与微生物的生长发育。

五、林火灾害危险度评价方案

我国土地辽阔，森林分布不均，各地林区的自然地理环境和社会经济条件十分复杂，发生林火的情况也很不一样。为了更好地按照各林区的林火特点，用先进的科学方法来控制林火的发生发展，很有必要对全国林区林火灾害的危险程度进行合理的评价。

(一)林火灾害危险度分区评价的依据

林火灾害危险度分区评价应着重考虑以下4个方面的因素：

(1)各地区森林分布现状与各林区主要代表树种构成的林木燃烧性。

(2)各地区气候因子的变化，特别是全年各月份降水量和蒸发量的关系以及干湿月份的分布状况。

(3)各地区的社会经济条件、交通和人口密度、火源及农业生产方式对林火的影响。

(4)各林区的林火特点、林火发生的频度、损失面积以及林火发生和结束的时间。

首先应根据历年有关的火灾资料，绘制火灾发生图和火烧面积分布图，并从多年来我国森林防火的实践出发，即偏远大面积林区，火灾次数虽少，但烧林面积大，损失也大；而交通条件较好，居民较多的林区，虽然火灾次数多，但有平均烧林面积较小，损失也小的特点，对上述4

个条件进行全面的综合的分析，将林区火灾的危险程度划分为三级。

Ⅰ级火险区：这类地方没有铁路、公路、或仅有少量公路，交通闭塞；火源复杂（有盲流人员或"刀耕火种"等落后生产方式的林区），起火后难于及时扑救，烧林面积大，损失严重，森林火灾危险性大。如东北的大兴安岭林区，云南的金沙江、把边江、南盘江林区，四川的凉山、甘孜、阿坝州林区，广西的百色林区等一些偏远的老火灾林区，都可划为一级火险区。

Ⅱ级火险区：这类地方居民点和生产点较少，虽有一定数量的公路，但交通仍不方便，起火后也不能及时扑救，但烧林面积和损失不大，林火危险性中等。

Ⅲ级火险区：这类地方有铁路、公路，交通方便，居民点和生产点较多，起火后能及时扑救，烧林面积和损失均小，林火危险性小。

（二）全国森林火险区划标准

全国森林火险区划标准（以下简称标准）是由林业部森林防火办公室提出，并委托林业部调查规划设计院于 1991 年制定的。标准由《全国森林火险因子得分表》和《全国森林火险区划等级标准》构成。详见本集中"中国森林火灾危险评价的研究"一文。标准是以全国 7 个大区，17 个省、自治区、直辖市的 590 个县（局）资料为基础，通过宏观规律的分析，经过因子逐步筛选，以稳定且关键的火险因子为依据制定的。因此，既能满足全国统一标准的要求，又能客观地反映各地区的森林火险程度。标准以数据表示，比以往延用的定性规定前进了一步，可以避免在森林火险区划中人为主观因素的影响。

参 考 文 献

[1] 王正非，朱廷曜，宋玮伟等. 森林气象学. 中国林业出版社，1985

[2] 赵子玉执笔. 森林防火基础知识. 四川民族出版社，1985

[3] 林业部护林防火办公室编. 森林防火. 中国林业出版社，1984

4. 地理信息系统(GIS)支持下的小区域森林火险区划方法研究

张振威　朱启疆
(北京师范大学资源与环境科学系)

摘要　本文中对四川省凉山州磨盘山地区(101km²)的森林火险因子进行了分析，建立了森林火灾背景数据库，给出了森林火险指标的加权累加模型，实现了基于像元尺度火险指标值的四级火险区划。该区划客观地反映了火险因子的作用以及它们在空间上的差异，具有实用价值。

森林火灾是气候、地形、火源与可燃物诸因子相互作用而形成的综合现象，具有一定的时间规律与空间分布。我国对林火发生规律的研究，主要集中在火险天气等级的计算与预报。对林火的预报，不仅要实现定时，还要实现定位。应该根据森林植被类型、可燃物的数量与立地条件，以及考虑地理、火源等时变小的因素，确定森林火灾潜在危险程度及其地域规律，在规定的范围内进行区域划分[1,2]。

近年来，由于气候变暖，造成干旱连年，诱发了世界性的大范围森林火灾，进入90年代，这一趋势越发明显。1990年美国发生了122783场野火，烧了220万hm²，面积比麻萨诸塞州还大[3]。以后是地中海沿岸国家、澳大利亚等都相继发生了森林大火，这使许多国家把森林火险区划方法研究重又提到议事日程。Emilio Chuvieco 和 Russell G. Congalton (1989)研究了应用遥感和地理信息系统(GIS)进行森林火险区划的方法[4]，他们建立了火险因子的线性模型，模型中各因子的权系数由其对成火的影响来确定。Beata Maria(1992)按基本相似的方法实现了希腊尤比亚岛火灾敏感区的火险区划[5]。Yue Hong Chou(1992)应用地理信息系统技术，对美国南加州的森林火灾的环境数据进行了分析，建立了由地形、植被、温度、降水和距建筑物与道路的远近等因子组成的模型，并据此计算火灾发生概率的空间分布[6]。

我国现行的森林火险区划方案[1]，是根据可以获得火险因子数据的有限的点来进行区域划分的，问题主要是这些数据的局限性。遥感数据在一定程度上避免了这种弊端，地理信息系统技术则有利于实现对遥感和常规调查所提供的火险因子数据的管理。

本文研究，如何在森林火险因子的空间数据库的支持下，实现四川凉山州磨盘山试验区的森林火险的等级区划。

一、试验区火险因子分析

森林的火险因子计有气候因子、植被因子、地形因子及人类活动影响，森林火灾即是在上述因素的作用下发生发展的，正确分析火险因子是做好火险区划的前提。

1. 气候因子

磨盘山试验区具典型的季风气候特征，冬暖夏凉，干湿分明。这里年平均气温 14—18℃，1 月份平均气温 6—10℃。多年平均降水量 1100mm，冬半年降水量仅为全年降水量的 10%左右，1—3 月份降水量最少，仅 20mm 左右。这种特殊的气候条件使该地区成为森林火灾多发地区之一。由于选择的试验区面积仅 101km²，气候条件在空间可视为均一，在进行区划时，就未考虑气候因子。

2. 植被因子

植被是森林火灾燃烧、传播蔓延的主要载体，不同的森林植被类型、森林郁闭度、年龄组和地位级，其对林火的影响是不同的。

植被类型 不同的植被类型所提供的可燃物的数量和性质是不一样的，其对森林火灾的影响也不同。在磨盘山试验区，植被类型共分为 8 类，每类按其对林火的作用获得不同的得分（表 1），0 级表示无影响，1 级表示中等程度影响，2 级则表示有强烈影响。

表 1 植被类型及其相应得分

植被类型	云南松疏林	云南松幼龄林	云南松中龄林	云南松成熟林	灌木林地	宜林地	草地	放牧地
得分	2	2	1	2	1	0	0	0

试验区中云南松林分布广泛，其分布面积约占总面积的 64.7%，并且主要为中龄林和成熟林。在整个云南松林中，中龄林占 52.6%，成熟林占 33.5%，幼龄林及疏林共占 13.9%。按国家林业部的行业标准，云南松林属易燃林类，其中又以云南松幼林及疏林火险程度最高。

森林郁闭度 林木树冠彼此交迭遮掩的程度称为森林郁闭度，它是林木树冠的投影面积与林地总面积之比，用 10 分法表示。表 2 是森林郁闭度等级及其相应得分。

表 2 郁闭度分级与得分

郁闭度	危险程度	得分
高郁闭度(>0.7)	无	0
中郁闭度(0.5—0.7)	中	1
低郁闭度(0.3—0.5)	中	2
疏林地(<0.3)	高	2

森林郁闭度的高低直接关系到林下可燃物的数量和含水状况，也影响到林内的水分和小气候的变化，是林火的重要影响因子。一般情况下，郁闭度愈高，射入林内的辐射能量愈弱，因而林内温度也就愈低，造成蒸发弱，湿度大，物质不易燃烧；反之，则发生火灾的可能性增大。试验区中，云南松林以疏郁闭度为主。

森林龄级 森林龄级与林中枯落物的多寡有关。林木通过自然整枝和自然稀疏，使林中产生大量枯落物和枯立木，随着林龄的增大，死的地被物随之增多。在透光林中，丰富的枯落物极易诱发林火。据大量的林火与林龄之间关系统计资料看到，幼龄林、过熟林、成熟林、中龄林的林火发生概率依次递减，表 3 是龄级及其相应得分。

表 3 龄级与其得分

森林龄级	危险程度	得 分
1	高	2
2,5	中	1
3,4	无	0
6	高	2

森林地位级 地位级是衡量森林生产力和立地条件的一个指标，它反映林地的综合肥力及对树种的适宜程度，它与森林的土壤条件密切相关。林分内树木的高矮、大小，是立地条件

好坏和树种适宜程度的明显标志。主要林层中优势树种林龄相同的林分，立地条件好，综合肥力优越者，树木就高大，地位级与林分生产力就高。

地位级共分5级，最高为Ⅰ，最低为Ⅴ。一般情况下，在其它条件相似时，地位级愈高，相应的总体生物量也愈大，可供燃烧的物质也愈多。表4列出了地位级及其相应得分。

表4 地位级及其得分

地位级	危险程度	得 分
Ⅰ，Ⅱ	高	2
Ⅲ，Ⅳ	中	1
Ⅴ	低	0

3. 地形因素

在试验区，地形通过气流和局地小气候直接影响林火的发生与蔓延。林火的地形因子主要考虑海拔高度、坡向和坡度。

海拔高度 在山区，随着海拔高度的增加，降水量增加，温度降低，蒸发量减少，而湿度变大，发生林火的可能性降低。在试验区里，山地降水普遍多于雅砻江谷地和安宁河谷地。磨盘山主峰海拔2731m，雅砻江河谷处仅为1180m，高差达1551m。海拔2500m以上山区全年无夏。

坡向 坡向直接影响到地表接收到的太阳辐射的多少，造成在不同坡向上存在明显的温度差异。南向坡（包括南坡、东南坡、西南坡）接收的太阳辐射相对较多，因而其地面温度比其它各向坡要高，空气干燥，容易发生森林火灾。研究中把坡向分为5类，即南向坡、东坡、西坡、北向坡和平地。

坡度 森林火场燃烧和蔓延状况随地形坡度的不同而有很大差异。地形坡度较大时，降雨径流排泄快，地表可燃物易于干燥，火险程度较高。坡度不同，林火对森林的损害程度也不一样，坡度增加时，林火造成的林木死亡率下降。按对林火的影响，把坡度分为4级，即≤8°，9°—25°，26°—50°，>50°。地形对林火影响的数量描述列于表5。

表5 地形对林火的影响

地形因子	坡向					坡度				海拔(m)		
	南向坡	东坡	西坡	北向坡	平地	≤8°	9°—25°	26°—50°	>50°	<2000	2000—2500	>2500
危险程度	高	中	中	无	无	无	中	高	无	高	中	无
得分	2	1	1	0	0	0	1	2	0	2	1	0

4. 道路网、水系与防火林带因素

道路网 道路作为人类活动范围的指标，是一个重要的火险区划因子。它是人为火源走火造成火灾的潜在路线，故邻近道路的地区，其火险程度增高；路面较宽的道路则对林火扩展有隔离作用，路面较窄的小径可增大火险程度。这是由于小径通达的地区一般山高坡陡，群众经此露营烤火、野炊，增大了火险程度，一旦着火，也起不到火场隔离的作用。

表6 道路、水网及防火林带的火险得分

影响因子	距道路远近(m)			防火林带(m)		水网(m)	
	<100	100—300	>300	缓冲区(50)内	缓冲区(50)外	缓冲区(50)内	缓冲区(50)外
危险程度	高	中	低	有	无	有	无
得分	2	1	0	1	0	1	0

试验区的森林火灾大多是人为造成的。每年11月、12月和次年1月以吸烟、烤火、野炊用火造成的森林火灾居多；2月、3月、4月份则以烧垦和烧灰积肥造成的林火居多。

水系 河湖水体可以有效的阻滞林火的蔓延，对林火起到隔离作用，是林火的抑制因子。试验区中有雅砻江和它的较大支流安宁河，河面宽80—150m，是很好的阻火因子。

防火林带 营造含水量较多的阔叶树林

带，可有效地阻止林火的蔓延。试验区里沿磨盘山山脊营造了防火林带，构成了阻止林火蔓延的绿色屏障。

道路、水网与防火林带等火险因子的影响见表 6。

二、试验区火险因子数据库

完成试验区火险区划的必要条件是要建立试验区的数量化的火险因子空间型数据库。

试验区位于四川凉山州西昌与盐源两县交界处的磨盘山地区，即在 N27°40′—N27°46′与 E102°—102°08′之间，处于雅砻江与其支流安宁河包围之中。由于本地区干湿季分明的气候条件，云南松为主体的林分组成以及人类活动的影响，使本地区成为西南林区火灾严重的地区之一，成为森林防火的一级火险区。

1. 图形数字化与图相编码

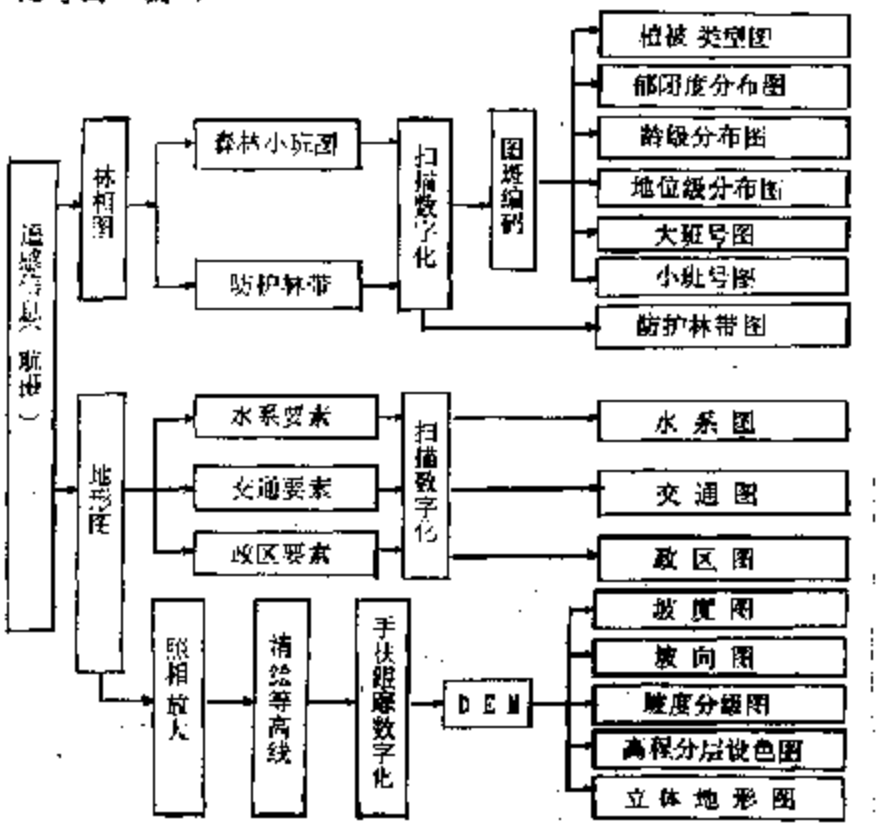


图 1　图形处理与输入流程图

为获取各火险因子的空间分布数据，研究中确定由 1∶5 万的地形图产生地形量化指标，由林相图（由国有林和集体林综合生成）生成植被因子的量化指标。道路、林带、水网因子也都由上述图件产生。

图形输入采用扫描数字化的方式，速度快、精度高，可避免手扶跟踪数字化不准而造成的误差。

1∶5 万的地形图信息载荷量大，线条也较复杂。为了减少计算机处理上的困难，研究中采

用先行清绘单要素图然后再扫描输入的方法。试验区地形起伏剧烈，等高线密集，需先照相放大(3倍)后再行清绘等高线，并采用手扶跟踪法进行输入。

对于林相图，则是清绘出以森林小班为单位的图斑后进行扫描数字化。林相图的图斑则按植被类型、龄级、郁闭度、地位级、大小班号等进行8位编码，其中植被类型占两个码位，其余各占一个码位。最后从8位编码图上可以单独提取、生成各种火险因子图。图形输入处理流程见图1。

由林相图图斑的8位编码图提取生成的火险因子图(植被分布图)见彩版1。

图形扫描输入是在TEKTRONIX－4991扫描仪进行的。扫描后得到矢量数据并将其转换成ARC/INFO的Coverage格式，然后在VAX11－750小型机系统上完成数据编辑，生成拓扑关系，最终形成矢量和栅格二种格式的数据文件。

地形图上高程数据的采集在手扶跟踪数字化的同时，完成等高线赋值，建立拓扑关系后，生成三角网，最后转换为栅格数据，得到数字化的高程数据。

2. 数据文件格式

数据库中的图形数据采用3种格式。

3. 数据库基本内容

数据库中主要存放火险因子图形数据文件，此外还录入了必要的属性数据文件和文件说明。

数据库中的图形数据文件有：水系图、交通道路图、政区图、防火林分布图、植被分布图、大班号图、小班号图、郁闭度分布图、龄级分布图、地位级分布图、坡度图、坡向图、高程分层设色图、坡度分级图以及透视立体图。

一旦有了火险指标的数量模型，根据这些数量化的图形数据文件，就可方便地实现火险区划。

三、火险指标模型与火险区划的实现

根据上述对试验区火险因子的分析，除本区因范围较小(101km²)，可将气候因子的空间分布视为常数外，据以进行火险区划的因子有：植被类型(x_1)、坡向(x_2)、距道路远近(x_3)、海拔高度(x_4)、郁闭度(x_5)、龄级(x_6)、地位级(x_7)、坡度(x_8)以及水系(y)及防火林(z)两个限制性因子。

1. 火险指标模型

上面我们已将森林火险因子进一步划分为因子级并赋以相应的得分。显然，各因子引发森林火灾的作用是不一样的，应同时赋以不同的权重。这样，我们可以用一个加权的火险因子累加模型作为火险指标模型，通过对每个像元(栅格点)的火险指标的计算进行森林火险等级的空间区分。火险指标(I)的累加模型为

$$I = y \cdot z \sum_{i=1}^{n} \omega_i x_i + c \qquad (n = 8)$$

式中，ω_i 为各因子的权重。

为使火险指标 I 有一定的动态范围并考虑各因子在引发林火上的作用，$\omega_1, \omega_2, \omega_3$ 设定为25，ω_4 设定为15，$\omega_5, \omega_6, \omega_7$ 设定为10，ω_8 设定为5。常数项 c 的作用是避免 I 等于零而设置的，

此处令其等于5。在这样设计下，火险指标 I 的动态范围变化在5－255之间。I 值的大小反映了火险程度的高低。

2. 试验区森林火险区划的实现

表7 火险区划等级

火险等级	火险指标值	赋色
无火险	<50	蓝色
轻度火险	50－95	绿色
中度火险	96－140	浅黄
严重火险	141－255	橙黄

有了火险指标 I 的空间分布，进行火险的区域划分就容易实现了。由于火险指标的分布正确地反映了森林火灾的潜在危险程度的空间分布，因此可将5的火险指标值截为数段以作为危险程度的划分。本研究中将火险指标值截为4段，每段(级)赋以不同的色调，就得到试验区的火险区划(见彩版Ⅰ)。火险指标的等级划分见表7。

四、讨论与结论

在森林火险因子空间型数据库支持下，实现了基于像元尺度信息的火险区划，这对通常的根据少数有限站点数据所做的火险区划是一种有益的方法上的补充和进步。从区划图上看到，火险等级的划分与区划的结果，符合现行的人们的认识水平，因而具有实用意义。

实际上，森林火险区划有着不同的空间尺度。从我国来讲，大者可到国家，小者可至县乡级。由于区划的空间尺度不同，选用的火险因子可有一定差异。试验区因为只有100km²，在气候上处于同一个类型单元，在空间变化上可作常量处理而不参与火险指标的计算，是一种特殊处理。当气候条件在空间上呈不均匀分布时，它就上升为首要的火险因子，这是要特别说明的。

火险因子的选取，大多是凭直觉进行的。被选中的火险因子中，许多是两两相关而不独立的，存在相当的数据冗余。在目前条件下，严格按照统计上的要求进行因子筛选有相当的困难，因为实际很难获得足够大的样本。这不能不说是一个很大的缺憾。

基于直觉的火险指标模型有简洁、易于运作的优点。因子权重的设定，因子级的得分都带严重的主观色彩。但有一点应该肯定的，即它应该符合人的直觉并有利于不同类别的火险指标值在空间上互相区分。

参 考 文 献

[1] 林业部森林防火总指挥部．全国森林火险区划工作指导手册，1992

[2] 朱启疆，高峰，于芳．森林火灾的卫星预警与监测系统研究．国土资源遥感，1991

[3] Keith C. Clarke, James A. Brass, and Philip J. Riggan, A Cellular Automaton Model of Wildfire Propagation and Extinction. PE&RS, Vol. 60, No. 11, 1994, pp. 1355－1367.

[4] Emilio Chuvieco, and Russell G. Congalton, Application of Remote Sensing and Geographic Information System to Forest Fire Hazard Mapping. Remote Sens. Environ., 1989, pp. 147－159

[5] Beata Maria, Risk Assessment for Environmental Degradation Caused by Fires Using Remote Sensing and GIS in Mediterranean Region, ITC－GHENT Publication, 1992

[6] YUE HONG CHOU, Management of Wildfire with A Geographical Information System, Int. J. Geographical Information Systems, Vol. 6, No. 3, 1992, p. 135－140

5. 西南重点林区火灾背景数据库建立与管理

于 芳 高 峰 朱启疆
（北京师范大学资源与环境科学系）

摘要 建立森林火灾背景数据库并将之应用于林火监测，是提高林火识别率的有效方法。因森林火灾涉及的环境因素很多，故建立一个相应的背景数据库是一项繁重复杂的工作。本文主要介绍了"八五"研究子专题，西南重点林区火灾背景数据库的建立工作，以及管理大型数据库的小型数据库管理系统的内容。

森林资源作为人类生存环境不可缺少的一环，长期受到森林火灾严重的损害。保护环境，保护森林，减少森林火灾及其损失，正日益得到全球的重视，随着遥感与计算机技术的应用，林火监测和林火损失评估的工作不再仅仅局限于人工了望塔及人工勘探等手段，而具有了空间性、动态性及现势性等特点。为了提高遥感影像的识别率，从而提高林火监测的准确性以减少火灾，建立地面火灾背景数据库辅助判别是重要的方法之一。为配合国家"八五"森林火灾课题的研究，我们主要进行了西南重点林区和实验样区火灾背景数据库的建库与管理工作。

一、西南重点林区实验区概况

对于我国西南地区的森林资源，50 年代后经过中国—原苏联西南考察队，中国科学院西南队数次考察一致认为它是仅次于东北大兴安岭林区的中国第二大林海，木材蓄积量大，分布集中的成过熟林，具体的讲，就是指分布在横断山脉地区的云冷杉林林区，全部位于四川云南境内。这种云冷杉林分布区一旦着火，损失严重，难于恢复，是保护的重点。

在建立西南重点林区数据库时，首先应考虑以横断山脉的云冷杉林为核心地段，并把云冷杉林分布的周边地段的云南松林、思茅松林也列入重点林区范围，它们目前虽处在中幼-中成年阶段，蓄积量不是很大，但从长远看，有发展前景。因此在建立西南重点林区数据库时，把西南重点林区实验区范围界定为：四川云南横断山脉分布的云冷杉林及周边地段集中分布的云南松林、思茅松林区。为便于计算机处理以及与 NOAA—AVHRR 带状扫描图像相配合，特用具体的经纬度加以界定，即北纬 23°- 34°，东经 98°－105°的范围。包括四川的大部与云南的全部，面积约 80 万 km^2。

（一）四川林区概况

森林资源 四川林区为我国三大林区之一。森林总面积约 800 万 hm^2，覆盖率 19.0%，活木林蓄积量 13 亿 m^3，是国家主要林区和主要木材生产基地之一，四川西部靠北，是以云冷杉

为主的原始森林；西部掌陶，气候温和，降水量集中，干湿季明显，形成以云南松为主的森林地区；东部盆地边缘地区，为马尾松分布的次生林区，海拔 1700m 以上还分布有华山松、青冈等树种，海拔 1700m 以下南部气温较高地区，有亚热带树种如桉树、龙眼、荔枝生长。

森林火灾情况　据 1951—1987 年统计，全省每年平均发生森林火灾 1108 次，烧林 2.14 万 hm^2，扑火耗工 103.349 工日，受伤 92 人，死亡 11 人，50 年代以来，森林火灾出现了 3 个高峰年：1960 年烧林 8.3 万 hm^2，损失率在 10‰以上；1961 年烧林 7.3 万 hm^2，1969 年烧林 6.7 万 hm^2，损失率近 10‰。

四川火灾高发地区为：凉山州、攀枝花市、甘孜、阿坝州。火灾高发时段为 11 月—翌年 5 月。3 月份火险最高，火灾多发生在春节后 100 天，主要起火原因是吸烟、烤火、玩火、迷信活动。本省雷击带在雅江—九龙—木里—盐源。主要灭火工具：水桶、工兵铲、风力灭火机、灭火弹。

表 1　四川 50 年代以来年平均森林火灾损失率表　　面积单位：hm^2

年代(19—　)	烧林面积	年均烧林	%
58—60	192936.8	38587.1	4.82
61　65	156736.8	31347.4	3.92
66—70	98328.8	24582.2	3.07 (4 年)
71—75	119499.9	23899.9	2.99
76—80	73175.1	14635.8	1.83
81　85	31460.8	6292.2	0.79
86—90	7448.9	1489.8	0.19
合　计	773604.4	159697.4	19.97
平　均	96738.1	19962.2	2.50

(二)云南省林区概况

森林资源　云南省森林面积约 932 万 hm^2，活立木总蓄积量约 13 亿 m^3。森林覆盖率 20.38%，针叶林占 84%，阔叶林占 16%，主要树种为云南松、思茅松、云冷杉、杉木、马尾松。云南森林资源的分布特点是，森林分布东少西多，滇西和滇南地区共占全省森林蓄积量的 70%，而其他地区只占 30%；天然林多，人工林少，有林地面积中 94%为天然林。

森林火灾情况　云南省森林火灾在 60 年代平均每年发生 3094 起，70 年代平均每年发生 8140 起，80 年代平均每年发生 2314 起。火灾原因主要是生产、生活用火，这类起因的火灾占火灾总数的 98%。50 年代以来，云南省森林火灾造成的人员伤亡平均每年死 110 人，伤 690 人，见表 2。

云南省防火季节为 12—6 月。火灾高发区为：文山、红河、曲靖、西双版纳、思茅、大理、丽江、迪庆。目前有了望台 204 座，1989 年开通 NOAA 卫星报告火点，每天报两次，准确率大于 70%，灭火主要用人工扑打，使用的器具有：工兵铲、枝桠、灭火铲、灭火水枪。

表 2　云南省森林火灾统计表

年代（19　）	火　次	烧林面积（万亩）	烧毁木材（万 m^3）	伤（人）	死（人）	平均耗资扑火工　日
51 · 52	2321	98.4	—	—	—	—
53—57	15023	1066.6	—	85		—
58—62	18515	1851.7		116	126	192.6
63　70	7783	681.8	—	54	36	6.0
71—75	23475	1588.6	3.01	79	266	129.0
76—80	28643	1712.9	54.62	114	562	231.0
81—85	15588	670.7	60.33	46	338	85.4
86—89	7430	254.7	-	—	—	—
1986	3749	199.8	15.3	102	251	48.0
1987	1347	29.8	4.16	1	42	26.4
1988	795	25.0	8.61	1	17	24.4
1989	1539	10.5	—	—	—	—
总　计	127036	8477.98	146.66	578	1632	733.7

二、数据库内容简介

西南重点林区火灾背景数据库采用“四川 1：50 万土地利用分布图”及“云南 1：50 万土地利用分布图”为基础底图。两者皆为“七五”最新科研成果。在此基础之上进行细类合并成具有 18 种林地类型的全区的森林分布图。同时，还收集了现有的社会经济统计资料与森林资源二类调查资料，经过系统整理，形成一套与火灾相关的统计资料。之后，经过计算机处理，分按五大空间数据与五大属性数据纳入数据库管理系统中。

本数据库的比例尺为 1：50 万，投影方式为双标准纬线（$\varphi1=27°30'$，$\varphi2=33°00'$）正轴等角圆锥投影，中央经线为 104°。数据内容分空间与属性两大类。空间数据包括森林分布、行政区划、交通、水系等，属性数据包括社会经济、森林资源、火灾统计、土地利用及气象、气候等。为便于与遥感影像叠合分析，以达到提高森林火灾识别率的目的，该数据库的数据结构定为栅格格式。所占计算机存储空间约 40M。

（一）数据处理程序

数据处理主要分 5 个部分，即原图清绘、扫描数字化处理、VAX ARC/INFO 数据编辑成图、数据格式转换和微机数据库管理。

1. 清绘

对水系、交通、境界、森林分布进行分版清绘（对森林分布按要求综合），并确定控制点。

2. 扫描数字化

硬件环境为 TEKTRONIX×4991 图形扫描仪和 TEKTRONIX4125 图形工作站。四川林区分 12 张子图，云南林区分 16 张子图，按 4 大要素共 112 幅图分别扫描数字化。据专题信息的复杂繁简程度，扫描数字化时采用不同的参数，处理速度也有所不同，具体如下：

表 3　扫描数字化参数与指标

项　目	水系、交通、境界	森林分布
数字化步距	0.12mm	0.08mm
扫描时间	30min	2.5—3h/幅
由 TEK4125→VAX785 传输数据	15min/幅	2.0—2.5h/幅
数据量	0.1mb/幅	2mb/幅

3. 数据编辑

首先在 4125 上进行预编辑，主要完成少量断线，杂点处理。数据格式为(*P X1 Y1 Y2 Y2 …Xn Yn*)，其中 P 为 polyline 标志，*X1*，*Y1*，…，*Xn*，*Yn*)为某一线段组成的 *n* 点坐标。

之后，将扫描数据转换成 ARC/INFO 标准 Coverage 格式。在小型机系统环境(VAX-11/785，TEK4115 图形终端，ARC/INFO 软件 V4.0)下进行编辑处理。对于水系、交通、境界等线状要素其过程为编辑—建拓扑关系—编辑—坐标转换—接边—编辑—建拓扑关系。对森林分布，行政区划等面状要素采用编辑—建拓扑关系—编辑—加 Label 点—建拓扑关系—第二次查错修改—建拓扑关系的方法处理。

最后，利用 ARC/INFO 的命令进行矢量到栅格的数据格式转换。森林分布数据因其数据量大，超出计算机运转承受能力，故需对分幅图像进行单独转换，再按其统一的栅格坐标系进行拼接。将全部栅格数据传至微机并进行管理。

(二)空间数据与属性数据说明

1. 空间数据

文件存储格式为二进制，最大行列为 2963 行×1820 列。栅格大小为 500m×500m。

(1)面状数据

MIN.GRD 行政区划图　FOREST.GRD 森林分布图

(2)线状数据

BOU.LIN 行政边界　HYD.LIN 水系分布　ROAD.LIN 交通网络

(3)其它系统格式

*.ENC 相应的游程编码压缩文件　*.IIED 相应的图像的头文件　*.PAl 调色板文件

2. 属性数据说明(以行政区为单位)

FOREST.DBF 森林资源　ECONOMY.DBF 社会经济　LANDUSE.DBF 土地利用　FIRE.DBF 火灾统计　CLIMATE.DBF 气象气候　POSITION.DBF 总控文件　TIC.DBF 控制点文件

三、西南重点林区 1∶50 万火灾背景数据库管理系统简介

该数据库管理系统是建立于微机环境下，具有小系统处理大数据的优化设计方法与特点。其目的是充分利用计算机的有限资源，提供便利快捷的途径，展示大型数据库内容，连通不同格式数据与多图操作，多方位查询提取数据库内容，以便更好地开发数据库应用潜力。西南重

点林区 1：50 万火灾背景数据库管理系统功能主要有以下 8 个部分：

(一)数据处理

- 数据压缩：游程编码，游程解码
- 矢量—栅格互转换
- 图幅拼接与分块

提供上下、左右、田字形 3 种方式，处理大图分幅或小图拼接

(二)数据提取

- 边界提取　用于提取面数据的边界(可由行政图形成新的行政边界图)
- 随机提取　使用了 VGA 卡 640×480 16 色模式输入需要提取的图像总数，图像文件名及子图文件名，并提供显示用的底图。用光标移动选择确定选择的子图范围，程序输出选择的子图以及子图的头文件
- 经纬提取　按经纬网提取子图
- 行政提取　按行政范围进行提取

(三)空间数据显示

- 放大缩小　放大缩小显示空间数据。首先用光标移动选择 B 起点，E 终点 F1→F10 可改变步长→显示定义的小块图像，可以叠加

F1　显示森林分布图	F2　显示行政区划图
F3　叠加行政边界	F4　叠加交通网络
F5　叠加水系	F6　叠加保护区边界图
F7　叠加居民点	F8　加经纬网
F9 加图例	ESC　退出

- 快速漫游　使用了 VGA 卡 800×600　256 色模式显示图像大小每次为 600×600，每次移动为 500×500 像元，用光标键移动图像。同时具备上述 F1—F9 的叠加功能(见彩版 Ⅱ)。

(四)属性数据管理

- 属性数据显示

包括社会统计、土地利用、森林资源、火灾频度及气象气候等 5 项

(五)数据查询

- 空间随机专题码查询
- 属性数据查询

包括社会统计、土地利用、森林资源、火灾频度及气象气候等 5 项查询

- 空间—属性双向查询

以西南重点林区的行政分布图为背景，光标控制选择查询的行政单元，查询空间与属性多种信息，上菜单显示空间图形信息，内容为：森林—行政—边界—交通—水系—保护区，右菜单

显示对应的属性信息，内容为：社会统计—土地利用—森林资源—火灾频度—气象气候。

· 点信息查询

可以以任何空间专题分布图为背景，光标控制选择查询的特定像元点多幅空间与属性信息，以便对特殊像元点周围窗口地区进行细部研究(见彩版Ⅱ)。

(六)分析编辑

· 空间聚合与类型转换

提供整体细类合并、窗口专题类型码转换的工具

· 统计叠合检错

运用统计手段，获得以行政区为单位的多类叠合专题统计数据，通过逻辑分析，查除零星数据点误差。

· 空间随机像元点编辑

(七)成图输出

· 点状图输出
· 线状图输出
· 面状图输出
· 多图叠合输出

(八)辅助热键及功能键

F1 系统辅助说明
F2 系统数据说明
F3 显示行政代码文件 POSITION.DBF
F4 显示某文件的字段名
F5 打印某空间点阵文件
ESC 退出
PgDn 前后翻页
PgUp

四、总 结

·西重点林区实验区研究范围大，研究区域复杂，有关资料残缺不全，再处理工作量大。

·数据量大，结果数据便达 40M。数据处理周转不灵，超过微机之处理负荷，大大增加了数据库管理软件的设计难度。

·从提高森林火灾监测准确率的应用出发，自行开发研制一整套数据库管理软件系统，解决了小系统管理大数据的实际问题。

6. 林火遥感监测系统

易浩若　张彦忠　纪　平　何荔萍
（中国林业科学研究院资源信息研究所）

摘要　本文介绍林火遥感监测系统的结构、原理、功能和特点。经实时运行证明该系统测报林火的准确率和运行效率均较高。最后提出今后工作设想。

(一)引　言

森林火灾是一种全球性的自然灾害。其成因既有自然的，也有人为的，相当复杂，目前看来，要完全杜绝林火的发生是不可能的。因此，各国都重视利用包括遥感在内的各种手段来监测林火的发生，以期尽早发现，及时扑救，达到减少火灾损失的目的。

利用气象卫星(NOAA)监测林火具有监测范围广、时间分辨高、成本低等优点。自1987年大兴安岭特大火灾以来，我国的林业、气象等部门已开展了利用NOAA卫星监测林火的工作，并取得很多成果。同时，也存在一些不足。例如还限于测报异常热点，没有能力确认是否是林火；火点坐标不够准确；由于南方林区地形复杂、干扰因素多，报准率太低，等等。

针对这种状况，笔者以西南林区为实验区，研究了林火发生、蔓延的规律；调查和分析了该林区的火灾在时间和空间上的分布规律；对比分析历史上的林火与当时过顶的NOAA卫星资料，总结NOAA数据林火信息特征，研究林火信息提取技术[1]；开展与卫星同步的人工林火模拟实验，研究NOAA数据识别林火的方法。基于上述规律的总结和技术方法方面的研究进展，研制成功林火遥感监测系统软件。

(二)林火遥感监测系统的结构

该系统由19个软件模块组成，全部装在一个二级总控菜单下，呈树状结构，如图1。

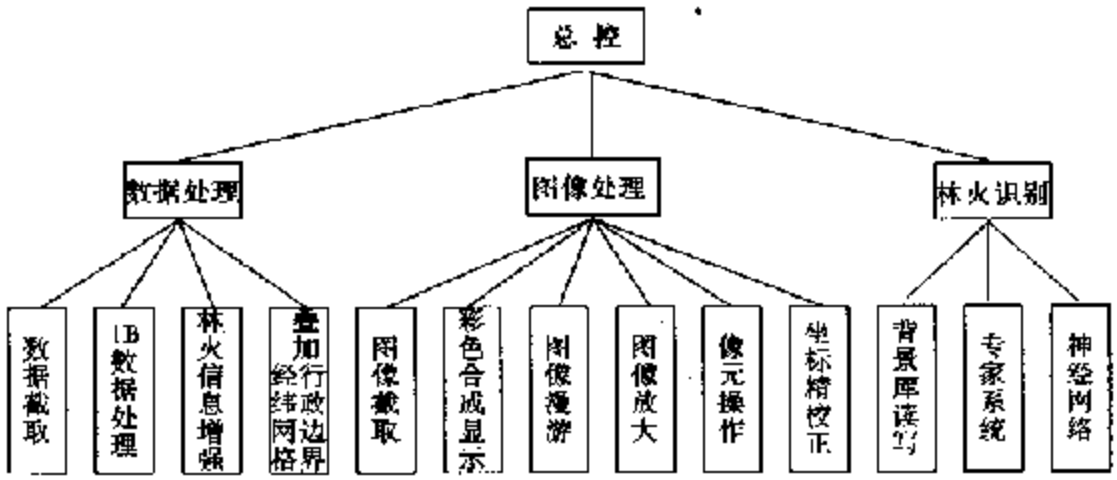


图1　林火遥感监测系统的结构

该系统由C、OPS83、DBASE等源程序模块生成。适用于386微机(需装有387协处理器)和486微机，需要640KB以上内存，VGA彩色显示卡及50MB硬盘空间。

(三)林火遥感监测系统的原理和功能

该系统的数据处理流程见图2。

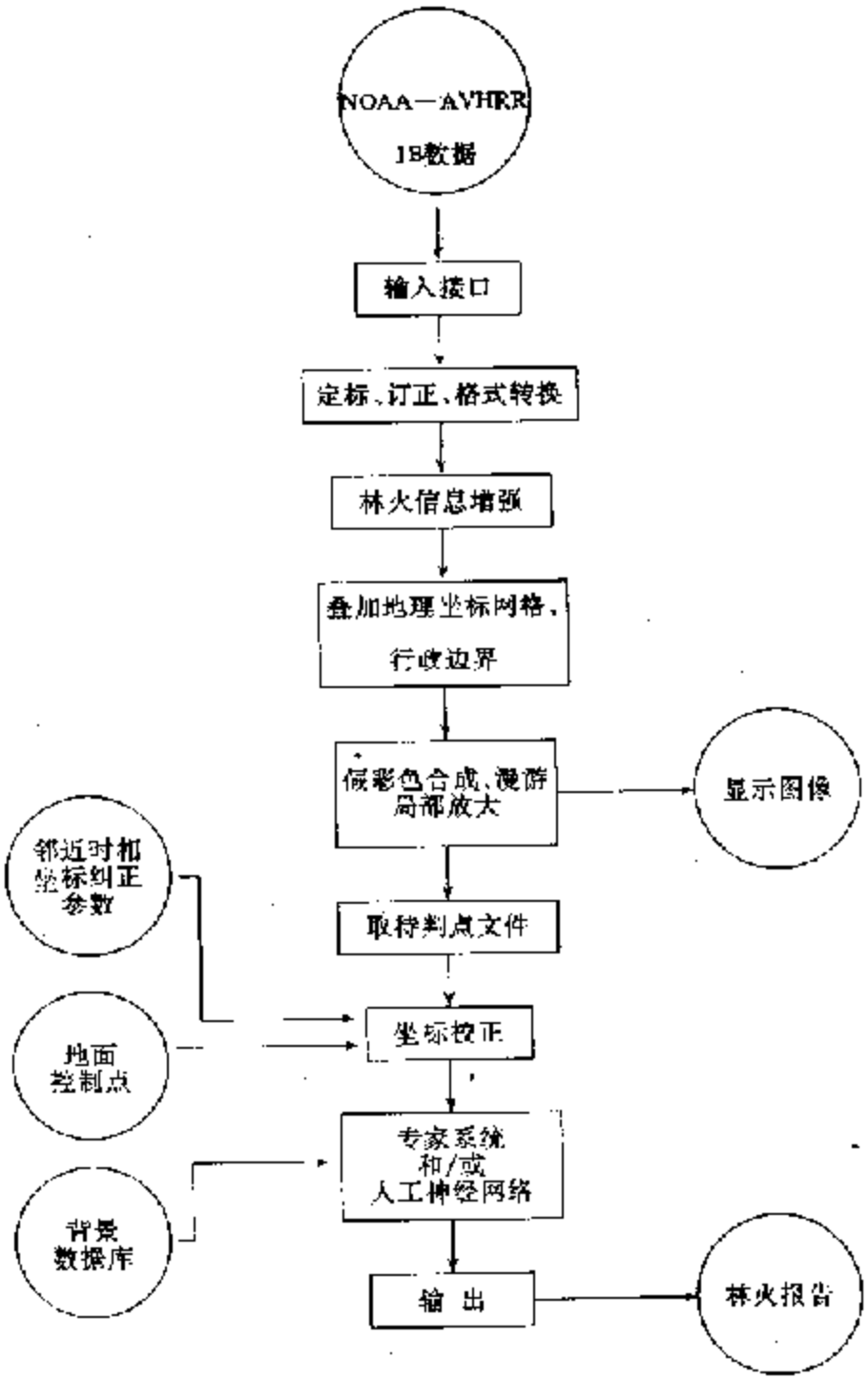


图2 林火遥感监测系统数据流程图

输入接口包括对NOAA-AVHRR 1B格式数据的不同介质的转储、浏览、截取。为适应多种用途的处理需要，该功能块在存取过程中不改变其格式，显示的1B数据为16进制格式。

定标、订正、格式转换模块是对1B数据作常规的处理，转换为分通道的二进制格式(即栅格形式，字长为8位)。其1,2通道为反照率，3、4、5通道为亮温值。

林火信息增强模块主要增强林火燃烧区、烟尘区、过火区等信息，可生成反映植被分布的垂直绿度指数图和反映地表温度分布的热度图[2,3]。

叠加地理坐标网格是利用1B数据每条描线上的地理坐标，计算生成以1°为间隔的地理坐标网格，再叠加在NOAA图像上。叠加行政边界是把已生成的1∶50万比例尺的云、贵、川等省行政边界文件叠加在NOAA图像上。

图像显示模块把用户指定的3个通道图像合成彩色图像。具备漫游、局部放大等功能。适用于各种VGA显示卡。

取待判点文件模块的功能是以人机交互方式从NOAA图像上选取异常高温点，形成盘文件，以备进一步判断。不用机器自动识别方式而用人机交互方式的好处是：人机交互方式更便于灵活选择监测范围；目视方法能快速排除零散小云团、熟悉区域内的地物等干扰点；能快速抓住重点区域内危险度高的火情。即人机交互方式更利于实时监测。

表1 典型林火报告及核实结果

序号	林火报告		核实结果			
	卫星过顶时间	坐标	林火时间	火情	过火面积(hm^2)	坐标
1 2 3	940424 6∶09 940424 17∶35 940425 5∶56	26°23′16″ N 101°12′52″ E	940424 早至940425 20∶26	云南松成过熟林火	15	✓
4 5 6	940426 17∶10 940427 16∶57 940428 5∶19	28°29′01″ N 100°50′17″ E	940426至940429晨	云杉冷杉林火	250	✓
7	940503 5∶59	24°21′ N 104°17′ E	940503	林火	10	✓
8	940504 17∶10	31°22′33″ N 100°09′40″ E	940504 11∶30至940505 20∶30	疏林地火	6	✓
9 10 11 12 13	950331 14∶33 950401 2∶56 950401 14∶22 950402 2∶44 950402 14∶10	27°07′34″ N 101°51′33″ E	950331至950402 17∶00	林火	10	✓
14 15 16 17	950402 2∶44 950402 14∶10 950403 2∶33 950403 13∶59	28°39′07″ N 101°41′44″ E	950402至950404	灌木林火	13	✓

坐标校正模块具备3项功能：取地面控制点1—3个，用平移法做坐标精纠正；取多个地面控制点(≥6)，用二次多项式做坐标精纠正；用邻近时相坐标纠正参数，纠正坐标。后者用于地

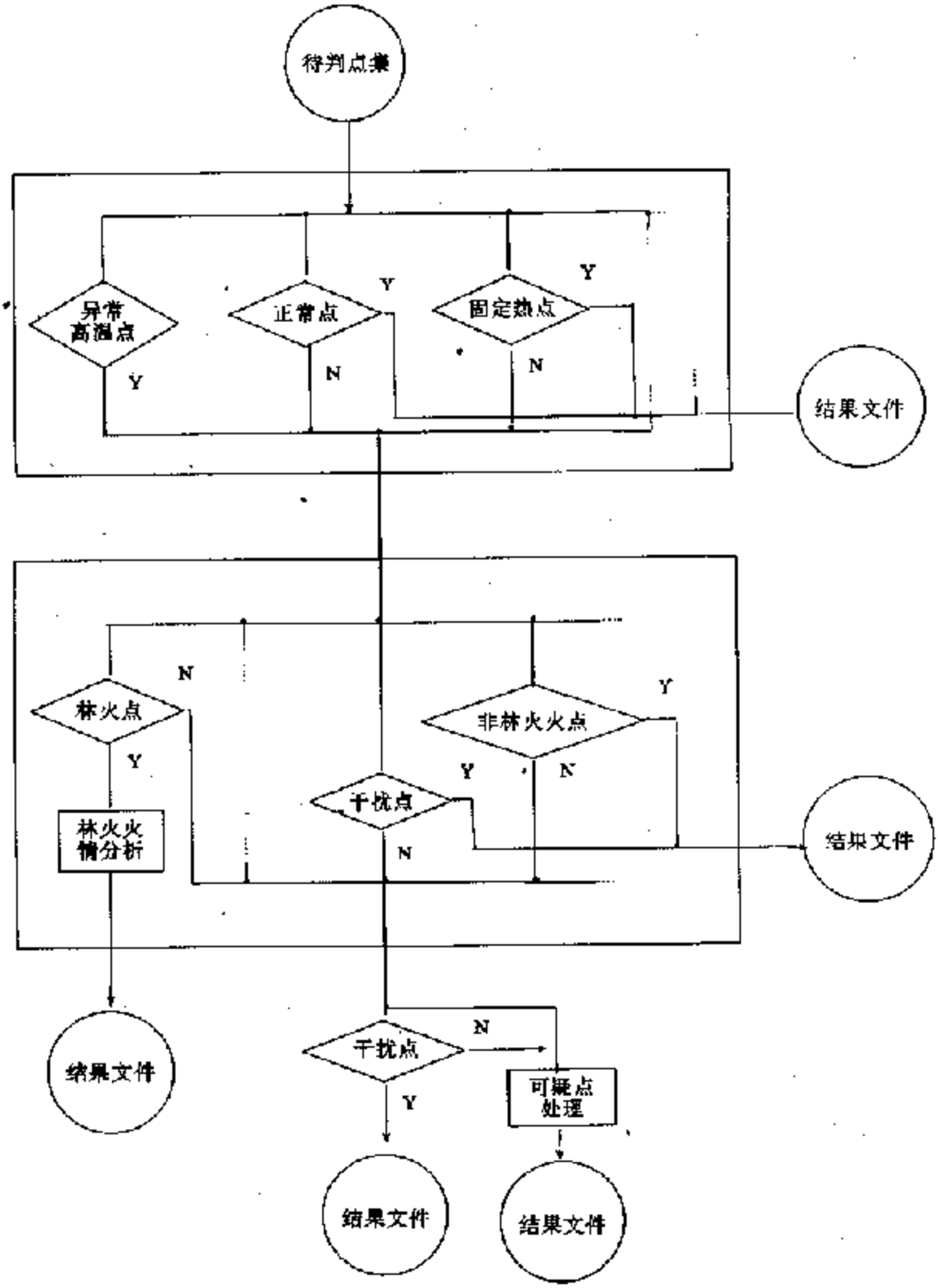


图 3　林火识别专家系统数据流程简图

面控制点被云覆盖时，纠正火点的坐标。

林火识别专家系统的数据处理流程见图 3。专家系统判断异常高温点是否为林火点的依据有事实和经验。事实主要存储在背景数据库中，它包括：森林分布、县级行政区划等栅格文件和森林火险等级、农林等县级统计数据库。经验主要包括：林火在时间上和空间上的分布规律，NOAA 林火信息特征，干扰信息的规律等。它把位于林地内的异常高温点判定为林火点，把远离林地的异常高温点判定为非林火点，对邻近林地的异常高温点，则要根据坐标偏离的程度、该地域火险等级、农牧活动等因素，推断其是林火的可能性；对所有的异常高温点都要分析地面现状与背景库中信息不一致的可能性及其对结论的影响，等等。

该模块主要是一个功能强的实时运行专家系统。为使整个系统具有实用意义，着重解决如下几个相关技术环节。①实现 NOAA 数据与背景库数据之间的坐标配准，并估算配准误差。经实例验证，误差小于 NOAA 图像的一个像元。②用背库数据辅助火点的识别，其算法是以理论上与火点对应的背景数据的坐标为中心，以误差值为半径，游动地与背景数据求逻辑与，综合分析逻辑与的结果，得出判断。③实现专家系统与 C 语言模块的连接。④实现专家系统快速读写数据库。

输出模块实现林火报告的生成和常年热点的登录等功能。

(四)实时监测试运行

1994 年 4—5 月间使用该系统对西南林区森林火灾进行实验性监测运行，向林业部和云、贵、川等省发出林火报告多次。报出的林火由有关省、县森林防火部门实地调查核实，并反馈回来。典型林火报告及核实结果见表 1。

经试运行验证，该系统实时监测林火是成功的，能准确识别林火，确定其位置，在卫星过顶后 1—2 小时内得出云贵川 3 省的林火监测报告，与国内现有监测林火的业务运行系统比较，该系统具备如下特点：①排除非林火干扰，识别林火。②林火定位精度高，达到位置误差小于 1 个像元。多次林火报告的核实结果表明，坐标误差小于 1′。③有发现云层覆盖下的林火的能力。④有识别远离星下点位置的林火的能力。后两点提高了监测林火的 NOAA 数据的可用率，从而提高了实时监测的可靠性。

(五)展望

该系统已达到实用化要求，有实时监测云南、四川林火的能力。从技术上讲适用于监测全国各地的林火。当监测区域变动时，只要建立起新的监测地区的背景数据库并对专家系统中描述西南林火特点的部分进行相应修改，就可以适用于那个地区。

使用该系统监测全国范围的林火尚需解决两个问题。其一，建立全国范围 1∶50 万比例尺的以森林分布图和县级行政区划图为主的背景数据库，用于支持对林火的识别。其二，建立至少二个地理位置分布合理的 NOAA 地面接收站。我国地域辽阔，主要林区的经度差达 40°以上。至少使用二个接收站，才能有效地覆盖主要林区。

系统的使用性能的改善和用户界面的完善有待今后推广应用中逐步解决。

参 考 文 献

[1] 易浩若，何彼萍，妃平，张彦忠. 利用 NOAA/AVHRR 资料监测南方林区森林火灾的研究. 国土资源遥感，1995(1)

[2] 肖乾广，陈维英. 用气象卫星的绿度资料对全国植被生态环境进行动态监测研究. 中国遥感进展. 万国学术出版社，1991

[3] 黄敬峰，桑长青，金杰. 天山北坡天然草场光谱植被指数的特征. 遥感技术与应用，1994. 9(1)

7. 西南林区火灾报警系统
——人工神经元网络专家系统的研究

纪 平　　易浩若　　何筱萍
（中国林业科学研究院资源信息研究所）

摘要　本文分析了西南林区火灾特性。提出了用人工神经元网络模拟林火模型的思想，并在利用 NOAA/AVHRR 数据的基础上给出了网络的拓扑结构及林火数学模型。构造了基于人工神经元网络的专家系统。给出了知识获取算法及推理机制。并在两年的西南林火实时监测中，检验了该系统的有效性和正确性，得到了部级和省级防火指挥部门的首肯及好评。

(一)前言

森林火灾是一种全球性的突发性灾害，火灾发生原因既有人为的，也有自然的，因此利用各种有效的技术手段来进行林火监测，以期尽早发现林火，迅速组织扑救便能将损失降低到最小，这是一项具有重要意义的工作。为此在国家"八五"攻关项目中专门研究如何将遥感、地理信息系统、专家系统相结合，实现对西南地区林火的早期报警技术。

用遥感方法监测森林火灾的研究工作始于 60 年代末，自 80 年代初开始美国、加拿大等国家亦先后开展了利用气象卫星探测森林火灾的实验和研究。近年来我国也已开始用气象卫星测报林火。西南地区的森林火灾发生率高、分布广，但由其地势多为高山陡坡、林田交错、林相不齐，加上地面非林火高温点干扰严重，使得用气象卫星测报林火的技术难度很大。很多省(自治区)的测报结果不能令人满意，报准率普遍较低。大多是报异常热点待查。针对这种情况，我们在西南林区火灾特性研究的基础上建立了基于人工神经元网络的专家系统，完成了西南林区火灾报警实时运行系统，并在实时监测中进行了验证。

(二)基于人工神经元网络林火监测专家系统的研究

与传统的专家系统比较，基于人工神经元网络的专家系统具有知识自动获取、信息分布或存贮、并行处理、高度的容错性和鲁棒性等优点，它的主要结构仍然是获取知识形成知识库和利用推理机制实现推理，得到结果两部分。

1. 知识获取

(1)西南林区火灾特点　由于人工神经元网络专家系统具有知识自动获取特性，因此更加需要深入研究西南林区的火灾特性，以便充分描述林火，获取内容充实的知识库。

通过对西南各省多年林火资料的统计和分析，其火灾主要特点如下：①林火的时间分布呈较强规律性。西南地区多为干湿季节明显的气候，旱季地被物干燥、空气湿度小、林木干枯，有成火条件。农民的季节性生产、生活活动为主要的林火直接成因。以西南某省为例，林火次数

分时统计见表1。该省林火主要集中在每年3—5月份，不同省(自治区)高峰期在月份上略有差异，其时间分布的规律性相同。②林火发生率高，小面积火灾占绝大多数。西南林区农户、山林、农田相互交错，生产、生活用火导致林火发生频繁，分布广泛。而沟谷纵横、地形破碎，可阻隔和延缓林火的蔓延，不易酿成大面积灾害。以西南某省为例，林火次数分级统计见表2。该省林火绝大多数延烧面积不足100hm²，即不足NOAA图像的一个像元。通常这种林火可持续燃烧几个至几十小时，瞬时燃烧面积(由燃烧带长度×燃烧带宽度折算)一般不大于0.01km²，即不大于百分之一像元。这是监测西南林火难度大的原因之一。③地表火为主，低、中度林火占多数，林火主要可分为树冠火、地表火、地下火，依火燃烧强度和火焰高度又可分为轻度、低度、中度、高度、强度火等[1]。经调查历史资料，西南林火大多数是地表火和伴有个别树冠火的地表火，只有少数陡坡上山火等易形成树冠火，地下火也少见。经典型林地实地踏察、量测后分析[2]。低度、中度火占所发生林火的大多数，地表火的热辐射受到树冠的阻挡，是监测西南林火难度大的另一原因。④飞播人工林易发火灾。西南飞播造林面积大，相连成片，林相整齐，落叶层厚，火灾多，尤其是飞播中、幼龄林火灾发生率高，其以地表火为主，常伴有较多树冠火，蔓延快，火强度高，较易监测。

表1　西南某省森林火灾次数分时统计表

月份 / 年代	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	计
1988	88	326	333	540	313	9	0	0	0	0	0	19	1728
1989	92	186	360	577	314	7	0	0	0	0	0	12	1550

表2　西南某省森林火灾次数分级统计表

单位，hm²

火灾分级 / 年代	森林火警 (<1)	一般火灾 (1—100)	重大火灾 (100—1000)	特大火灾 (<1000)	计
1988	933	767	28	0	1728
1989	1013	533	4	0	1550

(2)林火模拟实验　为获得林火燃烧数据，先后开展了2组共7次林火模拟实验。详见表3。根据森林类型、地型(主要是坡度)、地被、地表可燃物载量及其含水率等条件，设计点火方式，以期在卫星过顶时刻火烧面积和火强度达到实验计划要求。实验中用IRT—1200D手持式快速红外测温仪，测量火焰、过火地表、烟尘及背景林木和背景地表的温度。火烧时过顶的卫星数据与火烧现场实况的对照，是充实林火监测方法，确定林火监测系统参数的重要依据。

表 3　林火模拟实验情况

序　号	林 地 描 述	火烧面积	与卫星同步
1	云南松天然林	10	✓
2	阔叶林	20	✓
3	针阔混交＋纳林地一草地	100	✓
4	阔叶林	0.1 多块	
5	云南松为主的天然林	0.1	
6	云南松为主的天然林	15	✓
7	云南松林一疏林地	30	✓

注，1—4：四川省凉山州，1993 年 2 月。5—7：云南省红河州，1993 年 12 月

(3)知识获取算法　传统的专家系统其知识获取是知识工程师通过专家的语言描述而获取的，这种方式由于专家描述的不准确性和知识工程师理解上的误差使获得的知识不可避免地存在着不完整性。本文采用 BP 学习算法[3]学习火灾知识，并用三层 BP 网络构造知识库，利用这种方法仅需要历史上的火灾实例，便可获取火灾知识。

假设火灾实例为：

$$\{(X,Y)\,|X=(x_1,x_2\cdots,x_m),Y=(y)\}$$

$$X\in R^m,Y\in R^1$$

向量 X 是对火灾样本点的数学描述，也即是 BP 网络的输入向量。向量 Y 是对 X 的判别，$y=1$ 表明有火，$y=0$ 为无火。同时 Y 也是网络的输出。

所需要的是构造网络实现 $R^m\to R^1$ 的映射，这是一个高度的非线性映射，这一映射主要是通过网络的隐节点个数，层数及作用函数的类型来实现的。经过反复的计算实验，确定了该网络的隐层为 1 层，隐节点 4 个，作用函数为 H 型函数。

$$f(x)=\frac{e^x-e^{-x}}{e^x+e^{-x}}$$

则知识获取算法如下：

1°　$o_i=x_i\quad(i=1,\cdots,m)$

$o_j=f(u_j)\quad(j=1,\cdots,4)$

其中　$u_j=\sum_{i=1}^{m}w_{ij}o_i+b_j$

上式中，w_{ij}是输入层第 i 个神经元与隐层第 j 个神经元间的连接权，即为我们构造该网络实现知识存储的关键。o_i 是输入层第 i 个神经元的输出，o_j 为隐层第 j 个神经元的输出，b_i 是偏置量。

2°　$o_1=f(u_1)$

其中　$u_1=\sum_{j=1}^{4}w_1o_i+b_1$

w_{1j}是输出层与隐层第 i 个神经元之间的连接权，o_1 是输出层的输出。

3°　对任一组(X,Y)有误差函数：

$$E=\|Y-O\|^2=(y_1-o_1)^2$$

由　$\Delta w_{ij}=\eta o_j r_1$

$$\Delta b_i=\eta r_1$$

$$r_1=f'(u_1)(y_1-o_1)$$

$$\Delta W_{ij}=\eta o_i r_j$$

$$\Delta b_j=\eta r_j$$

$$r_j=f'(u_j)\cdot(w_{1j}r_1)$$

其中 $\eta\ll 1$

4° 对 Δw_{1j}，Δw_{ij}作修正[6]

$$\Delta w_{1j}(n+1)=\eta o_i r_1+\alpha\Delta w_{1j}(n)$$

$$\Delta w_{ij}(n+1)=\eta o_i r_j+\alpha\Delta w_{ij}(n)$$

其中 n 为迭代次数 $\alpha<1$

应用该算法，重复学习所有实例(X,Y)，直到收敛，$E\leqslant\varepsilon$，即完成知识获取。

2. 推理机制

该专家系统采用正向推理策略，其实现过程如下：

1° 对任意的火灾待判点 $X=(x_1,\cdots,x_m)$

计算 $o_j=f(\sum_{i=1}^{m}w_{ij}x_i+b_j)$ $(j=1,\cdots,4)$

2° 计算 $y_1=f(\sum_{i=1}^{4}w_{1i}o_i+b_1)$

$$y=\begin{cases}1 & \text{当 } y_1\geqslant 0.5 \text{ 时}\\ 0 & \text{当 } y_1<0.5 \text{ 时}\end{cases}$$

3. 样本构成

向量 $X=(x_1,\cdots,x_m)$是对火灾所做的数学描述，其中向量 x 的构成及 m 的取值是准确描述林火的关键。只有精确地描述林火才能进行有效的学习训练，并在实时监测中作出正确的判断。现有的 NOAA/AVHRR 数据共有 5 个通道值，CH_1 和 CH_2 主要反映植被情况，CH_3 是辐射温度，CH_4 和 CH_5 代表地表温度。其每个通道的一个像元值，是对 1.1×1.1(km²)的地面所做的光谱特性描述。由于分辨率低，这种描述是很综合性的，对其进行纹理分析及提取，意义不大。大量计算实验表明，其统计特性很能说明问题。

假设 V 表示通道值，U 表示均值，σ 表示方差，P 表示概率，$CH_{21}=CH_2/CH_1$

取窗口大小为 5×5，林火 $X=(x_1,\cdots,x_m)$为：

$$x_1=V_{CH_1}$$

$$x_2=U_{CH_{21}}=\sum_{k=1}^{25}V_{CH_{21}}P_{CH_{21}}$$

$$x_3=\sigma_{CH_{21}}=\sum_{k=1}^{25}(V_{CH_{21}}-U_{CH_{21}})^2P_{CH_{21}}$$

$$x_4=U_{CH_3}=\sum_{k=1}^{25}V_{CH_3}P_{CH_3}$$

$$x_5=\sigma_{CH_3}=\sum_{k=1}^{25}(V_{CH_3}-U_{CH_3})^2P_{CH_3}$$

$$x_6=U_{CH_4}=\sum_{k=1}^{25}V_{CH_4}P_{CH_4}$$

$$x_1 = \sigma_{CH_4} = \sum_{k=1}^{38}(V_{CH_4} - U_{CH_4})^2 P_{CH_4}$$

4. 网络训练

从历史数据中，取了 5 幅(640×480)NOAA 卫星影像，在对其进行了常规数据处理之后，从中选出了 38 个森林火点，53 个非火点，共 91 个点作为网络训练的样本点。再按样本构成法生成林火样本集(X)，取 e=0.001，将该样本集用于知识获取算法，直到收敛，完成网络训练即生成基于人工神经网络的林火监测专家系统。

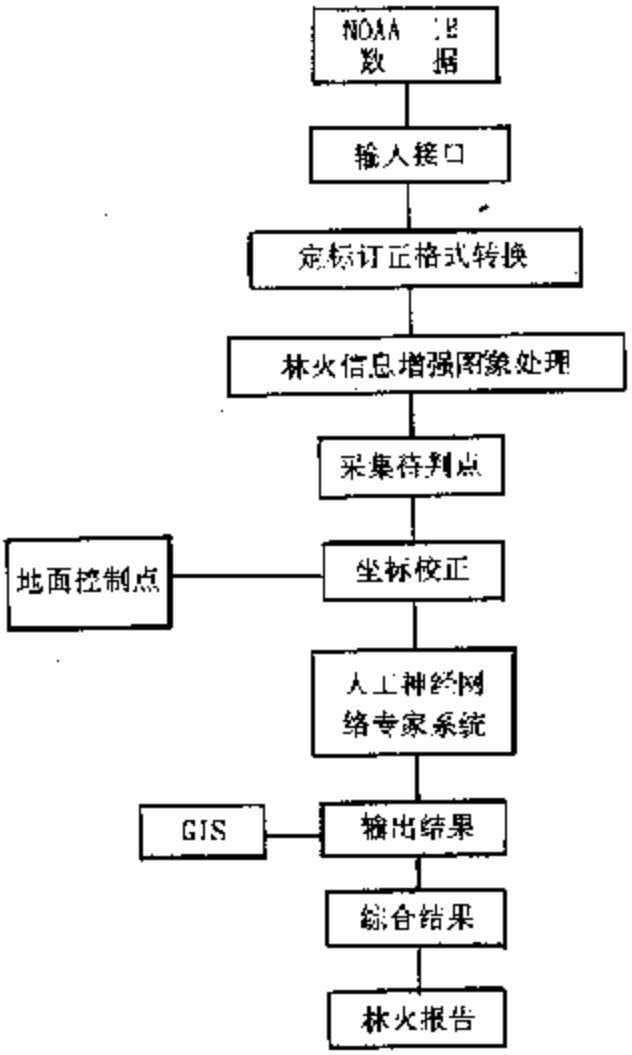


图 1 林火报警系统框图

(三) 西南林火报警实时运行系统

为了方便实际监测使用，我们将数据接收处理过程，专家系统分析判读过程及给出林火报告过程集成为西南林火报警实时运行系统。这一系统的运行过程如下：

首先，将接收到的卫星信号经地面设备预处理，生成 1B 标准格式数据文件，对其进行定标，太阳天顶角校正，格式转换等处理形成通用格式文件。再经适当的图像增强处理，增强图像中林火的可视性，形成利于林火分析的图像。其次，在图像上选取待判点(即有可能是林火的点)根据地面控制点坐标，利用漂移和投影算法，计算出待判点修正后的坐标，生成待判点集。第三，将这个待判点集在 GIS 支持下用人工神经网络专家系统进行判断，得到综合判读报告。流程框图见图 1。

(四)西南林火实时监测

在 1994 年 4 月 1 日—1994 年 5 月 17 日和 1995 年 3 月 27 日—1995 年 4 月 28 日，我们应用该系统对我国西南林区分别进行了为期 1 个多月的林火实时监测。监测中使用的数据分别来自 NOAA—11(1994)和 NOAA—14(1995)，这两颗卫星每天两次覆盖西南地区，因此，每天要处理 2 轨数据，得到林火报告，并向有关部门发出报告。这两年典型的林火报告记录汇于表 4 及表 5。

表 4　林火统计结果

地面情况	像元个数	判为林火	误判	判为非林火
林火	16	16	0	0
农用火	5	0	0	5
CH_4 高值干扰点	2	0	0	2
常年热点	7	0	0	7
非林火	9	0	0	9

表 5　典型林火报告及核实结果

序号	时间	火点位置	核实面积(hm^2)	林火情况
1	940426—940429	28°29′01″N 100°51′17″E	250	云冷杉林火
2	940504—940505	31°22′33″N 100°09′40″E	5	森林地火
3	950331—950402	27°07′34″N 101°51′33″E	10	林火
4	950402—950404	28°39′07″N 101°41′44″E	13	灌木林火

从反馈的核实信息可以看出该系统，①林火定位精度较高，达到位置误差小于 1 个像元。多次林火报告的核实结果表明，坐标误差小于 1′；②可以报告出亚像元林火。两次实时监测中测报出的最少林火面积小于 $1hm^2$；③可以排除农用火等非林火的干扰，正确识别林火；④可以发现薄云覆盖下的林火；⑤能够识别远离星下点位置的林火。

在两年的实时监测中，共接收处理了 117 轨可用数据，向有关部门报告林火 168 场次，报准率达 80%，得到了有关部门的好评，是“他们所知道的（林火报警）系统中精度最高的”，“并且能够监测从燃烧到蔓延到扑火全过程”。由此证明，该系统对西南林区的火灾监测及报警是有效的和成功的。

五、结论

本文在充分分析西南地区森林火灾特点进行多组林火模拟实验的基础上，提出了西南林火基于 AVHRR 数据的数学描述 $X=(x_1,\cdots,x_7)$，建立了基于人工神经网络的西南林火监测专家系统，给出了网络的拓扑结构为 7 个输入，1 个输出，单隐层 4 个隐节点，及指出了隐节点作用函数为 H 型函数，同时给出了该系统监测流程框图，并在两年的实时监测中验证了该系统的有效性。

从两年的实时监测及反馈核实信息看，该系统已达到实用化水平，不仅具有较高的林火报准率，同时亦能较准确地监测到公顷级面积的林火，具有发现小于 $1hm^2$ 面积的林火的能力。从技术角度讲，该系统可以监测全国的林火，需要补充做的工作是：针对所监测地区建立所监测地区 1∶50 万比例尺的以森林分布图和县级行政区划图为主的背景数据库。

参 考 文 献

[1] 郑焕德．森林火灾分类研究．森林防火，1989(2)

[2] 王正非等．应用线性方程确定林火强度．林业科学，1983(4)

[3] D. E. Rumelhart and J. L. McClelland, Parallel Distributed Processing, Vol. 1—Vol. 2. MIT Press.1986

[4] 纪平等．人工神经网络识别 NOAA 数据异常高温点的研究．重大自然灾害遥感监测与评估研究进展，1993

8. 基于微机 VGA 卡的遥感数据彩色合成显示

张彦忠　　易浩若　　纪　平
（中国林业科学研究院资源信息研究所）

摘要　本文提出了一个新算法，用于解决遥感数据在微机 VGA 卡上的彩色合成显示，与 24—bit 真彩色卡显示的三波段合成图像效果近似，使硬件成本极低。该方法适用于教学和小型研究项目。这一方法在"八五"攻关"西南林区森林火监测"专题 NOAA 数据的显示处理部分中得到了良好的应用。

在遥感数字图像处理领域内，图像良好的彩色显示是最基本的，不论对数字图像进行什么样的处理，最终都要显示出来变成可见的图像。这一应用通常由具有高效能的外设和较大内存的计算机完成。用于这一任务的最佳硬件是 24—bit 真彩色图像卡，它具有三个 8—bit 的彩色位面，每一基本彩色由 8—bit 即一个字来表示，这样，它就可同时显示 2^{24}种色彩，然而这种高性能的硬件价格较高，普及率也不高，对于一些小型研究项目来说无能力购买，而带有 VGA 卡的微型计算机却已相当普及。微机具有 8—bit 位面的彩色显示，具有能从 2^{18}(262,144)种彩色中同时选择 256 种颜色显示的能力，对于人眼的识别基本上能够满足。

(一) 彩色合成图像的显示

为了得到良好的彩色合成图像的显示效果，在软件设计中应考虑像元值是如何改变的，同时要注意 8—bit 位面显示设备的特点。

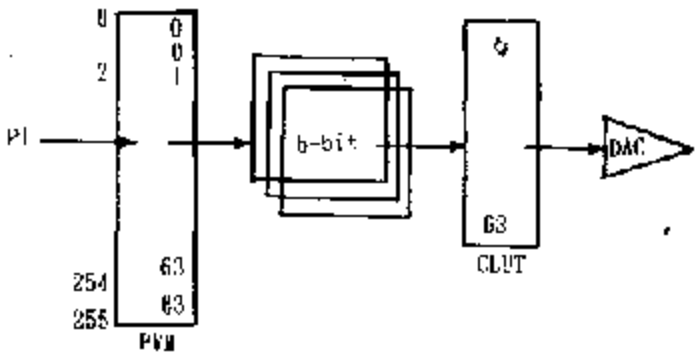


图 1　对于 6—bit 显示设备的像元值映射
PI—像元亮度值　PVM—像元亮度值映射函数
CLUT—彩色查询表　DAC—数字模拟转换器

当显示图像时，最重要的操作是如何利用能使图像具有最佳视觉效果的颜色配合即色调。例如，对每个像元的亮度值运用称为"像元值映射"的函数使图像即不太暗也不太亮。该函数可以把具有 0 到 255 范围内的样本值变换到同一范围之内，如同所存贮的图像和显示设备都是 8—bit 的，更经常的是，"像元值映射"将使亮度值范围减少。这正是一种典型的低分辨率显示设备的特点。像元值映射可以采用线性，对数或指数调整以及直方图技术（如直方图均衡化）。图 1 是把 0 到 255 映射到 0—63 的一种 6—bit 显示设备。图 2 是完全彩色显示，与图 1 是截然不同的，它的 8—bit 数据，经过 PVM 仍然是 8—bit，故可同时显示 256^3

种彩色。

目前完全彩色刷新缓冲器价格昂贵，而 8—bit 显示设备更普及，主要是因为它价格低，目前 VGA(Video Graphic Array)即视频图形阵列具有 8—bit 位面和 6—bit-DAC(Digital to Analay Conventer，数字模拟变换器)。本文的遥感图像显示和编制的软件都是针对 DAC 的，其彩色合成过程如图 3。

DAC 把数字彩色信息转换成模拟的红、绿、蓝信号，送给显示器。DAC 提供一张

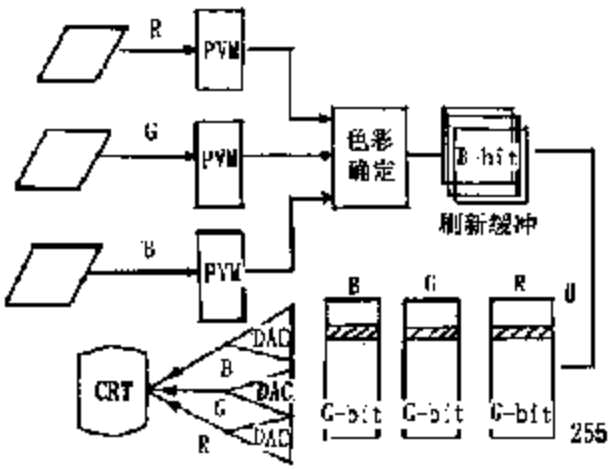


图 3　VGA 和彩色合成图像生成流程

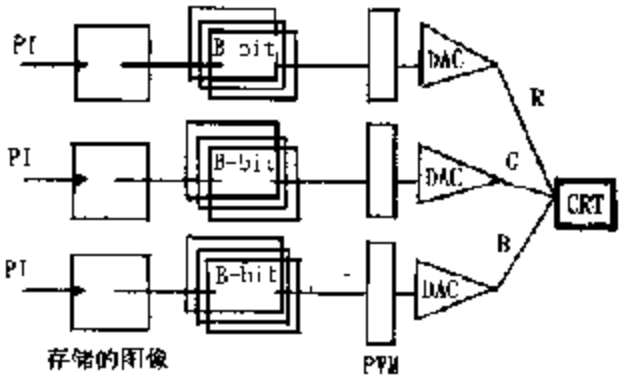


图 2　真彩色显示原理图

彩色查找表，查找表把 8—bit 彩色值，通过三路 DAC 变换成三路模拟彩色信号，每一路模拟信号具有 6 位分辨率，即 $2^6=64$ 级分辨率。图 4 显示的 DAC 的操作，从 VGA 送来的 8—bit 彩色值作为索引，用于选择 DAC 彩色查询表的 256 个彩色寄存器中的一个寄存器，每个寄存器有 18 位长，红色、绿色、蓝色分量各 6 位，因为红绿蓝每种彩色信号可以取 64 种不同值，因此具有 64(Red) * 64(Green) * 64(Blue) = 262144 种彩色，对于单色显示器，仅仅使用一个颜色信号，所以它具有 64 灰级。

(二) 软件实现

对于遥感图像来说，彩色合成需要三个波段，即红、绿、蓝。软件实现的关键是把三个波段的数值映射成 DAC 的彩色查询表。三维亮度矩阵定义了一个 RGB 立方体，每一个轴表示一个基本色彩，每个方块表示是一种彩色的合成的亮度(图 5)。

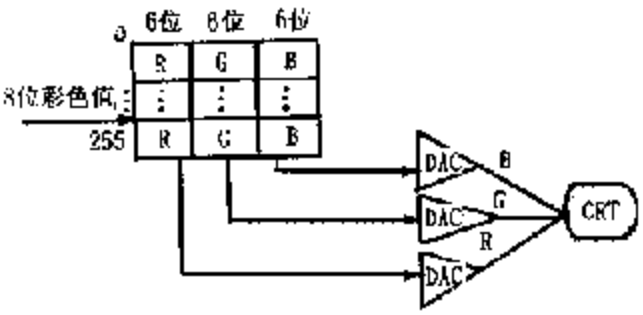


图 4　视频 DAC 与彩色查询表

使用 252 分割的原因是，能够划分的最大数目是 256，这 256 是 CLUT256 个入口和 8—bit 像元刷新缓冲给定的。用三个彩色枪确定颜色的最简单方法是 3—bit($2^3=8$)做为绿，剩下的 2—bit($2^2=4$)做为蓝，而这种不一致的轴划分是不可使用的。为了获得恰当数量的划分，在本算法中，就要有少量的颜色(256 种中的)不能用于图像的显示。当不用一种颜色时，即用 255 种颜色，其因子是 5 和 51，不可能产生三维分布上的划分。当留

下两种颜色用于其它目的(比如,字符的显示)时,254 的因子是 127 和 2,对于 253,其因子是 11 和 23。由此可知,最佳的划分选择是 252,它既能在每一个波段上得到平衡数量的划分,同时又可尽可能多地应用彩色(252 种),252 对应着 3 个因子:6,7 和 6。两个轴划分 6 段,另一个信息量较大的轴划分为 7 段,由于人眼对绿色较敏感,故本算法中把绿波段划分为 7 段,这在实际应用中已得到了验证。

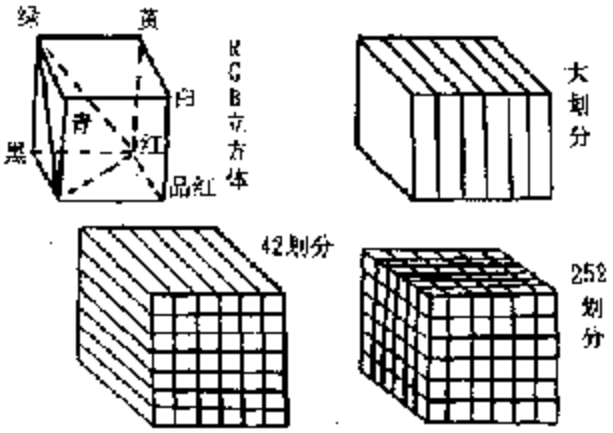


图 5 RGB 彩色立方体和 252 种划分示意图

算法步骤如下:

(1) 输入三个波段即红,绿,蓝,对其进行统计,包括最大值,最大值和直方图分布:

```
for(图像中的每一个像元)
      {
        read (RED,GREEN,BLUE);
      i=Tr[RED];
      j=Tg[GREEN];
      k=Tb[BLUE];
      dm[j,j,k]=da[i,j,k]+1;
}
```

这里 Tr[],Tg[],Tb[]为任意像元值映射函数。

(2) 对每一波段做拉伸增强处理;

(3) 建立 DAC 中的彩色查询表 CLUT;

```
for (i=0,i<6;i+1)
  for (j=0,j<7;j+1)
    for (k=0,k<6;k+1)
      {
          c=42*i+j*6+k;
          rgb[c][0]=i*10;
          rgb[c][1]=j*12;
          rgb[c][2]=k*12;
}
```

(4) 利用查询表显示图像:

```
for 图像中的每个像元
  {
      read(RED),GREEN,BLUE);
      Color=42*Tr[RED]+6*Tg
```

[GREEN]+Tb[BLUE];
显示 color;
}

(三)应用

以上算法利用 C 语言编制，可在带有 VGA 卡的 IBM 系列兼容机上执行，在 Compaq 系列机上也移植成功，本算法在程序实现中，直接对显示缓冲进行操作，提高了运行显示速度。另外还扩展了漫游显示，局部窗口放大等功能，在"八五"攻关课题"西南林火监测"子专题中得到了良好的应用。

另外，在实际应用中，为了快速显示和保存显示结果，还开发了生成 RGB 彩色文件的程序，它可以使三波段数据变成一波段用于彩色显示，这还相对节省了磁盘空间。以该算法为基础，其它一些功能还在开发之中。

9. 地理信息系统支持下的卫星监测林火方法

何薇萍

（中国林业科学研究院资源信息研究所）

摘要 本文对建立GIS支持的卫星林火监测系统进行了分析。内容包括：①监测区GIS的形成；②NOAA/AVHRR图像叠加经纬度网格；③GIS与NOAA/AVHRR图像的复合。1994年、1995年春天，我们对我国西南林区森林火灾进行了一个多月的防火期实时监测，证明了该系统具有林火分辨率高和定位准确的特点，是一个较为理想的林火监测系统。

一、引　言

森林火灾是森林的主要灾害之一。它不仅直接造成森林资源的减少，而且严重污染环境，破坏生态平衡，给人类社会造成巨大的灾难。自1987年大兴安岭特大森林火灾之后，森林防火工作得到了各级党政领导的高度重视，使森林火灾的发生次数和损失大幅度下降，然而森林防火工作依然面临着严峻的考验，据有关资料介绍，随着社会经济和生产力的不断发展，林区开发森林公园、进山旅游、开矿副业人员增多，及高火险天气的增多，未来全球的森林火灾将呈上升趋势。所以对林火这种突发性事件，如何采用科学的手段，及早发现火灾减少损失，仍然是人们非常关注的问题。

随着卫星遥感技术的不断发展，目前人们已广泛运用卫星遥感技术进行森林火灾方面的研究。如：1981年加拿大运用卫星遥感数据对其西北地区的全部火灾进行了调查[1]。NOAA极轨气象卫星是由美国海洋大气局运行的第三代气象观测卫星。由于其时间分辨率高且一轨数据的覆盖面广，很适于对森林火灾进行大面积的实时监测。但由于是利用NOAA/AVHRR CH_3(3.55—3.93)的红外谱段对高温极为敏感的特性来监测森林火灾的，因此，森林火灾反应在卫星图像上，经常淹没在大量的异常高温点或域(如：城镇中工厂、居民点用火、砖瓦窑烧火等)中，对卫星监测森林火灾造成了很大的难度。如果对监测区提取必要的地面信息，如：森林资源(包括：针叶林、阔叶林、针阔混交林、竹林、疏林、灌木灌丛林、草场、经济林)的分布情况及城镇用地、旅游区、水域等空间信息和属性信息，形成监测区的地理信息系统，以支持卫星图像对森林火灾的监测，将能够快速准确地处理异常高温点，提高林火的分辨能力，确定林火的具体地理位置。本文以我国西南地区(包括四川、云南、贵州三省)为监测区，对GIS支持的卫星林火监测系统的建立进行了分析。

二、方　法

(一)支持森林火灾监测系统的 GIS 的建立

1. GIS 数据结构

①矢量数据：监测区行政边界

常年热点

②栅格数据：森林分布图

水系图

交通图

行政区划图(县)

③数据库：

属性数据库：县级代码数据

统计数据库：森林资源统计资料

土地利用统计资料

2. GIS 数据的采集及处理

依据 NOAA/AVHRR 影像星下点的空间分辨率为 1.1km×1.1km，确定采集密度。在 1∶50万地图上，按 2mm 距离(实际距离 1km)采集北纬 21°—34°、东经 97°—110°范围内的矢量数据，按栅格大小 500m×500m 的标准采集栅格数据。数据库以县为基本单位，收集属性数据和统计数据，进行输入、编辑、拼接、叠加、建库、属性合并，建立地理信息系统 GIS。

(二)NOAA/AVHRR 图像叠加经纬度网格

NOAA/AVHRR 地面覆盖宽度约为 2700km，一轨卫星数据需要借助于经纬网格才能直观地了解监测区概况。程序实现时，按经纬网格以 1°为间隔，依据 AVHRR 数据提供的地理坐标文件，逐行在已知坐标的 51 个点之间，采用二分法逐步逼近，得到一组经度或纬度值及行列号坐标，按行列号经排序后，叠加在 NOAA/AVHRR 图像上。

(三)GIS 与 NOAA/AVHRR 图像的复合

1. 叠加监测区的行政边界

依据 AVHRR 数据提供的地理坐标文件，对特征曲线(监测区行政边界线)进行八邻域搜索逐点定位。在进行坐标纠准后，用插入排序法按行列号两个关键字排序，将行政边界叠加在 NOAA/AVHRR 图像上。以界定和提取监测区内的异常热点。

2. 复合森林分布图等地面信息

从背景信息库提取各异常点以 N×N 为窗口的相应地面信息，和现有的常年热点信息，辅助识别其是否为林火，再分析其所含林分的类型及主要林分相连部分的大小，最终确定其是否为林火。

3. 复合行政区划县情况

根据火点在图像上的行列号坐标，从背景信息中确定其行政归属地(县)。如果必要可按照

代码进行数据查询，提取属性数据及统计数据，如：火险等级、土地利用情况、森林资源情况等信息，结合多时像分析，对该火灾进行跟踪监测。

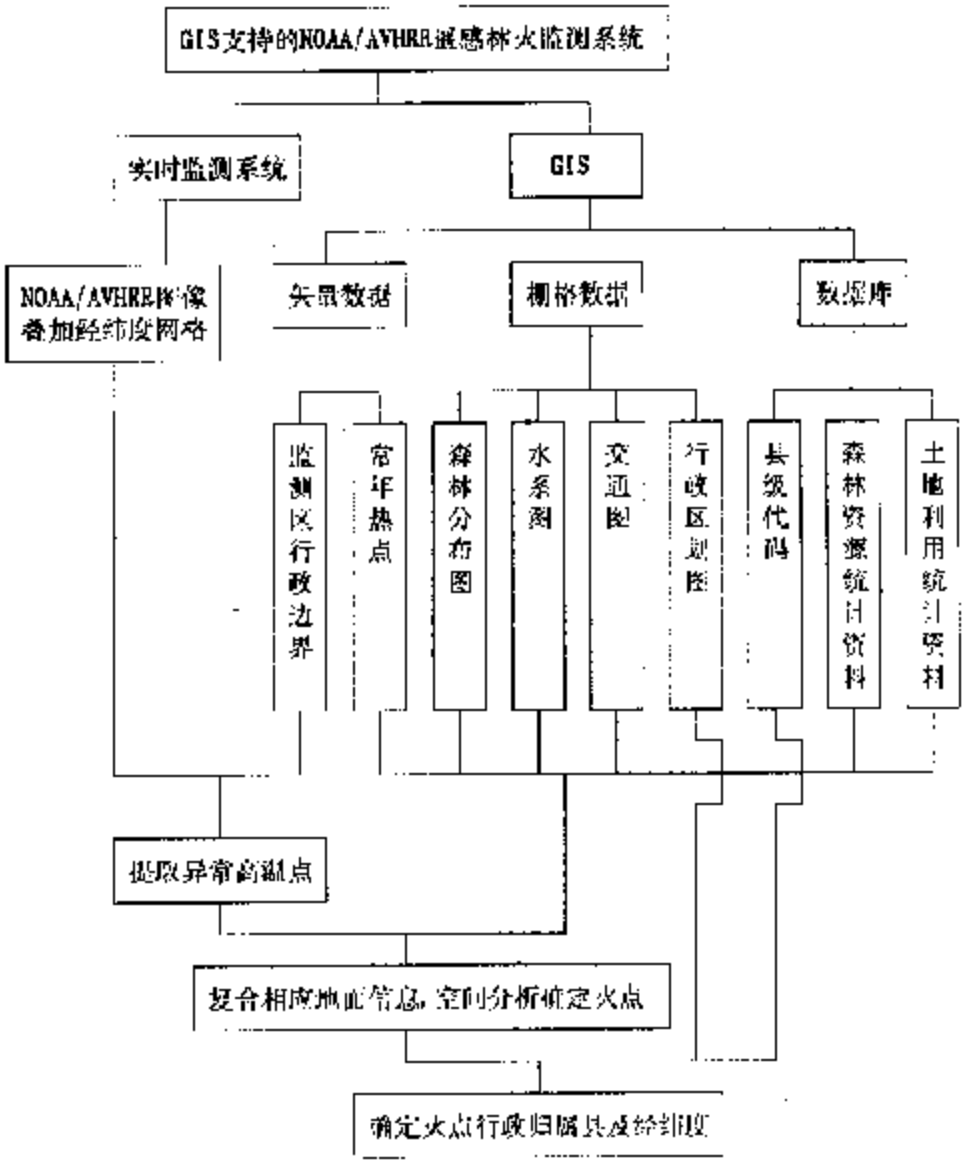


图 1　GIS 支持的卫星林火监测系统流程图

三、应　　用

1994、1995 年春季我们在防火期，利用 GIS 支持的 NOAA/AVHRR 数据对我国西南林区（包括云、贵、川三省）进行了森林火灾发生情况实时监测。接收每日卫星资料北纬（21°—34°范围）经计算机快速处理，发现林火立即向有关林区发布林火报告。经过一个多月的运行，证明了 GIS 支持的卫星林火监测系统，具有林火分辨率高和火点定位精确等特点，效果较为理想。

彩版 Ⅳ 上有 1400×2048 中漫游显示的 480×640 窗口的显示图片。图片中淡红色曲线为监测区的行政边界线；红色"＋"表示火点的位置；图左上角为该火点的放大显示。这场林火发

生在云南省华坪县的北纬 101°12′52″，东经 26°23′46″的云南松成过熟林中，过火面积 15hm²，见彩版Ⅳ。

四、讨　论

NOAA/AVHRR CH3 的红外谱段对高温极为敏感，林火实时监测系统，对 CH3 上反映出来的异常高温点（或域），提取行政边界及森林分布图，其比例尺选取 1∶50 万。由于 NOAA/AVHRR 的空间分辨率星下点为 1.1km×1.1km，这样从提供的地面信息及存贮的信息量两方面，满足快速反映的需要，足以识别林火及非林火。为解决预测林火发展、变化的趋势及扑救工作的决策问题，进行多时像分析，可从 1∶5 万的林相图中提取更加丰富的地面信息。

GIS 数据的准确程度直接影响着林火监测系统的可行性。随着时间的推移，监测区的地面信息将会发生变化，如：林业生产中的营林和采伐的森林类型的改变、农林交界的变化、森林旅游区的开发及砖瓦窑厂的建立与废弃、新型工厂的建成等常年热点的变化都影响着 GIS 数据的准确性。只有不断更新的 GIS，才能有力地支持卫星林火监测系统。

参 考 文 献

[1] Larkie D. 袁凯先译. 北美林业遥感实际应用的现状和前景. 遥感技术动态，1989，(4)

10. 林火识别专家系统的研制与验证

易浩若　何彼萍　纪　平　张彦忠
（中国林业科学研究院资源信息研究所）

摘要　本文介绍一个林火识别专家系统的研制和验证。该系统用框架、产生式规则和自定义过程表示知识，知识库采用模块化层次结构，动态生成综合数据库，采用匹配、继承和正向推理，具备运行跟踪和结论解释。

该系统用 OPS 83 和 C 语言实现，经 1994 年和 1995 年两次春季实时监测实践验证，监测结果准确，时效性强，获满意的效果。

一、引　言

我国每年发生森林火灾近万次。林火是一种突发性灾害，蔓延快，毁林重。及早发现林火是减少损失的关键。我国森林大多分布在地形复杂、交通不便的边远山区，用常规方法测报林火的难度很大。本世纪 60 年代以来，国内外在用航天、航空遥感方法监测林火方面做了许多试验和研究。近几年利用气象卫星(NOAA 卫星)监测林火已得到广泛实用。当前国内几家主要的林火遥感监测业务系统的监测流程均为先由遥感图像处理专家对 NOAA－AVHRR 数据进行处理，得到可视图像，进行目视解译，报告地面温度异常点；再由森林防火指挥者依据所报地理坐标在地图上逐一查找，作出判断；有时还需到野外进行现场核实。林火报准率的高低取决于目视解译者的经验、专业水平和森林防火指挥者对该地区林火规律的了解程度，因此，报准率偏低，且因人员因素波动，监测流程不易掌握。

目前对森林火灾的研究尚处于定性范围，个别的定量研究也很粗放，对反映林火高温信息的 NOAA－AVHRR 中红外通道(3 通道)数据的定量反演研究尚无成功的报道。因此，作者把提高遥感监测林火报准率的研究重点确定为实现森林火灾遥感实时监测专家系统。

二、森林火灾遥感监测过程的描述和分析

气象卫星各通道传感器接收的信号，经卫星发送、地面接收设备预处理，生成 1B 标准格式数据文件，将其进行定标、太阳天顶角校正、格式转换等处理形成通用格式文件。再经适当的增强处理后，以可视图像方式供人工目视解译，得出地面温度异常点的报告。图像处理和目视解译实现：①对不同地域、不同时相选取适合的参数，进行增强处理，突出温度异常点、林火烟尘、过火林区等林火信息，形成利于分析林火的图像。②林火的目视解译需辨认图像上的噪声干扰点，判断大面积云层反射干扰和连片地表反射干扰，排除工业用火的高温点，确定大片无林地区位置以便排除该范围内的高温点等等。③逐一综合各异常高温点的分布、像元值的大

小、所含像元个数和对应地域林火时空分布规律及特点，把认定为林火的点逐一列入地面温度异常点报告中。

森林防火部门接到上述报告后，根据所报地理坐标，凭多年森林防火指挥经验对所报地面温度异常点逐一进行分析判断，即实现：①根据地形图，分析该点所处地形条件及其发生林火的可能性。②根据森林分布图（或林相图），确定该点处于林地内或外，及其是林火的可能性。③根据行政区划及其火险等级，分析该点是林火的可能性及危害程度。④综合上述各种信息，根据林火时空规律及相关经验，做出该点是否是林火的结论。

上述过程得出的结论应保证：①准确率高，减少漏报和误报。②时效性好，为减少火灾损失，为快速扑救争得时间。

用专家系统解决遥感监测林火问题有明显的适用性和优势：

(1)遥感图像处理方法的研究和应用技术已趋成熟，但现有图像处理方法在进一步改善林火监测精度上受到限制。NOAA－AVHRR 常规处理方法是林火监测的基础。经其处理后的5个通道的值及其组合（如归一化差值植被指数 NVDI＝(CH2－CH1)/(CH2＋CH1)）是监测林火的主要信息。由于卫星传感器特性的漂移较大及随使用年限增加而非线性衰减，由于不同地域、不同时相地物反射（发射）的差别很大，很难利用传统程序的方法，通过确定和改进一个有限项数的域值表，来提高林火报准率。作者把传统程序的图像处理方法和专家系统的经验的方法相结合，试图提高林火报准率。

(2)目视解译是根据专家经验和辅助信息对图像进行分析判断的思维过程，适宜用一个产生式系统来实现。并且作者将这一研究作为遥感图像处理方法由目视解译向计算机识别发展的一种尝试。

(3)在利用地面信息辅助林火识别时，由于 NOAA 数据坐标纠正的误差和 NOAA 数据与地面信息配准的误差，由于地面信息的更新滞后于地面实际变化，造成判断林火的不确定性。

(4)森林防火专家对林火时空规律、非林火干扰的分布规律、林火成因的形成条件等知识的描述是模糊的、非量化的。分析判断过程是共性知识和个性知识交互作用的过程，是推理和计算交替的过程。

三、森林火灾遥感实时监测专家系统

1. 系统构成

该系统由知识库、推理与控制、综合数据库和跟踪与解释4部分组成，见图1。

(1)专家系统输入的驱动数据是把 NOAA 数据经过常规图像处理方法处理和林火信息增强后生成的待判断点集。它包括用图像处理方法已判断为林火的点、可能是林火的点、不能判定是非林火的点等。

(2)知识库主要由产生式规则和元规则组成。多条功能相同的规则构成一个规则组。多个功能紧密相关的规则组构成一个知识子模块。多个子模块构成一个模块。子模块、模块的组成与特定的元规则对应。子模块、模块间的关系是分层的或并行的。由各知识模块构成的知识库呈树状层次结构。知识库中模块、子模块见图2。

(3)综合数据库存放判断林火的地面信息和分析判断方法及经验。主要包括两方面知识：其一是动态和准动态地读取地理信息系统(GIS)提供的森林分布、土地利用、行政区划、火险

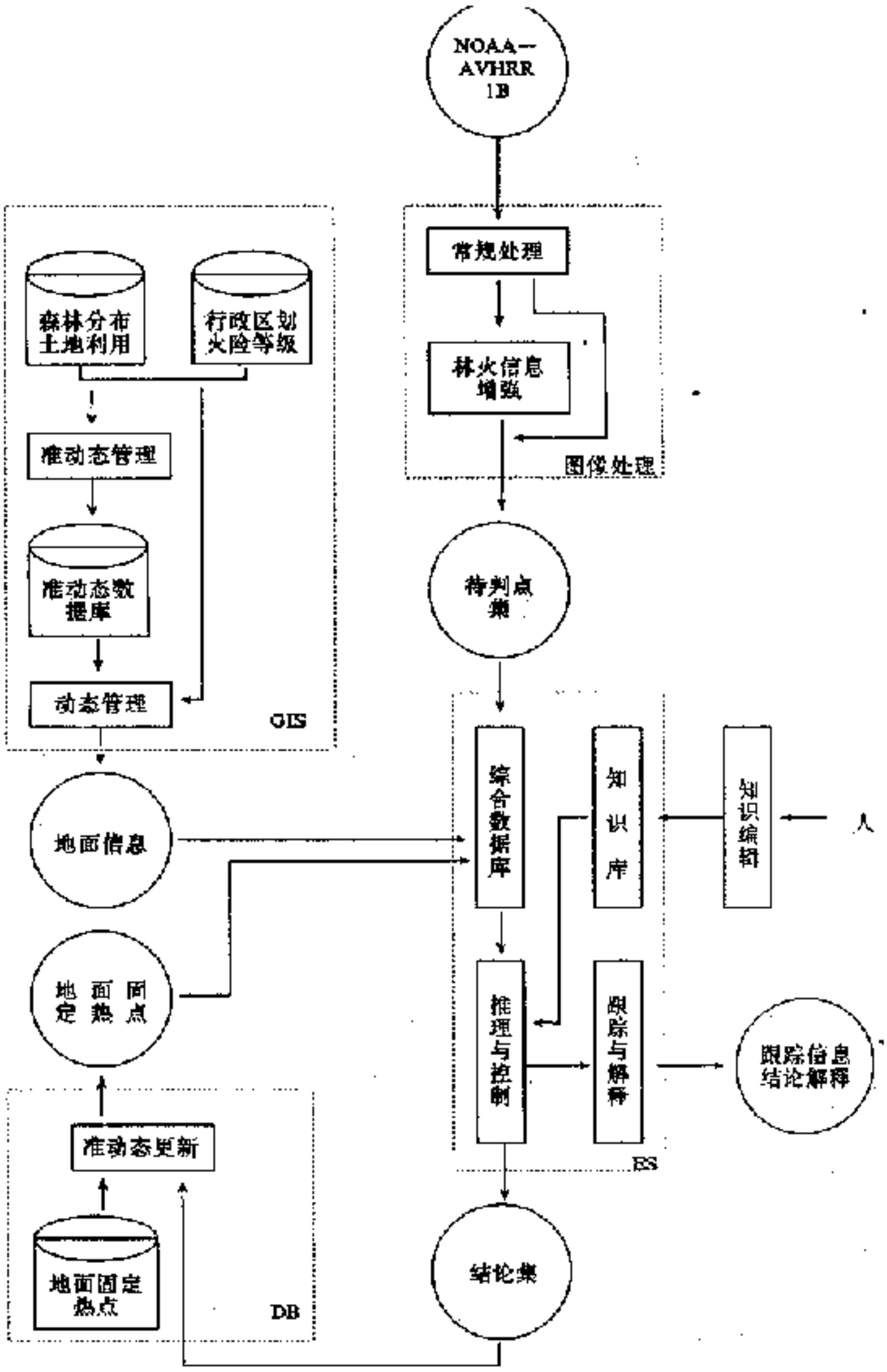


图 1　林火遥感实时监测专家系统结构

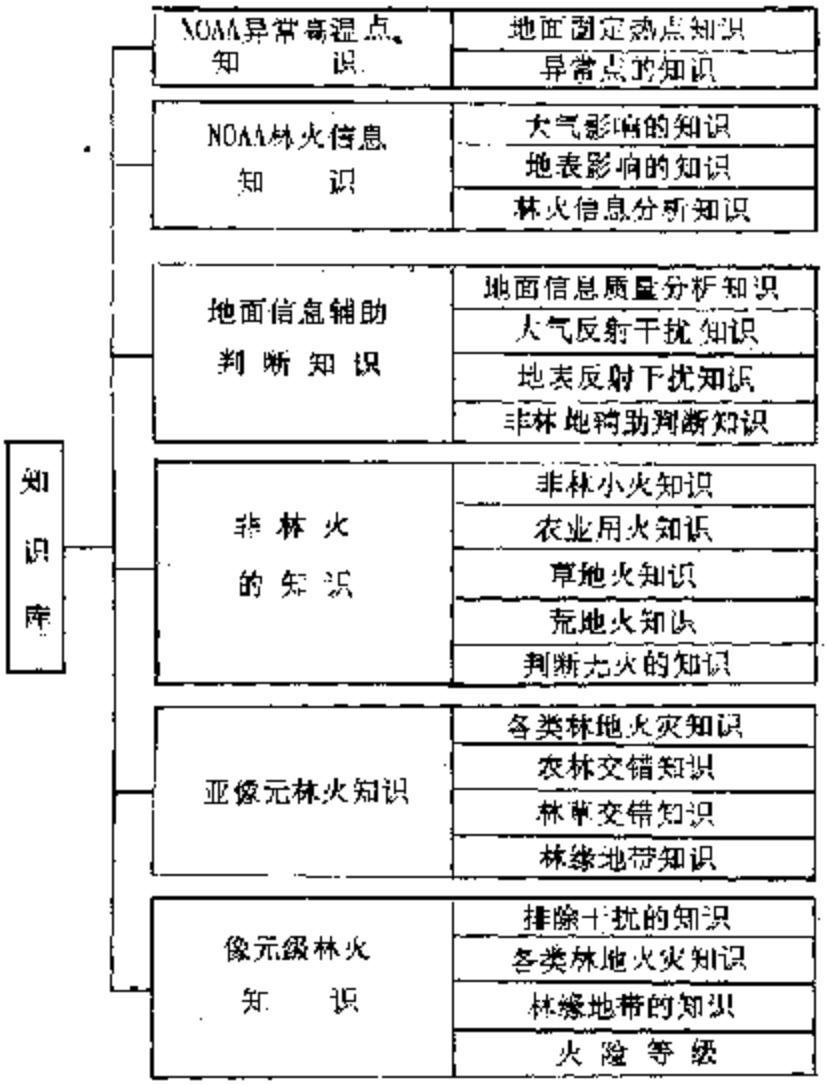


图 2 知识库中子模块

等级等地面信息及其分析判断方法方面的知识。其二是由连续监测运行的结果不断反馈而得以准动态更新的地面固定热点及其分析判断方面的知识。

(4)推理与控制实现对领域专家分析判断林火的思维过程的模拟，并且运行时间必须分秒必争，包括辅助处理、前期处理、结果输出和人工干预时间在内运行耗时不能多于 102min(这是 NOAA 数据最小获取周期)。

(5)为增强系统透明度和结论的可理解性，由屏幕或打印机显示系统运行的跟踪信息和对结论的解释信息。

(6)该系统是一个实时系统，在其知识表示方法、知识库管理策略、推理与控制等构造专家系统的技术方法及其结构等诸方面都突出其时效性。

2. 知识的表示

用框架，规则和自定义过程表示知识。用框架主要表示事实和对象：地面固定热点、待判断像元点、农用火点、草地火点、林火点等。它们的定义包含了分析待判点，排除各种干扰，确定林火点的知识，并把待判点定义为父框架，把其各种中间结论、最终结论点定义为各级子框架，构

成框架网络。其实质是，用该框架网络构成了问题求解的状态空间，并用于控制寻找目标状态的求解过程。其中待判点定义为：

```
框架      待判点(序号【整型】
                图像中位置【数组】
                地理坐标【数组】
                5个通道5×5域值【数组】
                地面信息(嵌套框架)
                ⋮
                )
```

地面固定热点定义为：

```
框架      固定热点(序号【  】
                地理坐标【  】
                5个通道点值【  】
                时间特征值【  】
                ⋮
                )
```

用规则主要表示领域专家识别林火的知识。这些知识既有过程性的，又有判断性的。例如推断地面固定热点的规则：

```
规则 TH11 if   待判点的点值为"高"；
          and  其坐标与某固定热点的距离为"近"；
          then 该点的标识=100,CF=x。
```

用自定义过程主要表示两类知识。其一是表示一些不确定性的知识。如上述规则中的两点距离为"近"，即根据待判点在扫描线上的序号、坐标纠正误差等因素，把两者坐标差值依据N个连续不等距区间划分，以描述其邻近程度。这一类过程还有某值为"高"、在某区域"内"等。其二是表示一些过程性知识和理论。如C语言程序实现的算法等。这两类过程放置于框架的槽和规则的前提、结论之中，实现推理和计算相互交替地求解。对推理机来讲，自定义过程又是一种辅助推理。

用元规则表示如何使用目标知识的知识，并与知识库的模块化结构相互对应。对每一待判点因其已知条件不同，仅使用特定的某个或某几个知识模块或子模块。因而，元规则优化了知识使用，提高了效率。

综合数据库的管理策略与知识库相同。对一待判点，根据其已知条件先动态地生成相应的数据子集，再调入内存。不调入无关数据，避免全空间搜索，节省内存，提高运行效率。

3. 推理与控制

匹配、继承和正向推理相结合实现系统推理。模拟领域专家分析判断林火的思路，构造一个基于框架网络的由待判点集到结论集的主推理控制流，用于控制问题求解的进行。当某状态N时，有框架I的侧面和槽值满足规则K，使规则K被激活，并执行：①改变指定框架的侧面和槽值，方法是：赋值、对其表达式或函数求值、调用其过程、其嵌套框架的例化等；②导致另一规则的激活；③指定下一状态在目标状态空间中的位置。即控制匹配序列的走向和实现跳跃，实质是对每一待判点，依其条件动态地形成其目标状态子空间。④执行输入、输出、运算等传统程

序功能。该规则K的执行最终导致推理由状态N过渡到状态N+1。并不断重复上述过程，直至到达目标状态(结论集)。

冲突裁决原则依优先级顺序是：①待判点序号(为适应操作员的习惯思维方式)；②最特殊者优先(为尽快得出具体结论)；③每条规则对同一数据只允许执行一次(避免死循环)。

子框架继承其父框架的槽、侧面值，也是一种推理方式，存在于待判点求解过程中。

4. 不确定性处理方法

该系统针对导致不确定性的主要因素，进行分析描述，并确定相应的算法。

(1)前提的准确度 $A(z)$：描述前提 z 与实际情况一致的把握程度。用于处理NOAA数据坐标纠正误差及其与地面信息配准的误差时，根据在晴天时误差呈正态分布，且受卫星轨道位置影响，分6级量化；根据阴天时误差仅受轨道参数影响，分4级量化。用于处理地面信息可能发生的动态变化时，根据这种变化与地面信息质量有关，分4级量化。

(2)前提的符合度 $C(z)$：描述前提 z 与实际情况符合的程度。根据对各影响因素的分析，分4级量化。

(3)前提的置信度 $CF(z)$：由 $A(z)$ 和 $C(z)$ 确定。单一前提的置信度 $CF(zi)=A(zi)\times C(zi)$

多前提的置信度 $CF(z)=\min\{A(z1),\cdots,A(zn)\}$

(4)规则的准确度 $A(g)$：描述规则能概括实际情况的准确程度，或不发生例外的程度。主要由领域专家语气词分6级量化。

(5)规则的符合度 $C(g)$：描述规则的适用程度，与领域专家商定，分4级量化。

(6)规则的置信度 $CF(g)=A(g)*C(g)$

(7)结论的置信度 $CF(j)$：描述结论的可靠程度，其值越高，该结论越可信。

$$CF(j)=CF(z)*CF(g)$$

5. 系统的实现

用专家系统开发工具OPS 83和C语言实现了上述系统。其知识库有6个知识模块，由22个子模块组成，包含84个规则组，共计400多条规则。自定义过程16个。定义框架29个。系统的进一步优化可由知识的细化和扩充实现，一般只需用编辑工具调整、添加相应规则组中的规则就可以完成。

为弥补OPS83在运算、输入输出等方面的缺点和限制，该系统装入多个C语言程序模块，实现了定性分析和定量处理相结合，并提高了运行效率。

专家系统使用的地面辅助信息有：由GIS生成的地面信息栅格文件，由DBASE Ⅲ生成的县级统计数据库，及地面固定热点、地面坐标校正点等正文格式文件。共9个文件，计20MB数据。由C语言模块进行动态、准动态读写。

四、运行结果及其分析

该系统在1994年春和1995年春森林防火期内分别进行了50天和30天连续实时监测运行，并与原有的气象卫星林火监测业务系统背对背地并行工作。监测结果经野外现场核实后，把典型火例列于表1。

表 1　两种系统实时监测森林火灾结果对比

序号	林火 时间（年·月·日）	林火 位置	林火 过火面积（hm²）	森林火灾遥感实时监测专家系统 早期测报	森林火灾遥感实时监测专家系统 全程监测	森林火灾遥感实时监测专家系统 漏报	原有气象卫星林火监测业务系统 早期测报	原有气象卫星林火监测业务系统 全程监测	原有气象卫星林火监测业务系统 漏报
1	1994.4.7	99°35′9″ 24°46′10″	0.6	✓	✓				✓
2	1994.4.16 4.23	120°14′24″ 48°8′20″	50000	✓	✓		✓	✓	
3	1994.4.24 —4.25	101°12′47″ 26°23′40″	15	✓	✓		✓	✓	
4	1994.4.26 4.29	100°50′17″ 28°29′1″	250	✓	✓		✓		
5	1994.5.1	103°44′ 24°8′	0.27	✓					✓
6	1994.5.2	100°50′ 24°31′	72	✓					✓
7	1994.5.4 —5.5	100°9′40″ 31°22′33″	6.4	✓	✓				✓
8	1994.5.17	107°2′ 30°2′	56.7	✓	✓		✓		

对运行结果分析如下：

(1)对大面积林火的监测能力略优于原有系统，见表 1 之②、③、④、⑥、⑧。

(2)对亚像元林火、小林火的监测能力优于原有系统，见表 1 之①、⑤、⑦。

(3)对相同对象的监测，该系统耗时不足原有系统的 1/10，为贯彻森林防火“打早，打小、打了”的方针抢得宝贵的时间。

(4)该系统完全取代了原有业务系统的图像处理、目视解译、人工查地图、人工分析判断的林火监测过程，林火报准率提高且较稳定。把森林防火指挥者从繁忙的分析判断林火的脑力劳动中解放出来，使之能够集中精力进行扑救决策和指挥。

该系统获国家和有关省森林防火部门的好评，并于 1994 年冬季防火期开始投入实用运行。

参 考 文 献

[1] 黄可鸣. 专家系统. 东南大学出版社，1991

[2] 航浦钢等. 中国人工智能 92. 浙江大学出版社，1992

[3] 钱文骅等. 专家系统开发工具 —— OPS83. 上海交通大学出版社，1988

11. 西南林区火灾预报方法研究

赵宪文
（中国林业科学研究院资源信息研究所）

摘要 本文从森林火灾成灾的三个基本因子（火源、环境和可燃物）入手，在宏观上对西南地区森林火灾预报方法进行了探讨。

本研究以数学方法为依托，从新的视角进行了研究，力图使其更符合实际，如，在预测林火发生方面，考虑到人为火是发生森林火灾的主要原因，有很大的随机性，因而采用了自回归模型和马尔克夫随机过程，在分析成灾环境时，采用了与天、地、生相关分析的方法。特别在可燃物的定量估测方面，用航天遥感数据，提出一套新的推算方法，为在区域的尺度上估测森林火灾给出了有效的、定量的方法，从而提高了可信度。

中国是森林火灾多发和损失严重的国家，1987 年的大兴安岭特大森林火灾震惊世界。根据 1950—1989 年全国森林火灾资料分析，40 年共发生森林火灾 63 万多起，总过火面积 3500 多万公顷，烧毁林木 9.9 亿 m^3，价值 1500 亿元（人民币）。平均每年发生森林火灾 15800 多起；平均每年森林过火面积近 90 万 hm^2，平均每年森林火灾面积占全国森林总覆盖率的 8‰ 左右，为世界平均水平的 8 倍；平均每 10 万 hm^2 森林面积年发生森林火灾次数为 12.7 起；每 10 万 hm^2 森林平均年过火面积为 721.7hm^2；全国平均每次森林火灾的面积为 56hm^2。如以每公顷损失 20m^3 来进行估算，林木共损失 7 亿 m^3[1]。大兴安岭 1950—1976 年森林火灾过火面积就相当于同期造林保存面积，几十年的心血毁于一旦。可见，森林火灾是我国林业发展所面临的重要问题之一。与其它灾种不同，火灾起因大多为人为所致，所以，森林火灾的防患，就更为可能，而其中很重要的一个问题就是火灾的预报。在这方面的研究不乏其例。如，用可燃物和气象要素来预测火险（居恩德 1993）；据厄尔尼诺—南方涛动异常来预测火灾（王述洋 1993），以及用火灾自身发生规律来预报（李勇 1992）等。

本研究从宏观的角度对形成森林火灾三要素的预测方法进行了探讨，同时引入遥感方法，使可燃物宏观预测成为可能，变得可信。

众所周知，森林火灾的发生必须同时具备火源、可燃物和可燃环境 3 个条件，缺一不可，这是传统的燃烧环理论。本研究在上述 3 个方面，则有别于传统观念：在引发火灾的火源研究中侧重于人为引发火灾随机因素的考虑；在可燃物预测中，采用遥感的方法进行了定量的估算；在可燃环境分析中则着眼于天、地、生大环境的分析，而不是拘泥于小环境的预测。以此，试图找出预报大区域森林火灾的易行、可信的方法。

选择西南地区的云南为试验区，因为这里是中国第二大林区，同时又是火灾多发省。

一、森林火灾发生（火源）的预测

在西南林区，人为活动极为频繁，90% 的森林火灾都是人为所致。实践表明，人口集居处发

生火灾次数(以及成灾次数)较多,但火灾危险性小;火灾发生的情况比较复杂,往往与客观分析偏差较大。如:火险级高,但人们警惕性高,火灾却没有发生,反之,在火险级并不高的时候,由于麻痹火灾发生了。它反映出人为因素与环境的无规性。在此我们力图通过变量本身的变化反映其动态规律,用森林火灾历史资料建立模型。充分考虑到人为活动的无序性。

(一) 马尔科夫决策理论的应用

1. 概念与方法

用马氏理论进行预测时,首先要建立转移概率矩阵。转移概率是一族时间上齐次的马尔科夫转移律,当系统处于状态 i,则无论系统的历史如何,下次转移到状态 j 的概率为 $P(j/i)$,记为 P_{ij}。转移概率矩阵的各行之和均为1,并且它是由不大于1的非负元素组成。设已知转移概率矩阵,$P=\lfloor P_{ij}\rfloor$,当前火灾概率初始分布为 P_0,则下一年火灾分布为 $P_1=P_0P$,再下一年火灾发生概率为 $P_2=P_1P$,依此类推,可求出今后若干年火灾发生概率:$P_n=P_{n-1}\cdot P=P_{n-2}\cdot P^2=\cdots=P_0P^n$。

从上述公式看到,预测在很大程度上取决于初始分布 P_0。但事实上,经过一定时间转移后,由一个状态向下一个状态的转移向量的改变是很小的,即不论初始分布如何,当发生足够多次转移后,概率向量将趋于一个唯一固定的概率向量,被称之为"固定概率向量",这点可由马氏长变程性质加以保证。

2. 试算

以云南省1951—1979年林火资料进行试算,据29年火灾资料,将其用火灾损失面积划为3个等级,即:

A. 100001—500000hm²

B. 10001—100000hm²

C. ≤10000hm²

文献[1]指出火灾频数受人为活动影响大,所以本次用成灾面积来划分火灾等级。

表1 1951—1979年林火被成灾面积划分表

年代	1951	1952	1953	1954	1955	1956
等级	C	B	B	A	A	A
年代	1957	1958	1959	1960	1961	1962
等级	A	A	B	A	A	A
年代	1963	1964	1965	1966	1967	1968
等级	A	C	C	C	C	C
年代	1969	1970	1971	1972	1973	1974
等级	B	C	C	B	C	B
年代	1975	1976	1977	1978	1979	
等级	B	C	C	C	A	

由上述资料得出转移概率矩阵如下:

$$P=\begin{matrix}\begin{matrix}A & B & C\end{matrix}\\ \begin{bmatrix}7/9 & 1/9 & 1/9\\ 2/7 & 2/7 & 3/7\\ 1/12 & 4/12 & 7/12\end{bmatrix}\end{matrix}\begin{matrix}A\\B\\C\end{matrix}$$

据此矩阵，可预测下一年火灾不同等级发生的概率，如：已知1979年的火灾发生状况是B级，即它的初始分布为$P_0=[0,1,0]$，则1980年发生火灾的分布为$P_1=P_0P=[0,1,0]P=[2/7,2/7,3/7]$，即1980年发生$A$、$B$、$C$级火灾的概率分别为2/7，2/7和3/7。

现在求解固定概率向量，设在上面讨论的问题中，待求固定向量为$P=[\overline{P_1},\overline{P_2},\overline{P_3}]$且

$$\sum_{i=1}^{3}\overline{P_i}=\overline{P_1}+\overline{P_2}+\overline{P_3}=1 \tag{1}$$

已知：$\overline{P}(P-I)=0$，其中I为单位阵，于是：

$$[\overline{P_1},\overline{P_2},\overline{P_3}]\left[\begin{bmatrix}7/9 & 1/9 & 1/9\\ 2/7 & 2/7 & 3/7\\ 1/12 & 4/12 & 7/12\end{bmatrix}-\begin{bmatrix}1 & 0 & 0\\ 0 & 1 & 0\\ 0 & 0 & 1\end{bmatrix}\right]=(0,0,0)$$

即，
$$-2/9\,\overline{P_1}+2/7\,\overline{P_2}+1/12\,\overline{P_3}=0 \tag{2}$$

$$1/9\,\overline{P_1}-5/7\,\overline{P_2}+4/12\,\overline{P_3}=0 \tag{3}$$

$$1/9\,\overline{P_1}+3/7\,\overline{P_2}-5/12\,\overline{P_3}=0 \tag{4}$$

解方程组(1)、(2)、(3)得

$$\overline{P}=[\overline{P_1},\overline{P_2},\overline{P_3}]=1/276[117,63,96]\approx[0.424,0.228,0.348]$$

通过固定概率向量，可以看出云南发生A级和C级面积损失的火灾较多，应当引起人们重视。

至此，我们对云南森林火灾近年以及较长期的势态可以给出一个预估，而且符合本区火灾的自身规律。

(二)线性差分方程的应用

1. 概念与方法

线性差分方程模型是时间序列分析中用途最广的模型之一，它是用离散的时间间隔描述事物动态的一种方法。

当线性差分方程模型的变量是不同时刻的同一类变量时，称为线性自回归模型。其输入量是环境对系统的随机干扰，输出向量是系统不同时刻的自身滞后量，而不涉及其它输入向量，是一种典型的纵向模型，其数学表达式为：

$$y(k)=-\sum_{j=1}^{m}A_jY(k-j)+\varepsilon(k)$$

它反映多个随机变量在前后不同时点上的自身作用及交互作用，交互作用是向量自回归区别于标量自回归的一个显著特点。其中m为模型的阶，系数矩阵为$p\times p$阶常阵。

$$A_j=\begin{bmatrix}a_{11j} & a_{12j} & \cdots & a_{1pj}\\ a_{21j} & a_{22j} & \cdots & a_{2pj}\\ \vdots & & & \vdots\\ a_{p1j} & a_{p2j} & \cdots & a_{ppj}\end{bmatrix}\qquad(j=1,2,\cdots,m)$$

称作自回归系数矩阵；输出向量为P维随机向量：

$$y(k)=\begin{bmatrix}y_1(k)\\y_2(k)\\\vdots\\y_p(k)\end{bmatrix}$$

模型误差为 P 维向量

$$\varepsilon(k)=\begin{bmatrix}\zeta_1(k)\\\zeta_2(k)\\\vdots\\\zeta_P(k)\end{bmatrix}$$

且满足假设 $E[\varepsilon(k)]=0$

用普通线性回归形式表达即：

$$Y^T(k)=X^T(k)\theta^T+\varepsilon^T(k)$$

当获得长度为 n 的样本矩阵时模型为

$$Y=X\theta^T+\in$$

其中，Y 为 $n\times p$ 阶样本量测矩阵。

$$Y=\begin{bmatrix}Y^T(m+1)\\Y^T(m+2)\\\vdots\\Y^T(m+n)\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}y_1(m+1)&y_2(m+1)&\cdots&y_p(m+1)\\y_1(m+2)&y_2(m+2)&\cdots&y_p(m+2)\\\vdots&&&\vdots\\y_1(m+n)&y_2(m+n)&\cdots&y_p(m+n)\end{bmatrix}$$

X 为 $n\times(p\times m)=n\times q$ 阶样本观测矩阵

$$X=\begin{bmatrix}x^T(m+1)\\x^T(m+2)\\\vdots\\x^T(m+n)\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}-y^T(m)&-y^T(m-1)&\cdots&-y^T(1)\\-y^T(m+1)&-y^T(m)&\cdots&-y^T(2)\\\vdots&&&\vdots\\-y^T(m+n-1)&\cdots y^T(m+n-2)&\cdots&\cdots y^T(n)\end{bmatrix}$$

$\in$ 为 $n\times p$ 阶残差阵

$$\in=\begin{bmatrix}\varepsilon^T(m+1)\\\varepsilon^T(m+2)\\\vdots\\\varepsilon^T(m+n)\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\zeta_1(m+1)&\zeta_2(m+1)&\cdots&\zeta_p(m+1)\\\zeta_1(m+2)&\zeta_2(m+2)&\cdots&\zeta_p(m+2)\\\vdots&&&\vdots\\\zeta_1(m+n)&\zeta_2(m+n)&\cdots&\zeta_p(m+n)\end{bmatrix}$$

模型参数估计 $\hat{\theta}^T=(X^TX)^{-1}X^TY$

自回归模型残差阵的无偏估计

$$\hat{\sum}=\frac{(Y-X\hat{\theta}^T)^T(Y-X\hat{\theta}^T)}{n-q}$$

回归估计 $\hat{Y}^T(k)=X^T(k)\hat{\theta}^T$

L 步预测 $\hat{Y}^T(m+n+l)=X^T(m+n+l)\hat{\theta}^T(n)$

其中：L 为预测步长，且当 $k=m+n+l$，$1\leqslant l\leqslant m$

2. 试算

仍用云南省 1951—1979 年森林火灾资料进行试算，对火灾发生次数和成灾面积两项进行

预估。

首先用1951—1970年的数据建立自回归模型，然后，依次推出逐年的火灾发生次数以及成灾面积，再与各年实际发生情况比较，计算差值百分数，分别采用一阶和二阶模型。本次进行了两步预测，现将结果列表于后。

表2 一阶自分模型预估结果比较表

$l=2$时误差百分数%		年代	$l=1$时误差百分数%	
次数	面积		次数	面积
		1971	-1.1	115
—59.5	40.8	1972	—60.1	—15.8
—53.5	26.0	1973	24.1	103.7
—28	63.3	1974	—44.5	—65.4
—68.5	—73.9	1975	—39.5	31.6
13.6	138.6	1976	101.9	283.2
58.9	275.0	1977	—31.2	—0.1
—41.4	37.4	1978	—18.2	53.7
—48.5	—93.1	1979	40.2	—94.7
—4.3	—84.1	1980		

建模时所用火灾次数为每年全省发生森林火灾次数，成灾面积为每年全省成灾面积，单位为公顷，表中$l=1$，即为预测一个步长时的值，$l=2$，即表示预测第二个步长时的值，每个步长为一年。

从表2得出，$l=1$时，火灾损失面积与实际发生值的差值范围在—0.1%—283.2%之间，其中差值<30%的占22%。

年火灾次数差值范围为—1.1%—104.9%，其中差值<30%的占33%。

$l=2$时，火灾损失面积差值范围为：26%—27.5%，差值<30%的占11%。

年火灾次数差值范围为—4.3%——68.5%，差值<30%的占33%。

下面给出二阶差分模型预估结果。

表3 二阶差分模型预估结果比较表

$l=2$时误差百分数(%)		年代	$l=1$时误差百分数(%)	
次数	面积		次数	面积
		1971	18.9	287.4
—41.3	220.6	1972	—46.4	81.8
—32.4	207.6	1973	2.5	—28.4
18.3	124.7	1974	—19.6	89.5
—50.3	10.5	1975	—44.3	50.2
34.8	244.1	1976	95.7	227.1
79.8	385.1	1977	31.5	346.9
3.7	355.8	1978	—14.2	44.4
—39.3	—89.9	1979	—34.6	—92.7
18.2	72.9	1980		

如表 3 所示，$l=1$ 时，火灾损失面积差值范围为 −26.4%—346.9%，其中差值<30%，仅占 11%。

年火灾次数差值范围为 2.5%—95.7%，其中差值<30%的占 44%。

$l=2$ 时，火灾损失面积差值范围为 26%—275%，其中误差<30%的占 11%。

年火灾发生次数差值范围在 −3.7%——79.8%，其中差值<30%的占 33%。

3. *初步分析*

(1) 由所得数据可知，此法用于估测森林火灾次数和成灾面积，误差较大。这正是火灾发生中火源的随机和无规律所致，但是可以看出一步预测比二步效果好，正如估测式所给出的条件 $1\leqslant l\leqslant m$ 所示。

下面给出对比数据来说明这一点，*A* 组：用 1995—1970 年的火灾数据推出 1971，1972，…，1979 年数据，*B* 组：用 1951—1970 年数据推出 1971 年数据，用 1951—1971 年资料推出 1972 年数据……依次类推，最后用 1951—1978 年数据推出 1979 年数据，现将两组数据与当年发生的真实情况比较，并将其相对误差列后：

表 4　一步预估、多步预估与真值相对误差(%)

年代	*A* 组(1 阶，$l=9$)		*B* 组(2 阶，$l=1$)	
	年火灾次数(%)	成灾面积(%)	年火灾次数(%)	成灾面积(%)
1971	−1.1	115.5	18.9	287.4
1972	59.5	40.8	48.4	81.8
1973	−53.3	89.4	2.5	−26.4
1974	−74.7	32.1	−19.6	89.5
1975	−85.9	42.1	44.3	50.2
1976	−75.7	60.3	95.7	227.1
1977	−84.0	22.8	31.5	345.9
1978	−80.8	40.5	14.2	44.4
1979	−92.6	−94.8	−34.5	−92.7

数据分析表明：在火灾发生次数方面，一步预估比多步预估精度高，而且预估步数越多误差越大。在火烧成灾面积方面却相反，多步预估比一步预估误差小。

(2) 在二阶模型一步预估表 3 中，年火灾次数相对误差较小，最大 95.7%，最小为 2.5%，误差<35%的占 66.7%，因此在某地区据历史资料预估次年火灾发生次数时可采用此法。

(3) 从上述三个表中(表 2，表 3，表 4)可以看到，在估测成灾面积时，无规律可循，是否有趋势项或周期项在影响着预估，这一点与下面讨论的问题是有关联的。

二、考虑天、地、生相互制约对火烧环境的宏观预测

森林火灾灾害学最新研究表明，一定区域内森林火灾灾情年际变化极不平衡，每过若干年就会重复出现森林火灾活动异常、林地损失极其突出的时段——重灾时段，具有某种周期演变规律，究其原因，研究它的预报方法将是非常有意义的。

(一) 背景

森林火灾预测理论和方法的研究已有 80 多年的历史，因受科技水平发展以及“可燃物—火源—气象要素”思维定式的影响，忽视了天、地、生相互作用。

最早尝试研究森林火灾年际变化规律与 ENSO(厄尔尼诺—南方涛动异常)关系的是 Dr. Simard A. J 于 1982—1983 年开始的，发现了这二者现象之间存在着某种遥相关关系。

厄尔尼诺(El Nino)是指赤道东太平洋(0°—10°S，90°—180°W)海温持续异常升高的现象；而南方涛动(Southern Oscillation)是指印度洋地区气压与南太平洋地区气压呈反向变化的现象，而且二者存在着紧密的“海—气”负相关。通常将其二者联系起来称作“厄尔尼诺—南方涛动异常”记为 ENSO。

(二) 分析

1. 在所用云南省 1951—1979 年的森林火灾资料与周期的 ENSO 有关数据进行比较、分析。

图 1 中 E 表示 EL Nino 事件年，A 表示“拉尼娜”事件年，记为 LN，是指中、东太平洋上海表温度比多年温度值低的时段。

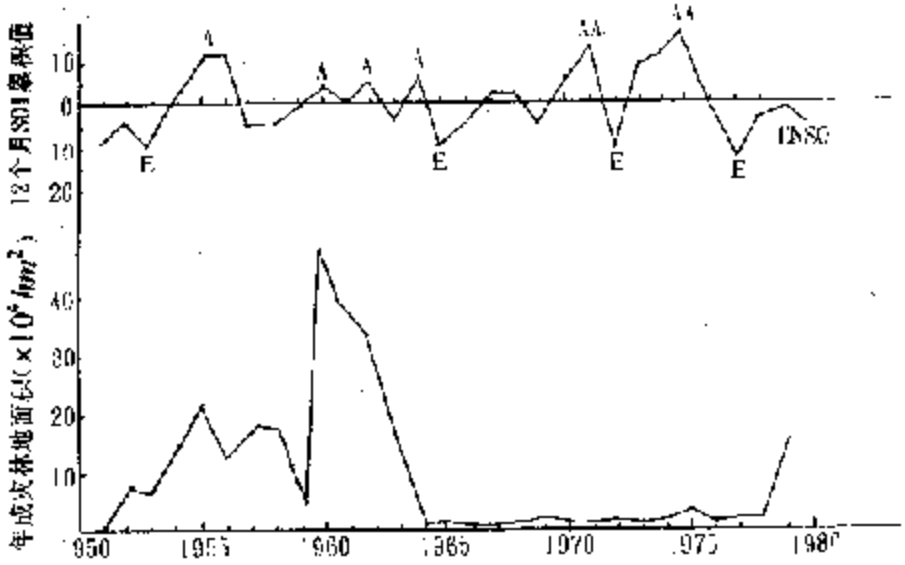


图 1 云南 1951—1979 年林火参数与 ENSO 数据比较图

从图 1 看出，云南省火灾高发生年多处在非 ENSO 事件年，多与拉尼娜事件年同步。

这一点非常像美国佛罗里达州，图 2 给出美国佛罗里达州森林过火面积与 SST 的关系图(1981—1991 年)。而与我国黑龙江的情况恰恰相反，图 3 给出黑龙江省森林火灾过火林地面积与 ENSO 的关系图(1950—1990 年)。

2. 也许会注意到，在分析比较上述问题时我们采用了森林成灾面积，因为最新研究结果(Jim. Brenner，1991)指出：“森林火灾发生率多受人类社会、人为因素的影响，不可能有多大的应用价值；在森林火灾长期预测研究中应重点运用过火面积指标，而不用火灾次数指标，林火次数的规律性很弱，在人类尚不能完全控制森林大火的历史阶段，与天、地、生有关的某些环境因素，控制着林火强度和蔓延，因而也将控制着森林火灾的最终规模”。

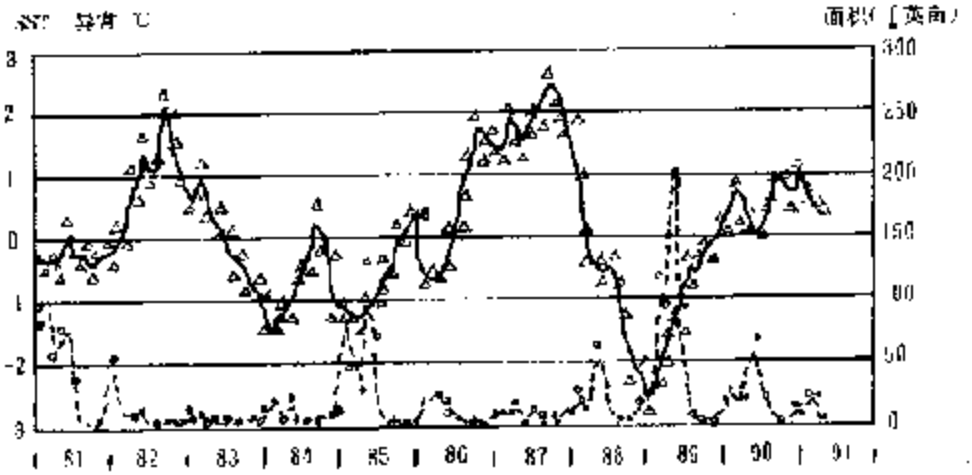


图 2　美国佛罗里达州森林火灾过火面积与 SST 的关系

实线：中太平洋海温 SST，℃

虚线：过火面积(千英亩)

3. 现将火灾次数，成灾面积与 ENSO 关系表示在一张图上，图 4。

从图 4 中看到，林火发生次数与 ENSO 以及成灾面积无明显关系，再对比太阳黑子相对数发现其与林火发生次数及成灾面积均无明显关系。由此有以下初步认识，①林火发生次数是与人为活动密切相关的，与林火的发生环境、天、地、生环境并没有直接关系。这一点与当前的一些研究是一致的。②森林成灾面积，与 ELNO 现象有一定关系，这与当前某些研究一致。而云南林火的成灾面积与太阳黑子活动无甚明显关系，这一点与国内一些研究不尽相同。

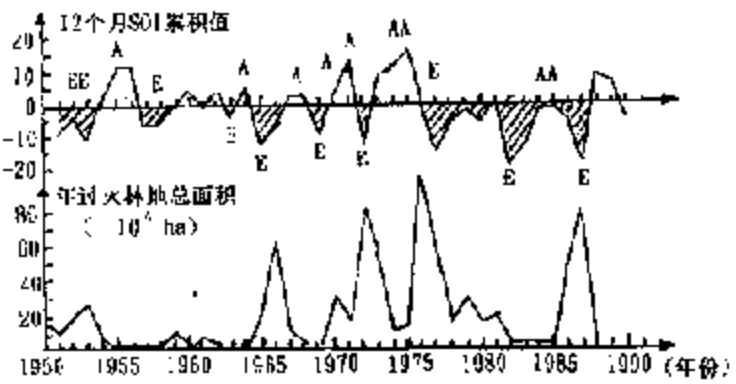


图 3　黑龙江省森林火灾年过火林地面积与 ENSO 的关系

三、可燃物的贮量遥感预测

林中积累的枯落物是森林火灾发生的物质基础。因此有大量的文章在探讨这一问题。研究表明：小于 1cm 的可燃物是森林火灾发生的要害；而可燃物含水率与燃点的关系是极为有关的；细小可燃物的贮量推算公式更是多种多样。如美国林火专家(Rothermel，1972)归纳出 9 个可燃物模型；Anderson(1983)给出了 13 种图片识别方法；Rothermel(1973)提出了动态模型。Bruce. D 认为林龄、森林密度、植被是影响可燃物负荷量的主要因子，W. henary (1978)等三名美国林学家认为，火烧后 5 年内表层可燃物将迅速增加，Willian. H(1980)认为火烧后可燃物总负荷量是随火烧后时间而逐渐增加，澳大利亚 R. J. Raison(1983) P. V. Woods、P. K. Khanna 指出桉树火烧后稳定状态的负荷量在 11. 1—29. 4t/hm²，中国邸学颖指出建立细小可

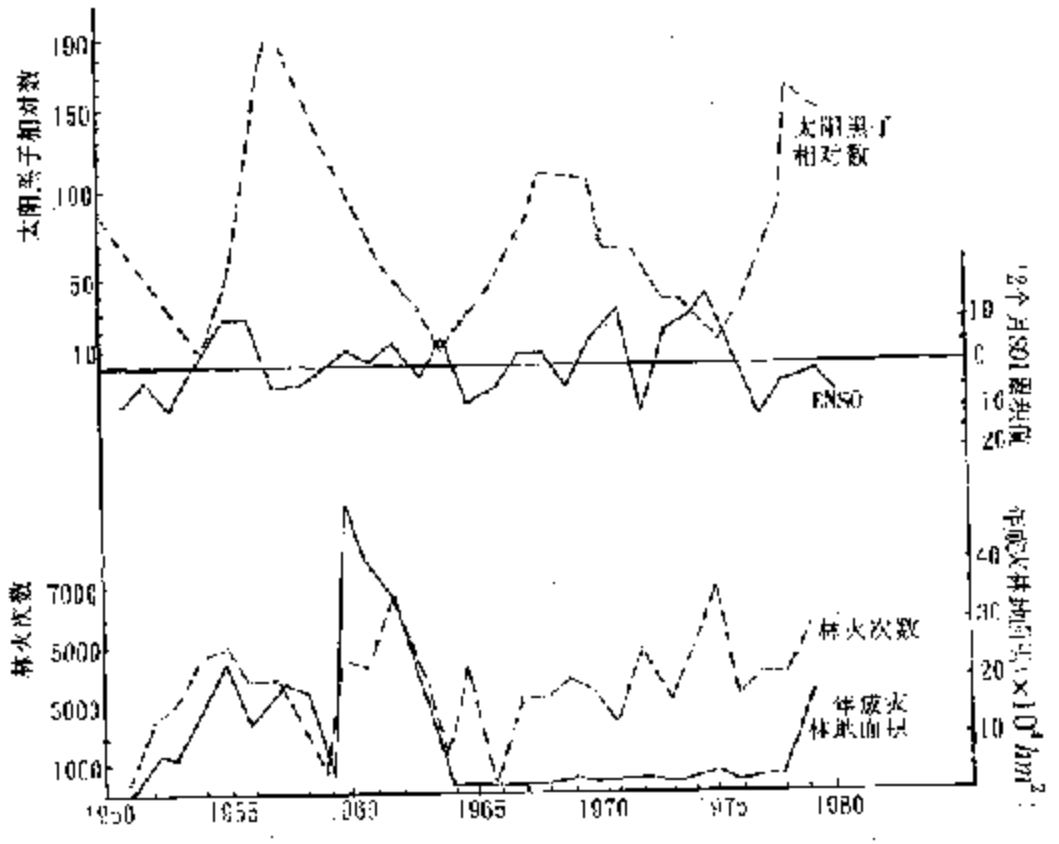


图 4　云南森林火灾年际活动与 ENSO 及太阳黑子活动关系

燃物与年龄、郁闭度、树高、胸径的多元关系是可行的。

本研究所给出的方法是利用遥感数据建立其与林分因子关系，通过林分因子，推算出某种林分下的可燃物贮量，从而对该地区的林火危险性给出评价。这是宏观评价某大区域林火发生可能性的较好途径，这一点正是我们以往在没有借助遥感数据时感到十分困惑的。

概念与方法

从文献[3]中我们已知遥感数据可在一定精度下求出相应的林分蓄积，其关系式为：

$$y = a_1x_1 + a_2x_2 + \cdots + a_nx_n$$

据在温带、亚热带和热带的研究表明，蓄积量与多波段数据及其比值项的多元相关系数一般为 0.4—0.6，如加上定性因子参加估测，按流域建立关系则通常可达 0.7 以上。在内蒙古林区，经实地验证估测森林蓄积量全局(相当一个县的面积)精度已达 95%以上。

据生态学研究已知，植物干材重(Q)与叶重(L)相关关系为 $Q=aL^b$；森林凋落物现存量与环境相关式为：$W=1.428\times10^{-4}N^{0.16}E^{0.91}A^{0.48}$($N$、$E$、$A$ 分别为纬度、经度及高程)，由此我们不难推出森林凋落物贮量。据云南资料推导了云南松的叶重与干材重的公式，即

$$Q = 40.92 \times L^{0.63} (r = 0.7049)$$

$\log Q=1.612+0.63\log L$，如每公顷蓄积(Q)为 270m³/hm²，干是叶重为 20.23t/hm³。如每年落叶 20%，则每年枯落物量为 4t/hm²，分解 60%，积累 1.6t/hm²。按本区 10 年没发生火灾

则累积近 16t/hm²。这便是森林火灾隐患之所在。

另一方面为从时间序列上，推断某区域枯落物积累量，有必要导出火灾后 n 年内枯落物（易燃物）积累量公式。

据生态学、林学知识，表达植物生物量增长的函数有几种类型，在此选择 $f(x)=a+be^{-cx}$ 令其自变量为时间 t，然后对其积分，从而求得其贮量。导出如下：

$$W=\int_0^n f(t)dt=\int_0^n(a+be^{-ct})dt=an-\frac{b}{c}(e^{-cn}-1)$$

于是可求出火烧后 n 年凋落物积累量理论值，扣除分解部分即可估测出当前贮量，这对预报林火危险性是有意义的。

用云南松资料拟合出的方程为：

$$W=15.227t+1402.6(e^{-0.01t}-1)$$

$$(r=-0.67)$$

式中：t 为最后一次火烧后年限（年）；

W 为枯落物累积量（t/hm²）。

其拟合曲线如图 5 所示。

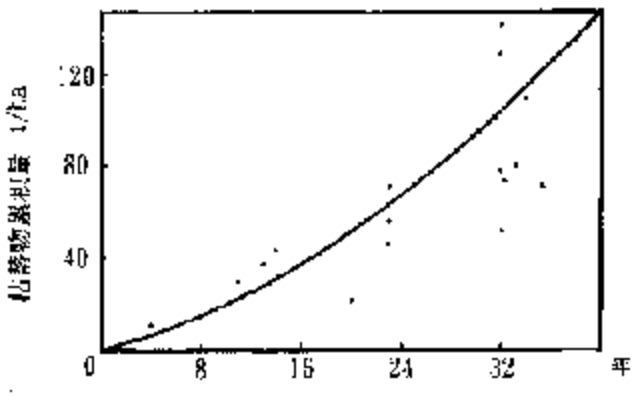


图 5　云南松林下枯落物累积量随时间变化曲线（<40 年）

在推断某区枯落物贮量时，可进行少量调查，对不同林型的典型样地，量其枯落物每平方米重量，然后据下式导出：

$$\text{每公顷易燃物重量}=\frac{\text{每平方米易燃物干克重数}}{1000}\times 10000(\text{t/hm}^2)$$

同时测定最近发生火灾年限，即可求出估测式，再对区域性枯落物积累量进行估测，从而判定火灾发生的潜在危险。

上面我们讨论了用遥感数据预测和用模型估计枯落物贮量的两种方法。

四、结　束　语

本文从宏观上探讨了西南林区火灾预报方法，围绕火灾发生的三要素，火源、燃烧环境，以及可燃物进行了探讨。在火源研究中突出了人为火随机性的考虑，采用了随机过程方法，自回归方法以及为免除随机干扰选取成灾面积为变量因子进行分析；在燃烧环境中，重点探讨了大环境，从全球气、水变化来分析西南火是否存在着某种关系和对应规律；在可燃物贮量的研究中，采用遥感数据通过立木蓄积间接推算枯落物贮量，为宏观估测开拓了新的途径。并给出区域性时间序列下枯落物累积的算式。

本文的工作仅仅是初步。还有许多工作可作，如区域性可燃物预测图的编绘，火灾与天、地、生的关系，以及火灾周期性因子的剔除，文中研究内容和方法还有众多不完备的地方，这些将是今后的研究任务。

参　考　文　献

[1]　郑焕能，中国森林火灾与对策，自然灾害学报，1994(3)

[2] 李勇. 马尔科夫决策规划理论在森林火灾预测中的应用. 森林防火,1992(4)
[3] 朱明德. 统计预测与控制. 中国林业出版社,1993
[4] 张罗修、南方涛动异常对我国锡罗里达州森林火灾影响. 森林防火,1992(4)
[5] 王述洋. 厄尔尼诺 南方涛动异常对森林火灾年际活动规律的影响. 世界林业研究,1993(3)
[6] 王述洋. 黑龙江省未来十年森林火灾火情宏观预测. 森林防火,1993(2)
[7] 何忠秋. 森林可燃物负荷量模型研究. 森林防火,1993(3)
[8] 党承林. 云南松林的生物量研究. 云南植物研究,1991,13(1)
[9] 赵宪文. 应用航天遥感资料估测森林蓄积量. 中国遥感进展,万国学术出版社,1992
[10] J. France. 农业中的数学模型. 农业出版社,1991
[11] 金可彦、大兴安岭地区地面可燃物分布调查研究. 森林防火,1984(1).

12. AADS—1268 多光谱扫描数据在林火监测中的应用[①]

蔡登谏　曾　森　　游先祥　　李秀林　邢永国
（林业部调查规划设计院）（北京林业大学）（河北省迁西县林业局）

摘要　本文针对森林火灾的危害性及用卫星监测林火时在空间分辨率方面的不足，提出用机载的 AADS—1268 多光谱扫描仪进行林火探测的设想，并于 1993 年 6 月 19 日在河北省迁西县作了林火模拟探测试验。报告对所获取的 11 个波段的数据分析与处理，建立了火、热点特征模型，用于火、热点信息的提取，最小火点面积为 0.09m²，提高了林火探测能力，达到了对森林火灾作出快速分析与评估的目的。

一、前　言

由于森林火灾会对人类的生命财产及其环境造成严重威胁，预防森林火灾便已成为国际上广泛重视的问题。防火是森林保护的首要措施，任何一场大的森林火灾都是由小火或火点引发的，如何尽早地探测和发现小林火，并及时扑灭它，这是护林防火的关键。

林火的探测，通常的办法是在地面设置瞭望塔、地面巡视或飞机定时巡航。这些方法在护林防火中发挥了重要的作用，但也存在一些弊端：如了望塔及地面巡视受到视野的限制，航空目视调查又与航调人员的经验有关，也受航高、航速等多种因素的影响。随着科学技术的发展和进步，高新技术在林火监测中得到了广泛的应用。NOAA 气象卫星的 AVHRR 数据早已用于大范围的林火监测。1985 年，加拿大的 Flannigan 曾用 NOAA 气象卫星进行林火监测试验，对 355 个不同大小的火点（区）作了昼夜观测，结果表明：其中 80%的火点（区）被探测出来了，对火区面积统计之后认为，面积估算的误差受多种因素影响。对于 400hm² 以下的小火区，其估算面积偏大；对于大于 400hm² 的火区，估算值偏小；中等大小的火区，面积估算误差为 66%[2]。1987 年发生在我国东北大兴安岭的那场特大森林火灾，也曾用 NOAA 卫星资料进行实时监测、分析和评估，每天所接收到的反映火情发展的 NOAA 卫星图像，成为当时指挥扑火的重要依据；灾情评估的成果为救灾及灾后的恢复建设提供了宝贵的资料。但是，由于 NOAA 卫星上的传感器空间分辨率较低，星下点像元约为 1.1km×1.1km，使其在小林火点探测方面的应用受到了限制。与 NOAA 卫星相比，Landsat 图像的分辨率提高到 30m×30m，但因其时相分辨率低，同一地区重复观测一次需 16 天，对于突发性的森林火灾，显然是无法及时提供着火区的实况图像。灾后所获取的图像数据，也只能用于灾情的评估。

---

① 参加本项目外业工作的还有：北京林业大学曹季林。林业部调查规划设计院李征元、蒋岳新、邱林、张瑞玺、高前红等在数据处理中也给予了帮助，特在此致谢。

目前，装有红外扫描仪的遥感飞机，因其传感器分辨率高，飞机起降灵活、方便，在应付突发性的自然灾害中，具有特殊的作用，它能迅速提供灾区的实况图像，这是抢险救灾必不可少的重要依据。为了充分发掘红外遥感技术在森林火灾监测中的潜力，我们于1993年6月19日用机载的AADS—1268多光谱扫描仪在河北省迁西县进行了林火探测试验。在对所获取的多光谱扫描数据分析和处理的基础上，通过建立火、热点特征模型，提高了红外探火的识别能力，并提供了对林火进行快速分析的方法。

二、试验区概况

林火探测的试验区位于河北省迁西县境内的太平寨乡。试验区的范围为：东经118°22′—118°38′，北纬40°10′—40°20′，航线自东南向西北穿越太平寨镇，航带长约27km，宽4km。航带位置示意图表示在图1中。

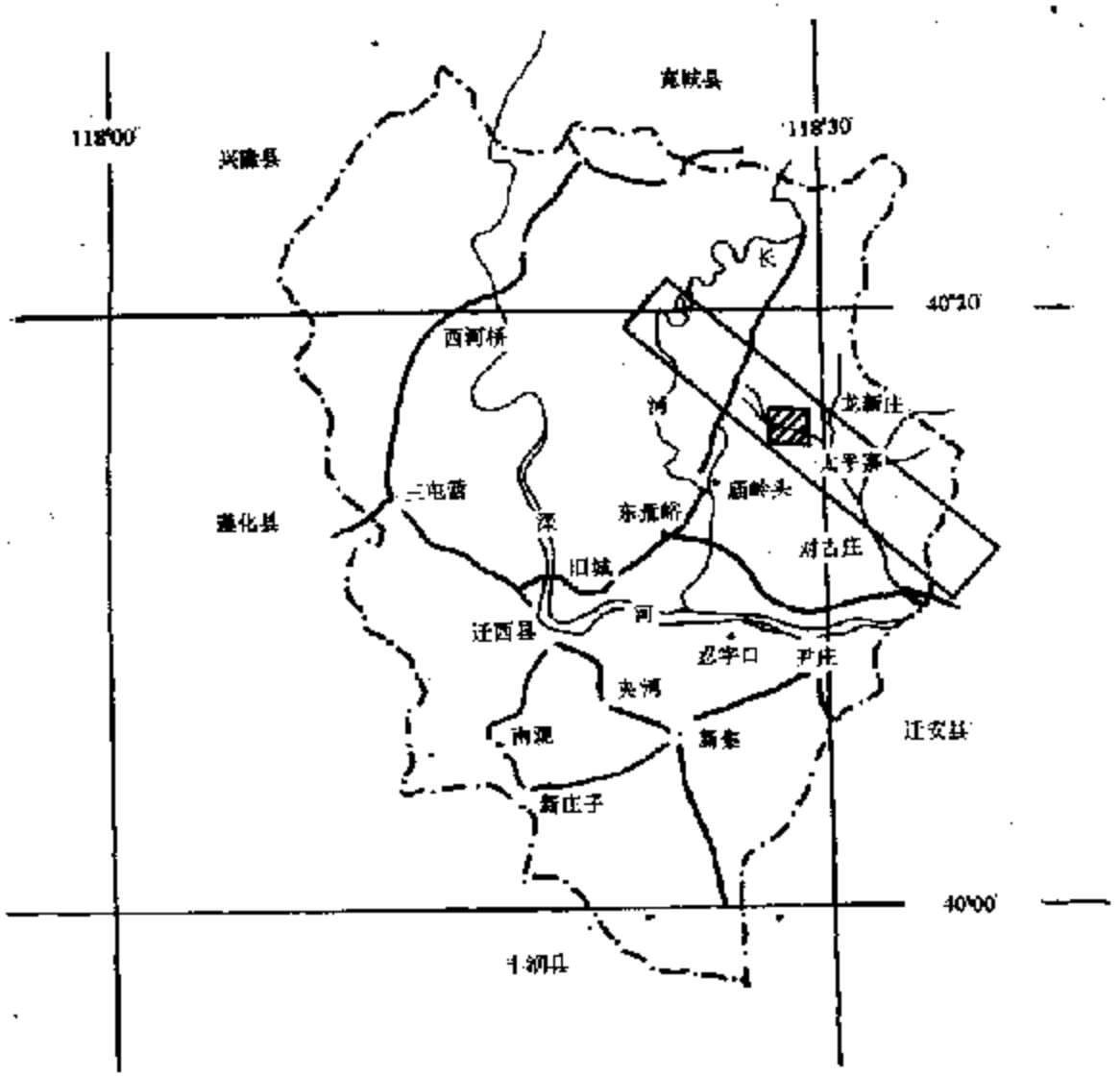


图1 试验区位置示意图

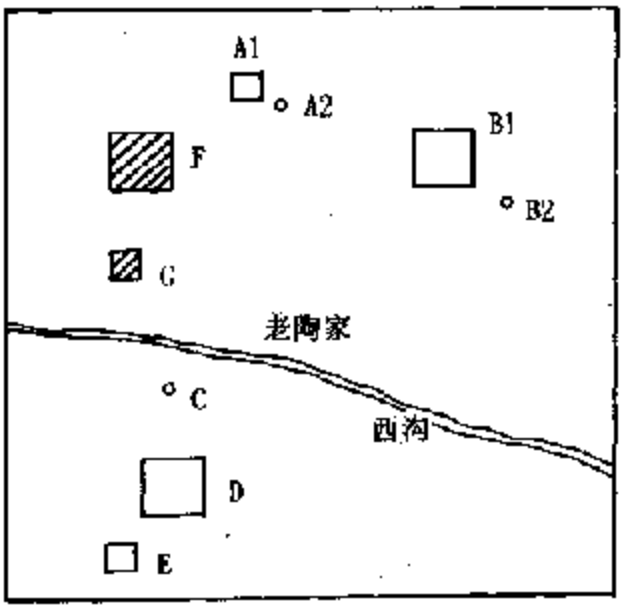


图 2　火点分布图

航带所覆盖的地区属于丘陵地区，最高海拔为 608m。主要森林类型有油松(用材林)、板栗(经济林)，沟谷、河旁有少量杨树。全县森林覆盖率为 46%，是河北省的重点林区之一。县内矿产资源丰富，其中以金矿和铁矿最为著名，试验区内就有大型的金厂峪金矿，还有多个炼铁厂、烧结厂，是进行多种火、热源探测的理想场所。

迁西县的森林火灾，多系人为造成的，全年有两个防火期：每年的 2 月至 5 月；10 月至 12 月。火灾的高峰期为 4 月。本次试验飞航日期为 6 月 19 日，已不属于该地区的防火期，没有真实的森林火灾供探测试验，只能采取人工模拟的方法，在地面布设不同大小的火点(区)，供飞行探测使用。考虑到 AADS—1268 扫描仪的地面分辨率随航高而变化，在航高为 2500m 时，像元的实地面积为 6.25m×6.25m，地面布设的火点(区)的大小分别为 10m×10m、5m×5m、0.5m×0.5m、0.3m×0.3m。火点(区)分布位置如图 2 所示。为了取得有关火烧迹地的遥感数据，在飞行前两天，在预定地点计划烧除出两块火烧迹地，即图 2 中的 F 和 G，其实地面积为 10m×10m 和 5m×5m。

表 1 列出了各火点(区)及火烧迹地的大小和所处部位。

表 1　火点类型、大小及所处位置

火区名称	火区类型	大　小	部　位
A1	着火区	5m×5m	阳坡
A2	着火区	0.3m×0.3m	阳坡
B1	着火区	5m×5m	阴坡
B2	着火区	0.5m×0.5m	阴坡
C	着火区	0.5m×0.5m	沟底
D	着火区	10m×10m	阳坡
E	着火区	5m×5m	山顶
F	火烧地	10m×10m	山顶
G	火烧地	5m×5m	山顶

三、AADS－1268 多光谱扫描仪数据

试验中所使用的传感器是美国制造的 AADS－1268 机载多光谱扫描仪，瞬时视场(IFDV)为 2.5mrad。在航高为 2500m 时，对应的地面分辨率为：

$$\alpha = 0.0025 \times 2500 = 6.25\text{m}$$

每条扫描线包含有 716 个像元，航带宽约为：

$$716 \times 6.25 = 4475\text{m}$$

飞行数据是在 1993 年 6 月 19 日中午获取的，扫描数据首先被记录在高密度数字磁带上，飞行任务结束后，在室内将高密度磁带转换成计算机兼容带(CCT)。AADS—1268 扫描仪成像的波谱范围宽广，包含有 11 个波段数据，覆盖了 Landsat 的 MSS、TM 及 NOAA 卫星 AVHRR 成像光谱区域，表 2 列出了 AADS—1268、LANDSAT 的 TM 及 NOAA 卫星 AVHRR 的波谱范围。从表 2 可见，AADS—1268 为林火探测提供了丰富的光谱信息。

表 2　AADS—1268、LANDSAT TM、NOAA AVHRR 波谱范围

AADS—1268		LANDSAT TM		NOAA AVHRR	
波段	波长(μm)	波段	波长(μm)	波段	波长(μm)
1	0.42　0.45				
2	0.45—0.52	1	0.45　0.52		
3	0.52—0.605	2	0.52　0.60	1	0.58—0.68
4	0.605　0.625				
5	0.63—0.69	3	0.63　0.69		
6	0.695—0.75				
7	0.76　0.90	4	0.76—0.90	2	0.725—1.10
8	0.97—1.05				
9	1.55—1.75	5	1.55　1.75		
10	2.08—2.36	7	2.08—2.35	3	3.55—3.93
11	8.5—13.0	6	10.42　11.66	4 5	10.5—11.3 11.5　12.5

四、火、热点特性模型

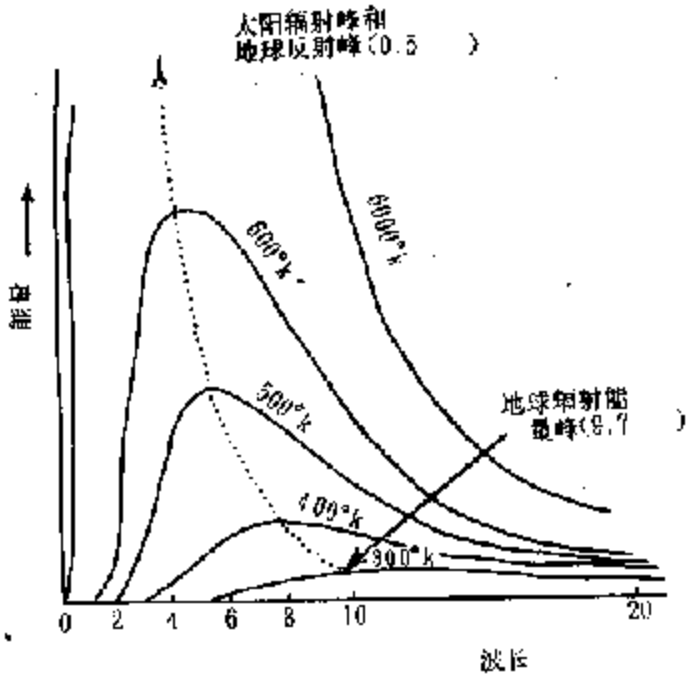


图 3　物体能谱分布曲线

众所周知，温度在绝对零度 0°K 以上的所有物质都辐射出能量，能量与波长的关系如图 3 所示。太阳表面温度约为 6000°K，它辐射出巨大的能量，入射到地球上的辐射被地球反射和吸收[5]，AADS—1268 多光谱扫描仪能同时记录物体的反射能量和辐射能量，这些能量在不同的通道内产生不同的响应，这是我们识别物体的依据。在 AADS—1268 的 CCT 中，像元的灰度值反映了物质的特性(包括温度特性)。表 3 列出了几种主要地物类别的像元灰度值。图 4 是与表 3 对应的灰度—通道曲线。

从图 4 可以看出，在通道 CH11

中，除了水体和杨树之外，各类地物的灰度值都大于 200，连火烧地的灰度值都达到 255，这是因为各类地物受太阳照射之后所产生的热辐射使通道 CH11 的记录达到饱和状态。

表 3　几种主要地物的像元灰度值

通道 / 类别	CH1	CH2	CH3	CH4	CH5	CH6	CH7	CH8	CH9	CH10	CH11
炼铁厂	40	109	99	91	101	96	113	111	82	221	215
小林火	37	86	81	72	81	105	135	143	90	102	250
大林火	33	79	63	55	60	57	75	87	79	255	255
火烧地	33	79	65	60	66	69	114	103	91	76	255
旱　地	48	113	120	120	140	151	197	191	154	118	249
民　房	35	114	124	137	161	160	148	168	120	147	239
杨　树	31	63	52	43	47	102	170	161	78	36	92
水体(库)	31	75	63	50	50	44	49	56	47	24	79

为了探测各类地物的温差特性，最好选择在夜晚或黎明前飞行，这样可以消除太阳辐射的影响[3]。由于条件所限，未能作夜间飞行，只得利用白天飞行所获取的数据，而热通道 CH11 所记录的数据只能在判别火、热点时作参考。再对其他通道的数据进行分析，发现通道 CH10 中，各类像元灰度值相互分离，具有这样一种趋势，即温度越高的地物，其灰度值越大，水体(水库)的灰度值最低，而大林火的灰度值最大，为 255。温度高低与灰度值大小之间的对应关系，有利于火、热点的判别。但是，在 CH10 中也可以看到小林火的灰度值(102)还小于民房的灰度值(147)，显然，仅仅依靠 CH10 是无法区分出火、热点，必须利用多波段的信息，这恰恰说明了多波段扫描数据的优越性。同时考虑 CH10 和 CH11 中各类地物的灰度值，并将它们相加，便出现了这样一种现象，凡是温度较高的物体，其 CH10 与 CH11 中灰度值之和也较大，说明了红外通道和热通道对温度的敏感性，再观察通道 CH5 中各类地物的灰度值分布，水体(水库)和杨树的灰度值较低，民房和旱地的灰度值最大，而原来温度较高的四类地物(炼铁厂、大林火、小林火及火烧地)的灰度值位于 60—101 之间，取 CH10 和 CH11 之和再减去 CH5 所得之值为 $T1_i$，并令

$$T1_i = CH10_i + CH11_i \quad CH5_i \tag{1}$$

式中 i 代表各类不同的地物。

用(1)式和表 3 所列数据计算出各类地物的 $T1_i$ 值列入表 4。

表 4　几种主要地物的 $T1_i$ 值

类别	水体	杨树	旱地	民房	火烧地	小林火	大林火	炼铁厂
$T1_i$	53	81	227	225	265	271	460	395

对比各类地物的 $T1_i$ 值，可以明显看出，$T1_i$ 值的大小与其温度相对应，依据 $T1_i$ 值便能识别出火、热点。但是 $T1_i$ 中包含了通道 CH11 的灰度值，前面已经说过，由于太阳辐射的影响，许多地物在通道 CH11 中的灰度趋于饱和，如火烧地与大林火在 CH11 中的灰度都是 255，为

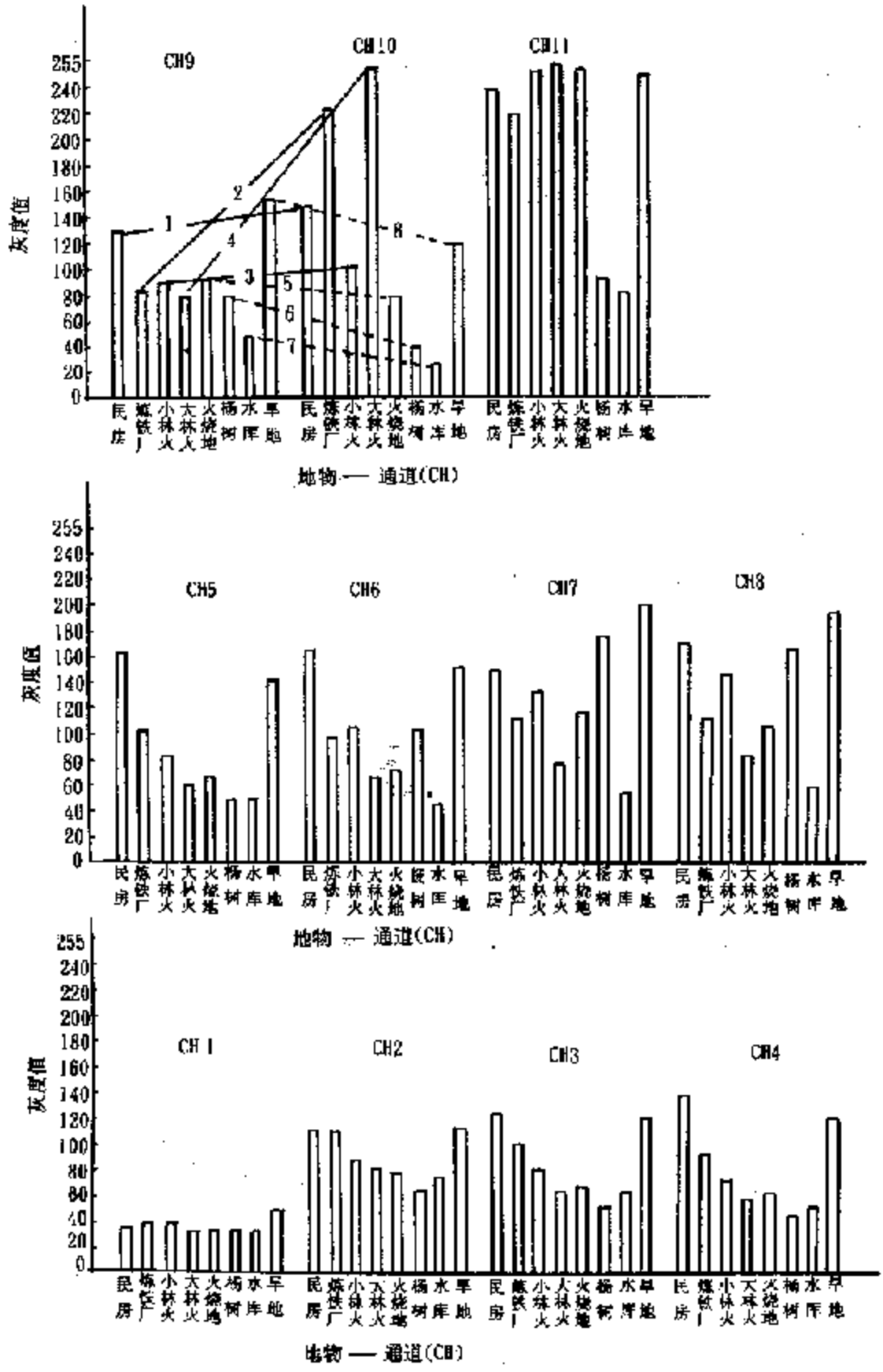


图 4　地物的灰度—通道(波长)曲线

此还需对 $T1_i$ 值进行修正，以便准确识别火、热点。

观察图 4 中 CH9 和 CH10 之间的灰度—通道曲线时，出现了十分奇特的现象，即凡是温度较高的地物，其 CH9 与 CH10 之间的连线的走向是向上的，如图 4 中的直线 1、2、3、4；温度较低的地物，如水库、杨树、火烧地、旱地等，其对应的连线（虚线）走向是向下的（见图中的虚线 5、6、7、8）。这说明温度高的地物，它在通道 CH10 中的灰度值大于其在 CH9 中的灰度值。而温度较低的地物，其 CH10 则小于 CH9。用 Δ_i 表示各类地物在 CH10 与 CH9 中灰度值之差，即

$$\Delta_i = \mathrm{CH10}_i - \mathrm{CH9}_i \tag{2}$$

式中，i 代表地物的类别

利用(2)式及表 3 计算各类地物的 Δ_i 值列入表 5。

表 5 几种主要地物的 Δ_i 值

类别	水体	杨树	旱地	民房	火烧地	小林火	大林火	炼铁厂
Δ_i	-23	-42	-36	18	-15	12	176	139

表 5 中的 Δ_i 值反映出各类物体的辐射特性，Δ_i 值的大小及其正负更有利于区分火、热点，可以作为判别地物温度高低的重要依据。但在利用 Δ_i 时，还要考虑到地物在 CH9、CH10、CH11 中的灰度值，对 Δ_i 作修正，令 Δ_i 为修正后的数值

$$\Delta'_i = \alpha_i \Delta_i \tag{3}$$

α_i 为修正系数

$$\alpha_i = \frac{\mathrm{CH10}_i \cdot \mathrm{CH11}}{\mathrm{CH9}_i \cdot 255} \tag{4}$$

将(2)、(4)代入(3)式得

$$\Delta'_i = \frac{(\mathrm{CH10}_i - \mathrm{CH9}_i) \times \mathrm{CH10}_i \times \mathrm{CH11}_i}{255 \times \mathrm{CH9}_i} \tag{5}$$

将 Δ'_i 和 $T1_i$ 相加，并以 T_i 表示，

即 $$T_i = T1_i + \Delta'_i \tag{6}$$

将(1)和(5)式代入(6)式中得

$$T_i = \mathrm{CH10}_i + \mathrm{CH11}_i - \mathrm{CH5}_i + \frac{(\mathrm{CH10}_i - \mathrm{CH9}_i) \times \mathrm{CH10}_i \times \mathrm{CH11}_i}{255 \times \mathrm{CH9}_i} \tag{7}$$

(7)式即为所求得的火、热点特征模型。用(7)式和表 3 的数值所计算出各类地物的 T_i 值列在表 6 中。

表 6 几种主要地物的 T_i 值

类别	水体	杨树	旱地	民房	火烧地	小林火	大林火	炼铁厂
T_i	49	74	200	244	252	284	1018	651

利用所计算出来的 T_i 值，便能很容易地将火、热点如小林火、大林火、炼铁厂与其他地物分离出来。

考虑到用(7)式计算各类地物的 T_i 值时，某些温度较低的地物会出现负值，而高温度的地物，其 T_i 值又会很大，远远超出图像显示的范围，故需对(7)式进行规一化，为此需计算出全试验区内 T_i 的最小值 $T_{最小}$ 和 T_i 的最大值 $T_{最大}$。在 $T_{最小}$ 为负值时，

令 $C=|T_{最小}|$ （即对 $T_{最小}$ 取绝对值）

$D=T_{最大}$

以 $T_{显}$ 表示各类地物的可供显示的灰度值，

即
$$T_{显}=(T_i+C)\div\left(\frac{D+C}{255}\right)$$
$$=\frac{255\times(T_i+C)}{D+C} \tag{8}$$

根据所求得的 $T_{最小}$ 和 $T_{最大}$ 值及式(8)，可以计算出各类地物的 $T_{显}$ 值，并在屏幕上显示出来。试验区内所得到的 $T_{最小}=-128.47$，$T_{最大}=1017.87$，按式(7)和式(8)及表6的 T_i 值而得到的 $T_{显}$ 值列入表7中。

表7 几种主要地物的 $T_{显}$ 值

类别	水体	杨树	草地	民房	火烧地	小林火	大林火	炼铁厂
$T_{显}$	39	45	73	83	84	92	255	173

五、森林火灾快速分析方法

林火快速分析判读的目的是：①准确识别林火点；②确定火点位置；③计算火区面积及灾情评估等。具体的工作流程如下：

1. 飞行数据的预处理

包括：①图像格式的转换。即将飞行部门提供的CCT数据转换成可进行分析和处理的图像数据；②波段选择。对于AADS－1268多光谱扫描仪，可以选用其中的CH5、CH9、CH10、CH11等四个通道的数据；③噪音的去除，包括点状及条带噪音。

2. 火、热点特征提取

依据(8)式，可能得到一个能反映全区地物温度特性的单波段图像，称其为火、热特征波段FWB。应注意，在用(1)式进行运算时，为保证精度，对所有的输入、输出图像，均需使用实型数据，只是在用(8)式进行规一化时，得到的 $T_{显}$ 才为byte型数据。从FWB波段可以明显地区分出不同温度的地物，温度越高，其 $T_{显}$ 值越大。为了使分析人员更容易、更直观地观察火情，可以将FWB与CH5、CH9进行彩色合成和增强处理。增强时，可依据居民区内显示出的民用火点作为增强处理的标准。

3. 图像的几何校正

AADS－1268扫描仪所获取的多波段图像，具有较大的变形，这是由于传感器自身结构、飞机的不稳定性及地面起伏等多种因素造成的。为了缩小图像所存在的误差，需要根据地形图上所选择的控制点进行几何校正。选点时，应选用1∶5万以上的较大比例尺的地形图，使地形图上读点精度与图像的地面分辨率相匹配。本次飞行所得到的图像，其纵横方向上的比例尺不一致，约为1∶2。因此，在几何校正前，应先将图像横向放大1倍，然后再作校正，这样也便于和地形图相对照来选择控制点。为了准确地探测小火点或使小火点不会因为作几何校正时重采样而丢失，建议采用以下两项措施来提高探火能力：①将原始图像的像元从6.25m×6.25m变成2.5m×2.5m或更小一些；②将FWB波段图像先进行分段线性增强，使火、热点的灰度

值进一步增大，然后再作几何校正。经过这样处理，火、热点会更为突出。

4. 林火区识别与统计

将经过几何校正的FWB、CH6、CH9进行彩色合成，按红、绿、蓝顺序配置，并作增强处理，便可以看见红色的火、热点。根据火、热点所在地区的情况（地形、地物），可以明确判断是否属于森林火灾，还是其他工业用火或生活用火。在确认为林火点（区）之后，便可用FWB波段统计火点（区）面积。方法是，首先在FWB波段上量测出林火点的最小与最大灰度值，应用线性拉伸的方法，在FWB波段上提取出林火区域，统计出面积，同时给出各火点（区）中心的经纬度。

六、探测结果及分析

应用上述森林火灾红外遥感快速监测方法，对本次试验所获取的多光谱扫描数据进行了分析和处理。全条航带为716×1100像元，选择了其中包括有人工模拟的林火点、工业及民用热源点的地段作为林火探测的试验区。使用本文所提出的火、热特征模型，取得了能反映地物温度特性及突出火、热点的FWB单波段图像。从FWB与CH6、CH9的合成图像上，各类热源点，如炼铁厂内的炼铁炉、烧结堆的成像极为清晰，连部分民用烟囱、太阳能热水器之类的火、热点都被显现出来了。彩版V上为FWB、CH6、CH9彩色合成图像中的一子图像（512×512像元）。从图像上可以看到，原先在地面布设的林火点A1（5m×5m）、A2（0.3m×0.3m）、B1（5m×5m）、B2（0.5m×0.5m）、C（0.5m×0.5m）、D（10m×10m）、E（5m×5m）及火烧迹地F（10m×10m）、G（5m×5m）全被准确无遗地探测出来了。这表明火、热点特征模型在用AADS—1268扫描数据作林火探测时是十分有效的。为了说明探测效果，也用常规的波段合成方法，将CH10、CH6、CH9按红、绿、蓝配置进行合成和增强，结果显示见书后彩版，从彩版V上不难看出，在常规的合成图像上，小的林火点C的成像很不明显。对于经火、热点特征提取处理后的图像，曾拿到现地进行过调查和核对，图像上所显示出的烟囱的实际大小一般为0.3m×0.3m左右，也就是说，在航高为2500m时，用AADS—1268扫描仪及火、热特征模型技术，探火能力可以达到0.3m×0.3m，显然比双通道定量红外扫描仪DS—1230的探火能力要高。据文献[6]介绍，1987年大兴安岭特大森林火灾期间，地矿部曾出动装有DS—1230扫描仪的双水獭遥感飞机，对火情进行监测，在飞行高度为1000m时，所能发现的最小火点直径为2.5m。用AADS—1268作林火探测，可以探测出更小的火点，这有利于尽早发现火情，及时组织力量灭火。

在森林火灾发生之后，随时估算出火区的面积，这是林火监测中的一项重要内容。根据火、热点特征模型所获得的FWB波段图像，可以直接用来量算火区面积，利用火灾区已有的林木蓄积量数据，可以计算出总的林木损失。同时还可以按不同的灰度级，将火区划分成不同的类别，灰度值的大小，也反映出燃烧的强度及火情发展的趋势。用FWB计算火区面积，既简便又省时。无需像常规方法那样，先进行波段合成，再作有监或无监分类。用FWB波段所求出的各火点（区）的面积及火区中心的位置列入表8中。

表 8　火点(区)位置及面积统计　　单位：m^2

类别		位置		实地面积	图上面积	面积之差
		经度	纬度			
林火	A_1	118°29′55″	40°15′26″	25.00	68.75	43.75
	A_2	118°29′56″	40°15′26″	0.09	6.25	5.16
	B_1	118°29′57″	40°15′22″	100.00	43.75	−56.25
	B_2	118°29′58″	40°15′22″	0.25	18.75	18.5
	C	118°29′39″	40°15′18″	0.25	6.25	6.00
	D	118°29′39″	40°15′13″	100.00	306.25	206.25
	E	118°29′33″	40°15′12″	25.00	68.75	43.75
火烧地	F	118°29′49″	40°15′25″	25.00	25.00	0
	G	118°29′52″	40°15′27″	100.00	75.00	25.00

从表 8 中可以看出，除林火点 B_1 之外，由图像上所计算出的火区面积都大于其实地面积，而火烧迹地的图面面积则等于或小于其实地面积，这与 Flannigan 用 NOAA 气象卫星资料估算林火面积时所得到的结论相同，即对小范围的林火，往往会出现估算林火区的面积偏大，对大范围的林火，估算面积偏小。B_1 火区出现相反情况，其原因是 B_1 火区可燃物稀疏，在飞机通过上空时已经燃烧完毕，几乎等同于一块火烧地，所以估算面积偏小。火烧迹地估算面积小于实地面积，这是很自然的。因为火烧迹地与其周围的地物温差不大，不可能使其周边的地物呈现热辐射状态，其成像不存在扩大的现象。当火烧迹地与四周的地物的温度、颜色相近时，部分火烧地的成像难于与其相邻地物区分，此时便会产生面积估算偏小的问题。

表 8 中所标注的经纬度是根据校正后的 FWB 图像上确定的。由于原始图像畸变较大，经过几何校正之后，点位平均误差约为 43.0m。这样的定位精度，对于指挥林火的扑救及灾情分析与评估还是足够的。

根据 FWB 图像所识别出的最小林火点的实地面积为 0.3m×0.3m，这是试验中所布设的最小火点。需要说明的是，由于通讯条件的限制，地面放火人员与机上领航员之间的联络仅仅借助于一般的对讲机，地面点火时间及火势大小均难于严格控制，致使飞机进入火点上空时，火点上的可燃物(柴草)已经燃烧完了，除林火 D 之外，其余火点上均没有明火存在。如果火点燃烧旺一些，即使面积小于 0.3m×0.3m 的火点也是能够被探测出来的。在 FWB 图像上所显示出来的部分烟囱，其实际尺寸一般不超过 0.3m×0.3m。由此可见，利用 AADS—1268 扫描仪及本文所提出的火、热点特征模型技术，可以尽早发现林区中的小火点，对森林火灾作出快速分析和评估，实现林火早期报警，达到减少森林火灾，保护生态环境的目的。

参 考 文 献

[1] 中国林学会. 护林防火知识. 中国林业出版社，1988

[2] Flannigan M. D., Forest Fire Monitoring Using the NOAA Satellite Series, Thesis for the Degree of Master of Science, Colorado State University. 1985

[3] F. F. 萨兹. 遥感原理及解译. 地质出版社，1981

应用红外遥感的森林火灾监测及灾后生态初步评估的研究①

游先祥　张晓丽
（北京林业大学森林资源与环境学院）

摘要　应用红外遥感技术进行森林火灾监测是当前常采用的方法，本实验对林区航空扫描模拟信息彩色编码图像、航空11波段扫描数字图像处理的影像、火灾后接收的TM数字处理后的图像进行了对比分析，研究表明，航空红外遥感的图像都能对森林火灾进行准确监测，配上GIS对原有热点的识别，完全可以对生产用火、生活用火、森林火灾及林中火点进行准确区分，并能对灾后的生态环境及损失作出相应的评价。TM卫星图像由于周期为半个月，因此在森林火灾的连续监测中能力有限，但由于具有较多的波段，且覆盖面积大，对提取植被生长状况信息能力强，故对灾后生态环境评估仍是行之有效的手段。

一、研究方法及实验地区概况

为了进行分析对比，实验中应用了1987年5月6日大兴安岭森林大火的模拟图像，该图像应用的是DS－1230双通道红外扫描仪，在森林火灾南部地区扫描的两条带之模拟图像、该区地面森林丰富、森林火灾燃烧面积大、扫描应用的双通道包括了A通道（波长8—14μm）、B通道（波长3—5μm）、考虑到当时已是5月份，A、B两通道定温区间都为4.2　40.5℃，比例尺从1：6500至1：50000，分辨力为1.25m×1.25m至8.75m×8.75m。

11通道航空扫描实验在河北迁西县长城山区进行，地面河谷为杨树，山上为油松，实验范围内有居民点多处及乡镇炼铁厂，地面布设有不同大小的火点，其中在河谷大杨树下布有0.4m×0.4m及1m×1m的燃烧点、山上在不同坡向上布设有0.4m×0.4m，10m×10m等不同大小的人工燃烧火点，当飞机扫描时已有过火区和正在燃烧区几种类型。

TM卫星图像是在1993年2月点火试验的四川省西昌地区，扫描图像是1993年4月接收的磁带、图像中包括了本年度点火试验区、过去不同年度的森林火灾迹地。

二、实验结果及分析

（一）双通道红外扫描仪对森林火灾监测的分析

DS-1230双通道热红外扫描仪的红外波段范围为A 8—14μm，B 3—5μm，扫描视场角

① 参加该工作的有唐幸林、杨晓明。

77°20′，温度分辨率为 0.2℃，温度参考源范围可达 -50—+150℃，磁带记录，磁带通过 DS 1813 数字彩色处理装置与 DS—1230 双通道信号处理系统联机后，将磁带记录进行模拟信号处理，增强某些信息，排除某些干扰因素，再进行彩色编码，将温度范围分成 6 个等级，并以红、黄、绿、青、蓝、品红 6 种基本颜色表示温度参考源所标定范围内的温度变化，白色表示超过标定温度上限的温度，黑色表示低于温度下限的温度。地面同一目标由于在 A、B 通道两个不同波段范围内辐射强度不同所表现的记录上的差异，经过加、减、乘、除，使某些信号增强或减弱，从而突出了所需的信息。在大兴安岭森林火灾监测中就是应用该法进行处理的模拟图像（见彩版 V）。图像中的白色为正在燃烧的森林、红色为燃烧过的火场、黄色为中等温度区，即在燃烧边缘或过燃区边缘温度上升区，绿色、浅蓝色、深蓝色都为未燃森林，但温度场不同，潮湿未着火的森林区为紫色，而暗紫红色为超低温度区，多为沼泽地和水域，这样在图像上能完全清晰地看到森林火灾温度场的分布，火烧漫延趋势，火灾燃烧状况和未燃烧情况，它为指挥灭火、评价灾情及灾后生态环境有重要意义和作用。

（二）航空 11 通道遥感的林火监测试验

1. 航空 11 通道遥感传感器特性分析

航空遥感 11 通道传感器包括了 6 个可见光波段，4 个近红外波段，一个热红外波段，热红外波段温度灵敏度很高（表 1）。

表 1　航空 11 波段传感器系统主要参数

通　道	带　宽	相应 TM 波段范围	灵　敏　度		
			12.5 扫/min	25 扫/min	50 扫/min
1	0.42—0.45		0.46E—07	0.83E—07	2.1E—07
2	0.42　0.52	1	0.14E　07	0.12E　07	0.53E—07
3	0.52—0.60	2	0.24E—08	0.40E—08	0.92E—08
4	0.60—0.62		0.48E—08	0.69E—08	0.11E—07
5	0.63—0.69	3	0.25E　08	0.30E　08	0.51E—08
6	0.69—0.75		0.18E—08	0.22E—08	0.34E—08
7	0.76—0.90	4	0.98E—09	0.12E—08	0.18E—08
8	0.91—1.05		0.11E　08	0.13E　08	0.23E　08
9	1.55—1.75	5	0.76E—09	0.78E—09	0.11E—08
10	2.08—2.35	7	0.24E—09	0.30E—09	0.51E—09
11	8.5—12.0	6	0.03℃	0.04℃	0.05℃

$$NT\Delta T=\Delta T+(V_2-V_1)/V_n$$

2. 航空 11 通道各波段信息量计算

为了分析 11 通道各波段在图像分类及林火监测中的作用，对扫描磁带中的部分窗口进行了信息量的计算（表 2），通过信息量计算表明，信息量最大的为近红外的 7 波段，依次为热红外 11 波段，可见光 5 波段等。表中数据与其他遥感信息量计算有相同之处，即标准差大，信息量亦大，波段范围中灰度等级亦宽，均值也大。

表 2　航空 11 通道各波段特征值

各波段特征值 / 波段	亮度最小值	亮度最大值	均值	波段亮度范围	标准差	波段中包括的亮度等级	信息量	信息量排序
1	0	255	37.58	14—51	8.34	47	5.0317	11
2	0	255	89.33	32—147	23.44	115	6.4841	10
3	0	255	89.45	19—165	28.65	146	6.6832	9
4	0	255	82.34	16—159	31.10	143	6.9869	5
5	0	255	93.18	17—181	36.84	164	7.0077	3
6	0	255	123.64	26—190	29.58	164	6.8208	7
7	0	255	173.94	34—255	40.71	221	7.1176	1
8	0	255	166.05	43—255	36.95	212	7.0805	4
9	0	255	107.74	17—173	32.22	156	6.9576	6
10	0	255	73.02	17—135	27.13	118	6.6970	8
11	0	255	190.07	89—255	38.09	166	7.1073	2

从表 2 可以看出，从信息量组合方面看 7，11，5 组合较好，它包含了可见光 5 波段，亦即 TM3 波段，近红外 7 波段，亦即 TM4 波段和热红外 11 波段，亦即 TM6 波段，但 TM6 波段分辨率低，而航空 11 波段的空间分辨率与其他波段相同，所以航空 11 波段的作用远比 TM6 波段强，在组合中对地类识别能力和林火监测能力，地面温度场都有很好的作用。实际上这 3 个波段反映了地类中的土壤地表特征（波段 5）、植被特征（波段 7），温度及水湿特征（波段 11），在红外波段组合中，则以 7、8、11 三个波段组合较好。

3. 航空 11 波段监测火点性能比较

为了分析不同波段和波段组合对覆盖地区地类、火点识别能力，我们应用增强、比值变换、波段组合等图像处理方法，并对数字处理的图像进行了判读分析（表 3）。分析表明，对于火点

表 3　不同波段组合识别能力综合分析

评价项目 / 波段组合	对火点识别能力	地类边界清晰度	对地类识别能力	评价项目 / 波段组合	对火点识别能力	地类边界清晰度	对地类识别能力
10,7/5,3	优	较清晰	良	11,8,1	优	较清晰	良
10,7,3	优	尚　可	中	11,9,2	优	较清晰	良
11,5/8,1	良	较清晰	良	3,7/5,8/7	差	尚　可	中
10,7/5,8/7	优	较清晰	良	7,8,4	差	较清晰	良
11,10,9	优	较清晰	良	8,3,2	差	较清晰	良
11,8/7,9	良	清　晰	良	8,5,2	差	较清晰	良
11,7,2	良	清　晰	优	5,4,2	差	不清晰	差
7/2,7/5,8/7	差	清　晰	良	8,3,1	差	不清晰	差

的识别能力，必须应用 10 和 11 波段，其次应有 7 波段。从组合图像中可以看出，应用 10、11 再加上一个近红外或者 1 个可见光波段，都能准确地识别地面火点为 0.4m×0.4m 以上的火点，也能识别高温的位置，因此配合 GIS 完全可以解决森林火、生产用火、生活用火三种类型的识别，而对地类的识别能力和火点识别能力的综合性能上看，则以两个红外波段和一个可见光波段，如 11、7、5；10、7、3；11、8、1 等较好。有近红外和可见光组合的图像对地类识别能力都较好，

而全由可见光波段组成的图像则对火点、地类的识别能力均不佳。总之，对林火的监测必须应用11、10两个波段方能取得较好的效果。例如波段10，波段7/5，波段3的组合，以及波段11，9，2的组合，均可清晰反映0.4m×0.4m的火点，参见彩版V上C、D、E等火点。

三、应用TM卫星图像的林火灾后生态评估

由于TM在同一地区、同一幅接收时间间隔半个月，不能快速发现火点，也不能连续监测林火蔓延动态。因此在林火监测中有很大的局限性。但TM有反映火点温度场的热红外波段(TM6)、有反映植物吸收红光进行光合作用的TM3波段以及对植物具有高反射的TM4波段和反映植被、土壤水分的TM5、TM7波段，这些特点使TM卫星图像具有反映森林植被生长状况和林地水热条件、可区分较多地类的特性。而且覆盖面积大(185km×185km)、分辨力较高、波段多、波谱范围跨度大、具有很好的数字图像处理能力，因此TM卫星图像是当前进行林火灾后生态评估的一个很好的信息源。

火烧迹地由于火烧类型(如林冠火、地表火等)、火烧强度、被烧树种及树种组成及结构不同、火烧面积大小及已烧时间不同，从而使火烧迹地林木生活力受到的影响程度不同，火烧迹地本身，以及迹地周围的生态环境受到的影响程度亦不同。这些都反映在迹地中林木生长状况及生境条件的变化，这些特征经数字图像处理的信息提取后都能进行很好地识别。尤其是迹地与迹地周围的生态环境差异、迹地对大范围生态环境的影响都能应用TM卫星图像进行分析和评价。如在西昌地区近8年以来的火烧迹地，无论弱、中、强度火，在图像中都能进行识别，其中弱度火随火烧后间隔期的增加，恢复都很好，与周围未烧林分差异不明显，即生态环境基本恢复。而强度火即使相隔时间已久，但仍与周围生态环境有明显差异。这些差异主要是由于火烧迹地中林木光合作用变低，在TM4波段中反射降低，图像中饱和度低，色调呈褐色甚至是深褐色。在西昌幅大面积的数字处理图像中，由于火烧迹地面积小且分散，从大环境看影响不大，如果火烧强度增大，面积增大，将对生态环境有很大影响，而且部分强度火烧迹地多年后在图像中仍呈暗褐色、饱和度极低，与周围未烧林差异很大，表明已很难自然恢复。以上表明，在云南森林分布区，应防止中、强度火以及大面积林火的发生，否则会对生态环境造成很大影响。而小面积、分散的弱度火对云南松林的生态环境不产生很大影响，而且很快能恢复。实验证明，TM卫星图像在林火灾后生态分析评估中具有很好的功能。

四、结　论

试验表明，应用不同层次、不同信息源的遥感手段，立体地对林火发生、蔓延进行监测及对林火灾后生态评估是一种有效的方法。NOAA卫星由于一天可连续8次通过同一地方，有对火点敏感的2个热红外波段，又具有可见光、近、中红外波段，时效性好，因可与天气预报结合进行，故投资低，因此是长期进行火险监测的信息源之一。一旦林火发生，并有蔓延之势。应用航飞双通道红外扫描或多波段扫描进行监测为佳，因它们的热红外波段对火场温度非常敏感，且分辨力高，可发现1m²以下火点，可以定温标，从而可迅速区分火场温度，能迅速对火场燃烧蔓延状况进行评估。同时还有监测潜在火灾蔓延的能力，为指挥扑灭火灾、分析火情、估测燃烧面积、迅速评估损失提供数据和资料。但由于这类扫描装置多为窄带状、几何精度低，应配合

GIS才能更好地区分生产用火、生活用火和林火等不同类型、准确确定位置，使其发挥更好的作用。

TM卫星时效性差，实时处理难度大，故在林火监测中有一定局限性。但波段多、有较多的可见光，红外、热红外波段、分辨力较高、几何精度高。数字图像处理能力强，对地类分类能力好，可识别林木生活力状况，可识别林地水热条件，对大范围内林地生态环境分析评价都很好，因此对林火灾后生态评估是非常好的信息源。但对土壤营养物质灾后变化，林地腐殖质变化很难从图像上进行识别，因此全面地评价仍应配合地面调查，并结合GIS才能达到更好的效果。

14. 林火仿真系统模型

彭世揆　余光辉　封维忠
（南京林业大学）

近年来，世界各地森林火灾频频发生。林火破坏了大量的森林资源，给人类社会带来了巨大的损失。林火问题的研究正日益引起人们的重视。林火仿真是林火行为研究的重要组成部分。它的研究有助于人们了解和预测林火的蔓延趋势和范围。为抗火、减灾和评估灾后损失提供依据。从目前发表的文献来看，林火蔓延模型多为依赖于经验参数的物理模型。这些模型不仅在一定程度上揭示了林火蔓延的理论机制，而且还提供了不少有价值的实验参数，给进一步研究林火打下了良好的基础。从仿真的角度看，林火蔓延是林火系统的动态行为。由于受各种因素的影响，这个系统的运行机制比较复杂，很难用一个理论模型准确描述。基于这种情况，本研究立足点于状态方程去建立林火行为的系统模型，并以此为基础估计和预测林火的蔓延趋势和火场温度的变化。当状态方程中的参数是未知的时候，可根据系统输入输出各点的温度变化情况。下面简要地讨论一下这两方面的系统模型。

一、林火的蔓延速度和范围

林火行为模型是一个时空模型，即林火是随时间的推移在一个二维空间发展蔓延的，为简便起见我们按极坐标的方式处理林火的蔓延。也就是说，以火源为中心按径向的方式建立林火蔓延的模型。

设，林火在某一向上的蔓延速度是均匀的，林火蔓延的输出量是火速和径向距离，则林火系统的状态方程可以写成

$$x(k) = \varphi x(k-1) \tag{1}$$

式中：x(k)和 x(k－1)是时刻 k 和 k－1 时的系统的状态向量，它的两个分量分别是径向距离和速度（用 r(k)和 $\dot{r}(k)$表示）

$$x(k) = \begin{bmatrix} r(k) \\ \dot{r}(k) \end{bmatrix} \tag{2}$$

φ 是状态转移矩阵，如果时间间隔为 T，则

$$\varphi = \begin{bmatrix} 1 & T \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{3}$$

(1)的观测方程可写成

$$Z(k-1) = Hx(k-1) + v(k-1) \tag{4}$$

式中，Z(k)是观测向量，H 是观测矩阵

$$H = [1\ 0] \tag{5}$$

(k－1)是观测噪声向量，其均值为零并设各时间点的观测噪声互不相关且方差为 σ^2，现在的问

题是，根据林火在各观测时刻的径向距离估计并预测林火在各时间点的发展状态，现假定我们已获得从0时刻到k时刻的$k+1$个观测数据，则由(1)和(4)式可得到在k时刻的系统状态$x(k)$的线性无偏最小方差估计$\hat{x}(k|k)$

$$\hat{x}(k|k)=\hat{x}(k,k-1)+K_k^*[Z(k)-\hat{r}(k|k-1)] \tag{6}$$

式中：K_k^*是估计值的增益

$$K_k^*=\varphi^k K_k=\begin{bmatrix}1 & kT\\ 0 & 1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\frac{-2}{k}\\ \frac{6}{k(k+1)T}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\frac{4k-2}{k(k+1)}\\ \frac{6}{k(k+1)T}\end{bmatrix} \tag{7}$$

$$\hat{r}(k,k-1)=[1\ kT]\begin{bmatrix}\hat{r}(0|k-1)\\ \hat{r}(0|k-1)\end{bmatrix} \tag{8}$$

而

$$\begin{bmatrix}\hat{r}(0|k-1)\\ \hat{r}(0|k-1)\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\hat{r}(0|k-2)\\ \hat{r}(0|k-2)\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}\frac{-2}{k-1}\\ \frac{6}{k(k-1)T}\end{bmatrix}z(k)-[1\ (k-1)T]\begin{bmatrix}\hat{r}(0|k-2)\\ \hat{r}(0|k-2)\end{bmatrix} \tag{9}$$

(6)—(9)式可以通过逐级递推而得到。

不难看出由时刻k预测时刻$k+1$时的状态容易由下式计算

$$\hat{x}(k-l|k)=\varphi^l\hat{x}(k,k) \tag{10}$$

方程(2)仅仅是最简单的一种情况。如果考虑地形(如坡度)对林火蔓延速度的影响并且有关参数是未知时，那么首先要采用系统辨识的办法对参数进行估计，然后再用状态方程进行预测。为了便于对系统参数进行辨识，可以将系统方程写成差分方程的形式：

$$r(k+1)+a_2r(k)=b_2u(k+1)+b_1u(k)+v(k) \tag{11}$$

式中，$u(k)$为k时，火点的高程，a_1、b_0、b_1为待定参数，只要给定观测数据，(11)式中的参数很容易由最小二乘法获得。在得到参数的估计值后，容易将(11)式改写成状态方程

$$x(k+1)=\varphi x(k)+Bu(k) \tag{12}$$

式中，$x(k)=r(k)$

$$\varphi=\alpha_1 \qquad B=\begin{bmatrix}\beta_0\\ \beta_1\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}b_0\\ b_1\end{bmatrix}-\alpha_1\begin{bmatrix}0\\ \beta_2\end{bmatrix} \tag{13}$$

由$r(k)$和$r(k+1)$不难对林火蔓延的速度作出估计。

二、火场温度模型

一般，火场的温度分布模型是用热传导的二阶偏微分方程近似表示的。在本研究中，我们同样以此方程为依据。但最后是以状态方程近似地描写火场各点随时间的温度变化的。

火场某一方向(径向)的温度分布模型可用下式表示：

$$\frac{\partial\theta}{\partial t}=a\frac{\partial^2\theta}{\partial x^2}+v\frac{\partial\theta}{\partial x}+f(x,t) \tag{14}$$

式中，θ表示温度，x表示离火源的距离，$f(x,t)$表示热源强度，a，v均为方程的参数，它们可以看成是扩散系数、风速等。采用分离变量法，此方程的解可以写成两个函数的乘积

$$u(x,t) = X(t)T(t)$$

其中，$x(x)$和$T(t)$分别是关于x和t的二阶和一阶微分方程。如果我们固定火点的位置，则此点上温度的变化可近似写成

$$T(t) + CT(t) = Bf(x,k) \tag{16}$$

式中，$f(x,k)$表示t时刻x点上的火场强度。B,C均为参数。解此微分方程可得

$$T(t) = T(o)e^{\alpha} + \int_{\cdot}^{t} e^{-\alpha} Bf(x,\alpha)d\alpha \tag{17}$$

其中，$T(0)$为x点上的初始温度。

(17)式同样可写成状态方程的形式，其第二部分可看成是系统的输入，而

$$x(k+1) = \varphi(k) + \Gamma u(k) \tag{18}$$

式中，$x(k+1)=T(k+1)$，$x(k)=T(k)$

$$\varphi = e^{-t} \qquad \Gamma = \int_{k}^{t(k+1)} e^{-\alpha} Bd\sigma$$

$$u(k) = f(x,k)$$

当方程的参数未知时，同样可将系统写成差分方程的形式，通过系统辨识的方式解决。火场温度的系统差分方程可近似写成下列形成

$$T(k+1) + a_1T(k) + a_2(k-1) = b_0(x,k+1) + b_1f(x,k) + b_2(x,k-1) \tag{19}$$

用最小二乘法估计其参数后，它仍可写成形如(12)那样的状态方程。

写成状态方程的形式不仅便于预测和仿真而且可以实时地调整系统，以便作出最佳的估计。

参 考 文 献

徐建华等. 状态估计和系统识别. 科学出版社，1981

15. 西南林火行为的计算机仿真系统的研究

蔡炳锌　彭世揆　余光辉
（南京林业大学）

一、引　　言

（一）概　　述

随着工业文明的不断发展，能源危机、环境恶化等重大社会问题日趋严峻。森林这一生态系统的主要组成部分和调节者，其多种效益也逐渐为人类所认识，对森林的需求也更为迫切，因而对森林的保护和管理愈加显示出重要性。林火作为森林生态因子也因此更多地为人类所关注。无论是针对给人类带来损失的森林火灾采取防护补救措施，还是为提高林分生产力，促进林木生长发育和控制森林火灾发生而进行的营林用火和计划火烧，在具体实施过程中，离不开对林火行为规律的研究。其中最主要的是林火蔓延速度和林火强度的探索，只有通过它们才能对林火发生发展状况进行估计和预报，从而为火灾的防护扑救和计划火烧方案的设计提供依据。

（二）林火行为研究概况

1. 林火机理

林火行为的研究以林火机理为基础，迄今的研究表明，森林燃烧也具备一般燃烧的特点。森林燃烧必须具备三要素：可燃物、氧气和温度。

（1）可燃物。可燃物是燃烧的物质基础，森林燃烧时，林中所有有机物都是可燃物，其中参与燃烧的为有效可燃物。燃烧时有焰燃烧产生明火，蔓延速度快，无焰燃烧产生暗火，蔓延速度慢。可燃物的状况直接影响到燃烧的类型。

（2）氧气。氧气是作为助燃剂参与燃烧，一般地氧气是经过高温活化后才与森林可燃物进行反应的。森林燃烧是在开放系统中进行的，按照大气中氧气的比例，森林可燃物在燃烧时，氧气的来源是充足的。

（3）温度。由于森林可燃物大多是在气态下参与燃烧，氧气也需要活化，在引燃时需要一定的外界火源，即需大到可燃温度，此后的活化过程则可以依靠自身燃烧释放的能量。因此研究林火不能不考虑可燃物燃烧时能量的释放。

森林燃烧是个非常复杂的过程，但从根本上说仍是化学反应过程，可燃物的燃烧分为 3 个阶段：

（1）预热阶段。在外界火源的作用下，可燃物温度上升，开始时大量水分被蒸发，温度上升缓慢，伴随着有烟产生，有部分可燃性气体挥发，但尚不能进行燃烧。

（2）气体燃烧阶段。随着可燃物的温度继续上升，当到达燃点后，大量可燃性气体挥发，温度急剧上升，并伴有明火产生。

(3)木炭燃烧阶段。即表面碳粒子的燃烧，此时温度高、热量大，最后剩下灰分，燃烧随即终止。

研究表明，可燃物预热阶段所需要的能量远远大于其它两个阶段。

林火的蔓延与燃烧时释放的热量多少和传播方式有密切关系，热量多少取决于可燃物的数量和燃烧性质，其传播方式基本有三种：

(1)热对流。热对流是林火释放的热量使局部空气受热后向上运动，而四周的冷空气从四周流过来形成对流，燃烧剧烈时，对流往往积聚了燃烧的大部分能量。

(2)热辐射。热辐射是林火燃烧区向外以电磁波的形式辐射热量，辐射强度与距离的平方成反比，与燃烧源的温度成正比。

(3)热传导。热传导主要是燃烧物内部传热，其快慢取决于导热系数，森林可燃物大都为不良导体，但其释放热量大，一般不易扑灭，地下火就是主要靠热传导方式进行蔓延的。总地说来，热对流和热辐射所传递的能量主要将火焰前方的可燃物进行预热，是外部的传热方式，它们使热量传递到可燃物的表面，促使林火的蔓延。

2. 林火行为研究概况

早在19世纪初，国外就有将林火分为速行火和稳进火等林火研究的报道，但并没有形成指导生产实际的理论体系。20世纪30年代，Bram 提出了著名的林火强度公式，随后 Rothermel 等人从物理、统计等方面对林火行为进行研究，从方法上基本有三种：

(1)实际火灾的调查分析法，或称为案例分析研究。即通过具体时间、地点对森林火灾的发生发展进行调查分析。

(2)统计分析法。即在大量的实际森林火灾和计划火烧的资料基础上建立统计模型，并藉此作一定范围的推广应用。加拿大的林火火险系统就采取了这种方法。

(3)物理模型。即根据燃烧学的基本理论，通过大量的野外小型火的试验，人为地选择控制一些显著影响林火行为的因子进行模拟试验分析。目前的研究表明这种方法对于研究林火蔓延的初期阶段颇为有效。

另外一种简便的方法就是图解法，是对林火环境进行比较粗略估计的基础上以图解的方法将火场绘制成图，方法粗放。见图1。

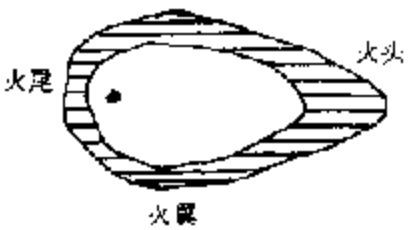


图1 林火火场基本形状图

林火行为研究，随着对林火机理认识的加深，从内容上逐渐集中到可燃物、地形、气象条件三个方面。著名的 Rothermel 公式，它就是根据火峰前沿单位可燃物引燃的能量守恒原理，再结合室内外的火烧实际得出，它所考虑的因子包括风、地形、可燃物干湿度、可燃物成分、热力学特性、负荷量、可燃物的排列方式和形体结构等。加拿大国家林火火险等级系统中，通过降水、相对湿度、风速、气温估计细小可燃物的湿度码，并据此结合地形、风来求算最初蔓延指标。国内郑焕能(1983年)提出森林燃烧环的概念，并据此概念对林火行为进行分级讨论，但目前仍限于定性范畴。王正非(1985年)曾利用气温和风速作为二元相关因子建立了蔓延速度计算式。王正非(1985年)、毛贤敏(1988年)在美国、加拿大的研究基础上建立了山地条件下的林火蔓延速度方程组，分别以修正系统的方式体现可燃物、风、地形等因子的影响，同时沿用了国外某些计算方法中初始蔓延速度的概念。可以说，鉴于林火环境的复杂性，不管是物理模型还是

统计模型，都回避不了对可燃物、气象、地形等因子的统计意义上的估计。这既符合林火机理中对各因子的考虑，又可兼顾野外林火实际。如果配以小型林火试验进行分析验证，作者认为是研究林火行为的有效途径，也仍是今后相当长一段时间内的研究方法，而主要的问题是林火机理的深入研究、各因子作用方面的具体研究和现有研究模型在具体地区的调整和应用。

森林可燃物的含水状况直接影响到可燃物的预热过程，从而影响到林火的蔓延速度。对可燃物的含水状况的研究，采取了常规的野外采样干燥称重的方法，也有在观测站设立模拟环境进行测定的方法。可燃物的含水状况对林火的影响，无论是美国的各种时滞可燃物的划分，还是加拿大、澳大利亚湿度码、干旱码等指标，最终也是通过一些线性或非线性的统计模型拟合进行估计的。为了便于应用，有不少采取通过近期气象因子估计这种影响的方法，如曾在我国早期防火工作中应用过的综合指标法（聂斯切洛夫，前苏联）、实效湿度法（冨山久尚，日本）和近几年来各省、地区自行研究应用的指标如干燥度指标（四川甘孜）。总的认为可燃物的含水率低，用于预热的能量少，林火强度大，蔓延速度快，反之亦然。通常用于估计这种影响的因子有气温、相对湿度、降水、蒸发量等。

可燃物的负荷量影响到燃烧时释放热量的多少，分别不同林型进行负荷量的研究在国外开展比较早，相对应地在其模型中也就考虑了可燃物的热值等因素。

地形的影响，如图 2，一般认为起伏地形下，上坡方向上可燃物接收的燃烧过程中释放的能量多，表现出上坡火速度快，强度大；下坡方向，大部分的研究只考虑其减弱作用，据 Van wagner（美国）的研究，下坡火速度在坡度 0°—22.5°时随坡度的增加而降低，而在 22°—45°时随坡度的增加而增加，并逐步趋向于平地的情形。坡度产生的速度改正系数同坡度的关系呈抛物线，最低点在 22.5°左右。这其中除了辐射火焰的原因之外，热传导和燃烧块的滑移也是可能的原因。

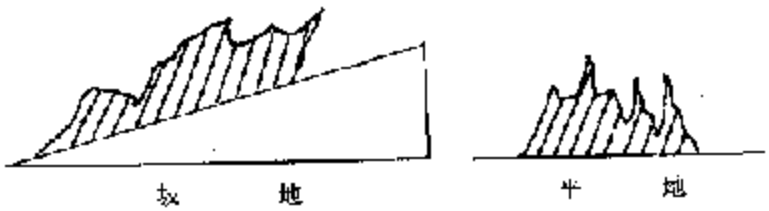


图 2　起伏地形火头侧面

风的影响有两方面，一是促使可燃物的水分的蒸发，二是促使燃烧时热量的传递。估计它对蔓延速度的作用常用指数式表达（王正非、毛贤敏、Wagner）。

3. 计算机林火行为仿真研究概况

计算机行为仿真的研究依赖于林火行为的研究和计算机技术的发展，同时也同生产实践的需要有关。最初多采用简单的椭圆模型，能大概地计算火灾后的火场面积。随着对林火行为规律的深入研究，一方面，处理各作用于林火的因子要借助于计算机，另一方面，对林火行为仿真的内容也更丰富，不仅要求火场面积，同时要求进行林火强度等指标的预测预报，从而为灭火或编制计划火烧方案提供依据。从简单的椭圆勾绘，目前已发展到利用地理信息系统的成果，以地形的栅格化数据为背景计算出林火火场并显示。

同时，利用地理信息系统的成果，将蔓延计算结果和地形背景叠加，蔓延计算采用逐个栅格进行的边界外延算法，林火可按发生发展的全过程顺序显示，动态直观。模型从理论上具有燃烧学上的物理意义，又以统计形式考虑复杂的林火行为因子，别的地区可以根据本地实际适当修改参数后使用。

二、林火行为指标的计算

林火行为指标如林火蔓延速度、林火强度等是林火蔓延模拟、组织人员扑救和灾后损失评估的基础。

林火蔓延速度的计算

对地表火而言，可燃物状况、地形、风是林火蔓延速度的三个主要因子。迄今为止的研究对可燃物状况的研究一直围绕可燃物的含水量(燃烧性)展开。但这些因子对林火蔓延速度的影响是何种数量关系仍不明确，鉴于林火环境的复杂性，通过一些容易获得的气象因子和可燃物因子直接对其对林火蔓延速度的影响作出估计，这样的模型是完全可行的，而且往往更便于推广应用，当然从森林燃烧机理出发，这些因子必须反映出可燃物的干燥程度、燃烧性和数量等。地形和风对林火蔓延速度的影响仍沿用指数修正的方法。作者提出用下式来计算林火蔓延速度：

$$R = A \times Kf \times Kmt \times Kg \times Kw$$

式中，A 为常数项；

Kf 为可燃物系数；

Kmt 为温湿系数；

Kg 为地形系数；

Kw 为风系数。

各系数的求算下面分别加以讨论。

1. 温湿系数

根据气候学家张宝堃用干燥度划气候带的公式、前苏联聂斯切格夫划分林火火险等级的综合指标以及四川甘孜州火险等级划分中对干燥度的计算方法，结合在实际应用中上述几种方法的效果，避开连旱日数很长时指标值无限制增加的弊端，同时区分不同季节可燃物含水状况，我们先设计如下温湿度指标：

$$T_t = \sum_{i=1}^{15} \frac{S_i + 0.1}{\sum_{j=1}^{i} t_j + 20} \times 8$$

式中：T_t 为温湿度指标；

S_i 为距林火发生日 i 天的降水量，具体情况分：有降水日指日降水量(mm)；无降水日时，阴天取 0.02，晴天取 0；当天的降水只计林火发生以前的；

t_j 为距林火发生日 j 天的 14 时温度。

该式的基本思路是某地的降水量少、温度高则可燃物的湿度小，距林火发生日时间长短不一，其影响也不一样。一般认为一次降水过程后在 15—20 天后其影响逐渐消失。所以选用了

15天的温度、降水资料。另外，天气的阴晴对林火也有影响，阴天的太阳辐射少，应当也是林火的阻抗因子。

为了进一步反映不同地区、不同季节的温湿状况，在分析四川省林火发生频度和火灾面积的基础上，作者又根据空气相对湿度来设计了如下温湿度指标：

$$T_m = \frac{1}{25.3 \times m^{5.6} + 1}$$

式中：T_m 为温湿度指标；

m 为由月均相对湿度插值得出的日均相对湿度。

用此方法而不用每日测出相对湿度，目的是为了反映出不同季节的状况。

根据这个指标可以反映出不同季节地面可燃物的燃烧性和格局变化。以四川省云南松林为例，相对湿度和火灾关系如下表一。

表1 四川云南松林近10年火灾面积及平均相对湿度关系表 单位：万亩，%

项目＼月份	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
面　积	3.3	15.3	22.7	15.7	10.2	1.1	0	0	0	0	0.004	0.2
湿　度	51	46	41	45	56	73	75	75	75	74	66	59

结合两个指标得到温湿系数求算表达式：

$$K_m = e^{-T_i} \times T_m$$

从上式看，近期的降水使温湿系数值下降，相同的 T_i 值在不同的月份温湿系数也不同，以四川7月和2月的温湿系数相比，根据上表可知，7月的相对湿度是75%，2月是46%，T_m 值分别为0.165和0.754。这与林火发生发展的实际情况是吻合的。

2. 可燃物系数

地表可燃物系数主要体现可燃物的数量、类型和配置格局。作者认为可燃物对蔓延速度的影响，起主要作用的是可燃物的易燃部分，即地表可燃物中的干枯杂草、小枝、落叶、树皮、地衣和苔藓。通常这些可燃物干燥快、燃点低、燃烧速度快。同时下层的可燃物由于相对于上层而言受热缓慢，水分蒸发也缓慢。如果是比较潮湿的非易燃可燃物，则主要是滞后燃烧，对林火蔓延的贡献不大。同时易燃可燃物无限制的积累也会使下层可燃物由于辐射散热受阻、不可能使蔓延速度无限制地增长。加拿大林火火险等级系统中的初始蔓延指标就用了短时滞类型的可燃物。对四川云南松林可燃物状况的调查分析表明，在考虑地表易燃可燃物（按马志贵等人的划分方法）加上灌木层和草本层的可燃物，每吨可燃物燃烧释放的热量在 1.8×10^{10} 焦耳左右，而只考虑地表易燃可燃物时也与此值相差不多。分析结果见表2。

表2 不同云南松林易燃可燃物能量统计 单位，10^{10}J

类　型	地表易燃可燃物	地表易燃可燃物、灌木层和草本层
草类云南松	1.7848	1.7466
灌木云南松	1.8002	1.7768
常绿栎类云南松	1.8007	1.8071
落叶栎类云南松	1.7955	1.7921
旱冬瓜云南松	1.8119	1.8035

因此在云南松林区，影响可燃物系数的主要还是数量和配置格局，考虑自然堆积的情形，我们关注的重点将是易燃可燃物的负荷量。有资料表明可燃物的积累与林火发生的关系呈现出一种类似逻辑斯蒂克曲线的形式，根据以上的分析，以易燃可燃物深度为因子，建立可燃物系数 Kf 的计算公式如下：

$$Kf = \tanh(hf \times B)$$

式中：hf 为易燃可燃物深度(cm)；

B 为常数项，本次试验取 0.18。

根据上式，可燃物系数随易燃可燃物深度增加而无限趋近于 1。这与罗廷贵对林火发生与可燃物积累关系的研究相似，而不同的森林状况可能导致 B 值的不同，在实际应用中应针对性地进行试验修正。

3. 地形系数

根据王正非、毛贤敏和加拿大[6]的研究，地形订正系数为：

$$sf = e^{3.533(\frac{\sigma}{100})^{1.2}}$$

式中：sf 为蔓延因子；

σ 为倾斜地面每百米上升高度(m)。

将该式中 σ 改为地形坡度则为：

$$sf = e^{3.533 \times tg^{1.2}\varphi}$$

式中：φ 为地形坡度。

为了使该式能用于求算坡面上各方向上的蔓延速度，如下图 3 所示，设坡向为 sdd，坡度为 sd，所求速度的方向为 vdd，则该方向上坡面倾斜角为：

$$' = \text{arctg}(\text{tg}(sd) \times \cos(Vdd - sdd))$$

所以该方向上蔓延因子为：

$$sf = e^{3.533 \times tg^{1.2}\varphi}$$

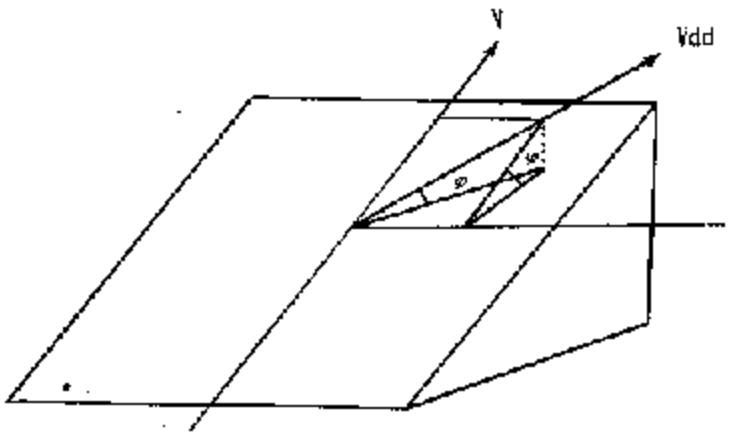


图 3　坡度，坡向与计算方向

根据野外林火火烧试验，我们发现在四川云南松林区，当坡度较小(15°以下)时，该表达式用于计算林火蔓延速度比较吻合，当坡度增大时，一般对上坡火总估计过大，分析上式，作者认为其中常数项 3.533 应随坡度变化，根据作者拟合的地形系数表达式为：

$$Kf = e^{(-0.055 \times sd + 3.65) \times tg^{1.2}(\varphi)}$$

分析上式，随着坡度的增加，上坡蔓延速度不断增加，当达到 45°时，这种趋势逐步减少，最终又转为蔓延速度逐步减小。由于对大坡度(大于 70°)火烧试验资料匮乏，仅解释为大坡度情况下，一方面可燃物分布大多成块状，不具连续性。另一方面，燃烧时易导致燃烧块的下滑，因而上坡蔓延速度有下降趋势。考虑下坡火，在 0°—35°，随着坡度的上升，蔓延速度呈下降趋势。当坡度再增加时，下坡蔓延速度则又逐步回升，达 65°以上时，下坡蔓延速度有可能超过同样情况下的平坡蔓延速度。这种结果与 Van wagner 的研究在具体数值上有别，但形式完全相

似。事实上对四川省的林火计划火烧试验分析结果也具此种趋势。上、下坡蔓延时地形系数同坡度的关系见图4。

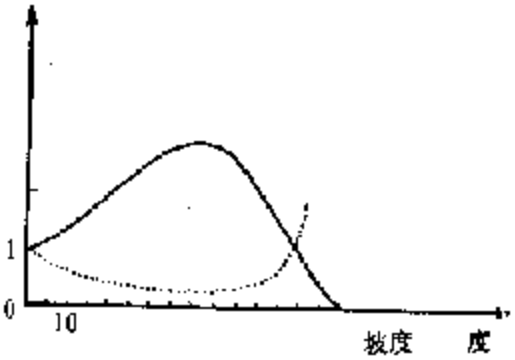


图4 上、下坡地形系数与坡度关系

4. 风系数

对风影响林火蔓延的原因，一般认为是其促进了可燃物的干燥和燃烧过程中的热量交换。在山区，由于地形因素的影响，使风的行为非常复杂。为了既反映风的这些方面的作用，又便于计算。大多数的模型采用林地上方的主风方向上的风行为。沿用毛贤敏研究[1]中对风速风向的考虑，在风方向上，风速越大，蔓延速度越大，修正系数 Kw 就越大。应有：

$$Kw \propto V$$

式中：V 为风速。

则有：

$$\Delta Kw \propto \Delta V$$

设它们的比值与当时的状况有关，则有：

$$\Delta Kw = c \times \Delta V$$

式中：c 为常数。

$$\int \frac{dKw}{Kw} = \int c dV$$

$$Kw = K_0 e^{cV}$$

当 $V=0$ 时，$Kw=1$，所以 $K_0=1$，因而有：

$$Kw = e^{cV}$$

毛贤敏利用王正非的数据计算出 $c=0.1783$。

考虑风对不同计算方向上蔓延速度的影响，假设风向为 Wdd，风速为 m/min，计算方向为 Vdd，则：

$$Kw = e^{0.1783 \times V \times \cos(Vdd - Wdd)}$$

$V \times \cos(Vdd - Wdd)$ 是风在计算方向上的投影值，可以看出，在与风方向相反的方向上，风对林火蔓延起到延阻的作用。

通过对以上各系数的分析，利用四川省林业科学研究院在西昌磨盘山林区的试验数据，由于林火资料限制、采取在计算机上模拟的方法，得出：

$$R = 1.4 \times Kf \times Kmt \times Kg \times Kw$$

式中：各系数由上述分析中的式子求出。

三、林火蔓延的计算机模拟

(一)蔓延算法及其实现

1. 边界插值算法

该算法是基于具备栅格信息的条件下建立的，由于地形、风等因子的综合影响，火场常不呈平常所说的椭圆形状。边界插值是指只计算从初始火源点出发的八个方向，而其它方向通过插值的方法形成火场边界。

森林起火后，假定火源点的行、列位置分别为 x 和 y，考虑自火源向八个方向蔓延，取正东、正南、正西、正北和东南、东北、西南、西北八个方向。各方向上只计算自火源点出发的该方向上的栅格，其余栅格不作考虑。

在进行蔓延计算前，必须先进行有关地形、气象、森林因子的计算，最终形成速度文件，或能够在蔓延计算时方便地调用的中间数据文件。假定各栅格的八个方向蔓延线速度均可在计算时调用，记为 V_{ijk}。i 表示行号，j 表示列号，k 表示方向号，标识的方法是：自正北方向顺时针赋以八个方向值为 0 至 7，如图 5 所示。

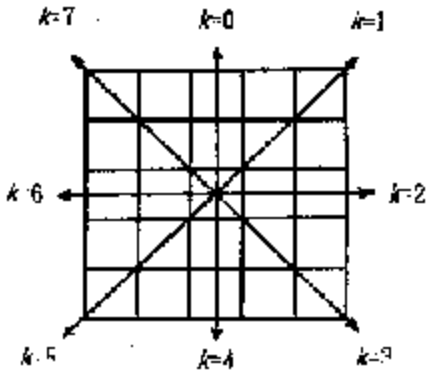
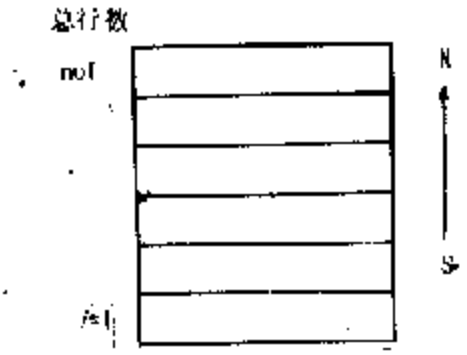


图 5　栅格方向标识方法



$j=1$　　nom 总列数

图 6　DEM 数据获取方向

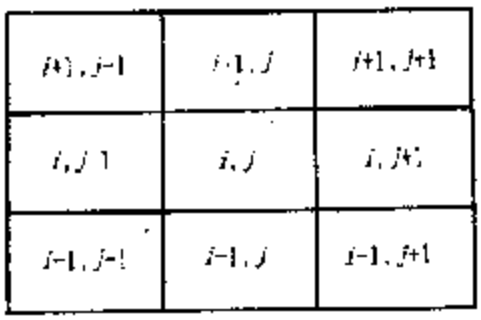


图 7　栅格的八个方向邻格关系

设栅格边长为 L，为了识别计算过程中各方向上的栅格，尤其是在蔓延计算中调用的那些栅格，还需建立栅格之间的相邻关系。一般地数字高程模型(DEM)数据是以由南至北的顺序获取，因而八个方向邻格之间的关系反映在行列号上，如图 6、7 所示。

为说明蔓延计算过程，我们以北向为例，也即方向号为 0 的情况为例，设火源点的行列号分别为 i_0, j_0。这样，下一格起燃时间为：

$$t_{i_0+1,j_0,0} = L/V_{i_0,j_0,0}$$

再下一格的起燃时间为：

$$t_{i_0-2,j_0,0}=t_{i_0+1,j_0,0}+L/V_{i_0+1,j_0,0}$$

依次类推，我们可以导出该方向上第 n 格的起燃时间为：$t_{i_0-n,j_0,0}=t_{i_0+n-1,j_0,0}+L/V_{i_0+n-1,j_0,0}$

其余七个计算方向上的方法类似得出，仅在相邻关系上有所不同。我们可以得出：

正北方向：$k=0$

$$t_{i_0+n,j_0,0}=t_{i_0+n-1,j_0,0}+L/V_{i_0+n-1,j_0,0}$$

东北方向：$k=1$

$$t_{i_0+n,j_0+n,1}=t_{i_0+n-1,j_0+n-1,1}+L'/V_{i_0-n-1,j_0+n-1,1}$$

正东方向：$k=2$

$$t_{i_0,j_0+n,2}=t_{i_0,j_0+n-1,2}+L/V_{i_0,j_0+n-1,2}$$

东南方向：$k=3$

$$t_{i_0-n,j_0+n,3}=t_{i_0-n+1,j_0+n-1,2}+L'/V_{i_0-n+1,j_0+n-1,3}$$

正南方向：$k=4$

$$t_{i_0-n,j_0,4}=t_{i_0-n+1,j_0,4}+L/V_{i_0-n+1,j_0,4}$$

西南方向：$k=5$

$$t_{i_0-n,j_0-n,5}=t_{i_0-n+1,j_0-n+1,5}+L'/V_{i_0-n+1,j_0-n+1,5}$$

正西方向：$k=6$

$$t_{i_0,j_0-n,6}=t_{i_0,j_0-n+1,6}+L/V_{i_0,j_0-n+1,6}$$

西北方向：$k=7$

$$t_{i_0-n,j_0-n,7}=t_{i_0+n-1,j_0-n+1,7}+L'/V_{i_0+n-1,j_0-n+1,7}$$

式中：

$L'=\sqrt{2}\times L$

由以上八式可以求出八个方向上逐格的起燃时间，如果给定起火模拟的时间，只需以此时间为阈值，各向上计算至时间大于等于该值为止，记录下各方向的栅格行列号，再反映到具体地形上，可以使火场状况一目了然。另外，可以依据这八个终结点进行插值运算使火场形成封闭的边界。

2. 边界外延算法

(1)基本原理　林火蔓延过程，其显著地表现出：

1)外延特性。林火总是由正在燃烧着的区域向未燃烧的区域或复燃区蔓延，在不考虑复燃的过火火场模拟时，就表现为向未燃区延烧的性质。

2)最快路径特性。林火不仅是一地理现象，而且是一个时间现象。从已燃点到未燃点，一方面是地理位置上的变化，另一方面是时间的延续。到达一未燃点，林火总是从诸多可通达路径中最快到达的一条。有时并不是最短的路径。所以称之为最快路径特性。有的研究利用这一特性，借助于图论中树的概念来解决蔓延算法问题[50]，也正说明了林火的这一特性。

在具备栅格信息的前提下，实现林火边界外延的蔓延算法，首先要明确林火边界集合，前已述及，边界的判断原则是该栅格的周围尚有未燃烧且具备蔓延可能性的栅格。如图 8 所示，图中 P 点已不具备这一条件，所以不是林火栅格边界。其次也要明确栅格的八个方向相邻关

系，同时，整个边界集合有一个可蔓延的相邻栅格集合。如图 9 所示。A、B、C 三点正处于燃烧状态，则下一个起燃栅格也只有从这 3 个点的邻格中去寻找，我们仍以八向蔓延为基础，图 9 中下一个可能起燃的栅格为图中标注了"★"的那些栅格中的一个。这是搜索起燃栅格的基础。

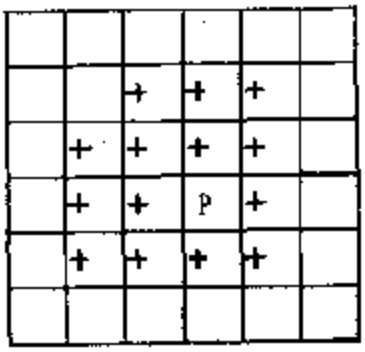


图 8　判断边界栅格
（图中"+"表示已过火）

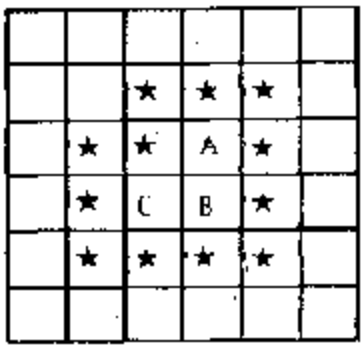


图 9　可蔓延边界相邻栅格集合的组成

实施这一算法的步骤是：记录每加入一新的起燃栅格后形成的林火边界，在可蔓延边界相邻栅格集合中，搜索其各向上所需时间最短的栅格，并以此栅格作为下一个被引燃的栅格。为了进行下一步的计算，必须对该栅格进行是否林火边界的判断，同时对由于该栅格的加入导致的原有边界集合的变动作调整。如此再去搜索新的起燃栅格，重复至满足模拟时间为止。以流程框图表示如图 10。

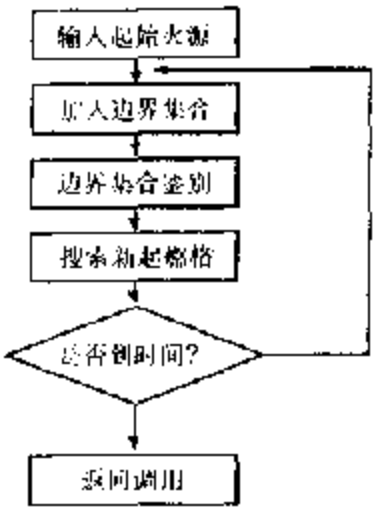


图 10　边界外延算法流程框图

(2)算法实现

1)数据结构。林火蔓延过程的模拟要求具实时性，才能达到辅助防火等林火管理的目的，对于模拟算法的实现来说，就是要求运算速度尽可能地快。计算机硬件往往对内存有限制，数据置于硬盘或软盘上，由于频繁地进行数据调用会大大降低运行速度，在算法实现过程中，如何采用恰当的数据结构，以尽量避免过多地与软、硬盘交换数据，这对算法的有效性十分重要。以 400×400 的栅格数据为例，如果把 16 万个栅格的八向蔓延速度、行列号和时间全置于内存中运行，这显然不现实。通过前面对蔓延算法的分析，由于算法中只需要林火边界及邻格的数据，进行某一次的计算时，可以只考虑当前林火边界栅格的行列号、八向蔓延时间及过火时间(指本栅格)。过火时间是指本栅格起燃的时间值，八向蔓延时间指本栅格向八个方向邻格蔓延直至起燃所需要的时间，八向蔓延时间的计算方法如下：

$$TS[i] = Tm + L/V[i]$$

式中：i 为本栅格向下一邻格的方向号，其确定方法同边界插值算法中的方法；

$V[i]$为本栅格 i 方向上的蔓延速度；

L 为本栅格到下一栅格的地面距离；

Tm 为过火时间。

为了加快计算速度，节约内存开销，时间和速度可以采用倍乘于10的方法取整型值。另外对于每个边界栅格的八向蔓延时间采取有序化的放置方法，以便于最短时间值的搜索。我们知道要确定新起火栅格的行列号，必须了解本栅格的行列号及至该新栅格的方向号。因此，可以对$Ts[i]$的记录方法作一修改，$Ts[i]$本身为整型值，再倍乘于10，然后加上方向值，也即：

$$Ts[i] = (Tm + L/V[i_j]) \times 10 \quad i$$

通过对$Ts[i]$的有序化后(作者采用升序)，这样每次搜索时只要对所有边界集合的$Ts[0]$进行比较就可以了。相应地我们可以建立如下的数据结构将蔓延计算过程中所需要的信息存放在内存中：

记录序号	边界栅格行号	边界栅格列号	八向蔓延时间	过火时间
1	x_1	y_1	$Ts1[8]$	$Tm1$
2	x_2	y_2	$Ts2[8]$	$Tm2$
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

2)过火标志的设立。在运算过程中需要不断判别某栅格是否过火，由于栅格数目庞大，内存有限，直接为每个栅格设置一整型或字符型标志值，所需内存太多。同样置于软、硬盘的话，又影响运行速度，作者利用C语言中位操作的便利，设置一巨型逻辑尺，以8位字符型变量的各位分别代表八个栅格的过火标志。这样利用一个字符指针就可以完成对逻辑尺的存取操作，从而满足系统中对任意栅格过火与否的判断需要，而且占用内存少，运算速度也快。仍以400×400的栅格为例，若每栅格设一字符型变量为标志的话，需16万字节，这对内存是个不小的压力。如果采用巨型逻辑尺的方法，可以减少到16/8=2万个字节，大大减轻了内存压力。图11的流程是完成对任意栅格标志值的读、写操作。

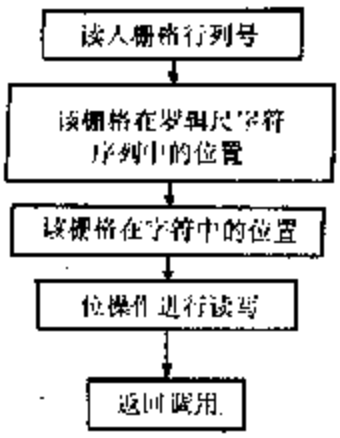


图11 过火标志读写操作流程框图

3)边界栅格鉴别。运算时，一方面由于内存限制，另一方面是算法中并不需要，边界栅格记录不会与过火栅格同步增加。前已述及，每加入一新的边界栅格后，需对边界栅格集合进行鉴别处理，有的需要删除、有的需要将某一方向变为不可通达。

①. 如果一边界栅格的八个方向邻格都是过火栅格，则从边界栅格集合中删除该栅格。

②. 如果一边界栅格不满足上述条件，但某方向上的邻格已是过火栅格，则使该方向不可通达。具体方法是将该方向的蔓延时间值改为一大于模拟时间的值，因而在模拟时间内是不可能重复到达这方向邻格的。如图12所示，设P为新的起燃栅格，来向为$\overrightarrow{AP}$，图中"★"部分和A、B、C、D、E、F、G、H都是已过火栅格，图12左图中，$\overrightarrow{BP}$、$\overrightarrow{CP}$、$\overrightarrow{EP}$和$\overrightarrow{PB}$、$\overrightarrow{PC}$、$\overrightarrow{PD}$、$\overrightarrow{PE}$方向上都已不可通达，不需要再作蔓延计算了，其蔓延时间值应置为大于模拟时间。图12右图中P的加入，不光使部分方向不可通达，同时，P的八向邻格都是已过火点，所以应当从边界栅格集合中删除这一记录。

在已知加入栅格的情况下，受其影响的邻格中属于边界栅格的，需作调整处理的方向与加入栅格的关系为：

设调整的方向为 j，而加入格到该栅格的方向值为 i，则

当 $i<=4$ 时，$j=4+i$

当 $i>4$ 时 $j=i-4$

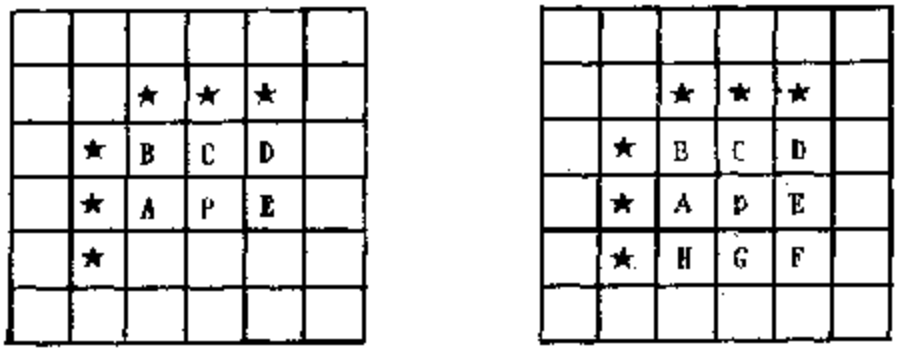


图 12　边界栅格集合的鉴别

4)初始火源。蔓延计算起始于初始火源。如果是一个栅格为初始火源，只需把其 Tm 值赋以零，并把该栅格作为边界栅格直接加入到初始记录中。如果是多个栅格作为初始火源，那么一方面要对这些栅格作边加入边进行鉴别的处理，另一方面把它们的时间值都置为零，直到所有的初始火源栅格都经过计算。这也正是我们不通过具体的路径和结点去计算，而只关心其具备蔓延条件的各个方向的原因。所以从理论上讲，对于面域数据形式的初始火源的情况，也同样适用，分散的多个栅格的火源的情况也是如此。

(二)地形因子分析

前已述及，林火蔓延速度与地形因子密切相关，尤其是坡度、坡向，在具备数字高程模型的条件下，对地形因子进行提取分析是蔓延模拟的先决条件。

1. 地形因子分析

根据空间矢量的分析原理，建立数字高程模型每一个格网点的标准矢量$\overrightarrow{P_{i,j}}$，如图 13。

$$\overrightarrow{P_{i,j}}=[(i-1)\times\Delta x+x_0,(j-1)\times\Delta y+y_0,z_{ij}]$$

$$(i=1,2,3,\cdots\cdots nom-1,nom)$$

$$(j=1,2,3,\cdots\cdots nof-1,nof)$$

式中，Δx 为 x 轴方向的增量，Δy 为 y 轴方向的增量。x_0 和 y_0 为起始点坐标值，$\overrightarrow{z_{ij}}$为格网点高程数据。

具体计算坡向时，作者采用简化的微分公式，方法如下：

如图 13 所示，设 za、zb、zc 和 zd 为地表单元格网点的高程数据，ds 为相邻格网点的增量，则 P 点的微分公式为：

$$U=\frac{\partial z}{\partial x}=\frac{za-zb}{2dss}=\frac{\sqrt{2}(za-zb)}{2ds}$$

$$V=\frac{\partial z}{\partial x}=\frac{zc-zd}{2dss}=\frac{\sqrt{2}(zc-zd)}{2ds}$$

$$slope_{ij}=\text{arc tg}\sqrt{U^2+V^2}\text{(弧度)}$$

$$=\text{arc tg}\ \sqrt{U^2+V^2}\frac{180}{\pi}(\text{度})$$

坡度自然在0°—90°之间。

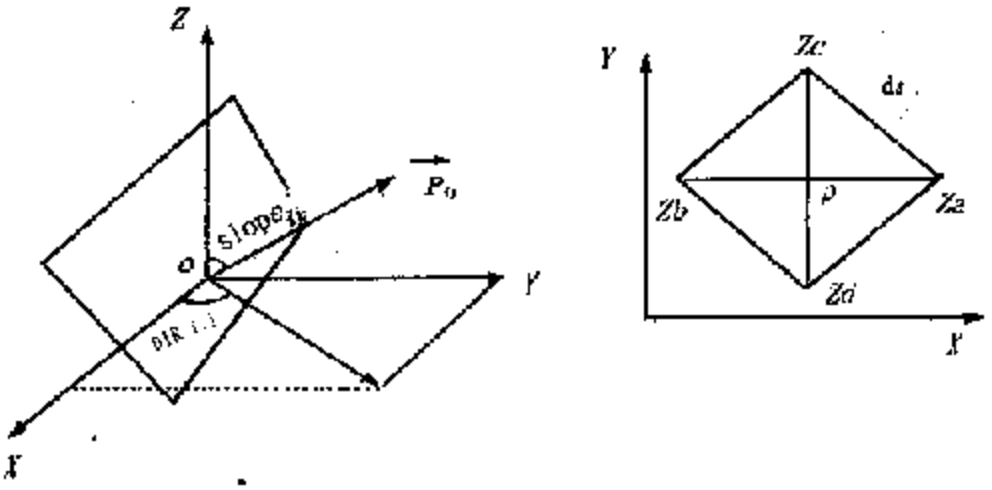


图13 坡度坡向分析

2. 坡向分析

根据图14，X 轴为正南，因而地表单元坡向为其法矢量$\overrightarrow{n_{i,j+1}}$在 XOY 平面上的投影n_p与 X 轴的夹角，计算公式为：

$$DIR=\text{tg}^{-1}\left(\frac{\overrightarrow{y_{n_{i,j}}}}{\overrightarrow{x_{n_{i,j+1}}}}\right)$$

$$=\text{tg}^{-1}\left(\frac{A(j)\Delta x}{B(j)\Delta y}\right)$$

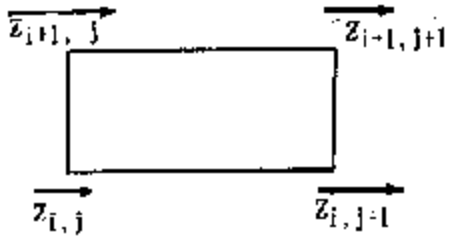


图14 坡向算法

式中：

$$A(j)=\overrightarrow{z_{i+1,j+1}}+\overrightarrow{z_{i,j+1}}-\overrightarrow{z_{i,j}}-\overrightarrow{z_{i+1,j}}$$

$$B(j)=\overrightarrow{z_{i+1,j+1}}+\overrightarrow{z_{i-1,j}}-\overrightarrow{z_{i,j+1}}-\overrightarrow{z_{i,j}}$$

具体计算时，需转换为标准的方位角表示，即以北向为基准顺时针方向旋转，用0°—360°之间的角度来表示，其转换方法如表4。

表4 坡向转换表 度

$B(j)$	$A(j)$	DIR	坡向
=0	>0	90	东
=0	<0	270	西
=0	=0	无	平
>0		如上式计算	阳或半阳
<0		如上式计算	阴或半阴

3. 曲面面积计算

林分过火后的面积求算还必须依赖于曲面面积的计算，因为根据格网的面积只能得到投

影到水平面的面积，根据空间矢量的物理性质，单元曲面面积 S_{ij} 可以表示为：

$$S_{ij}=\{(\Delta y\Delta y[\overrightarrow{z_{i,j+1}}-\overrightarrow{z_{i,j}}-\overrightarrow{z_{i+1,j+1}}-\overrightarrow{z_{i+1,j}}])^2+(\Delta x\Delta x[\overrightarrow{z_{i,j+1}}+\overrightarrow{z_{i+1,j-1}}-\overrightarrow{z_{i+1,j}}-\overrightarrow{z_{i,j}}])^2+\Delta x^2\Delta y^2\}^{\frac{1}{2}}$$

(三)背景显示及要素叠置

1. 地形背景的显示

根据地理信息系统提供的数字地形高程模型，经过栅格向矢量形式的转换，将研究区域的地形等高线作为地形背景显示，或者根据三维透视原理，将地形以透视投影图的形式显示。

(1)平面背景的显示　平面背景的显示基于再生栅格数据进行，再生栅格数据来源于由多边形或弧段数据生成，这些数据是经过插值和平滑处理的格网高程数据，为了能迅速地对林火作出反应，背景显示不应当有很长的运算时间，针对这样的要求和条件，可以对所提供的栅格数据进行插值加密至屏幕容许大小的栅格数据，然后逐行进行等值线级判断和是否显示判断，如果原有栅格数据与所要求的屏幕大小相差不太大时，可以边插值边进行显示与否的判断。

插值采用双线性插值方法，鉴于再生栅格数据的来源和屏幕大小的限制和仿真系统的要求，采用这种方法进行再生栅格数据的矢量化是可行的。

(2)三维透视投影　应用三维透视投影原理，采用三维齐次坐标和透视投影的矩阵变换方法，可以将数字高程模型中的各行、列及高程值转换为三维空间中的坐标，最终投影到视见区并显示出来。作为立体模型，主要有两个步骤：

1)投影变换　三点透视的原理是先绕 x 轴 θ 角使平面 $px-qy+rz=0$ 上过原点的法线 $N(pqr)$ 旋转到 $Y-Z$ 平面上，再绕 x 轴旋转 $-\varphi$，使法线 N 与 y 轴重合，然后向 V 面正投影得到透视投影变换结果。

2)隐藏线处理　根据栅格数据的存贮顺序，采用扫描线 Z 缓存算法，先读入靠近观察者的行进行透视投影显示，扫描线上各点是否被隐藏取决于该点 x 值情况下，缓存中记录下的最小或最大 Z 值与该点 Z 值的比较。如果以屏幕坐标来说，若靠观察者的 y 值大，则在同一 x 值的情况下，y 值大于缓存中的 Z 值时，该点被隐藏。反之，则不会被隐藏。缓存中记录的 Z 应是同 x 值条件下，各已进行逐行处理过程中的最小值。

3)三维图形的旋转　背景的三维显示使一部分点被隐藏，因此当林火火源或火场发展到这些点时，在计算机屏幕上将无法看到，为此必须使该三维图形能够按不同的视点位置旋转，对于一定大小的栅格高程文件，作者采用旋转数据文件的方法，简言之，针对不同的旋转角度，针对性地改变高程文件的读取顺序，仍沿用扫描线 Z 缓存的方法进行隐藏处理，从而得到旋转后的三维透视投影图。

2. 其它地理要素的叠置

其它地理要素的叠置采用边读取高程，边打开这些属性数据文件提取，据此以不同的颜色显示，对道路、水系、居民点和森林调查因子均采用此方法。

3. 过火区叠置

火场是以蔓延计算后得到的一系列的栅格点的行列号或转换后的矢量坐标记录，在和背景叠置时，考虑到要体现林火蔓延趋势，在三维背景下，加上时间成为四维系统，不能采取逐行扫描回显的方法，而必须按着火的先后顺序在背景上显示，根据不同的背景处理，操作也不同。对于平面等高线的背景，只需根据蔓延计算的起火顺序读出并直接在屏幕上显示。对于三维透

视背景，这些过火点需要先进行透视投影变换，同时还根据该位置的地形要素是否被隐藏来决定该林火点是否显示。具体做法上仍采用了蔓延算法中巨型逻辑尺的设置，在为存中记录下地形要素显示时的各点隐藏情况，然后利用这一逻辑尺来判断林火点是否隐藏。

四、软件运行

软件运行环境

该软件全部用 TurboC(2.0)开发，采用汉字下拉式菜单，由于直接访问汉字字库，所以无需启动汉字系统。只要具备地理信息系统的栅格数据，就可以在屏幕上以二维或三维方式显示出来。本软件是西南防火课题的一部分，地理信息系统部分将由别的课题组提供，本系统针对具体的信息进行处理，并应用于林火蔓延和损失评估中。整个系统的运行见图 15。

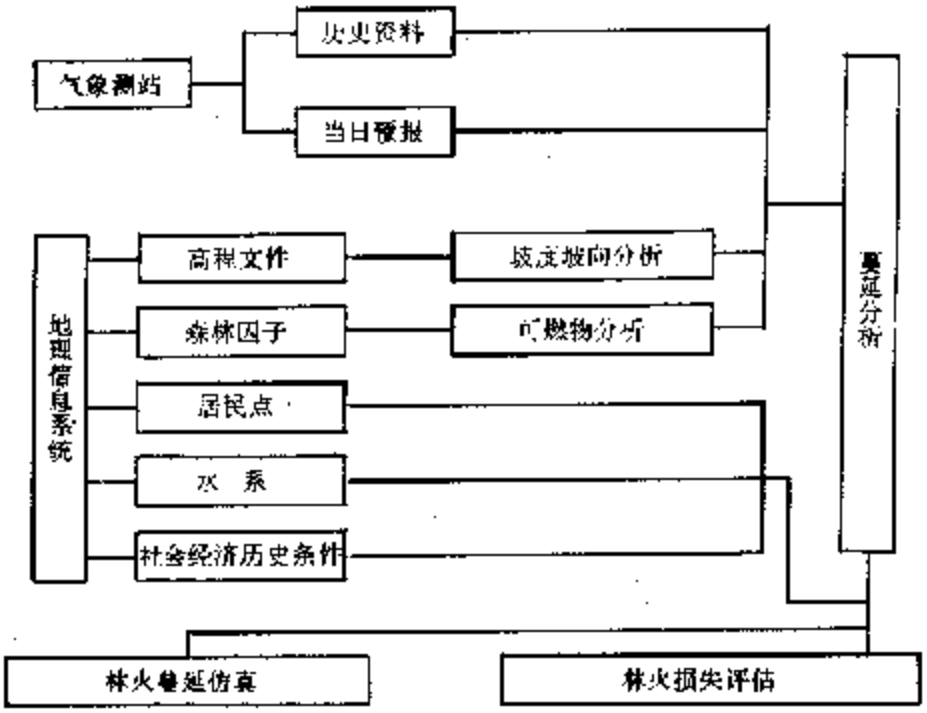


图 15 系统运行示图

参 考 文 献

[1] 宋志杰等. 林火原理和林火预报. 气象出版社，1991

[2] 王金锡等. 云南松森林计划烧除试验研究(之一). 森林防火，1993(1)，9—13

[3] 王金锡等. 云南松森林计划烧除试验研究(之二). 森林防火，1993(3)，3—7

[4] 单克华等. 攀西地区云南松林燃烧性的研究. 四川林业科技，1991(2)，28—36

[5] 杨道贵等. 计划火烧对云南松生长的影响. 森林防火，1992(1)，9—11

[6] 石生彩. (资料)国外林火预报方法综述. 森林防火技术文集，48

[7] 熊增等. (资料)云南省森林火灾的特点. 森林防火技术文集，56—57

[8] 刘志强等. 气象与林火关系. 森林防火技术文集. 58－59
[9] 金晓钟等. 森林火灾的蔓延速度与模式研究概述. 森林防火技术文集，70－72
[10] 马钟风华. 评价火险期危险程度的方法. 森林防火技术文集，82
[11] 金继忠等. 加拿大林火天气指标系统在大兴安岭林区的试用. 森林防火技术文集.
[12] 王正非等. 加拿大林火等级系统概述. 森林防火技术文集
[13] 文定元等. 森林防火. 湖南科学技术出版社，1987
[14] 侯玉海等. 5.6特大森林火灾的调查分析. 黑龙江科学技术出版社，1990
[15] 高颖仪等. 林火分布图的绘制与应用. 森林防火论文集(2)
[16] 郑焕能. 森林燃烧环网及其应用. 森林防火技术文集，1—5
[17] 徐裕华. 西南气候. 气象出版社，1991
[18] 翁笃鸣等. 山区地形气候. 气象出版社，1990
[19] 王桂芝. 森林火灾与气象因子的关系. 森林防火，1988(1)，29－32
[20] 赵子玉. 森林火灾的预报与扑救. 森林防火，1988(1)，16－17
[21] 付国标. 林火长短期预报初探. 森林防火，1988(3)，30－32
[22] 路介禹. 关于森火强度计算的情况. 森林防火，1988(4)，13－15
[23] 李兆明. 福建省森林火险天气预报方法的研究. 森林防火，1989(1)，29－30
[24] 牛树奎译. 根据可燃物、地形和气象数据绘制大区域潜在火险图. 森林防火，1989
[25] Francis M. Fujioka，1985 Estimating Wildland Fire Rate of Spread in a Spatially Nonuniform Environment，Forest Sci. vol 31，No 1，1985. pp21－29
[26] G. J. Fryer and E. A. Johnson，1988，Reconstructing Fire Behavior and effects in a Subalpine forest，Journal of Applied Ecology(1985)，25，1063－1072
[27] J. Boone Kauffman and R. E. Martin，fire behavior，fuel consumption，and forest－floor changes following prescribed understory fires in Sierra Nevada mixed conifer forests，CAN. J. FOR. RES.，VOL. 19，1989，455－462

16. GIS 支持下的林火扩展模拟研究[①]

高　峰　　张林威　　宋启疆
（中国科学院南京地理与湖泊研究所）（保定师范学院）（北京师范大学）

摘要　定量模拟林火行为对于林火扑救决策部门具有重要意义。林火扩展具有时间和空间特征，因而对火场的模拟必须建立在空间型背景数据库之上，即要在地理信息系统（GIS）和遥感技术的辅助下完成。森林火灾的发生、发展有其内在和外在因素的相互作用，内在因素包括可燃物类型、可燃物湿度、地形等，考虑这些因素，研究与生成了像元尺度的植被燃烧基本历时图；外在因素主要指气候的作用，据其生成植被起火概率图以控制像元是否起火。在火场扩展中将 Rothermel 模型和经验模型结合使用，并考虑了坡度和风向带方向的因素的影响。最后利用迷宫算法在计算机上实现了火场在地理信息系统支持下的空间蔓延动态模拟。

一、引　言

森林作为陆地生态系统重要单元和与地球最近的保护层，它的存在与破坏正日益受到人们的关注。火灾是造成森林破坏的主要方式之一。全世界森林因火灾造成的损失每年约为1‰，林火多发国家可达2‰—8‰。近年来更因全球普遍变暖，诱发干旱连年，造成地中海沿岸国家、北美和澳大利亚森林大火肆虐。因而，澳大利亚 CSIRO 和 ANU 最近不得不招聘林火模型高级研究人员，美国则加速推进预测林火蔓延的新的计算机模型的出台，为林火扑救提供决策支持，反映了对林火蔓延模型需求的紧迫感。

利用遥感技术监测火灾，在国外起始于60年代初期的航空红外探测，对火行为发展的实质性研究要稍晚一些。初期的研究主要集中于建立自然因素与火行为关系模型（Rothermel，1972），分析林火行为特征，由于技术的限制，直到1979年 Kessel 才首次考虑了空间因素，并将空间的复杂性应用于林火扩展模拟之中。进入80年代，随着地理信息系统技术的发展，对林火行为模拟研究逐渐转向空间范围的定量模拟，在地理信息系统和遥感技术的支持下实现火场扩展的理论和经验模拟，并已取得了实质性进展，逐步走向实用化。

国内在林火行为研究中也做了不少工作，发展了森林火灾蔓延速度和强度的模型，但在空间上模拟林火行为的工作开展较晚，距离实用化还有一定的距离。本文的工作以四川凉山州实验区为例，在植被类型、地形数字高程、森林郁闭度、森林地位级、森林龄级、水系、公路等空间背景库支持下，考虑地形、坡度和风向的影响，建立了林火行为空间扩展模型，成功地对火场蔓延进行了空间模拟。

① 参加本项研究工作的有于芳、武乐涛、陈良贵、李荣英、马乐平等，在此一并致谢。

二、森林火场蔓延模型

森林火场蔓延模型研究一直沿着林火燃烧温度场、热量平衡和林火燃烧特征三个方向发展，其中以基于热量平衡的火场扩展模型进展最快，有希望走向实用化。

1. 基于温度场的林火蔓延物理模型

火在森林中的扩展与热的传播方式有密切的关系。基于温度场的林火蔓延物理模型，根据热传导、热辐射和热对流规律，以温度场作为描述火势的基本状态，用分布参数系统方法导出火势蔓延的数学模型，进而对林带一维系统的模型进行计算，它是一个分布参数的物理模型，其中各参数物理意义明确，可通过实验或参数识别法来实际确定。

2. 基于林火燃烧特征的火蔓延模型

森林燃烧系统是一个复杂的动态系统。火蔓延速度、火强度和火焰长度是描述森林火场的三大定量指标，其中蔓延速度最为重要。我国林火专家在这三个指标的定量化上做过不少工作，得出了一些经验和理论模型，用以计算林火蔓延速度、面积、强度以及火焰长度。

3. 基于能量平衡的 Rothermel 模型

Rothermel 模型是一个半经验模型，它把物理参数（如燃料物尺度、温度等）同物理变量结合起来，产生了蔓延速度公式。本文的空间动态蔓延速度模型即是以其为基础而加以改造的。

Rothermel 模型的物理基础是火场的辐射传输过程，它应用能量平衡原理导出平均温度微分方程，其中的扩展速度作为一个参数。

取一隔离体，应用能量平衡方程，可建立微分方程：

$$\nabla \cdot q = \quad (\frac{\partial D}{\partial t})$$

式中：q 为从控制体向环境的传热通量；

D 为单位体积可燃物净吸热量；

t 为时间。

$$D - \delta_a \cdot Q$$

式中：δ_a 为有效体积密度；

Q 为单位质量可燃物净吸热量。

$$\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} = -(\frac{\partial D}{\partial t})$$

$$\frac{\partial D}{\partial t} = \frac{dx}{dt} \cdot \frac{\partial D}{\partial x} = R \cdot \frac{\partial D}{\partial x}$$

忽略 $\frac{\partial q_x}{\partial y}$ 项积分得到

$$-R\int_{-\infty} \frac{\partial D}{\partial x} \cdot dx = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\partial q_x}{\partial x} \cdot dx + \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\partial q_z}{\partial z} Z_c \cdot dx$$

最后整理后可得到：

$$R = \frac{I_R \cdot \xi \cdot (1 + \Phi_w + \Phi_s)}{\rho_b \cdot \varepsilon \cdot Q_{ig}} \qquad (2-1)$$

式中：R 为林火蔓延速度(m/min)；

I_R 为火焰区反应强度(KJ/min·m²)；

ξ 为林火蔓延率(无因次量)；

Φ_w 为风速修正系数；

Φ_s 为坡度修正系数；

ρ_b 为可燃物集合的体积密度(kg/m³)；

ε 为有效热数(无因次量)；

Q_{ig} 为点燃单位质量可燃物所需的热量(KJ/kg)。

上述方程在实际应用中要求输入参数较多，参数间有嵌套关系，大部分地区不具备预报这些参数的条件。本文工作中对此模型进行了部分修正，加入了经验公式，使其更为实用。

尽管(2—1)式表达很复杂，但方程可以看作是4种环境参数的变量，即可燃物类型F、可燃物湿度M、风速W和地形坡度T，

$$R = f(F, M, W, T) \qquad (2-2)$$

(2—2)式中，风速和坡度两个因子对火场蔓延的影响具有方向性。结合(2—1)式可以得到：

$$R_{max} = R_{base} \times (1 + \Phi_w - \Phi_s) \qquad (2-3)$$

式中：R_{base}为不受风速和坡度影响的火场蔓延速度；$R_{base} = \dfrac{I_R \cdot \xi}{\rho_b \cdot \varepsilon \cdot Q_{ig}} - f(M, F, T)$

Φ_w 为风速对火场蔓延速度的影响(顺风方向)；

Φ_s 为坡度对火场蔓延的影响(上坡方向)；

R_{max}为火场蔓延最大速度。

由(2—3)式可见：火场的扩展方向是在风和坡度综合影响下形成的火场最大蔓延速度的方向；没有风速和坡度的影响，火场将以R_{base}的速度均匀扩展。带有风速和坡度影响的情况可以用图1中的椭圆来描述，椭圆长轴O_1A代表了R_{max}，即火场蔓延主方向，而O_1C和O_1C'代表了R_{base}，即火场基本扩展速度。当要确定任意方向上火场的扩展速度时(O_1x)，可使用下面的公式(2—4)：

$$R_b = \frac{R_{base}}{1 - (1 - \dfrac{R_{base}}{R_{max}}) \cdot \cos\theta} \qquad (2-4)$$

θ为O_1x与O_1A的夹角。

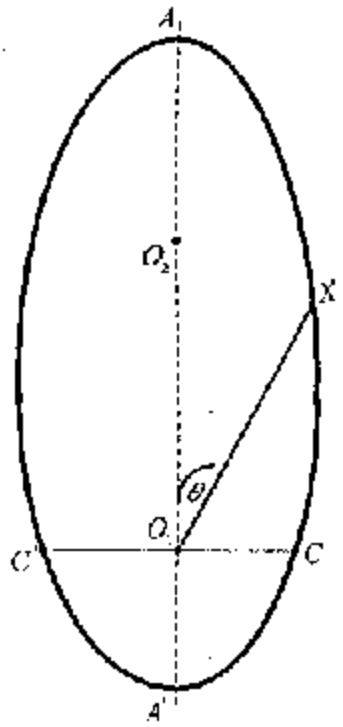


图1 椭圆模型

三、火场扩展模拟

1. 凉山州实验区概况

实验区位于西昌市附近西昌与盐源两县交界处，北纬27°40′—27°46′，东经102°—102°08′，面积101.1km²。该地区处于雅砻江和安宁河两大水系之间的磨盘山一带，海拔最低为1180m，最高处为2720m，年平均气温14—18℃，冬暖夏凉，干

湿季分明，为典型的季风型气候，冬半年降水量仅占全年降水量的10%左右，森林以草类云南松林，栎类云南松林为主，林缘及疏林地多为密灌枝和易干燥的禾本科及部分菊科植物。试验区植株高大，生长密集，含纤维多，干枯后不易腐烂，加之林下杂乱物堆集，干旱季节容易着火燃烧。这里山体高大，森林连片，林地面积大，一旦引燃，不易扑灭。因此，这里是凉山州的重点防火区域之一。

实验区的地形、气候及植被条件较为典型，同时交通便利、资料翔实、丰富，是进行森林火场蔓延空间模拟研究的理想地区。

2. 试验区背景数据库的建立

试验区背景数据基本资料有1：5万地形图、林相图，以及各类调查统计资料，由这些基本资料产生了背景数据库中的数据。

从1：5万地形图上清绘水系、政区界线、交通图、等高线4种要素，由于研究区地形起伏剧烈，等高线密集，因此清绘前先将地形图在复照仪上照像放大3倍，然后在放大的照像底片上清绘等高线，采用手扶数字化方式输入高程，利用ARC/INFO TIN功能生成数字地形高程，并形成了坡度、坡向图。

从林相图上清绘出以森林小班为单位的图斑并扫描数字化，每个图斑均按树种、龄级、郁闭度、地位级等因子，进行统一编码、存贮，需要时可形成各类林相专题图。

所有图件均转为栅格图像，经过严格配准后加入背景数据库中，最终形成图像栅格像元大小为25m×25m，图幅范围大小为340行×340列(见彩版Ⅵ)。

3. 技术路线

从前面的模型中可以看出，火点向各个方向扩展的速度取决于R_{head}的大小，以及Φ_w和Φ_s的作用。

R_{head}是可燃物类型、可燃物湿度和地形的变量，可燃物的湿度与气候、地形有关，气候则因起火季节而异，同一位置的可燃物在冬季可能燃烧而在夏季则不会燃烧，这对于火场最终蔓延扩展具有较大影响，因此在计算火场空间扩展前，需要生成一张像元燃烧可能性的概率图，表示一旦发生火灾，该像元点被点燃的可能性大小。起燃阈值取决于当时的季节及气象条件，可以自以往发生火灾的经验建立起对应的关系。

植被起火概率有别于火险区划，前者强调火点蔓延并起燃的可能性，只与自然因素相关；后者强调火灾发生的可能性，除与自然因素相关外，在很大程度上还要考虑到人类的活动影响。植被起火概率与多种自然因素相关，如植被类型、森林郁闭度、地形(海拔高度、坡度、坡向)等。试验区内云南松是一种易燃树种，其起燃的概率要大于灌木林地；又如森林郁闭度愈大，林内光线愈弱，温度愈低，蒸发小，湿度大，不易燃烧，反之则发生火灾的可能性愈大。再看地形因素中，随着海拔高度的增加，温度降低，蒸发变弱，湿度增大，发生火灾的可能性降低，此外阴坡和阳坡对火点起燃也有不同的影响。而河流、大公路、防护林对火场蔓延有阻滞作用。

具体计算方法为，在考虑的每个因素k中确定一个标准燃烧因子概率值为1，其它各因子燃烧概率P_{ijk}依据经验和前人工作成果而定，每个因素给定一个权重W_k，则最终一个像元起火概率P_{ij}可表示为：

$$P_{ij} = \left(\sum_{k=1}^{n} P_{ijk} * W_k\right) * P_{ijm}$$

式中：(i,j)代表像元所在的位置；P_{ijm}为阻止火场扩散因素，它是水系、道路和防护林的变

量，是个二值图，若(i,j)处有水系、大道路或防护林，则$P_{ij}=0$，否则$P_{ij}=1$。

W_k依据各因素贡献大小而定，为方便起见，设$\sum W_k=100$。彩版Ⅱ是最终计算的试验区植被起火概率图，图中颜色由黑到白表示燃烧概率由小到大的变化。

R_{base}不考虑方向性影响，可以预先生成火场扩展基本历时图，减少模拟时间。首先定义某类植被在一定条件下燃烧的标准像元时间，然后再确定其它各类的相对时间，像元燃烧绝对时间的计算可参考基于林火燃烧特征的火蔓延模型，本文工作限于没有基本燃烧参数，只是按经验和文献资料给定了相对时间，考虑的因素包括了植被类型、郁闭度、森林龄级，地形(高程、坡向)、道路、水系、防护林。彩版Ⅰ所示是最终生成的像元尺度植被燃烧历时图，图中颜色由黑到白表示了像元燃烧历时由短变长。

坡度对火场扩展的影响具有方向性，假定由本像元(i,j)到燃烧像元(g,h)的坡度为θ，基本燃烧速度为R_o，两象元间垂直投影距离为L，则实际燃烧距离：$S=L/\cos\theta$。

当火向上坡蔓延时，火场蔓延速度$R=R_o/\cos\theta$，则由它燃烧到下一个像元的时间$T=S/R=L/R_o=T_o,T_o$为基本燃烧历时。

当火向下坡蔓延时，火场蔓延速度$R=R_o\times\cos\theta$，则燃烧到下一个像元的时间$T=S/R=T_o/\cos^2\theta$。

风速的影响Φ_w是另一个带方向性的参数，Φ_w与风速的关系难以定量表达，本文在模拟时直接给定Φ_w的大小，风力越大，Φ_w越大。

在给定起火点的位置坐标，起火概率阈值，风Φ_w及方向，以及模拟扩展的时间后，系统即可以对一定时间范围内的火场扩展进行动态模拟显示，并可按行政或林相等进行燃烧面积统计。图2所示是以数据流方式表示的森林火场扩展计算机模拟的技术路线。

下一步利用历史火灾来检验系统模拟，利用历史资料(遥感、气象、统计等)确定风速对火场蔓延速度的影响；确定各类因素与基本扩展速度的定量关系。我国森林类型差异大，纯物理或纯经验的模型都有各自的局限性，这种半经验的模型可以充分利用获取的空间及统计资料，建立特定地区的相关模型，使系统更趋实用而准确。

一旦发生火灾，系统允许使用由遥感获取的蔓延范围作为输入进行后期蔓延模拟，若是模拟有误时，系统可以立即编辑调整设定新的扩展范围，由相对准确的范围再次扩展。

4. 计算机模拟实现

输入基本参数后，火点向四周蔓延，问题转变为求解带权重的最短路径问题，由起火点(x_0,y_0)经过一系列蔓延到达(x,y)时

若 $$\sum(t(x_0,y_0)+\cdots\cdots+t(x,y))\leq T$$

则符合这一条件的所有点的集合，就是最终蔓延结果。

对每一个像元点计算其最短路径，运算量非常之大。在具体解决中，我们引用了迷宫算法，每一点向外扩散有八个方向的选择，从正东开始，沿顺时针方向检测，每检测到某一方向就计算累积时间$\sum t$，若$\sum t$小于给定的扩展蔓延时间T，且该方位没有走过或是原先累积时间$>\sum t$，则向此方向走一步，并记下所走的这一步，存放在堆栈中，同时将累积时间修改为$\sum t$，累积时间可用二维数组存放，其初值设为零。若检测到这一步四周的$\sum t$均大于T或大于原先的累积时间，则退回一步重新检测下一个方向，如此重复检测，直至初始燃点四周的八个方

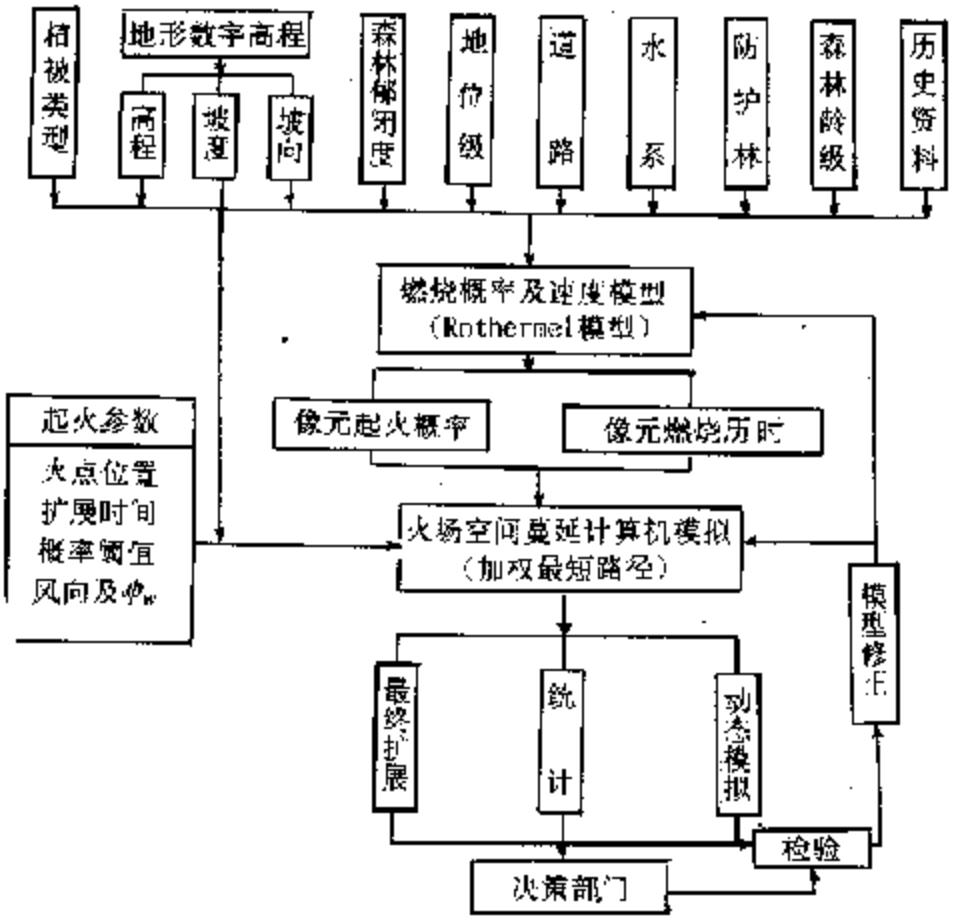


图 2　森林火场蔓延计算机模拟流程

位都已阻塞，堆栈中没有像元时，整个蔓延过程完成，最终二维数组中所存放的累积时间均小于 T，是满足燃烧蔓延时间 T 内的所有像元的集合。

彩版 Ⅱ 上所示是无风时火场蔓延动态情况，从左上角开始按顺时针方向分别表示了在时间 $T/4$、$T/2$、$3/4T$、T 时的扩展范围。图片中的背景图是以坡向图作为亮度，以植被类型图作为色度的合成图，因此图中既可以表示植被信息，又可以表现地形信息。火场扩展范围用红色表示，红色的明亮程度表示了燃烧时间的相对长短，暗红色燃烧时间较早，亮红色燃烧时间较迟。

彩版 Ⅱ 上所示为有较强的北风时火场动态扩展的情况，与无风火场蔓延相比，火场在南端和西北端蔓延较大，而在东北端和北端蔓延较少，这较好地反映了火场扩展受风向影响的结果。火场范围内没有燃烧的部分为燃烧概率较小的草地。

四、结　　论

通过以上工作，我们得到如下结论：

1. 火场蔓延具有时间和空间的特征，因此不仅要建立火行为三大定量指标的模型，更进一步地还要建立起以地理信息系统为基础的火场空间扩展模型，这对实际应用更为重要。

2. 火场蔓延模型的建立十分重要，本文使用 Rothermel 模型，并结合经验模型考虑到了

带方向的因素(坡度和风)和不带方向的因素的影响，成功地进行了火场空间蔓延模拟。进一步则需要建立该地区基于林火燃烧特征的蔓延模型，利用以往的火灾经验及资料，研究林火蔓延速度的定量模型，加强坡度和风对蔓延速度的影响的定量分析。

3. 考虑到季节、气象等外界因素对火行为的影响，本文生成了植被起火概率图，客观地反映了林火燃烧特征，阈值概率由当时的外界因素而定，阈值的不同将直接影响到火场的最终扩展，因此阈值的确定将是今后进一步研究的内容。

参 考 文 献

[1] 王正非. 森林潜在火行为预测预报. 林业科技，1990 年第 2 期

[2] 林业部调查规划设计院. 国家林火管理系统研制报告. 1992 年 6 月

[3] Rothermel R. C. A Mathematical Model for Predicting Fire Spread in Wildland Fuels, U. S. A. For. Serv. Res., 1972

[4] Rothermel R. C. How to Predict the Spread and Intensity of Forest and Range Fire. USDA For. Serv. Gen. Tech. Rep. INT -143, P161, 1982

[5] Francis M. Fujioka. Estimating Wildland Fire Rate of Spread in a Spatially Nonuniform Environment, Forest sci., Vol. 31, No. 1, 1985

[6] Albert J. simard. A General Procedure for Sampling and Analyzing Wildland Fire Spread, Forest sci., Vol. 30, No. 1, 1984

[7] Nelson, R. M. JR and C. W. Adkins. Flame Characteristics of Wild—driven Surface Fires, Can. J. For. Res., Vol. 16, 1986

17. 林火灾后林木死亡率的估测

蔡炳华　余光辉　彭世揆　周广胜
（南京林业大学）

林火灾后的灾情评估是林火监测、仿真评估及善后工作不可缺少的一部分，它对灾后进行适时补救，更新具有重要的现实意义。本研究在林火仿真的基础上，依据背景库提供的林地资料，并根据林火强度、林木碳化高度与林木死亡率之间的关系建立模型进行估测。

（一）林火强度的计算

进行实时模拟，直接测定火场的一些因子如火焰长度等很困难，因此估算林火强度必须依靠在林火发生前就可获取的一些因子及其由这些因子计算来的一些中间因子。从白兰林火强度公式出发，可燃物、林火蔓延速度是两直接因子，可利用分析林火蔓延速度时的指标来计算林火强度。通过对四川凉山州林火试验的案例分析和统计分析，结合计算机上的模拟，可得：

$$I = 650 \times Kmt^{1.5} \times Kf^{1.5} \times Kg \times Kw$$

式中：I 为林火强度（KW/m²）；

Kf 为可燃物系数；

Kmt 为温湿系数；

Kg 为地形系数；

Kw 为风系数。

（二）林木碳化高度的计算

许多研究中都用火焰高度或长度作为火场行为指标，有时还混为一谈。作者认为，能比较好地体现林火行为指标的应是碳化高度或称烧焦高度，而且该指标对于林木损失估计也更直接、准确。按照 Van Wagner 的研究，他曾以烧焦高度和林火强度之间建立过一统计意义上的关系式：

$$I = 0.85 \times hs^{1.5}$$

如果反过来建立这种关系，有理由假定：

$$hs \propto I^{2/3}$$

将单位换算成法定计量单位，并根据实际数据进行验证，得：

$$hs = 0.0174 \times I^{2/3}$$

式中：hs 为碳化高度（m）；

I 为林火强度（KW/m²）。

（三）灾后林木死亡率估测

一次林火发生以后，人们必须对林火损失进行估测，尤其是初步的林木死亡状况，然后确

定对火烧迹地或计划火烧的过火林地采取何种经营措施。在研究灾后林木死亡率中，最简单的方法是进行过火林地的调查，搞清林木受损状况。但是，一方面林木死亡时间常常可以延续到火灾后的二三年时间内，另一方面此项工作费工费时，不利于迅速作出预报，并及时采取灾后补救措施。因而可以考虑通过一些林火行为指标和树种特性结合对林木死亡率作出预报。

根据王正非等人对火烈度的研究，设想可以直接由火行为因子蔓延速度和林火强度估测平均烧焦高度，再由平均烧焦高度来估测林木死亡率。一次林火后，过火林地中各林木受害情况并不相同，一方面与林火的行为特点有关，另一方面又与林分状况有关。对同龄纯林而言，对一次林火后各林木的烧焦高度作统计分析，并以此为依据来估计类似林火条件下此类林分的受害状况是可行的，而平均烧焦高度是用于估计林木死亡率的一个比较直观的中间因子。具体做法根据过火林地的标准地调查资料，包括平均胸径、不同烧焦高度级的林木株数及不同烧焦高度级时的林木死亡情况，建立两类关系，一是不同烧焦高度级的林木被烧株数分布。二是不同烧焦高度级的林木死亡率。根据这两关系进一步求出各烧焦高度级上的林木死亡株数，对其求和得出全林林木死亡株数。

应用张兴利在油松纯林的调查资料分析。

1. 不同烧焦高度级的林木株数分布

$$y = \frac{1}{1 + ae^{bx}}$$

式中：x 为烧焦高度级(cm)；

y 为林木某烧焦高度级的累计株数百分率；

a、b 为系数。

2. 烧焦高度级株数百分率分布

取级距为 10cm，该分布满足：

$$y = \frac{-ab}{e^{-bx} \mid a^2e^{bx} \mid 2a}$$

式中：x 为烧焦高度级(cm)；

y 为林木某烧焦高度级的株数百分率；

a、b 为系数。

对油松纯林的分析，式中 $a=6.9$，$b=-0.055$，拟合 $r^2=0.94$。

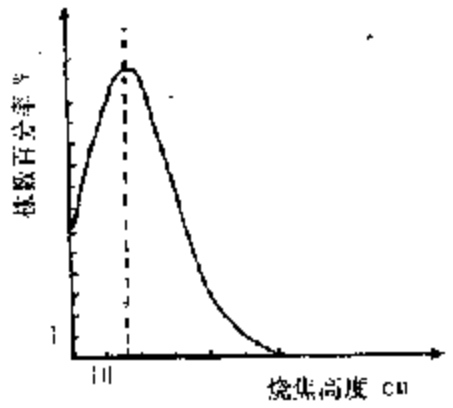


图 1　各烧焦高度级株数百分率分布

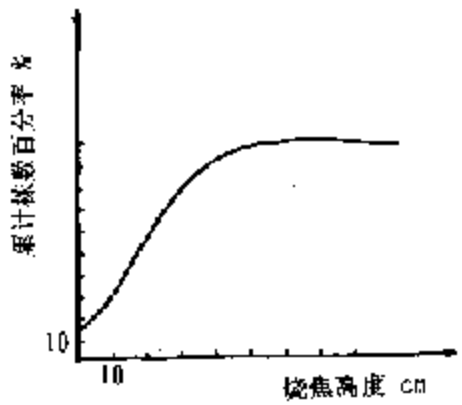


图 2　各烧焦高度级累计株数百分率分布

由上式，对两边求导得：

$$y' = \frac{ab^2(a^2e^{bx} - e^{-bx})}{(e^{-bx} + a^2e^{bx} + 2a)^2}$$

令 $y'=0$

$$a^2e^{bx} - e^{-bx} = 0$$

所以

$$x = \frac{-\ln a}{b}$$

也就是说，烧焦高度级株数百分率的最大值在$\frac{-\ln a}{b}$处，最大值为 $y=-b/4$。

从图 1 上看，株数百分率分布呈类似截尾正态分布。其平均烧焦高度同最大值处的 x。

2. 不同烧焦高度级的林木死亡率

以指数函数对此进行拟合，可得：

$$y = \frac{1}{1 + ax^b}$$

式中：x 为烧焦高度级(m)；

y 为某烧焦高度级时的林木死亡率。

分析该式，当烧焦高度在一定范围内时，死亡率缓慢上升，而达到一定高度后，死亡率急剧上升，尔后又随着烧焦高度的增加而无限趋近于 1。a 和 b 值反映了林木的抗火能力，由于林木年龄和树种不同，抗火能力各不相同。曲线图示如图 3。

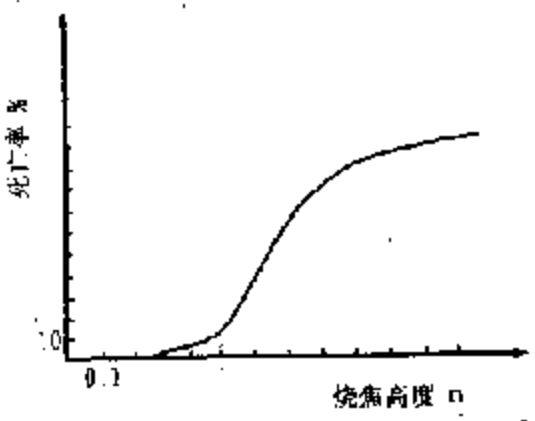


图 3　各烧焦高度林木死亡率曲线

对油松纯林数据拟合结果：$a=2.54$，$b=-5.88$，$r^2=0.96$

3. 根据株数百分率分布和各烧焦高度级死亡率求全林林木死亡株数和全林林木死亡率

$$f_1(x) = \frac{1}{1 + ae^{bx}}$$

$$f_2(x) = \frac{1}{1 + ax^b}$$

则全林林木死亡率　　$s = \sum_{x=10}^{\infty} (f_1(x) \quad f_1(x-10)) f_2(x)$

$x=10,20,30,40,\cdots\cdots$

如果知道全林林木株数 $T_总$，则依下式可求出全林林木死亡株数 T：

$$T = s \times T_总$$

相同的树种在这两参数上有一定的共性。所以在有了平均烧焦高度后，通过对林火发展状况的估计，实际上是对林内地表状况的估计后，即可以估计林火过后的林木死亡情况，随即有针对性地采取森林经营措施。

参 考 文 献

[1] 宋志杰等. 林火原理和林火预报. 气象出版社，1991

[2] 路介梅. 关于林火强度计算的情况. 森林防火，1988(4)，13—15

[3] 张兴利等. 油松纯林火害评价. 森林防火,1993(2),18—20
[4] 石生彩. 地面林火蔓延的几种形式及其计算方法. 林业科技,1993,27—28
[5] 王正非. 论生态平衡和林火烈度. 植物生态学与地植物学学报,1986(1)68—71
[6] 郑焕能. 森林燃烧环. 东北林业大学学报,1987(5),1—5
[7] 温文正. 林火信息管理系统. 中国林业出版社,1993
[8] James E. Eenigeburg,1987, Computer program for calclating and ploting fire direxion and rate of spread, Gernal Technical Report NC—117
[9] Ted Catchpole and Neville de Mestre,1986, Physical models for a spreading line fire, Aust. For., 1986, 49(2), 102—111
[10] Hal E. Anderson,1983, Predicting WindDriven Wild Land Size and Shape Research Paper INT—305
[11] C. E. Van Wagner,1988,Effect of slope on fires spreading downhill CAN. J. FOR. RES. VOL. 18. 818—820
[12] C. E. Van Wagner,1969,A simple Fire—Growth Model, The Forestry Chronicle 103—105
[13] James K. Brown and Cameron M. Jhonston,1987, Predicted residues and fire behavior in small—stem lodgepole pine stands, Gernal Technical Report INT—237
Martin E. Alexander,1982, Fire behavior in aspen slash fuels as related to the Canadian Fire Weather Index. National Research Council of Canada 1028—1030

18. 用 TM 数据进行林火灾害信息提取及损失评估方法的研究

孙小兵　彭世揆　方有清　余光辉
（南京林业大学）

摘要　本文应用试验区 TM 数据资料和地面调查资料，基于反射电磁波理论和亮度增益原理，以因子分析的数学反演技术，综合考虑影响试验区火烧迹地光谱效应的各敏感因子对 TM 图像的正负亮度增益作用；围绕地形、植被状况、水湿状况和灾害程度四大因子，确定出影响该区火烧迹地光谱效应的综合因子指标体系。结合 GIS 探讨研究了森林火灾后灾害信息的遥感提取方法，由此出发，对灾害面积和灾害造成的蓄积损失进行了较为准确的估计。

一、亮度增益原理

假设在制约遥感图像像元亮度值的诸多客观因子中，在某一因子发生了变化而其它因子保持不变的情况下，像元的亮度值发生了变化，那么该因子对像元的亮度就产生了增益，该因子就称为亮度增益因子。当表现为亮度值增加时，称其为正增益；反之称其为负增益。

亮度增益的大小与正负，取决于该因子变化的程度与属性，如果该因子能够敏感地反映出像元亮度值的增减，则称该因子为敏感亮度增益因子，简称敏感因子；反之，称其为非敏感因子。

以上原理可简单地用下式表示：

$$G_{确} = G_{标} + \sum_{i=1}^{n} g_i \qquad (1\quad 1)$$

式中：$G_{确}$ 为确定波段的像元的实际亮度值；

$G_{标}$ 为确定波段的像元在不受诸因子的影响条件下的亮度值，为一常数；

g_i 为某一因子对该确定波段像元的亮度增益，可为正也可为负；

n 为亮度增益因子数。

二、试验区概况与试验资料及分析

（一）试验区概况

本研究由于缺乏西南地区有关森林火灾的遥感资料，故选择的试验区位于内蒙古大兴安岭林区呼伦贝盟的免渡河林业局境内，其地理坐标在北纬 48°53′—49°09′，东经 120°36′—121°14′之间。属寒温带大陆性气候带，春秋两季多风干旱，造成该区的火灾气候。平均海拔

800m 左右，平均坡度在 20°—30°，主要包括林地、荒山、荒地、沼泽、河流等几大地类。区内多为原始森林火烧或砍伐后演替起来的杨、桦次生林，主要树种有白桦、山杨、黑桦、蒙古栎，另有少量落叶松，林内及林间枯枝落叶及易燃性杂草灌木较多。属于较易燃烧、林火蔓延速度较快、林火程度中等、林火种类为地表火的可燃物类型区域。1985 年的地面调查面积为 30961hm²。

本次火灾发生于 1986 年春季，据灾后调查统计资料，过火面积达 9041hm²，其中有林地 4559.6hm²，非林地 4481.5hm²，分别占过火面积的 50.5% 和 49.5%，过火面积占林场面积的 29.2%，灾害程度属于中等偏上水平。

(二)研究资料及光谱资料分析

1. 遥感资料：1986 年 6 月，TMCCT 卫星磁带数据，轨道号为 122—26。

2. 背景资料：1985 年内蒙古自治区林业勘察设计院调查的地形林相图 1 份；二类调查资料 1 份；1986 年灾后地面调查资料 1 份；1∶5 万的地形图 1 份。

3. TM 光谱数据分析：从试验区 540×540 子区图像的 7 个波段的统计资料(表 2－1)可以看出：近红外的 TM4 波段和中红外 TM5 波段亮度级数和标准差均较可见光(TM1、TM2、TM3)大。说明近红外和中红外波段的信息量较可见光波段丰富，区分地物类别的能力强；另外从 TM4 波段的直方图上可以明显看出两个正态峰，说明从 TM4 波段图像上可以明显区分出两个大类。根据植物光谱特征分析及其与 TM 数据的关系，可以初步判定：这两大景观可能是过火区和非过火区。

表(2－1)试验区 540×540 子区图像辐射亮度统计资料

波段号	TM1	TM2	TM3	TM4	TM5	TM6	TM7
最小值	65	26	25	29	47	88	20
最大值	111	64	70	80	142	134	73
均　值	84.27	35.41	40.97	53.17	88.04	106.19	42.02
标准差	6.79	4.33	7.47	10.57	15.97	5.88	7.16

(三)敏感亮度因子的选择

敏感因子的选择方法，可以根据野外建立判读标志的样地调查，亦可通过计算方法求得各因子对亮度增益的贡献大小来确定。

本研究根据以往文献记载的基础性遥感研究成果及试验区的具体情况，经多次试验后，确定了地类、坡向、湿度、龄级、郁闭度、灾害程度等 6 个因子作为试验区的敏感亮度因子。

三、综合属性库的建立

(一) 综合属性库模型的选择及数据组织

数据库中数据之间的联系主要通过数据库模型来实现，本研究采用 dBASE 关系数据库作为属性数据库，根据研究需要及试验区的实际情况，确定了林班号、小班号、地类、坡向、小班面积、小班蓄积、龄组、郁闭度等 8 个因子作为关系元组的包含属性，记录数为林场中所有小班数的总和。

(二) 拓扑文件的建立

建立属性库的目的是辅助进行 TM 数据和各种处理，这就要求在二者之间建立起一种联系。如果能够把 TM 图像上的每个像元——对应地落实到各个小班之中，这种联系就很自然地建立起来了。

拓扑文件，就是联系 TM 数据文件和属性库文件的文件。本研究通过空间配准、林相图的数字化、矢量数据向栅格数据的转换、封闭区域的填充、边界线的消除等一系列处理过程，建立了联系二者的拓扑文件，其包含了试验区的林班文件和小班文件两部分。

四、灾害信息的增强

包含灾害信息的 TM 数据所记录的是一种综合性信息，要使灾害信息得到突出的一个最好途径，就是削弱或消除其它各种信息的干扰。本研究所确定的几个敏感因子，就是几种最主要的干扰因素，本文通过以下的图像处理方法使湿度信息和植被信息的干扰得到了一定控制或削弱。

(一) SCALE 拉伸处理

为了尽可能地使参与运算的波段的动态范围相一致，本研究把 TM1、TM2、TM3、TM4、TM5、TM7 各波段的原始数据，经拉伸后作为以后图像处理的基础数据。

(二) TC 变换

TC 变换是一种线性变换，它通过旋转 TM 数据给出了 TM 数据散布平面的直观概念，把景物的光谱特征与自然景观属性联系了起来。通过 TC 变换可获得 6 项特征，其中前三项有鲜明的物理景观含义。

第一特征是全部 TM 波段的亮度加权和，并定义为亮度，亮度反映总体反射率的变化，并且仅与影响总体反射率的物理过程有关。

第二特征定义为绿度，它是绿色植物对可见光波段能量的强烈吸收与植物对近红外波段能量强反射的复合结果，绿度与地面的覆盖情况、叶面指数及生物量有紧密联系。

第三特征定义为湿度，它是可见光—近红外波段反射能量的总和与两个短波红外反射总和的比值，此比值与景物的湿度关系最为密切。

(三) 线性合成

TM4 波段图像能较明显地显示出火烧迹地和非过火区(后文称为背景区)在影象上的信息差别，可是由于众多干扰信息的影响，这种差别里还包含着许多"噪声"，这些"噪声"可以概括为这样两种表现形式：一是火烧迹地和背景在波谱信息的交叉混合现象；二是火烧迹地内的不同灾害程度在波谱信息上表现出的交叉混合现象。本研究提出了两种线性合成方案，使两类"噪声"得到很好的控制或消除。

方案一：是以增大灾害区和背景区的信息差别为目的的线性合成方案。

$$G_h = G_{TM4} + aG_{TM2} + bG_{TM3} \qquad (4—1)$$

式中：G_A 为线性合成图像(后文称 F4T23D)的像元亮度值；

G_{TM4}为 TM4 波段图像的像元亮度值；

G_{TC3}为 TC 变换获得的湿度特征图像(后称 TC3)的像元亮度值；

G_{TC2}为 TC 变换获得的绿度特征图像(后称 TC2)的像元亮度值；

a，b 为为二常数，根据二因子对 TM4 图像的亮度增益贡献大小来决定，这里均以 1/6来表示。

方案二：是以减弱植被信息和湿度信息的干扰为手段的，突出灾害程度真实信息的线性合成方案。

$$G_A = G_{TM4} + a(127 - G_{TC3}) + b(G_{TC2} - 127) \qquad (4—2)$$

式中，G_A 为线性合成图像(后称 F4T23M)像元的亮度值。其余参数均与方案一相同。

五、灾害区和背景区的分割

从 F4T23D 图像的直方图上可以看出，如果选择合适的阈值，就可以把其分割成两部分，一部分包含全部的火烧迹地(后称区域一)；另一部分包含了大部分的背景区(后称区域二)。见彩图(书后彩版 VI)所示：当阈值 D=124 时分割出的区域一中混有部分背景区。通过分析，本文把这部分背景区分成三种类型：一是水体，它有部分区域与灾害区紧密连接在一起；二是一些与灾害区大图斑无任何连接关系的小图斑；三是由于阈值 D 选择的武断性，使得部分在阈值 D 附近的非灾害性像元混在其中的部分。

本着既要保证非灾害性信息得到消除，又要保证灾害区信息不被丢失的原则，本研究设计了一种先除水体再消小图斑，然后进行邻元处理消除第三类混合像元的三步走分割法，效果良好。以这种图像为分割控制掩膜，就可以使灾害区和背景区得到理想的分割。

(一) 水体信息的提取

通过分析发现，水体在 TC2 图像中表现出低亮度，而在 TC3 图像中却表现出高亮度，因此通过在 TC2 和 TC3 图像中选择适当的阈值，就可以较好地提取出这部分水体信息。

(二) 小图斑的消除

本研究设计了一种当图像中小图斑数量较多且面积不很大的情况下十分适用的"收缩膨胀"算法来进行小区域消除。该方法无需对图斑进行标记，总体上分两步实现，首先，对图像中的各图斑进行"收缩处理"，即重复剥去各图斑的最外围的边缘像元，直至所有小图斑被剔除为止，然后对剩下来的最大图斑进行"膨胀处理"，即使该图斑"膨胀"至最初状态。

(三) 邻元处理

如果像元 G_c 的亮度值小于阈值 D=124，而其 8 邻接像元 C_m 中与其亮度值最接近的近邻像元 G' 的亮度值 g' 却大于阈值 D=124，则就把 G_c 判定为非灾害性混合像元。

六、灾害区内灾害程度信息的提取

F4T23M 图像和 TC2 图像可以从不同侧面反映出灾害程度，F4T23M 图像中灾害区内的

像元亮度值与灾害程度成正相关，而TC2图像中灾害区内的像元亮度值与灾害程度成逆相关。根据这种相关性，就可以从不同侧面获得灾害区内的灾害程度信息。

（一）似然差分法

1. 方法原理

对于一幅TM图像而言，影响其像元亮度的各增益因子的属性都是分别相同的两个像元，它们的亮度值也一定相同或相近。

假设TM图像中的一个含有灾害信息的像元G_s，其灾前的亮度值记为G_f，影响其亮度变化的增益因子为$f_i(i=1,2,\cdots,n)$，其中f_n为灾害信息因子；另一个不含灾害信息的像元G_n，其灾前灾后像元的亮度无变化，影响其亮度变化的增益因子$f_i(i=1,2,\cdots,n-1)$。

如果 $f_i=f_i(i=1,2,\cdots,n-1)$，则$G_f=G_n$；

那么

$$G_s=G_n-G_f=G_n-G_s \tag{6—1}$$

其中：G_s为似然差分图像的像元亮度值。

2. 方法步骤

(1) 综合因子类型的划分

所谓综合因子类型，就是根据选择的敏感亮度因子对图像的不同综合作用效果而划分出的综合性类型标准。本研究主要针对有林地，根据坡向和龄组二因子的不同组合确定了24种综合因子类型。

(2) 似然差分运算

通过划分出的综合因子类型，就可以确定出灾害区和非灾害区在各综合因子类型条件下光谱效应上的差异，从而得到灾害程度的量化描述。结果图像记为LD。

（二）植被信息法

1. 方法原理

假设灾害区灾前的植被信息量为$G_{前}$，灾后的植被信息量为$G_{后}$，则植被信息的损失度定义如下：

$$G_{损}=\frac{G_{前}-G_{后}}{G_{前}}\times 100\% \tag{6—2}$$

但是，在没有灾前多光谱数据的情况下，$G_{前}$是无法获得的，本研究在灾后单时相的TC2图像上，采用类似似然差分法的方法原理，较好地解决了这一问题，其数学模型为：

$$G'_{ij}=\frac{G_i-G_{ij}}{G_i}\times 100\% \tag{6—3}$$

式中：G'_{ij}为灾害区内属于i综合因子类型的j像元的植被信息损失度；

G_i为灾害区外属于i综合因子类型的j像元的平均亮度值；

G_{ij}为灾害区内属于i综合因子类型的j像元的亮度值；

i为综合因子类型的标志符，$i=1,2,\cdots,24$；

j为像元的标志符。

2. 方法步骤

(1) 综合因子类型的划分，与似然着分法相同；

(2) 植被信息损失度计算。

通过划分出的综合因子类型，就可以确定出灾害区和非灾害区在各综合因子类型条件下，植被信息的差别，从而得到植被信息损失度。结果图像记为 PD。

七、灾害等级的划分

在 LD 和 PD 图像上，像元的亮度值能够直接或间接地反映出其对应灾害区的相对灾害程度，但是从绝对意义上来说，像元亮度的大小还无法直接定量地表示出其对应灾害区内林木绝对烧死率，因此，若能建立起相对灾害程度与绝对烧死率之间的某种线性关系，就可以根据灾害等级划分标准，确定出绝对灾害程度，从而对蓄积损失做出合理的估计来。

(一) 相对灾害等级的划分

根据实际需要，在等级划分级数规定之后，就可以直接在 LD 或 PD 图像上进行分类，确定出各像元所属相对灾害等级。

如书后彩版 Ⅵ 所示，在 LD 图像上进行了划分级数为 3 的等密度分割，划定了重度、中度、轻度三个相对灾害等级的灾害区相对等级图。

(二) 绝对灾害等级的划分

根据有关国家规定和以往人们的使用习惯，一般把受害等级划分为重度、中度、轻度三个等级，具体划分标准如下：

(1) 重度受害：指成林 30%以上或幼林 60%的林木被烧死的林地；

(2) 中度受害：指成林 15%—30%或幼林 40%—60%的林木被烧死的林地；

(3) 轻度受害：指成林 15%以下或幼林 40%以下的林木被烧死的林地。

按照常规的方法，在遥感图像上判定林地林木的烧死率，必须通过地面布设样地进行调查，在遥感图像上选择出对应训练地，然后进行监督分类才能对各相对灾害程度区域做出烧死率估计。本研究把植被信息损失法获得的 PD 图像的像元亮度值(即该像元对应区域的植被信息损失度)，近似代替林木烧死率，按照上述等级划分标准对灾害区的灾害等级分别按幼、中、成林进行了划分，得到绝对灾害等级图，沼泽地赋值 1，荒山赋值 2，荒地赋值 3，非灾害区像元全部赋值 0，而有林地的赋值如下表所示：

等级 / 龄组	重	中	轻
幼	11	12	13
中	21	22	23
成	31	32	33

八、试验结果与分析讨论

（一）灾害面积的估计

从遥感图像上，确定某一具体区域的面积，最简单也是最准确有效的方法就是把该区域内的像元数，乘以该图像的空间分辨率，可用下式表示：

$$S = \frac{n \times t^2}{10000} \qquad (8—1)$$

式中：S 为该区域的面积，单位为 hm^2；

n 为该区域映射的像元数；

t^2 为该图像的空间分辨率，单位为 m^2。

对于空间分辨率为 30×30 的 TM 图像，S—n×9/1

1. 按地类划分的灾害总面积的统计。（表 8—1）

地类		有林地	非林地				∑
			沼泽	荒山	荒地	∑	
TM 估计	面积(hm^2)	4981.32	2604.42	1549.79	235.17	4679.38	9660.7
	占过火面积(%)	52.10	38.17	17.25	2.48	47.90	100
地面调查	面积(hm^2)	4799.6	2638.5	1502	196	4345.5	9145.1
	占过火面积(%)	52.48	28.85	16.50	2.17	47.52	100

2. 按过火有林地中灾害等级和森林类型划分的灾害面积统计。（表 8—2）

灾害等级	森林类型	面积(hm^2)	占同灾害类别面积(%)	占过火有林地面积(%)
重度	幼	27.54	3.47	0.55
	中	153.18	19.27	3.09
	成	614.07	77.26	12.33
	∑	794.79	100	5.96
中度	幼	33.30	1.14	0.67
	中	473.31	16.24	9.50
	成	2407.59	82.62	48.33
	∑	2914.2	100	58.50
轻度	幼	16.38	1.29	0.33
	中	317.07	24.92	6.37
	成	938.88	73.79	18.84
	∑	1272.33	100	25.54

（二）灾害蓄积的损失估计

本研究在进行灾害等级划分时，是落实到灾区内有林地所映射的每个像元来进行的，因此在进行蓄积损失估计时，还必须把灾区灾前的蓄积平均分配给其中的每个像元来实现。

对于空间分辨率为 30×30 的 TM 图像，若像元 G 落在 M 小班区域内，M 小班的公顷蓄积又为 V_m，则像元 G 所对应区域的灾前蓄积 $V_g = V_m \times 9$。

那么，像元 G 所映射区域的蓄积损失可用下式来表示：

$$V_{损} = V_g \times P \qquad (8\ 2)$$

式中：$V_{损}$ 为像元 G 所映射区域的蓄积损失量；

P 为像元 G 所映射区域的林木死亡率。

本研究以 PD 图像中，G 像元的亮度值 g 除以 100（即像元对应区域的值被信息损失度）来近似表示 P。

1. 各灾害等级蓄积损失统计（表 8—3）

灾害等级 / 类　目	重　度	中　度	轻　度	Σ
原蓄积(m^3)	48987.3	203967.2	90210.3	343164.8
损失蓄积(m^3)	22256.6	61461.9	13775.2	97493.7
烧死率(%)	45.43	30.13	15.27	28.41

2. 过火有林地各龄组各种火烧程度蓄积损失统计（表 8—4）

龄组	灾害程度	原蓄积	损失蓄积	烧死率(%)
幼龄林	重　度	1415.4	849.3	60
	中　度	1796.9	808.6	45
	轻　度	1621.6	486.5	30
	Σ	4833.9	2144.4	44.36
中龄林	重　度	8147.4	3666.4	45
	中　度	29087.6	8726.0	30
	轻　度	22596.7	3389.5	15
	Σ	59831.7	15781.9	26.38
成熟林	重　度	39424.5	17740.0	44.9
	中　度	173082.7	51927.3	30.2
	轻　度	65992.3	9899.2	15
	Σ	278499.5	79567.4	28.57
合计		343164.8	97493.7	28.41

（三）结果的分析讨论

本研究通过采用一系列合理的图像处理技术，获得的试验区各种灾害信息统计结果与实际情况达到了较好的符合效果。

1. 从表 8—1 的统计资料中可以说明，用 TM 多光谱数据估测火烧迹地面积有足够精度，

与火灾后当年的二类清查结果相比较，误差为—4.35%，这也说明用本研究提出的方法从TM多光谱数据中自动提取火烧迹地面积信息是可行的，能够满足生产的需求。

2. 由于灾区面积估测的准确性，使灾区植被信息损失状况的估测也得到了较好的效果，从而增加了灾区植被信息损失度与林木烧死率之间的近似程度。

从表8—2的统计资料来看，重灾区占过火有林地面积的15.96%，中灾区占过火有林地面积的58.5%，轻灾区占过火有林地面积的25.54%，而从表8—3中的统计结果中可以看到，整个过火有林地的林木平均烧死率为28.41%。表明此次火灾属中度火灾，这与该试验区的林火行为的特点相符。

从表8—3的统计资料中可看出：重灾区的林木平均烧死率为45.43%；表明重灾区的林木平均烧死率大于中灾区的林木平均烧死率且大于轻灾区的林木烧死率，这与事实是相符的。

从表8—4的统计资料来看，成熟林平均烧死率为28.57%，中龄林平均烧死率为26.38%，幼龄林的平均烧死率为44.36%，表明幼龄林的烧死率较高，这与幼树不耐火的事实相符。

这些事实从不同角度证明：用本研究从TM多光谱数据中提取出的灾区植被信息损失度近似代替林木烧死率具有它一定的科学性。

3. 结合灾害等级图和表8—1、表8—2、表8—3、表8—4的统计资料，我们不仅能够直观地了解到灾害区内各地类，各灾害等级的地理空间分布，而且还能具体了解到此次火灾的过火面积和蓄积损失状况，这为我们区别情况开展采伐营林活动提供了依据。

4. 本次研究主要采用了灾后TM多光谱数据资料和灾前林相资料，充分体现了遥感资料的时效性，若有灾前TM多光谱数据资料，则可望达到更好的效果。

九、结　论

通过TM多光谱资料估测森林火灾后火烧迹地面积和蓄积损失的方法研究，可得到以下几点结论：

1. 地理信息背景库可提供有关灾区的各种有用信息，建立地理信息背景库，并在此基础上利用遥感数据进行灾情评估，可有效地提高受灾面积和灾后蓄积损失估计的精度。

2. TM多光谱资料对于森林火灾造成的森林景观变化较为敏感，尤其是TM4波段最为敏感，因此，TM多光谱数据是进行森林火灾后灾害信息提取工作的极佳信息源。

3. 应用亮度增益原理，从TM多光谱资料中提取火烧迹地所反映出的灾害信息，是一种切实可行的方法。

4. 用TM数据确定火烧迹地的边界和面积可以达到很高的精度，如采用本研究设计的方法获得的试验区火烧迹地面积同灾后当年的地面调查资料相比达到—4.45%的精度，能够满足生产的需要。

5. 本研究设计的植被信息损失法获得的灾区植被信息损失度可以近似代替林木烧死率，是一种在TM图像上衡量灾害程度的较好的量化指标。

19. 森林火灾后生态因子及生态变化遥感调查结果的分析[①]

高世忠　周万村　范建容　郭　浩
（中国科学院、水利部成都山地灾害与环境研究所）

摘要　本文首先叙述以遥感调查与常规调查相结合的方法对火灾后森林植被的空间分布、遗地更新和生态变化状况等进行了全面调查，然后以各种调查资料为基础，深入而全面地分析了各生态因子在火灾前后的空间分布特征及其变化规律，生态因子对森林生态变化的影响作用性质、方式和程度，最后，探讨了在各生态因子影响下森林生态所发生的变化规律和发展趋势，为火灾后森林生态变化的动态监测研究提供了实验依据。

一、前　言

影响火灾后森林生态变化的因素比较多，它们的影响作用性质、方式和程度互不相同，因而生态变化的规律和趋势千差万别。各因子既可以单因子的形式影响生态变化，又相互联系，相互制约，形成不同的空间组合体，对生态产生综合影响；有些影响作用是直接的，有些却是间接的，……。在这些影响作用下，生态所发生的变化也必然十分复杂。

在国家"八五"攻关课题《森林火灾后生态变化遥感动态监测技术》研究中，首要解决的就是生态因子及其评价技术标准的确定、生态因子影响作用的权重估算等问题。为此我们以遥感图像判读为手段，并与常规调查方法相结合，在全面调查了火灾后森林植被的空间分布、遗地更新恢复和生态变化状况的基础上，深入地进行了火灾后生态因子及其对生态影响作用以及生态变化规律和发展趋势的分析研究，为火灾后森林生态变化动态监测评估模型的建立及其功能验证提供了实验依据。

根据专题组的安排，我们以攀西林区的云南松林生态系统火灾后的发展变化为主要研究对象。所用的遥感资料主要有西昌幅1984年MSS卫片，1987年SPOT和TM磁带及1993年TM磁带，还有1980年航摄的1∶4.8万的彩红外航片以及与之准同步观测的《攀西地区地物反射光谱曲线图集》[②]等。通过磁带处理和多波段组合试验，以TM4、3、2三波段红、绿、蓝三色的常规合成图像效果最佳，与MSS、SPOT和彩红外航片色彩相关性极好。用上述图像相结合进行野外调查判读。

---

① 参加者还有游先祥、兰立波、赵子玉、龙先华等。野外工作多次受到四川省林业厅防火办、凉山州和西昌市林业局防火办的协助与配合，深表谢忱。

② 由山地所刘淑娟等人测试并绘制，内部资料。

二、云南松的生境条件

研究区位于四川凉山州的西昌、德昌、盐源三县市的毗邻地段，北纬 27°20′—28°00′，东经 101°30′—102°30′之间，正是攀西林区的核心部位；为横断山中段，以中山地貌为主，山峰高峻，河谷幽深，高差 3000 多 m；气候具有典型的干湿季分明的亚热带季风型特征，同时又有明显的垂直分布规律，形成"一山有四季，十里不同天"的复杂多样生气候；土壤、植被也因之形成明显的垂直带谱。

三、调查的技术路线和方法

1. 观测样地的选择

在云南松的 5 个林型组[10]中选择草类云南松林和灌木云南松林两个林型组的 20 多个不同年代的火烧迹地作为观测样地，于每一迹地外围就近选取条件与之相似的未过火林地作对比样地。以各样地及其对比样地的观测结果的时间序列代替对某一个或几个迹地的定点逐年连续观测数据。

2. 样地的常规调查

常规调查指用目视观察法和标准地调查法对各样地及其对比样地的林分状况（林龄和郁闭度）、土壤和地形条件（海拔、坡度、坡向和坡位）等进行调查，以采集火烧前后各样地生态因子及生态变化信息，为遥感判读和动态监测模型建立提供依据。

（1）林分状况：每一样地依不同立地条件选 1—3 块标准地，对其中乔灌草作分层调查，乔木层作每木检尺，测枝下高、胸径、树冠面积等；灌草层分别以小样方测其植株高度、盖度或密度等；为判定林木受害程度而测量树干碳化高度，树冠枝叶烧损变色程度和面积，树木烧死和保留株数，灌草萌生、恢复数量、高度和盖度等；用伐倒木测定火烧前后 5 年树木高和径生长量，等等。最后将各样地测量结果以时间为序分析，即可掌握火灾对林分的影响和灾后生态恢复的趋势和动态特征。

（2）土壤条件：于每一样地及其对比样地内对应选取 2—5 个 1×1(m^2)小样方，测量其中凋落物数量，腐殖质层厚度；在有代表性地段挖掘深约 50cm 的土壤剖面，在观察土体结构和土壤性态特征变化之后，分 0—5，5—10，>10cm3 层采集土样，作常规养分含量和理化性能分析。同样，从各样地调查结果的时间序列分析，可了解火对土壤各层的影响规律及灾后土壤生能逐年恢复的动态特征。

（3）地形条件：于同一样地及其对比样地内对比观察处于不同地形条件（海拔、坡度、坡向、坡位）的林分变化情况，或通过不同地形条件的各样地的林分差异对比分析，可定性地掌握各地形要素对森林生态恢复的影响作用及相互差异。

3. 样地的遥感调查

多时相的遥感图像，既提供了火灾前后的森林植被的空间分布信息，又记录了森林生态变化和迹地更新状况的动态特征。所以到野外现场，在对每个样地及其对比样地的森林景观作对比观察，以获得该样地生新恢复和生态变化情况的感性认识之后，将遥感图像与样地对照判读，并以常规调查结果为参照，首先进行生态因子的分析研究，以掌握各生态因子空间分布的

影像特征(即形态—结构特征和色调—灰度特征),探索在生态因子及其组合体的综合影响下森林生态景观所发生的变化,与其在不同时相的图像上的影像特征差异的对应相关关系。然后进行森林生态变化,即林木生长机能恢复和生物量增长情况的判读分析,并与常规调查结果对比,研究云南松生长机能恢复和生物量增长与其不同时相上影像特征变化的相关性。通过以上判读,既获得了生态因子和生态变化的判读标志,也掌握了各样地生态因子和生态变化的特征。最后将同一幅图像上不同样地或同一样地在不同时相图像上的判读分析结果,以时间为序作比较分析,即可全面地掌握火灾对云南松林各生态因子及生态系统的影响作用,以及火灾后生态因子及生态系统变化的动态规律和宏观趋势。

各样地的判读实践证明,遥感图像对各种生境条件下的森林生态景观变化的反映是敏感的和精确的,故用遥感方法调查火灾前后森林生态因子及其对生态变化的影响,以及在这些影响下森林生态变化的动态规律和发展趋势是切实可行的,其结果和常规方法一样,都是可靠的。不过,遥感方法偏重于宏观的大系统大范围的研究,以"面"上的定性分析为主,而常规方法则是微观的小系统小范围的定量观测,以"点"上的量化剖析为主,所以我们用遥感技术与常规方法相结合进行调查,使"点"、"面"结合,宏观与微观结合,定性与定量结合,其调查结果更具科学性和可靠性。

四、生态因子及其影响作用遥感调查结果的分析

1. 林分状况

林分状况是生态变化的内在主导因素,也是生态变化的重要标志,在各生态因子作用下森林生态所发生的变化,首先反映在林分自身状态的变化上,也反映在不同时相的遥感图像的色调—灰度特征差异上。一般而言,火烧前林分状况好的林地,灾后恢复都比较好。

(1) 林龄结构:森林为抗火性和生长机能恢复速度与林龄结构密切相关,不同龄级有不同的火险等级,一般是幼、中龄林易燃,且损失较大,而近、成熟林较难燃,损失也较小;遇同一强度林火,异龄林中烧伤严重或死亡最多的是幼树,且幼树比例越大的异龄林,烧伤程度越严重,灾后恢复越困难;纯幼龄林一旦遭火灾,很全"军"覆没,极难恢复。其所以攀西林区云南松林龄组结构比例失调,幼林:中林:成林=2.8:3.7:3.5[2],幼龄林明显偏少,主要应归咎于频繁的火灾。受同等火灾危害,中龄林因处于生长发育旺盛期,其灾后的恢复一般比近成熟林速度快,效果好,幼龄林因受害严重,大多难以恢复,所以幼林地应特别注意防火。由于异龄林中的幼树在火灾中死伤较多,故对异龄密林而言,中、弱度火起到了强度抚育的作用,促使林龄单一,林相整齐。

(2) 郁闭度:林分郁闭度越大的林地,其可燃物和林下凋落物累积越多,火行为强度也越大。相对而言,灌木云南松林可燃物和林下凋落物一般比草类云南松林多,所以从火烧试验现场观察也证实,前者火行为程度比后者大,且易发生树冠火;同一林地内,林分郁闭度或密度越大的地段,火强度也越大,火焰也高,发生树冠火的机率要大些;尤其在陡坡地段和上山火的情况下,密林受害程度比中、疏林严重得多;一般幼林地的林分密度相对要大些,这也是纯幼龄林比中、成林受害严重的原因之一;对于乔、灌、草混生且盖度较大的疏林地,遇同等强度火,烧损比其它疏林地严重。云南松疏林地的林龄大都参差不齐,多为历年来飞播或人工补植之异龄林,林相凌乱,一旦火起,烧死者又多为幼树和灌木,故频繁的火灾对异龄疏林的威胁最大,好

多疏林地因此而退化，或沦为荒山草坡，或变成稀树灌丛草地等。其所以攀西林区内林业用地占土地的71%，而其中有林地仅占31%，其余几乎全为疏林地和灌木林地[2]，此种局面的形成皆缘于火灾。

2. 土壤要素

土层的厚度、质地和结构等物理特性，直接影响林木草被的长势，而土壤的酸碱度等化学特性决定了适生林木的种类和群落结构。攀西林区的土壤呈明显的垂直分布，云南松林下，自低而高依次有褐红壤、山地红壤、棕红壤、黄棕壤和山地棕壤等主要的5个性能不同的土壤带，它们分别与光、热、水、气等形成不同的空间组合，并随着地面坡度、坡向、坡位和海拔的不同，其适生性相互间差异明显，对林木生长发育和火后生态变化和迹地更新产生错综复杂的影响。相对而言，最适于云南松生长的是棕红壤、山地红壤和黄棕壤。

火灾对土壤的结构和营养成分含量有一定的影响。据野外剖面分析，火烧后，土壤分布层次基本无变化，仅 A_0 层（腐殖质层）有不同程度变薄，颜色也有所变化，土体结构受到不同程度破坏。从化验结果看，火灾对土壤营养物质含量的影响利弊皆有，其决定条件是火行为强度[3,4]。高强度火烧，可使土壤营养物质循环受到不同程度破坏。首先，火烧掉地上林木和凋落物，也使腐殖质层减薄，酸性减弱，有机质减少；其次火的热量对地面的强烈烧烤，使土壤中一部分氮化作气体跑掉，全氮、水解氮减少，造成土壤贫瘠化；第三，火灾后地表裸露，富含氮、磷、钾等元素的大量灰分及土壤中相当一部分营养物质因受雨水淋洗和冲刷而流失。火强度越大，上述破坏作用越大。而中、低强度火烧，对土壤的营养物质循环有一定的促进作用。首先，适度火对林木无致命伤害，仅使有限的凋落物化为灰烬，给土壤补充一部分速效养分；其次火对地面的适度烧灼，使土壤pH值有不同程度的增大，因刺激微生物活性而加快腐殖质层矿质化过程，其结果主要使10cm以下各层速效养分增多。

由于云南松林树种单一，林下灌草相对生长不良，凋落物也不丰厚，故云南松林的火灾多属中、低强度火，高强度火较少，所以大多数火灾使土壤养分有不同程度的积聚作用，这对云南松林的灾后生态恢复有利。故民间有“火不烧山地不肥”之说。

3. 地形条件

地形是森林的主要生境条件，也是影响森林生态变化的间接要素。火烧过程中，它通过对温度、风速、风向等气象条件的控制而影响林木的受害程度；灾后恢复过程中，它依靠对光、热、水、气、土等条件的重新分配而影响森林生态系统物质循环和能量转换机能恢复的速度和效果。大量的调查证实，各地形因子本身在火灾前后并无明显变化，但它们的影响作用既十分重要而又错综复杂，且随着相互间的不同搭配和组合形式而变化。

（1）海拔　随海拔的升高，温度和降水量等气象条件发生有规律的变化，在垂直方向上以分明的层次再现水平地带性的各种气候特征，也使土壤要素出现垂直分布带，从而为不同种群的森林植被提供了适生环境，也使同一种群的生态景观因海拔的不同而产生明显的分异。如云南松主要分布于海拔1300—3100m的范围内，其间不同海拔的森林种群结构、林相和生长发育等有着明显的差异：海拔1500m以下，受干热河谷气候制约，云南松多零星分布，或与稀树灌丛草地为伍，很少成片林地；海拔1500—1700m以疏林地居多，乔木与灌草混生，农、林交错分布，受干旱河谷气候和人为活动影响，云南松生长不良，林相残破；1700—2800m，光、热、水、气、土资源的地域组合适于云南松生长，故多成片宽幅大面积分布，且多为纯林，林相整齐，长势良好，木材蓄积高达460m³/hm²[1]，为平均蓄积的3倍多，在遥感图像上这一区段的森林影

像的红紫色调饱和度高，纹形结构致密，十分显眼。但林下灌草层多不太发育；从2800m起，随海拔升高，降水增加，但气温降低，云南松逐渐由纯林过渡到松栎混交林，林下灌层渐趋丰高；3000m以上，云南松在松栎混交林中的比例随海拔的升高而逐渐降低，直至以单株形式分布于栎类林中。可见，海拔对森林种群结构及其分布有着决定性的作用，同样也对火灾后种群结构和生态景观恢复有着不容忽视的影响。

(2) 坡度　① 随着地面坡度的增大，重力的影响作用增强，地面现代侵蚀和水土流失加剧[2]，使土壤厚度渐趋浅薄；坡度的增大也使土壤的淋溶现象加重，养分流失增多，土壤逐渐贫瘠化；② 在攀西偏干性气候条件下，不同坡度的地面，因受太阳辐射能量的差异，气温、土温和土壤含水量、有机物分解等明显不同，导致云南松生长状况、冠群结构、林分密度等千差万别。野外观察和遥感图像显示都证明，陡坡林地长势、郁闭度和冠群盖度等均不如缓坡林地；③ 坡度还直接影响林木受害程度和灾后恢复速度，在同等林分和火强度下，坡度越大的地段林木受害越严重，尤其在上山火情况下，陡坡烧损最为惨重，灾后恢复也比缓坡林地差；④ 因为35°为干燥状态下的泥沙静止角[3]，故35°以上的陡坡林地一旦遭火烧，极难恢复，大多沦为光山秃岭或裸岩峭壁；在地层破碎，风化壳较厚，地震频繁的攀西地区，森林火灾甚至成为崩塌、滑坡、泥石流等灾害的重要诱发因素之一。

(3) 坡向　坡向不同的地面，受太阳辐射能量和日照时数不同，形成诸多小气候环境，使水、热状况和土壤理化特性出现明显差异。① 阳坡光照好，热量充足，但蒸发量大，土壤含水量相对较小。在多雨湿润地区，阳坡森林生长和灾后恢复显然比阴坡好；但在旱季长于雨季，偏干性特征突出的攀西地区，尽管阴坡光照和温度不如阳坡，但土壤水分条件相对较好，所以阴坡林木生长比阳坡茂盛。遥感图像上明显可见，好多地方阴阳坡林分密度或郁闭度截然不同，尤其是低海拔地段密林和疏林往往以山脊线为界；② 阴阳坡的森林类型和种群结构也有明显差别：喜光温耐干旱贫瘠的云南松多生长在阳坡和半阳坡，且多为纯林；而在阴坡和半阴坡水分条件较好的地段以及湿润沟谷，生长着小片的栲属、栎属和青冈属等阔叶林或与云南松的混交林。③ 不同坡向和海拔的空间组合结果，制约着森林类型的分布和种群结构，影响林木长势和生物量的增长。如前所述，草类云南松林和灌木云南松林主要分布于海拔1600—2800m的阳坡和半阳坡，但在1600m以下的干热河谷和干旱河谷，它们大多分布于阴坡和半阴坡，且生长不良。

(4) 坡位　坡位的变化实际上也是阳光、水分、养分和土壤条件的生态序列，对生态变化的影响具有和海拔类似的作用。① 由上坡位到下坡位，土壤由剥蚀过渡到堆积，厚度逐渐增加，水分、有机质和各种养分含量相应增多，愈到下坡位对森林生长愈有利。在攀西地区其实不然，愈到下坡位，焚风效应愈强烈，土壤中的水分大量蒸发，尤其在旱季的大半年里，降水不到全年的10%[1,2]，光、热、土资源的优势因缺水而不能充分发挥，所以下坡位林木生长明显不如中、上坡位。这从遥感图像上可完全证实。② 在攀西，坡位在很大意义上标志着人为活动对森林生态系统的影响作用。下坡位多系林地与耕地、居民点及工矿用地等人工地类交错分布地带，人为的经济开发活动对森林的干扰太大，如当地农民的刀耕火种、轮歇种植的耕作方式，毁林开荒，乱砍滥伐，使下坡位森林面积不断减少；无管制的生产和生活用火，经常诱发森林火灾，从统计数据看，此类火灾占森林火灾的绝大部分[1]；火灾后本可以恢复的一些森林，往往以种种借口被哄砍而光，或作耕地，或沦为荒山草坡等，……。凡此种种，造成下坡位森林林相残破，林地凌乱，林下植被多样性，生长明显不如上坡位，更不如中坡位。

4. 林木受害程度

火是一个重要而活跃的自然生态因子。自从地球上有了森林，火就参与了森林生态系统的动态平衡[4]。火与云南松林的形成和发展关系尤为密切。据考证[2]，远古时期的滇西大地曾为偏干性常绿阔叶林所覆盖，现在的云南松纯林及其与阔叶树的混交林是在频繁的火灾长期作用下形成的亚顶极群落。正因为云南松的生物学、生态学特性，决定了它具有较强的抗火性和对火的依赖性，才得以维持其生态群落的稳定性；离开火，许多云南松林将被常绿阔叶林或其它森林类型所取代。可见火是云南松林生态系统动态平衡的关键因素之一。

对火的作用也要一分为二[3,4]。适度的中、低强度火烧，对森林生态平衡有好处：火烧去一部分幼树和灌木，相当于强度抚育，既使林相整齐化，又调节了林分下层密度，有利于林内通风透光；火将大量枯枝败叶化为灰烬，提高了土壤肥力，有利于林木生长恢复，而且为云南松天然更新植苗下种做好立地准备，也为幼苗生长提供了有利的环境条件，同时也有效地控制了森林病虫害。但高强度的火烧，对云南松林生态系统将是致命的破坏，不仅烧光草被，烧死灌木，对树木也会造成严重伤害。

受害程度取决于火强度、林龄结构、林分郁闭度或密度、森林各层可燃物的数量及其含水量等因素。

火强度是对林木直接造成伤害的关键因素。一般火强度增加，林木受害程度和死亡率增大。火强度及其危害程度还与火烧方式（如上山火或下山火）、当时当地的气候条件（相对湿度、温度、风向、风速等）、地形条件（坡度、坡向）以及林分条件（乔、灌、草的密度、凋落物累积数量）等因素有关。

云南松林的乔灌草和林下凋落物均为可燃物。云南松为喜光树种，其枝、干、叶富含油脂，燃烧性能好，其凋落物均为易燃物质。据测定，各层可燃物含水量依乔、灌、草、凋落物层次序逐层减少，且随气温和降水量而变化，以旱季为最少，4月份达最低值，如草类云南松林凋落物4月份含水量不足7%[1]，在适宜的气温、风力、风向条件下，遇火即燃，极易成灾。

从动态监测需要出发，结合人们将火强度分三级的习惯，我们将林木受害程度也分为重度、中度和轻度三级，并给每级以具体的可操作的指标。既可以在扑火的同时，直接用仪器测量火强度，目估火焰高度，也可以在火灾后用标准地调查法调查树干碳化高度占枝下高的比例，树冠枝条和叶片碳化、变色的比例，统计树木和林下灌草死亡率等，以评估受害程度。

轻度伤害，一般与低强度火相关，多系地表火和下山火所为，以草类云南松林发生较多，因其危害未超出森林生态系统的自我调节能力，故不会破坏森林生态平衡，一般3—4个生长季后即可恢复。重度伤害多为高强度火所致，以林下凋落物贮量较大的灌木云南松林和草灌云南松林发生较多，树木大多严重烧伤，奄奄一息，但从调查证实，只要树木顶梢未死者都有复活的希望，只是恢复时间较长，一般要6—7个生长季。其间若辅以人工抚育，可提高恢复速度和效果。中度伤害介于重、轻度之间，一般4—6个生长季后即能完全恢复。

五、森林火灾后云南松林生态变化趋势和特征分析

1. 乔木层生态变化

由于云南松生物学和生态学特性，云南松具有极好的耐火性，中、成龄林一般都不易烧死，只是因为受伤害程度的不同，恢复时间有长有短而已；因幼龄树易被烧死，故纯幼龄林一旦遭

火灾，恢复较困难，野外观察，多数纯幼龄林遇中、高强度火烧根本无法恢复，不得不重新营造；对于幼树比较多的异龄林，其林分郁闭度或密度火灾后降低较明显。其中密度过大的异龄林地，遭中、低强度火烧，类似于强度抚育，对林木生长和林龄整齐化有利；但对于异龄疏林地，火灾可使其中乔、灌盖度降低，促使其向荒山荒坡或稀树灌丛草坡退化。其所以区内荒山荒坡和稀树灌丛草坡占地面积大，频繁的火灾是极重要的原因之一。

2. 灌木层生态变化

各类灌木在不同强度的火灾中烧死部比较多，故火灾对灌木层的威胁较大。尽管不同类型的灌木恢复速度不一，但普遍比乔木慢，且恢复后的数量和盖度都有明显降低，故频繁的火灾，使灌木云南松林的灌层退化，直至被草类云南松林所取代。其所以区内灌木云南松林面积明显小于草类云南松林，主要应归结于频繁的火灾。

3. 草被层的生态变化

云南松林下的各种草本植物火灾后的萌发和生物量的增长均为最快，一般一个生长季后即可全面恢复。因为中弱度火灾可使土壤肥力提高，特别有利于草类生长。草类的迅速恢复使裸露的地面得到覆盖保护，有利于林地的固土保水，有效地防止了水土流失，对林木的恢复大有裨益。正因为草被恢复快，所以在经过一个生长季后的遥感图像上，疏林地迹地的影像色调灰度特征反而比一个生长季后的中、密林迹地突出，经实地判读证实，主要是草类的色调—灰度占了优势，所以为排除草类对乔木层恢复情况判断的干扰，遥感调查和森林生态动态监测宜选用草被枯萎褐黄的旱季(3—5月份更好)摄取的遥感资料。

六、体　　会

由于在森林火灾后生态变化动态监测研究过程中使用了遥感和常规调查相结合的方法，获得了各单个因子火灾前后空间分布特征变化及其对生态变化的影响作用的信息资料，也掌握了各生态因子间相互依赖、相互联合而形成不同的地域组合体，综合地影响森林生态变化的规律性，以及在这些影响下森林生态变化的动态特征和趋势，从而使我们在正确选择生态监测评价因子，并对其进行影响作用评价和影响权重估算的基础上，建立了能正确反映森林生态动态变化规律的动态监测评价数学模型。

参 考 文 献

[1] 马忠贵，王金锡主编. 森林生态与计划烧除研究(论文集)成都：四川民族出版社，1993年4月

[2] 甘书龙主编. 四川农业资源与区划(论文集). 成都：四川社会科学院出版社，1990年1月

[3] 杨玉娜，李振问. 火对森林生态系统营养元素循环的影响. 森林防火，1992(3)

[4] 郑焕能，居恩德. 火在森林生态平衡中的作用. 森林防火，1984(1—2)

20. 遥感在森林火灾后生态变化动态监测研究中的应用[①]

高世忠　周万村　范建容　郭　洁
（中国科学院、水利部成都山地灾害与环境研究所）

摘要　本文以遥感的功能为基础，阐述遥感在火灾后森林生态变化动态监测评价研究各个环节中的应用和方法，以常规方法和遥感相结合所进行的大量试验为依据，顺利地完成了生态评价因子及其评价标准的确定，建立了合理的监测评价模型，在 EGIS 支持下，以遥感信息代替常规调查数据，进行火灾后森林生态的动态监测，达到了预期的攻关目标。

一、前　言

森林生态系统是地球上重要的生态系统之一，也是区域生态系统的重要组成部分之一，是维持区域生态平衡，保护人类生存环境稳定的主体。所以，保护森林，防止人为破坏和火灾发生，促进火灾后森林生态系统的恢复和重建，是防止区域生态环境恶化的关键，而火灾后的森林生态变化动态监测，正是为森林生态系统的恢复和重建提供科学依据和决策支持的重要之举，在国内外都受到林业部门的高度重视。

影响火灾后森林生态变化的因素很多，其影响作用又十分复杂，靠常规的野外调查，缺少先进的监测手段，困难是相当大的；特别是在地形复杂，交通不便的地区，简直无法进行。而多时相的遥感数据，既包含着火灾前后森林植被的空间分布信息，又反映了森林生态变化和迹地更新的动态信息，故可作为火灾后森林生态变化动态监测的重要信息源，尤其是遥感和计算机技术的结合，将使森林生态变化动态监测的成本降低，速度加快，及时、准确。对实现森林经营管理和迹地更新工作现代化具有重要的实践意义和理论价值。

二、研究工作的技术路线和方法

动态监测是遥感应用研究的重要内容之一。而对火灾后森林生态变化动态监测的遥感研究尚处于试验探索阶段，成功的方法国内尚不多见。我们以多时相的 TM 遥感资料为重要信息源，以 SPOT、MSS 和彩红外航片为辅助资料，在大西南的攀西林区选择不同年代的一系列云南松林火烧迹地进行野外图像判读，以各迹地常规调查结果为参照，以森林植被光谱特性为导向，从森林生态因子的空间分布规律及其对生态变化的影响作用分析入手，研究迹地更新和林木长势恢复状况，与其在不同时相的遥感图像上的影像特征（即形态—结构特征和色调—灰

① 参加者还有郭先祥、兰立波、赵子玉、龙先华等。野外试验与观测得到四川省林业厅护林防火办公室、凉山州和西昌市林业局的大力支持与帮助，深表谢忱。

度特征)变化的相关关系。在确认 TM 图像对森林火灾后的森林生态变化的反映具有较好的敏感性和准确性的基础上,决定采用植被指数提取法代替常规调查法,以获取动态监测所必需的生态变化信息,并利用生态环境地理信息系统 EGIS 的操作、运算和处理功能,在图形和图像信息库支持下,对火灾后的森林更新和生态变化趋势作动态模拟,对火灾对森林生态变化影响作用进行评价试验,在此基础上建立森林生态变化动态监测数学模型,并设计专门的软件系统,以完成对森林生态变化的动态监测和趋势预报。整个研究工作路线示如图 1。

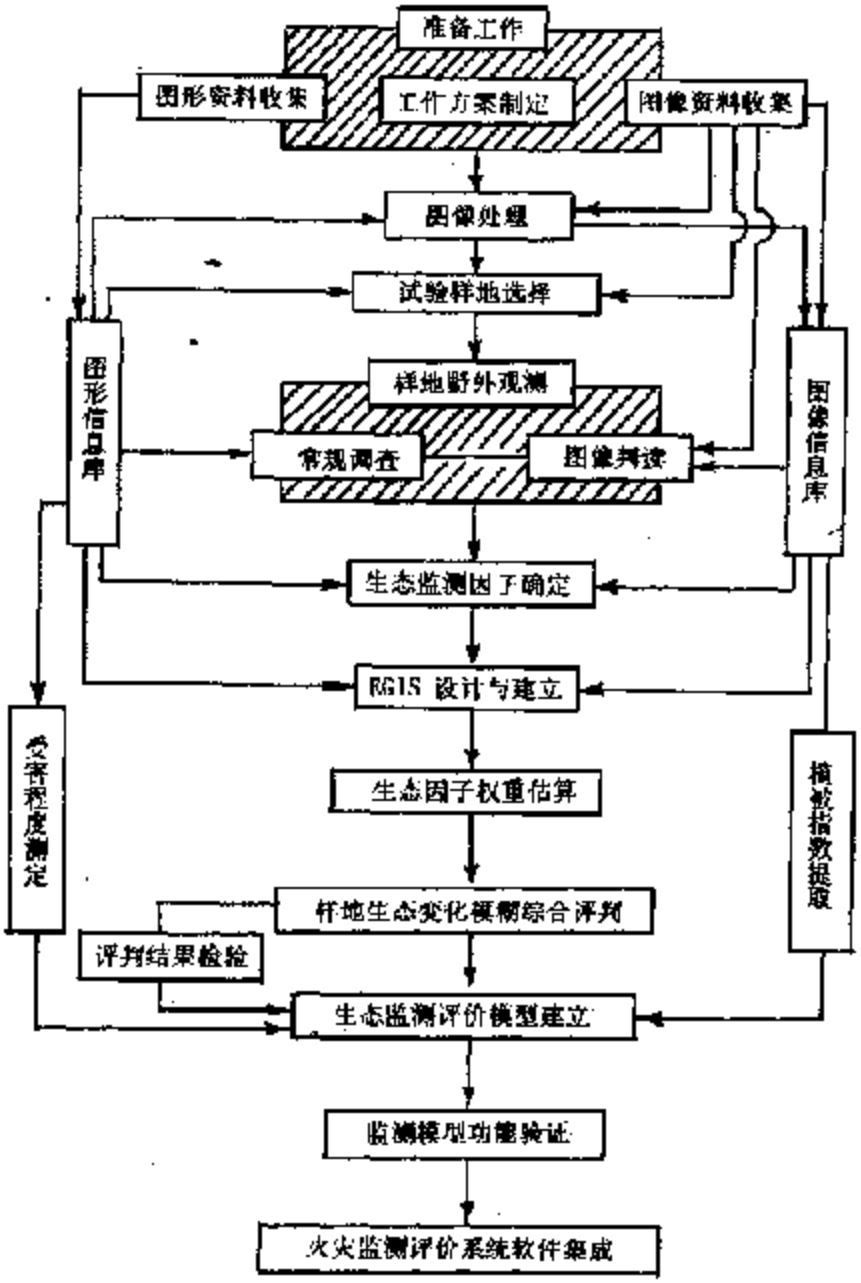


图 1　研究工作流程

三、云南松林的生态环境特征

1. 自然环境

试验区位于四川凉山彝族自治州境内的西昌、德昌、盐源三县市毗邻地段，北纬 27°20′—28°00′，东经 101°30′—102°30′之间，面积约 100 万 hm^2，正是攀西林区的核心部位，系横断山中段。地势西北高，东南低，为典型的中山地貌；气候为西风南支急流和西南季风交替控制之下的典型的亚热带季风型气候，干湿季分明，旱季（10 月—翌年 4 月）长于雨季，加之多风、风高物燥，是森林火灾的高发季节。同时，因地形高差悬殊，气候垂直带发育，形成“一山有四季，十里不同天”的复杂多样性气候特征，造成土壤和植被的垂直分布。

2. 云南松林生态特征

(1)生态类型独特，生态主导作用突出　云南松是我国亚热带云贵高原的特有种类，为喜温性深根性树种，具有喜光抗干旱耐瘠薄更新能力强等优势，所以为西南林区亚热带针叶林的主要建群种，其分布面积和蓄积分别占西南林区的 30.2%和 21.5%，仅次于云冷杉，在攀西林区分布最广，从海拔 1300—3100m 到处都有，最低可到金沙江河谷 1100m，最高可达 3500m[1]。因而对区内生物地理群落结构、生态特征及物质循环等起主导作用，在其 5 个主要林型组中，以草类云南松林和灌木云南松林面积最大，其群落结构简单，林相整齐，层次分明，故为本次动态监测研究的主要对象。

(2)生产力高，生物量大　区内亚热带气候光、温、水、热资源丰富，与土壤的地域组合优势突出，为不同类型的森林植被创造了良好的适生条件，日均温稳定在 0℃以上，年积温 5000—7500℃[2]，全年几乎都是生长季，故森林生态系统生产力高，生物量大，森林覆盖率高达 24%，比全省平均水平高出约 1 倍；木材蓄积量平均 127.5m^3/hm^2，最适生环境（海拔 1600—2800m）可达 460m^3/hm^2[3]。因此林木自我恢复和迹地更新能力强。

(3)生态脆弱，抗逆力差

①云南松林立地条件多为山高坡陡、势能较高部位，好多斜坡大于沙子静止角，地面稳定性差，故森林一旦遭破坏，极难恢复；且当地面失去植被保护，地表裸露，水土流失加剧，还易诱发崩塌、滑坡、泥石流等灾害；这些灾害往往危及山下和沟谷的生态系统，破坏区域生态平衡；区域生态平衡失调反过来又影响森林生态系统，形成恶性循环。

②目前大面积分布的云南松林多为基带性植被遭破坏后形成的荒山草坡或稀树灌丛草坡上人工营造的纯林，因树种单一，林下灌草生长不良，森林结构不合理，失去生态的多样性和不同物种优势互补的特点，故森林生态抗逆能力下降，经不住各种灾害的袭击，特别是多松脂的云南松纯林，在干燥多风的旱季，最易发生火灾。

③旱季降水不到全年 10%，又因多风，蒸发量大，土壤干燥，对迹地的自然更新和林木生长极为不利，好多迹地因此而沦为疏林地、灌木林地或稀树灌丛草地等。

四、研究工作主要环节上的遥感应用

1. 试验样地的选择

在试验区内选择一系列不同年代的火烧迹地作为试验样地，以各样地观测结果的时间序

列代替对某一个或几个迹地的定点逐年连续观测。由于各迹地火烧年代及其恢复情况不一，尤其是中、轻度火烧或时间较久的老迹地，经过灾后的逐年恢复，其生态景观与周围未过火林地浑然一体，难以区分，靠常规方法不容易确定其位置和范围界线。而不同时相的遥感图像是迹地恢复过程的真实写照，它记录了迹地生态变化的各种动态信息，所以不同时相的遥感图像在观测样地及其对比样地以及标准地的选择和圈定中起到了极好的作用。

2. 遥感图像的选择、处理和图像信息库的建立

遥感之用于森林生态监测，国内尚无成功的经验可资借鉴，一切得以从头试验。首先就是哪种图像适于监测的问题，从图像来源、成本等考虑，TM 图像较合适；其次是 TM 图像的分辨率和信息量能否满足监测需要。为此，通过野外样地生态变化的判读结果分析，确认 TM 图像分辨率虽不如 SPOT 图像和彩红外航片，但对森林生态景观变化的反映是灵敏的和准确的，其信息量也完全能满足动态监测的需要。

其次是图像的处理试验。以森林植被的光谱特性和 TM 图像各波段的功能为依据，进行多波段组合试验，以求得到一幅对森林生态判读最为有利的合成图像。从光谱曲线图(图 2)[①]可知，TM4 近红外波段和 TM2 绿光波段在 700—1100μm 和 550μm 处呈强和较强反射峰，它们与植被灾后的健康状况(长势)恢复速度呈正相关；而 TM3 红光波段却与植被长势恢复状况呈负相关，故其曲线呈强吸收谷，长势越好，其吸收谷越深。所以用 TM4、3、2 三波段合成比其它波段的合成效果都好。按色度学的原理，分别赋予三波段以蓝(TM2)、绿(TM3)、红(TM4)三原色进行光学合成，制成 TM 假彩色卫片，它与彩红外航片和 SPOT 卫片等有着较好的色彩相关性，因而在生态判读中发挥了较好的作用。

最后，将所收集的各类遥感图像及其处理结果建库贮存，形成试验区的图像信息库。

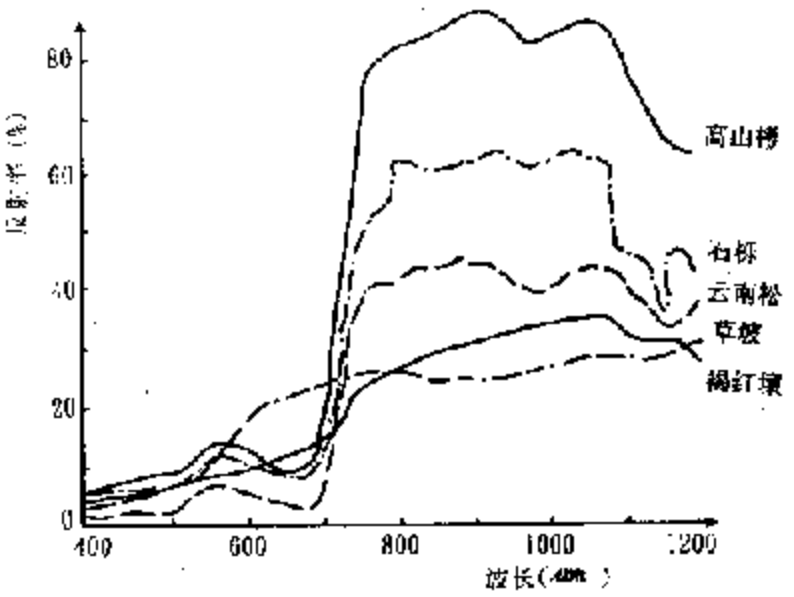


图 2　森林植被光谱曲线

3. 各样地的遥感图像判读

每个样地判读之前，用林业上惯用的标准地调查法收集该样地及其对比样地的林分、土壤、地形及林木受害程度等生态要素及有关数据，然后将样地生态景观与其影像特征作分析判读，旨在掌握火烧后云南松林的生态景观变化与其在不同时相图像上的影像特征差异的相关性；遥感图像所提供的森林生态动态信息与常规调查结果的相关性；并以常规数据为参照，分析 TM 图像对地形复杂地区森林生态变化反映的灵敏度和精确度，以探索用遥感信息提取技术代替

① 选自成都山地所刘敏捷等人所编制的"攀西地区地物反射光谱曲线图册"，内部资料。

常规调查方法作动态监测的可行性和可靠性。

(1)生态因子判读　通过各样地的判读，并参考常规调查结果，分析各生态因子空间分布及其影像特征，各因子对森林生态恢复的单个影响作用及其地域组合体的综合影响作用，以及在这些影响作用之下森林生态景观所发生之变化与其影像特征差异的相关关系，以便从众多的生态因子中找出对森林生态变化起关键作用，又在图像上有突出特征的主导因子，为监测评价因子的选择、权重评估和监测模型的建立提供图像依据。

为便于分析，在判读某因子的作用时，假设其它因子相同或相似，且无变化，以避开分析中的复杂性，以郁闭度判读为例，在一个样地中选择郁闭度不同而其它条件如地形、龄组等相同或相近的两块以上标准地，先以常规方法调查各标准地的不同郁闭度的林分在火灾后的恢复状况，并与其在不同时相图像上的影像特征差异作相关性分析判读；再将各个样地的判读结果以时间为序作对比分析，即可得出郁闭度对森林生态的影响作用、方式和程度，以及不同郁闭度的林地在火灾后的更新恢复和生态变化状况，与其影像特征变化的相关性规律。

生态因子判读结果表明，构成森林生态系统的各因子，除单个因子对生态产生不同程度的直接影响外，大多数是以其相互制约、相互联系、相互依赖的多重关系形成不同的地域组合体，对生态系统的能量转换和物质循环产生着综合的影响；这些因子随空间或季节的不同而发生不同程度的变化，其单个因子作用或综合影响也随之变化，因而使森林生态系统结构和功能的变化丰富多样，生态景观千差万别。

(2)生态变化判读　火灾后森林生态的变化是各生态因子及其地域组合体综合影响的结果。其主要表现是林木生长机能的逐渐恢复和生物量的不断增加，前者主要影响森林影像色调的变化，如健康的未过火林地影像色调为红—紫红色调，火烧当年的迹地，影像是蓝紫色调，随着迹地的逐年恢复，色调迹逐渐向红—紫红色靠拢。而生物量的增长使影像色调饱和度增加，影像中的消色成分降低。如生态恢复得越好的迹地，生物量越大，其影像色调也越鲜艳、纯净，越接近周围的未过火林地。生态变化判读旨在弄清云南松林的生长恢复和生物量增加与其影像色调—灰度特征差异的相关性，为图像信息提取和监测评价模型提供实验基础。

野外判读中，每到一样地，首先对其林木长势和生态景观特征与其对照样地进行对比观察，并结合常规测量数据研究火烧后林木生长恢复和生物量增加的综合量值特征；然后，将图像与生态景观仔细对照，研究生态变化与其影像色调特征差异的相关性；再将同一幅图像上不同年代的各火烧迹地(或同一样地在不同时相的图像上)的相关性分析结果以时间为序作对比研究，则可掌握火灾后各年林木生长恢复和生物量增长情况与其影像特征变化的动态相关规律；最后再与常规调查结果作相关性分析，即可了解遥感图像和常规调查结果所反映的生态变化信息具有较好的相关性和等效性。

上述遥感图像判读实践证明，TM 图像对生态主导因子的空间分布特征及其对森林生态的影响作用的显示是敏感的和准确的；TM 图像上森林的影像色调—灰度特征变化与其生长恢复和生物量增长息息相关。所以用遥感方法监测生态主导因子的变化而达到监测生态变化的方法是可行的。因为不同时相的影像色调—灰度特征差异与常规的调查结果对生态变化的表达具有同等的效果，所以用不同时相的遥感信息代替常规的调查数据作森林生态变化的监测和评价，其结果同样是可靠的。

1. 植被信息提取

前已述及，森林植被在火灾后的健康状况恢复越好，其在近红外光区的反射率越大，其近

红外波段的曲线反射峰(图 2 所示)越高;而在红光区的反射率越低,其红光波段的吸收谷越深,与之对应的 TM4 近红外波段对森林的冠群结构和生物量敏感,而 TM3 红光波段对叶绿素敏感[5][6]。所以用 TM4 和 TM3 数据的不同组合来表示林木的长势和生物量,可以客观地反映森林植被火灾后生态变化的动态特征和趋势。其不同组合的主要形式有:比值 TM4/TM3,差值 TM4－TM3,归一化差值(TM4－TM3)/(TM4＋TM3)等,亦叫作绿度值,它们是卫星遥感的一种特征参数,称作植被指数,它随森林植被的长势和生物量的增加而增大,与植被的空间分布密度(或盖度)增大和叶绿素含量增加呈线性变化。

1)在攀西,复杂的地形条件对反射率的干扰很大,因此选用归一化差值指数法,即

$$VI = \frac{TM4 - TM3}{TM4 + TM3}$$

该法能使植被信号放大,增强绿色植被与非绿色背景之间的反差,从而消除或削弱大气和地形阴影的部分影响。

2)由于选用不同年限的火场作为观测样地,故应分别提取各样地(T)及其对比样地(R)的 TM4 和 TM3 数据,计算它们的归一化差值 TVI 和 RVI,以其比值

$$D = \frac{TVI}{RVI}$$

表示该样地 T 从火烧后到遥感成像这段时间内的林木长势和生物量增加的相对值;各不同年代样地的植被指数比值 D_i 的时间序列,即为火灾后各年度森林生态变化的动态规律及发展趋势的真实记录。

五、生态评价因子的选择、生态监测模型的建立与功能验证

1. 生态评价因子选择及监测评价模型的建立

构成森林生态系统的各要素对生态系统的影响作用的性质、方式和程度互不相同。根据云南松林的生态学特征及其生境条件,依靠遥感判读分析并与常规调查资料相互印证,使我们从众多的因子中筛选出 8 个主导性因子,并制订了较为合理的评价标准。然后,针对火灾后森林生态变化的复杂性和模糊性特点,采用模糊数学中的"多层次模糊综合评判"方法,对 18 个样地的各生态因子进行由低层次、小系统到高层次、大系统的逐步综合评判,其结果(表 1)揭示了火灾后各迹地的生态变化趋势。最后,引入火烧年限 t,通过对 18 块样地不同火烧年限的 28 组植被指数比值数据的统计分析,建立了动态监测评估模型,以预报各迹地逐年的动态变化进程。即

$$D = 9677.618 - 9677.574b_1 - 9676.974b_2 - 9677.343b_3 - 9677.945b_4 + 0.0536t$$

式中:b_1,b_2,b_3,b_4 为模糊综合评判结果。

2. 监测评价结果的分析与验证

(1)模糊综合评判结果的分析　将评判结果(表 1)与各样地的野外调查结果作对比分析可知:

①林分状况是生态变化的内在主导因素。从 4、5、13、16、17 号样地可看出,林分郁闭度大的林地火烧后的恢复一般都比较好。幼龄树在火灾中比中、成树死亡得多,纯幼龄林在中、强度火灾后一般难以恢复,故 2 号幼林样地评判结果为"差",而中龄林因正处于生长发育旺盛期,

故易于恢复，效果也较好；这些都得到野外证实；同理，异龄密林在火灾后林分密度有不同程度降低，异龄疏林在灾后往往沦为荒山草坡或稀树灌丛草坡。

表 1　森林火灾后生态恢复趋势的模糊综合评判结果与野外调查结果的对比分析

样地号	火烧时间	受害程度	林分状况		地形				土壤	模糊评语				变化趋势	1992 年 5 月野外调查结果
			郁闭度	林龄	海拔	坡向	坡度	坡位		很好	良好	一般	差		
1	1992.5	中	0.6	中	2300	SE45°	22°	中、上	红壤	0.171	0.199	0.627	0	一般	刚烧，可望恢复
2	1982.5	强	0.5	幼	1600	W	23°	上	紫色土	0.014	0.065	0.039	0.882	差	树木几乎全烧死
3	1986.4	中强	0.4	中	1800	NW35°	23°	中、上	紫色土	0.040	0.589	0.371	0	良好	山腰好，山顶稍差，局部陡坡有裸岩
4	1982.3	强	0.7	中	1600	SW65°	15°	下	紫色土	0.156	0.777	0.057	0	良好	与周围未过火林地无法区分
5	1986.3	中强	0.7	中	1700	SE45°	24°	中	紫色土	0.148	0.507	0.345	0	良好	恢复不均匀，大部分良好，局部差
6	1982.3	强	0.4	中	2200	NW50°	30°	中、上	红壤	0.084	0.320	0.359	0.237	一般	基本恢复，但参差不齐，好坏不均
7	1991.4	中	0.6	中	2400	山西下	32°	上	黄棕壤	0.142	0.813	0.045	0	良好	恢复速度快，较整齐，均匀
8	1992.4	弱	0.5	中	2300	S	35°	中、上	黄红壤	0.300	0.645	0.043	0.012	良好	恢复较容易，局部陡坡较难
9	1987.5	强	0.4	中幼	2300	W	38°	上	黄红壤	0.010	0.544	0.445	0	良好	恢复较好，但不均匀，强度下降
10	1987.5	强	0.5	中幼	2200	W	30°	上	紫色土	0.010	0.554	0.436	0	良好	恢复好，但高低不等，强度不均
11	1990.4	中	0.4	中	1400	E	25°	中	红壤	0.029	0.606	0.365	0	良好	恢复好，但局部陡坡差
12	1988.2	强	0.4	中	1500	N	35°	中、上	红壤	0.057	0.285	0.658	0	一般	恢复一般，局部混交林好
13	1989.7	中	0.7	中	1800	N	30°	中、上	红壤	0.152	0.823	0.007	0.019	良好	恢复速度快，但不均匀，陡坡差
14	1991.4	中	0.4	中	2100	S	25°	中	红壤	0.030	0.894	0.067	0	良好	恢复速度快，效果明显
15	1985.4	中	0.6	中	1600	S	28°	下	红壤	0.070	0.281	0.637	0.012	一般	人为干扰大，恢复不均匀
16	1980.4	中	0.7	中	1800	S	30°	中、上	红壤	0.152	0.798	0.038	0.012	良好	恢复好，与周围浑然一体，陡坡差
17	1987.2	弱	0.7	中	2300	W	24°	中、上	黄棕壤	0.148	0.827	0.025	0	良好	恢复好，与周围无明显区别
18	1986.3	弱	0.6	中幼	1617	W	24°	下、中、	紫色土	0.299	0.659	0.032	0	良好	恢复好，与周围无法区别

②林木受害程度是火行为强度、树木死亡率、树干碳化高度和树冠烧损比例等的综合反映。林木受害程度越大，恢复越困难，但只要树梢未死的树木，都有复活的希望，只是恢复时间长短和恢复效果不同而已。其所以火灾后一些林地消失，多半是被以种种理由滥砍所致。表 2 中的中、弱度受害的样地一般被评为"良好"，是符合云南松林生态变化规律的。对于中、成龄的密林，遇中、弱度火灾烧死一部分幼树和灌木，既使林相整齐，又调节了林分密度，有利于林内通风透光，相当于强度抚育；有些弱度受害的林地，如 8、17、18 号样地，其林分状况的恢复结果甚至超过火烧前的水平，因为弱度火既对林木伤害不重，又使大量枯落物和部分草灌化为灰烬，不仅增加了土壤肥力，有利于林木生长恢复，而且为云南松天然更新创造了条件，也有效地控制了森林病虫害[1]。上述评判结果说明火对云南松林生态系统的影响作用具有两重性。

③在 8 个评价因子中，4 个地形因子的影响权重小于林分状况和林木受害程度，这是因为它们是森林的生境条件，以其对光、热、水、气、土的重新分配而间接地影响灾后森林的生态恢复和重建。但当坡度≥35°时，陡坡上的迹地更新恢复就十分困难，如 6、8、13、15、16 号样地中的陡坡地段因失去植被保护而出现裸岩和秃顶，水土流失加剧，局部地方甚至诱发岩崩和滑坡，故其评语中出现"差"的显示，提醒人们切实注意陡坡林地的防火和火灾后的人工更新抚育。

总而言之，遥感与模糊综合评判的有机结合，使评判结果基本符合火灾后云南松林生态变化的趋势，经对 12 个迹地的调查验证，与实地情况相符。证明评判结果是可靠的，其评判方法和技术路线是合理的和可行的。

(2)动态监测结果的验证　利用所建立的动态监测模型对 4 个迹地进行逐年监测评估，并进行图像测算，同时进行实地调查，最后将三者的结果进行对比分析，示如表 2。从表中可看出，三种方法不同，但结果却基本相同：监测评价模型所计算的数值越大，其评语越好，说明迹地每年的林木生长恢复速度和生物量增长值越大。生态恢复所需时间也越短。一般中度受害的林地，约需 5 个生长季便可达到评语的水平，这与实地调查的 4—6 个生长季一致；而轻度伤害林地，则又需 3—4 个生长季，因为中、弱度火灾使林木受到中、弱度伤害，它使土壤肥力和林分状况有一定程度的改善，故一些迹地恢复效果甚至超过火烧前；但强度受害的林地非 6—7 个生长季不可，评语过差的，甚至更长，因林木受害过重或生境条件过差，生态往往困难以恢复而退化为草地或荒山秃岭。

表 2　生态动态监测评价模型功能验证结果

序	验证样地位置	火后年限(年)	受害程度	生态因子			生态动态变化等级		
				林分	地形	土壤	模糊计算	图像测算	1993年野外观察
1	德昌茨达奥水	1	中度	龄组： 灌木云南松林 中龄林，混生阔叶树 郁闭度：0.7	海拔：2000—2700m 坡度：25°—30° 坡向：南和西 坡位：中、上坡	上坡位： 山地棕壤 中坡位： 山地黄棕壤	0.653	0.679 (1987年图像)	恢复最好
2	盐源平川大梁子	6	中度	龄组： 灌木云南松中幼林 郁闭度：0.6	海拔：1900—2500m 坡度：30°—35° 坡向：西 坡位：中、上	黄红壤	0.849	0.886 (1993年图像)	恢复良好
3	德昌佛川新马	4	中度	龄组： 草类云南松幼中龄林 郁闭度：0.5	海拔：1500—2000m 坡度：30°—35° 坡向：东和西 坡位：上	红壤	0.635	0.700 (1993年图像)	恢复一般(山顶较差)
4	盐源右所赵岩山	2	中偏强度	龄组： 草灌云南松林 中龄林 郁闭度：0.5	海拔：1600—2700m 坡度：30°—35° 坡向：一山四面 坡位：中、上	上坡位： 山地黄棕壤 中坡位： 黄红壤	0.703	0.880 (1993年图像)	恢复良好

六、结　语

通过内、外业的大量试验研究，将遥感技术与模糊综合评判方法应用于森林火灾后生态变化的动态监测和趋势评估，攻克了森林生态变化动态监测的难关；所完成的监测评估数学模型是遥感与地理信息系统密切结合的一体化实用技术系统。在 EGIS 支持下，以模糊综合评判方

法获得火烧迹地生态变化的总趋势评估，再以遥感信息提取技术可获取的森林生态变化信息，代替野外常规调查数据，建立动态监测评估模型，以估测迹地逐年的生态变化量值，因而具有快速、高效、及时、准确的优点，为火烧迹地的合理经营和更新抚育提供了动态信息的获取手段，尤其对于交通不便、人迹罕至的深山林区的迹地生态监测更具优越性。

参 考 文 献

[1] 马志贵、王企银主编. 林火生态与计划烧除研究. 成都：四川民族出版社，1993年1月

[2] 甘书龙主编. 四川省农业资源与区划. 成都：四川省社会科学院出版社，1986年1月

[3] 邹崇辉. 植物生物量和作物产量遥感估算的若干理论问题. 遥感信息，1987年第4期

[4] 王导清. 我国卫星图像数据用于生物量研究. 遥感信息，1987年第4期

21. 遥感与模糊评判在森林火灾后生态监测评价中的应用①

范逢容　周方村　高世忠　郭　洁
（中国科学院、水利部成都山地灾害与环境研究所）

摘要　本文以遥感资料为信息源，针对森林生态的复杂性与模糊性，采用模糊数学中“多层次模糊综合评判”的方法，对森林火灾后生态景观进行评价及动态监测，以期探索森林火灾后生态监测评价的新途径，为森林生态系统的恢复和重建提供科学依据和决策支持。

一、引　　言

试验区位于四川西昌地区北纬 27°20′ -28°00′，东经 101°30′- 102°30′，是四川重要的云南松林区。云南松林分布于海拔 1300—3100m 的范围内，群落结构简单，林相整齐。由于该区域地理位置、下垫面状况及大气环流因素的综合影响，形成冬春干暖少雨的气候条件，加之云南松固有的生物学、生态学特性，云南松树干枝叶富含松脂，冬春季又正是云南松林地植物的休眠期，叶枯草干，一遇火源，即可酿成森林火灾，因此，该区森林火灾一直很严重。据四川多年统计，云南松林区森林火灾次数和受害面积占全省的 80%[1]，1980—1990 年间共发生重大森林火灾 23 次，年均两次，一般火灾次数更多。这给研究森林火灾后的生态变化提供了多时相的观测研究样地。地域内地形复杂，山川并列，高差悬殊，林木立地条件多样，为研究不同本底状况下的生态变化差异提供了保证。

森林火灾后，其生态景观变化是各生态因子及其地域组合体综合影响的结果，其表现是林木生长机能的逐渐恢复和生物量的不断增加，生长恢复与生物量增加同影像特征变化紧密相关。遥感信息对生态主导因子的空间分布特征及其对森林生态的影响作用的综合显示敏感、准确；且遥感具有迅速、周期性等特点。因此，用遥感资料提取植被信息监测生态变化。

针对森林本身的复杂性及其生态恢复方面的模糊性，采用模糊数学中“多层次模糊综合评判”的方法，进行林火灾后生态评价、预测火灾后林地的发展趋势。

二、图像处理与植被信息提取

（一）图像处理

研究中，用到的遥感信息源主要有：1980 年的 1∶4.8 万彩红外航片；1987 年西昌幅

① 参加者还有游先祥、兰立波、赵丁玉、龙先华等。野外试验与观测得到四川省林业厅防火办、凉山州和西昌市林业局的大力支持与帮助，深表谢忱。

SPOT、MSS 卫星遥感图像；1987 年和 1993 年西昌幅 TM 磁带。

图像处理主要是对 TM 磁带数据的处理试验和对比分析。即根据 TM 七个波段的特性，进行 TM 波段组合效果试验。选择能很好反映该研究区森林植被的 TM4、3、2 三个波段，依三基色合成的色度学原理，分别赋予红、绿、蓝进行彩色合成。此图像在野外样地选择和生态要素判读中发挥了较好的作用，且利于植被信息的提取。

(二)植被信息提取

植被在 TM 影象红光区(TM3)为强吸收，在近红外波段(TM4)呈强反射。因此，用 TM3 和 TM4 的不同组合来表示植物的健康状况和生物量，以客观地反映植被的景观现状及动态变化。此法使植被信号放大，并使植被群内方差缩小，群间方差变大，消除或减弱地形阴影的影响，增强绿色植被与背景之间的反差。其主要组合形式有：比值$\frac{TM4}{TM3}$、差值 TM4－TM3、归一化$\frac{TM4-TM3}{TM4+TM3}$等，它们被称作植被指数，亦叫绿度值，随叶绿素含量的增加和植被盖度的增大而增加，与植物的长势和生物量大小呈线性关系。本文采用归一化植被指数法，即

$$VI=\frac{TM4-TM3}{TM4+TM3}$$

式中：VI 为植被指数。

提取火场样地及其对照样地的归一化植被指数 TVI、RVI，以其比值

$$D=\frac{TVI}{RVI}$$

表示该火场样地从火烧到遥感成像这段时间的林木长势恢复和生物量增加的相对值。

三、评价因子与评价标准的确定

森林生态系统十分复杂，系统内各要素作用的性质、方式和程度互不相同，各要素又相互联系，相互制约，以不同的组合特点对系统产生综合影响。根据“不相容原理”，当一个系统复杂性增大时，我们使它精确的能力减小[2][3]。因此，生态评价这项工作就具有复杂性和模糊性的特征。

森林火灾后，影响其生态变化的因素难以一一进行评价。根据地域特点，筛选出 8 个具有制约性的评价因素。评价因素及其评价标准见表 1。

表 1 中，x_7 由实测取得，其值直接参与评价；对 x_1、x_2、x_3、x_4、x_6 用评分法作了处理；x_5、x_8 为经过加工处理的参数。土壤综合指标是先对土壤种类、土壤结构、土壤质地等进行评价，以其总分表示。林分受害程度是火行为强度、树干碳化高度、树冠受害比例、树木死亡率的综合指标。

表 1　西昌地区云南松林火灾后生态恢复的评价因素与评价标准

序号	评价要素及评价标准								评语	植被指数比 D
	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8		
	坡度 坡度(°) 分	坡向 坡向 分	坡位 坡位 分	海拔 海拔(m) 分	土壤综合指标(分)	林龄 林龄 分	郁闭度	受害程度(%)	生态恢复	
1	0—15 95—100	N 95—100	中 95—100	1600—2800 95—100	95—100	21—40 95—100	≥0.7	<30%	很好	≥0.9
2	16—35 80—95	NE、NW、E、W 80—95	中上、中下 80—95	1300—1600 80—95	80—95	41—60 80—95	0.4—0.7	35—50%	良好	0.7—0.9
3	36—40 60—80	SW、SE 60—80	上 60—80	≥2800 60—80	60—80	10—20 ≥60 60—80	0.3—0.4	50—70%	一般	0.5—0.7
4	≥40 <60	S <60	下 <60	≤1300 <60	<60	≤10 <60	<0.3	≥70%	差	<0.5

四、模糊综合评判

本文采用多层次模糊综合评判的方法[2][3]，即先对低层次的各类因子进行综合评判，然后对各类因子的评价结果进行高层次的综合评判。经过一个由低层次、小系统过渡到高层次、大系统的逐步综合过程，实现林火生态的模糊综合评价。

1. 划分因子集并给出评语集

将整个因素集 X 划分为地形(X_1)、土壤(X_2)、林分(X_3)、受害程度(X_4)4 个子集，即

$$X = \{X_1, X_2, X_3, X_4\}$$

四个子集分别为

$$X_1 = \{x_1, x_2, x_3, x_4\} \quad X_2 = \{x_5\}$$

$$X_3 = \{x_6, x_7\} \quad X_4 = \{x_8\}$$

拟定森林火灾后生态恢复的评语集为

$$Y = \{\text{很好}, \text{良好}, \text{一般}, \text{差}\}$$

2. 确定评价因子的权重

应用多目标决策中的"二元对比法"原理[1]，确定因素集中各评价因子的权重。即根据该地区区域特征和专家咨询意见，对 m 个因子中任意两个因子之间的重要性进行两两比较，给出第 i 个因子相对于第 j 个因子的重要性指标与第 j 个因子相对于第 i 个因子的重要性指标，记其比值为 C_{ij}，得到判断矩阵：

$$C_{mm} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & \cdots & C_{1m} \\ C_{21} & C_{22} & \cdots & C_{2m} \\ \vdots & & & \vdots \\ C_{m1} & C_{m2} & \cdots & C_{mm} \end{bmatrix}$$

然后对矩阵 C 每一行元素先相乘再求 m 次方根，得一向量 $\beta = (\beta_1, \beta_2, \cdots, \beta_m)^T$，作归一化处理

后得另一向量 $\underset{\sim}{A}=(a_1,a_2,\cdots,a_m)$，其中，$a_i=\dfrac{\beta_i}{\sum_{k=1}^{m}\beta_k}$。经检验判断矩阵具有满意的相容性时，向量 $\underset{\sim}{A}$即作为权数集。

由上述方法得到各因素集相应的模糊权数集为：

生态恢复权数集 $\underset{\sim}{A}=(0.0842,0.0342,0.2881,0.5935)$

地形子权数集 $\underset{\sim}{A}_1=(0.2207,0.5619,0.0613,0.1561)$

林分子权数集 $\underset{\sim}{A}_2=(0.1667,0.8333)$

对上壤和受害程度进行综合考虑，没细分到低级因素。因此，无子权数集。

3. 单因素评判

首先，建立隶属函数。本文选用升(降)半梯形分布，建立一元线性隶属函数。再根据隶属函数计算每个评价因子对各评语的隶属程度，诱导出因素集的模糊关系 $\underset{\sim}{R}$，即单因素评判矩阵：

$$\underset{\sim}{R}=\begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2n} \\ \vdots & & & \vdots \\ r_{m1} & r_{m2} & \cdots & r_{mn} \end{bmatrix}$$

式中：r_{ij}为 i 因素对于 j 等评语的隶属度。

4. 综合评判

因素被分为两层，因此要作两级综合评判，即一级综合评判和二级综合评判。

一级综合评判是由类因子的权数集 A_i 与该类的单因素评判矩阵 R_i 进行模糊变换，求得各类一级因子的评价结果 B_i，即

$$\underset{\sim}{B}_i=\underset{\sim}{A}_i\cdot\underset{\sim}{R}_i=(b_1,b_2,\cdots,b_j,\cdots,b_n)$$

在模糊变换中，选用加权求和型，即 $b_j=\sum_{i=1}^{m}a_ir_{ij}$。此变换法对所有因素依权重大小均衡兼顾。

一级综合评判的结果 B_i，是因素集 X_i 中单因素的评价。二级综合评判将每个 X_i 作为一个因素看待，用 $\underset{\sim}{B}_i$ 作为它的单因素评判，于是构成因素集 X 的单因素评判矩阵：

$$\underset{\sim}{R}=\begin{bmatrix} \underset{\sim}{B}_1 \\ \underset{\sim}{B}_2 \\ \underset{\sim}{B}_3 \\ \underset{\sim}{B}_4 \end{bmatrix}=(b_{ij})_{4\times 4}$$

用生态恢复权数集 $\underset{\sim}{A}$与 $\underset{\sim}{R}$进行模糊变换，即得生态恢复的综合评语 $\underset{\sim}{B}$，$\underset{\sim}{B}=\underset{\sim}{A}\cdot\underset{\sim}{R}$。表 2 为 18 块火灾样区的二级模糊综合评判结果，其生态恢复等级依最大隶属原则确定。

表 2　森林火灾后生态恢复模糊综合评判结果

样地号	Fuzzy 评 语				生态恢复等级
1	0.174	0.199	0.627	0	一般
2	0.014	0.065	0.039	0.882	差
3	0.040	0.589	0.371	0	良好
4	0.156	0.777	0.067	0	良好
5	0.148	0.507	0.345	0	良好
6	0.084	0.320	0.359	0.237	一般
7	0.142	0.813	0.045	0	良好
8	0.300	0.645	0.043	0.012	良好
9	0.010	0.544	0.446	0	良好
10	0.010	0.554	0.436	0	良好
11	0.029	0.606	0.365	0	良好
12	0.057	0.285	0.658	0	一般
13	0.152	0.825	0.007	0.019	良好
14	0.039	0.894	0.067	0	良好
15	0.070	0.281	0.637	0.012	一般
16	0.152	0.798	0.038	0.012	良好
17	0.148	0.827	0.025	0	良好
18	0.299	0.669	0.032	0	良好

五、动态监测评估

模糊评判值是影响林火生态的诸多因素的综合反映，它预示火烧林地总的发展趋势，而不能反映林地逐年的变化情况。因此，还需引入火烧年限 t，评估林地逐年变化的情况。逐年变化程度用火烧林地与对照地植被指数的比值 D 来反映。对照地就近火场选取，其环境因子与火场样地相同，原林分状况与火烧前林分相近。

通过 TM 图像处理和专门信息提取，测得 17 块样地不同火烧年限的植被指数比 D（共 28 个），通过对这 28 组数据的统计分析，建立评估模型：

$$D = 9677.618 - 9677.574b_1 - 9676.974b_2 - 9677.343b_3 - 9677.945b_4 + 0.0530t$$

式中：b_1, b_2, b_3, b_4 为模糊评判结果。

衡量回归效果的统计量如下：

偏差平方和 $= -0.2229$

回归平方和 $= 1.0557$

复相关系数 $= 0.875$

显著性检验量 $F = 14.3869$

六、结果分析

(一)Fuzzy 评语所提供的信息

森林火灾后的发展总趋势主要从 Fuzzy 评语反映出来。根据最大隶属原则，由评语确定了森林恢复的等级，但这主要是为工作和表达的方便，Fuzzy 评语所提供的信息远远超出了清晰的等级结论。

1. 考察整个评价过程，可以了解各个评价要素、各类因素及总的等级状况。

2. 分析基础数据和表 2 的结果可知，10 年以下的云南松幼林，一经火烧，几乎就不能恢复，如 2 号样地；强度火烧后，云南松中成林恢复不好，但仍有恢复的可能，如 1 号、6 号、12 号、15 号样地，同时也说明云南松具有耐火性；中度受害后，普遍恢复良好，但恢复一般的可能性也较大，如 3 号、9 号、10 号、11 号样地，因此，必须加强管护；弱度受害后，生态恢复良好，且恢复很好甚至超过原林分水平的可能性也较大，如 8 号、17 号、18 号样地。

在因素集中，地形所占权重不如受害程度和林分状况，但当坡向为南坡(如 16 号样地)或坡度大于 40°(如 13 号样地)时，生态恢复出现差的可能性，如不加强管理，就会向劣势发展。

3. 由 Fuzzy 评语可看出各等级的从属情况，从而推测发展趋势，为合理的经营管理提供依据。

(二)动态监测评估分析

遥感信息与模糊评判相结合，监测评估林火灾后生态，使评估工作粗中有细，细中有粗。由模糊评判结果可知总的发展趋势，再从遥感影像上获取植被信息，建立逐年监测评估模型，估测每年的变化程度。分析评估模型可知，约经过 5 个生长季，林地植被指数比 D，便可达 0.8 左右，即说明生态恢复一般要经历 5 个生长季，评语越好，经历年限越短，评语越差，经历年限越长，当太差时，生态难以恢复，甚至退化；中低度火烧相当于强度抚育，改善林地卫生状况，消除火灾隐患。

(三)结果检验

对 4 个迹地的 Fuzzy 评语、图像测算值、动态监测评估值进行了验证(见表 3)。从表 3 可看到，Fuzzy 评语与实地调查情况相符；模型估算值同 TM 图像测算值近乎相等，并且同野外调查情况相符。4 号迹地的 TM 图像测算值偏大，是林下灌丛发育所致。若能提供冬季的遥感影像，便可减小或排除这种干扰。

研究表明，应用遥感与模糊评判相结合的方法进行林火灾后生态评价是可行的，具有较高的科学性。

表 3　验证情况表

序号	Fuzzy 评语	火灾时间	生态动态变化情况			备注
		灾后年限	模型计算 D	TM 影像测算 D	野外调查 (1993 年)	
1	(0.148,0.827,0.025,0)	$\frac{1986}{2}$	0.653	0.670 (1987 年影像)	恢复良好	
2	(0.010,0.544,0.446,0)	$\frac{1987}{7}$	0.849	0.880 (1993 年影像)	恢复良好	
3	(0.057,0.285,0.658,0)	$\frac{1989}{5}$	0.635	0.700 (1993 年影像)	恢复一般	
4	(0.142,0.813,0.045,0)	$\frac{1991}{3}$	0.703	0.880 (1993 年影像)	恢复良好	林下灌丛发育

参 考 文 献

[1] 赵子玉. 森林火灾的预防和扑救. 四川省护林防火办公室,护林防火讲义,1988

[2] 吴望名,陈永义等. 应用模糊集方法. 北京师范大学出版社,1985

[3] 袁嘉祖,冯晋臣. 模糊数学及其在林业中的应用. 中国林业出版社,1988

22. 干旱河谷云南松林火灾后生态因子的评价[①]

游先祥　唐季林
（北京林业大学森林资源与环境学院）

摘要　实验在四川西昌地区干旱河谷云南松林中进行。为了定性和定量分析林火对干旱河谷云南松林生态环境的影响，在可复位的火烧迹地中选择了不同火烧时期的18块标准地进行了调查。调查内容包括了火烧迹地立地环境条件、林分调查因子、火烧强度、群落变化特征、胸径及树高在林火后的变化，幼树受损害情况，土壤物理化学性能变化，火烧前后林木生物量的测定等等，并在进行过数字图像处理的TM影像图上(比例尺为1∶25000，1∶50000)进行了定位观测，分析了不同年度、不同强度等级的火烧迹地在TM卫星影像图上与周围环境的差异性。在此基础上综合分析，评估了干旱河谷云南松林林火后生态因子的变化特征。

火是一个活跃的生态因子，经常作用于森林生态系统，林火的燃烧破坏了森林的结构和功能。长期以来，被视为人类大敌。本世纪60年代，生物学家开始用积极观点来看待林火，火作为一种自然力越来越受到人们的重视。Leopold(1963)曾报道，植物群落中完全无火可能是有害的，也有些学者认为，地球上许多地区天然林的形成与火因子影响有关。郑焕能等[1,4,5,6](1990)研究了火在森林生态系统中的影响，并提出了评价指标。目前随着人为干扰的增多，森林火灾危险性日益增大，如何正确评估林火的双重性，快速监测火后生态环境的变化，进一步评估林火对不同森林群落的影响，就成为林火管理的关键性问题。

四川干旱河谷云南松林，是四川火灾多发地区，因此如何快速监测林火，以及灾后生态环境的质量评估就成为一个重要课题，本研究在四川西昌地区进行，试验中应用动态森林分类学的观点，分析不同林火强度火烧迹地、林木生长状况、森林更新、群落稳定性能特征及地形对林火影响，并应用经过数字化图像处理的TM影像图进行不同时期火灾后迹地识别。根据迹地与周围相邻森林生长状况的对比分析，对其灾后的生态环境作出评价。

(一) 试验地区概况

四川西昌市属亚热带季风气候，具有冬春季日照多、气温高、湿度小风力大、干湿季明显等特征。据凉山州林业局气象资料报道，在1—5月西昌市日照时数高达237.6h，阳光充足，平均降水量仅为27mm，而平均蒸发量206.2mm，加之风速过大，这些气候使林火发生可能性较大。从而使该区在冬春成为林火多发生区。

① 高世忠、丁昭全、马光赤等同志参加了外业调查，马光赤参加了内业整理。

西昌地区森林资源丰富，亚热带针阔叶混交林为优势植被，乔木树种中主要为云南松林，云南松既属易燃树种，又为南方针叶树种中耐火性较强的树种。云南松林下主要木有桤竹、杜鹃；草本有茅草、苔草和蕨类等。试验区森林类型多为草类云南松林、灌木云南松林、栎类云南松林等，林区土壤以山地黄棕壤和山地红棕壤为主。

（二）地面数据采集及成果分析

标准地设在海拔1390—2893m，火烧时间为1986—1993年的不同火烧强度迹地上，标准地多为云南松纯林，灾后生态环境变化的数据采集来源于地面调查和卫星图像分析。本文重点介绍火后群落学特征变化、环境因子变化（见林火对云南松林土壤性质的影响一文）[5]，林木生长变化等。

1. 调查项目及火烧强度的确定

标准地大多设在草类云南松林、灌木云南松林内，林分郁闭度0.3—0.7，林木平均高5.5—15m、平均胸径5.5—18cm。根据可复位并能确定火烧时间调查了18块标准地（标准地材料见火对云南松林土壤性质的影响一文）。

林火强度确定，可根据火后残存树木数量、CWD（枯立木和倒木）状况、火后更新，并参考树干熏黑高度，按公式$I=260F_s^{3}$[1]计算火强度（式中I为火强度，F_s为树干熏黑高度）。计算火强度后，根据火烧对植被影响的严重程度，确定16块样地火烧状况，火烧强度判别标准见表1所示。

表1　火烧强度判别标准

林火等级	火烧强度（KW/m）	熏黑高度（m）	残存活树	CWD	树冠受害状况	火后更新	下木活地被物状况	样地号
Ⅰ	>3500	>4	较少	倒木、枯立木多	褐或黑褐色	好	全部烧光	麻1、典1
Ⅱ	500—3500	1—4	较多	中	针叶被黑或黄褐色	中	1/3灌木被烧	高峰村、麻林1、乌麦、邱家山子
Ⅲ	<500	<1	很多	少	针叶微黄或不受害	差	受害程度轻	铜川、黄竹沟、麻林1,2,3,巴拉寨2,3,4

2. 林火对云南松纯林生态学过程的影响

从理论上讲，植被格局是一个地区植被的基本特征（Daubenmive 1986；Ellemberg 1974），在南方针叶林植被格局形成中，具有一定的生态意义，明了这点，有助于我们进行正确的林火管理。

（1）火对林木生长的影响　林火对林木伤害程度，取决于多种因素，如火性质、火强度和火环境。为了分析这些问题，我们选择了不同火烧强度，不同地形因子火烧迹地的7株标准木作解析木。通过解析木分析，测定了林木受伤害后的状况，从表2～6可以看出如下规律：

① 对林木胸径生长的影响　从表2可以看出，火烧强度大，对林木胸径生长影响很大，不仅表现在火烧当年，在以后几年中亦受较大影响，且基本恢复不到原来的水平。

弱度火仅在当年对胸径生长有影响，一般在火烧后的第二年即可恢复到原来的水平，有的由于增加了土壤灰分，在后几年中生长速度甚至增加。

为了预估火灾对今后生长影响的大小，考虑到胸径生长曲线特点，应用了灰色预估模型

GM(1,1)和一元回归模型进行了估测(表3),从两种模型估测结果看,除第7株解析木外,其它结果近似,而第7株明显偏大,是否准确,需用1993,1994年两年实测数据进行校正。

表2 林火对立木胸径生长调查

树号	火烧年代	火烧强度	火烧迹地位置	胸径生长量(cm)									
				1992	1991	1990	1989	1988	1987	1986	1985	1984	1983
1	1986	强度	山脊	0.26	0.26	0.26	0.24	0.30	0.22	0.24	0.40	0.38	0.40
2	1986	强度	山脊	0.32	0.40	0.40	0.40	0.24	0.36	0.26	0.32	0.46	0.40
3	1986	强度	山上低洼处	0.22	0.22	0.20	0.24	0.28	0.28	0.22	0.50	0.50	0.48
4	1986	强度	山上低洼处	0.36	0.40	0.42	0.40	0.38	0.38	0.24	0.42	0.44	0.44
5	1990	弱度	坡上部	0.50	0.45	0.35	0.40	0.40	0.30				
6	1990	弱度	坡上部	0.33	0.40	0.44	0.33	0.45					
7	1989	弱度	坡中部	0.60	0.40	0.25	0.25	0.22					

②火烧对林木高生长的影响 火烧对林木高生长的影响近似于胸径生长,如果火强度为弱度火意味着对顶芽没有太大的影响,因此对高生长影响不大。如为强度火,火苗蔓延到树冠顶部,则对树高生长有较大的影响。表4中数据表明,有的影响较大(可能由于树高较低),有的影响极不显著。

同样对树高生长应用了灰色模型GM(1,1),一元回归模型进行了估测(表5,表6),估测结果表明,对火灾后高生长的预估模型,以GM(1)为佳,回归估测结果明显偏低,不符合现实生长情况。

表3 林火后立木胸径生长预测

树号	年度		
	1993	1994	1995
1	0.21(0.21)	0.20(0.19)	0.19(0.17)
2	0.35(0.34)	0.35(0.34)	0.35(0.34)
3	0.14(0.12)	0.13(0.09)	0.12(0.05)
4	0.38(0.37)	0.38(0.37)	0.38(0.36)
5	0.51(0.51)	0.54(0.54)	0.57(0.57)
6	0.37(0.34)	0.36(0.32)	0.36(0.31)
7	0.80(0.62)	1.13(0.71)	1.60(0.81)

表中括号外为GM(1,1)模型估测,括号内为一元回归模型估测

从以上对火后高生长及胸径生长的模型估测来看,回归对胸径生长预估较好,而GM(1,1)对树高生长较好。

表4 林火对林木高生长的影响

标准地号	火烧年代	火强度	树高生长速度									
			1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993
磨林1	1990	弱度	0.62	0.58	0.61	0.39	0.39	0.30	0.26	0.30	0.27	0.19	
磨林2	1990	弱度	0.45	0.30	0.25	0.28	0.18	0.19	0.29	0.10	0.18	0.21	
磨林3	1989	弱度	0.76	0.62	0.50	0.39	0.39	0.55	0.54	0.67	0.44	0.63	
磨林4	1988	中度	0.33	0.37	0.32	0.31	0.74	0.23	0.32	0.35	0.45	0.55	

表 5　应用回归模型的高生长预测

标准地号	预估值			
	1993	1994	1995	1996
密林 1	0.12	0.07	0.02	
密林 2	0.12	0.10	0.07	
密林 3	0.52	0.51	0.50	
密林 4	0.47	0.48	0.50	

表 6　应用灰色预测(GM(1,1))模型的高生长预测

标准地号	预估值				模型评价
	1993	1994	1995	1996	
密林 1	0.17	0.15	0.13		优
密林 2	0.16	0.15	0.14		优
密林 3	0.58	0.59	0.50		合格
密林 4	0.48	0.46	0.51		基本合格

(2)林火对云南松林植物多样性的影响　火对植被影响的一个重要方面就是对物种多样性的影响。由于林火强度、森林类型、地形条件不同，因而对物种多样性影响的大小亦不同。高强度火使森林环境严重破坏，从而减少了物种的多样性，弱度火由于对森林环境影响小，从某种意义来说还对环境条件有所改善，从而还能增加物种的多样性，所以一般根据物种多样性的变化状况来判断森林受火灾破坏程度。在试验中，我们调查了强、中、弱三个火强度的火烧迹地上的下木、活地被物的变化、森林更新状况等等。

① 火烧后活地被物和下木状况　根据 1993 年火烧迹地调查，只要是过火之处，活地被物基本被烧光，因此火对活地被物影响的一个方面就是火后活地被物的生长状况，调查数据表明，火后草本高度明显高于火前水平，如火前平均高度为 0.2—0.3m，火后平均高度 0.4—0.5m，其原因可能是地面土壤灰分增加，养分累积所致，使火后草本生长势恢复较快，在火后第一个生长季，草本总盖度就接近火前或超过火前盖度，在以后几年内盖度均保持在较高水平，如图 1 所示。

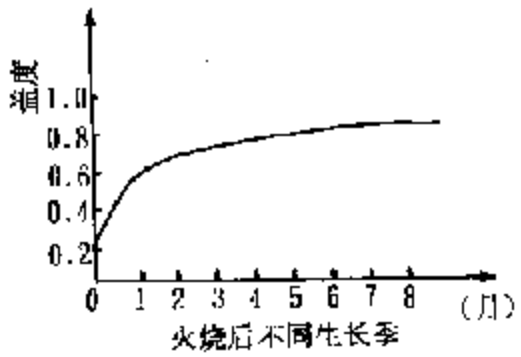


图 1　海拔 2200—2900m 在火烧后活地被物不同生长季的盖度变化。(横坐标 0 为火烧当年)

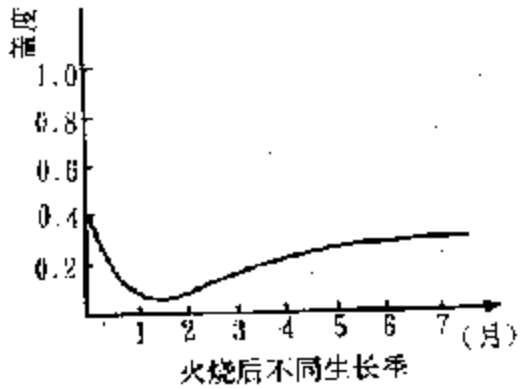


图 2　海拔 2200—2900m 在火烧后不同生长季下木盖度的变化。(火灾发生在 1 季度处)

火后在海拔 2200—2900m 范围内，阴坡、半阴坡云南松林下，下木以大叶杜鹃、小叶杜鹃和南烛为主。林火后下木平均高、种类比例和盖度均有所变化，表现为平均高度下降(火前为 1.5m 左右，火后不足 1m)，在种类比例上，火前杜鹃占优势，火后由于楠竹萌生力强，每公顷萌生高达 3 万多株，占灌木总株数 70%左右，而杜鹃萌生力较弱，数量明显减少。从下木盖度来看，火后当年总盖度明显下降，但第二个生长季开始，总盖度增加如图 2 所示。

据四川省林科所在西昌地区云南松林火烧迹地调查，也有类似的结果。火前灌木高度为

1.2—1.5m，盖度为 0.4—0.5，火后高度下降，盖度降为 0.2—0.3。

② 火强度与树木死亡率关系 我们调查样地一部分为计划火烧迹地，一部分为人为火，在计划火烧迹地中，一般火强度较小，乔木未发生被烧死情况，但在火烧强度达 I 级时(磨 1，典 1)烧死较多。

为了较准确判别林木火后死伤程度，我们测定了林木生物电势变化，据国外测定欧洲赤松损伤程度指数，发现火后林木生物电小于 5mv 时，林木 2—3 年后完全死亡，5—15mv 时林木处于半死状态，生物电大于 30mv 时，林木火后很容易恢复。我们首先在四川西昌地区进行了测定，由于测定时间太短，读数跳动较大，规律性不明显，后在河北省迁西县的红外探火试验中，在油松火烧迹地上，对油松进行了测定，对每个读数延长了时间，当其稳定后才取值。试验表明，当林木火后受损严重时，生物电在某一范围内跳动，烧伤越重，跳动越明显；烧伤较轻时，生物电变化趋势与正常林木生物电曲线非常近似。从图 3，4 可以看出，随着观测时间的延长，生物电值趋于稳定，火前林木生物电高于火后的生物电，弱度火二者趋于平行的变化，强度火则火后跳动较大。由于没有连续几年观测值，对林木死亡与生物电值之间的准确判断尚不能作出结论。但基本可以判定，若生物电跳动大则火后林木很难成活，跳动小则损伤较轻。

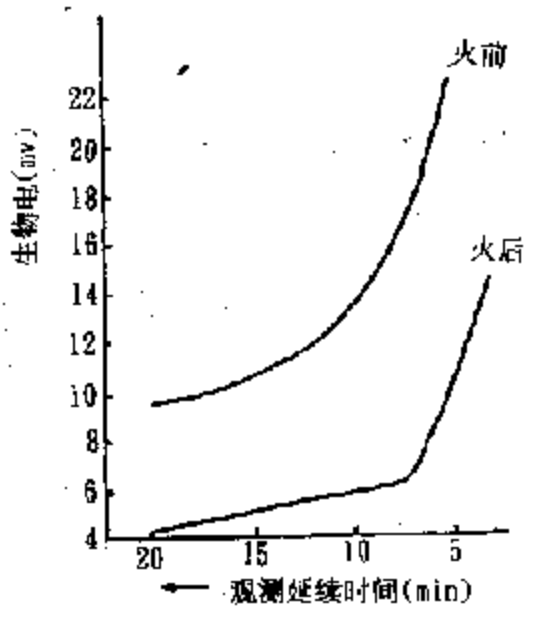


图 3 留有部分绿叶顶芽完好的生物电曲线

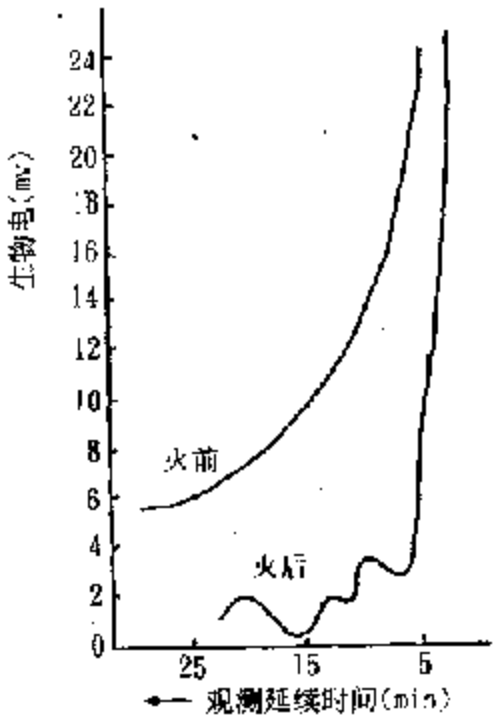


图 4 针叶烧光顶芽坏死时的生物电曲线

③ 火后幼树死亡调查 由于强度火幼树与下木基本烧光，因此对强度火而言可以说幼树已基本死亡，所以我们仅在弱度火的巴汝火烧迹地上进行了样方调查。调查中设置了 10 个样方，每个样方为 2m×2m，调查结果表明，幼树年龄越小，死亡率越高，一般大于 10 年后的幼树，在弱度火的情况下，基本没有死亡。而 1—5 年生的幼树死亡率高达 80%，6—10 年生幼树死亡率仅为 14.8%(表 7)。

表7 弱度火不同年龄幼树死亡率调查

样方数	火烧幼树平均株数	火烧后平均株数											
		1—5年生			6—10年生			>10年生			合计		
		活幼树	死幼树	死亡率(%)	活幼树	死幼树	死亡率(%)	活幼树	死幼树	死亡率(%)	活幼树	死幼树	死亡率(%)
4	40	2	11	04.6	8	1	11.1	18	0	0	28	13	40.0
3	22	4	4	50.0	8	1	11.1	5	0	0	17	5	22.7
3	29	0	10	100.0	7	2	22.2	10	0	0	17	12	41.4
合计	91	6	25	80.6	23	4	14.8	33	0	0	62	29	31.9

综上所述，不同强度林火对群落的影响有很大差异，低强度火基本不影响云南松林的群落生长状况。在短期内各项指标基本能恢复到火前水平，某些生态环境还能得到一定改善。但对幼树都有较大影响，林下灌木火后平均高度降低，盖度减小，下木优势种发生变化。云南松林一方面是易燃性树种，又是耐火树种，对林火具有一定耐火能力，在中、弱度火烧情况下，具有一定自我调节能力。

(3) 林火与地形因子的关系　根据我们的调查，林火的发生与坡位、坡向具有明显的关系。

① 林火与坡位的关系　从调查样地数据统计可以看出，在坡的上部发生的火灾占56.25%，中部占31.25%，而坡的下部仅为12.50%。说明坡的上部在旱季极易发生火灾，这是因为在旱季的干旱河谷云南松林内，在山脊处林地干燥、植物易燃，加之风大，火特别容易蔓延，加之坡度较大更易造成火的蔓延，而且容易造成过山火，所以山脊火造成损失较大。

山的中部植被生长较好，密集盖度大，在干旱季节也易着火，所以发生火灾的概率也较大，而山的低洼处，湿度较大，火蔓延慢，易扑灭，其火灾频度较低。

② 坡向与林火的关系　在干旱河谷云南松林的西昌地区，纯阳坡云南松林分布较少，据其它几个坡向调查结果是，西及偏西的半阳坡火灾的频率是62.5%，东及偏东的半阴坡频率为32.25%，而阴坡(北坡)的频率为6.25%，这说明阳坡日照强、温度高、蒸发快、可燃物易干燥，从而易燃。阴坡日照弱、温度低、蒸发慢、湿度大，因此不易燃烧，火势弱，火蔓延缓慢，因而火灾频率低。

(三) 应用TM卫星图像的林火灾后生境因子的判别分析

由于TM具有7个波段，其中TM3具有反映吸收红光进行光合作用的特点。因此它能反映植物健康状况，即健康植物吸收强烈，反射低，反之生长不良的植物吸收低反射较高。而TM4波段则所有健康植物反射高，生长不良的植物反射低，在TM2波段范围内，植被具有一个小的反射高峰，而在TM5波段、TM7波段具有水的吸收带，它们反映了植物叶中含水量的变化。为了突出植被生长状况，并消除山地地形引起的阴影影响，在数字图像处理中，应用了TM4/TM2，TM5，TM7/TM3组合图像，该组合图像宏观地反映了不同时期火烧迹地的特点。

表 8　四川西昌地区林火火烧迹地与未烧林地亮度值比较

样地号	火烧迹地 对照未烧林地	火烧后恢复状况	未处理原始波段亮度值							经行过增强比值处理后的亮度值		
			1	2	3	4	5	6	7	4/2	5	7/3①
1号	火烧迹地	恢复不好	53.7	21.8	20.1	41.8	36.0	123.3	13.0	107.3	27.7	21.2
	对照未烧林地		66.7	24.0	25.0	48.5	50.3	125.8	20.0	145.2	42.5	30.4
2号	火烧迹地	恢复很好	55.5	24.0	23.6	46.5	42.4	133.0	15.8	135.0	43.2	32.7
	对照未烧林地		58.5	25.4	26.2	54.2	52.4	151.6	20.8	147.4	49.2	33.4
3号	火烧迹地	恢复差	58.2	24.7	24.5	43.2	42.3	130.2	17.5	94.2	51.5	37.0
	对照未烧林地		58.8	26.0	26.0	55.3	53.7	135.5	20.5	139.3	60.3	52.5
4号	火烧迹地	恢复差	61.2	25.5	25.2	40.5	53.5	136.0	23.5	102.0	59.5	15.6
	对照未烧林地		62.0	27.0	29.6	48.7	58.8	137.6	25.1	132.0	61.5	54.5
5号	火烧迹地	恢复好	59.2	25.2	24.2	51.0	43.2	131.5	16.2	116.5	38.0	22.2
	对照未烧林地		62.6	27.0	31.4	54.4	69.4	153.0	29.0	151.6	53.4	30.6
6号	火烧迹地	不能恢复	66.5	30.0	38.5	45.3	58.5	137.7	31.7	102.7	71.8	51.2
	对照未烧林地		69.0	33.0	43.8	52.5	89.7	138.3	45.8	118.6	91.2	55.0
7号	火烧迹地	恢复好	59.7	26.5	26.0	44.2	45.7	123.5	19.0	109.7	48.5	34.5
	对照未烧林地		61.4	27.0	27.6	54.6	53.8	131.5	21.2	154.8	57.0	35.2

注：①1，2，…，7 系 TM1，TM2，…TM7 波段，4/2，5，7/3 系 TM4/TM2，TM5，TM7/TM3。

表 8 表明，火烧迹地光谱反射值与未烧林分在原始波段中有差异，但由于传感器、地面辐射（尤其在 TM1 波段）等的影响使图像模糊，且森林植被多处于低亮度值范围，从而使反映火烧迹地特征不明显。通过比值和增强后，由于火灾后森林植被在光合作用强的 TM3 差异大，在植被高反射的 TM4 波段也增大了差异，在反映植被和土壤水分的 TM5、TM7 波段，因立地和植被含水量的变化，使火烧和火烧林分差异变大，再通过比值使这种差异增强，然后通过色度和饱和度的调整，使火烧迹地和相邻未烧林分具有十分明显的差别。表 8 中通过 TM4/TM2 比值、使亮度值从低亮度值范围向高亮度值范围移动、TM5 波段增强后亮度值也有明显不同。而 TM7/TM3 后，由于 TM3 在低亮度值范围，TM7 中由于火烧时间较长，已通过 2—5 个生长期的恢复。土壤及植被中水分条件差异变小，因此，在此波段虽表现明显差异，但不似 TM4/TM3 差异那么大，但图像由于包含反映光合作用、植被高反射及反映水分条件的波段，以及比值增强，使火烧迹地与未烧林分在图像中具有很大的差异。通过十几个火烧迹地与 TM 图像定位分析可以看出，在近 3—4 年内的火烧迹地，如有强度火，即使火烧后已达 4 年之久，火烧迹地仍十分明显，但弱度火则与周围环境趋于一致。从目前火烧迹地来看，因面积不大，尚不会造成大的生态环境改变，但如果强度火点增多，面积增大，将会造成生态环境的大改变。因此应极力避免中、强度火的发生。

彩版Ⅶ中的 A 是 1993 年 2 月点火试验的林地，可以看出这次强度火对林地造成了较大损失，从图像上看，该火烧迹地很难得到恢复。而同一图像上的 B 为中度火烧迹地，尽管已过 3 年，但仍明显可见，地面调查林木生长与周围林木生长差异明显。

参 考 文 献

[1] A. T. 萨弗钦科．论研究火因子对森林影响方法.dechou xcyphad，1987(4):27－31

[2] 美．卡尔．福格编,华东林业规划设计院编译．林业手册．北京国际文化出版公司.1990

[3] 唐季林，林火对云南松林土壤性质的影响．北京林业大学学报,1995

[4] 宋志杰编著．林火原理和林火预报．北京气象出版社,1991．

[5] 郑焕能等．火在森林生态系统平衡中的作用．东北林业大学学报,1990

[6] Henry A Wright and Arthun W Bailey. Fire Ecology－United states and southern canada. 1982.

23. 林火对云南松林土壤性质的影响①

唐季林

（北京林业大学森林资源与环境学院）

摘要 研究了林火对云南松林区土壤理化性质的影响。结果表明，林火对土壤性质有一定的影响。经检验，差异显著。在中、弱度林火的云南松林中，林火前后土壤结构变化不大，表现出容重略有降低，总孔隙度增大，土壤pH值增加，有机碳和全氮含量减少，速效钾增加等规律。

林火是一种自然现象，也是一种特殊的生态因子，它对森林生态系统的形成和发展起重要的作用。林火会燃烧掉大量的森林凋落物，进而影响土壤物理和化学性质。目前研究林火对土壤的影响包括3个方面，即土壤物理、化学性质，土壤温度对土壤微生物的影响。[2,16]

四川西昌云南松林区属Ⅰ级火险区，林火发生频率高。为完成西南林火快速监测中灾后生态环境质量评价，本文着重论述了林火后土壤性质的变化，如土壤容重、孔隙度、pH值、有机C、全N含量和速效钾等指标。国内外不少学者也曾研究过林火对土壤物理、化学特性的影响。[2,4,5,6,8,11]四川省林业科学研究院在西昌地区云南松林区也进行过计划火烧试验[4]，试验中关于火烧对土壤养分有一定影响的结论，与本研究结果近似。

（一）研究地区概况

研究地区在四川西南部西昌市管辖范围内，地处N27°00′，E102°18′，平均海拔2000m以上。安宁河雅砻江两大河流流经境内。气候属亚热带季风气候，年均温17℃，最冷月（1月）平均温度9.5℃，最热月（7月）平均气温22.7℃，无霜期272d，年降水量1013mm，7月最大降水量216mm，1月最小降水量5mm。冬春季日照多，气温高，湿度小，风力大，干湿季明显。据林业部防火办公室颁发全国森林火险区划等级标准，该地区属1级火险区。调查地区土壤以山地黄棕壤和山地红棕壤为主，境内森林资源丰富，云南松林占有林地面积90%，其次是栎类等硬阔叶林。

（二）研究方法

1. 样地设置

该研究是属于西南林火遥感快速监测中的一部分，因此样地布设要考虑到各种因子的代表性。实验中进行了不同强度的燃烧实验，在巴汝乡燃烧10hm²云南松林，在磨盘山燃烧了20多hm²的云南松林，燃烧后进行了采样，同时在巴汝乡、磨盘山乡、马道镇和德昌县境内调查了不同时期的旧火烧迹地。按林火时间系列（1986—1993年），不同地理位置（海拔1390—2893m），不同立地条件和林火强度共调查了22块样地，选择了对比性强的16块样地进行了土壤分析，样地设置20m×20m，各标准地概况见表1。

---

① 参加该工作的有欧国考、丁明全等。

表 1　标准地基本情况

样地号	地点	火烧年代	火烧方式	海拔(m)	坡向	坡度	坡位	群落类型	树木组成	郁闭度	平均高(m)	平均胸径(cm)	下木盖高(m)	下木高(m)	草本盖高	草本高(m)	土壤类型
巴汝	巴汝乡	1993	上山火	2693	SE	18°	上	草类云南松林	10云	0.4	7.8	11.6	0.5	1.2	0.1	0.15	黄棕壤
磨1	磨盘乡	1993	上山火	2420	W	36°	上	灌木云南松林	10云	0.5	7.3	8.7	0.5	0.8	0.2	0.30	黄棕壤
磨2	磨盘乡	1993	上山火	2518	NE30°	30°	上	灌木云南松林	10云	0.5	5.5	7.1	0.3	1.5	0.2	0.30	黄棕壤
磨3	磨盘乡	1993	上山火	2320	NW30°	30°	中	灌木云南松林	10云	0.3	5.7	11.3	0.6	1.5	0.3	0.15	黄棕壤
磨4	磨盘乡	1993	上山火	2340	NE30°	24°	中	灌木云南松林	10云	0.4	7.0	7.9	0.5	1.5	0.3	0.30	黄棕壤
序18	马道	1992	下山火	1680	W	15°	上	云南松人工林	10云	0.5	6.8	8.8	0.1	1.5	0.7	0.40	红　壤
序19	邱加山	对照		1680	W	15°	上	云南松人工林	10云	0.7	5.6	8.8	0.2	1.5	0.9	1.0	红　壤
序18	黄竹沟	1991	下山火	1390	E	15°	中	草类云南松林	10云	0.5	6.8	15.1	0.1	1.5	0.6	0.40	红　壤
磨林1	盐中	1990	上山火	2430	SE10°	15°	上	草类云南松林	10云	0.4	8.4	10.3	0.1	0.5	0.3	0.40	棕红壤
磨林2	盐中	1990	上山火	2425	W	35°	上	楠竹云南松林	10云	0.5	5.9	9.6	0.3	0.5	0.8	0.60	棕红壤
磨林3	盐中	1989	上山火	2310	W	28°	上	楠竹云南松林	10云	0.3	5.5	5.0	0.2	0.5	0.4	0.4	棕红壤
序12	锦川	1989	下山火	1560	W	28°	中	肖侧云南松林	10青	0.5	8.0	5.0	0.5	1.0	0.5	1.0	黄棕壤
磨林4	盐中	1988	上山火	2450	W	32°	上	楠竹云南松林	10云	0.4	8.7	16.0	0.3	0.5	0.4	0.50	红棕壤
马道	马道镇	1988	上山火	1710	N	26°	下	灌草云南松林	10云	0.4	6.5	7.6	0.3	1.2	0.9	1.0	红壤
序16	高峰村	1987	下山火	1520	SW	20°	下	灌草云南松林	9云	0.4	15.0	9.7	0.2	1.5	0.8	0.50	红壤
序17	典承	1986	上山火	2180	SW	20°	中	胖皮木云南松林	1胖8云2胖	0.4	8.5	17.2	0.2	2.0	0.6	0.50	黄棕壤

2. 采样

在样地内呈"S"形随机布设 6—7 个样点分别取样，按 0—5cm，5—10cm，>10cm，3 种深度分别采样并混合均匀，用环刀分别切取 3 个层次土壤，测定土壤容重，土壤含水量。上样风干后室内分析 pH 值、有机 C、全 N 和速效 K 含量等指标，样品测定按土壤常规分析法。[11]

3. 数据采集

林火强度确定：根据树干烧黑高度，用公式 $I=260V_b^{1.171}$ 计算火强度 I，其中 V_b 为树干熏黑高度。根据 I 值大小划为 3 个等级[3]，I 值>3500KW/m 高强度火，I 值 500—3500KW/m 为中强度火，I 值<500KW/m 为弱强度火。

用林火前后土样分析数据差值进行 t 检验，以判断林火对土壤物理、化学特性各项指标影响程度的差异。

（三）结果和分析

1. 土壤容重和总孔隙度

不少研究表明：只有在严重火烧或反复发生林火的迹地，由于林地裸露雨水冲击土粒堵塞孔隙，导致土壤表面板结，降低总孔隙度和渗水率，才造成容重增加，而在燃烧不完全的控制用火迹地，对土壤孔隙度则影响较大[11]，Seomer. Parrant(1956)研究北方云冷杉林时，发现在轻度火烧迹地，土壤孔隙度和渗透率均有增高的趋势。这一点与我们研究结果比较一致，我们的林火试验地大多数为中、弱度的火烧迹地，林火后土壤总孔隙度升高，容重降低，如在 0—5cm 上层中，火前平均容重为 1.08g/cm³，火后为 0.98g/cm³，降低 9.5%，经差值 t 检验，t 值为 4.182** 差异极显著，土壤孔隙度火前平均为 0.60%，火后平均为 0.65%，升高 5.9%，t 值为 3.671**。在 5—10cm 土层中也有类似规律，火后容重由 1.19g/cm³ 降至 1.09g/cm³，t 值为 −3.150* 差异显著。总孔隙度增加 5.8%(结果见表 2、表 3)。造成中、弱度林火后土壤总孔隙度增加，容重降低的原因，可能是由于高温烘烤使土壤有机质被烧烧有关。

表 2　土壤理化性质分析结果

土壤层次	火烧前后	平均值					
		容重 (g/cm³)	pH 值		有机 C (%)	全 N 含量(%)	速效 K (mg/kg)
			$CaCl_2$ 浸提	KCl 浸提			
0—5	火前	1.08	4.72	4.53	5.99	0.340	23.0
	火后	0.98	5.05	4.83	5.01	0.548	25.4
	变率	−9.5%	7.0%	6.6%	−16.4%	−14.4%	28.0%
5—10	火前	1.19	4.36	4.10	4.01	0.431	19.5
	火后	1.09	4.60	4.29	3.41	0.377	19.4
	变率	−8.4%	5.5%	4.1%	−15.0%	−12.5%	−0.5%
>10	火前		4.22	3.91	3.44	0.172	13.3
	火后		4.33	4.02	3.53	0.182	−18.5
	变率		2.6%	2.8%	2.3%	5.8%	1.5%

2. pH 值

分别用 $CaCl_2$ 和 Cl 浸提土壤样品，用电位法测定土壤 pH 值，两种方法测定结果相近似。对照林火前后土壤 pH 值呈提高趋势，0—5cm 和 5—10cm 土层中火前 pH 值分别为 4.72 和 4.36，火后分别为 5.05 和 4.60，分别增加 7%和 5%，经差值 t 检验均差异显著。（见表 2，表 3）

有些学者认为，火后土壤 pH 变化微弱，但大多数研究结果表明，林火后土壤 pH 值增高，如 Beatory[10]曾报道加拿大火炬松林，火后土壤 pH 值从 4.6 上升至 6.4；Farrant[10]也报道在降水量超过 2500m 的太平洋西北部，林火后土壤 pH 值从 4.8 升至 7.2；四川林业科学研究院在西昌云南松林下测定火前、火后土壤 pH 值分别为 5.82 和 6.11[3]。

由于控制用火仅焚烧部分有机质，增加土壤中灰分物质含量，盐基成分被释放，提高了表层土壤 pH 值，土壤酸性减弱，这对促进微生物活动和增加土壤营养物质产生一定的影响。

表 3　土壤理化分析差异性检验

项　目	土壤层次(cm)	临　界　t　值	t　值
容重	0—5	$t(8)0.05=2.306$　$t(8)0.01=3.355$	−4.182**
	5—10	$t(7)0.05=2.365$　$t(7)0.01=3.499$	3.130*
总孔隙度	0—5	$t(8)0.05=2.306$　$t(8)0.01=3.355$	3.671**
	5—10	$t(7)0.05=2.365$　$t(7)0.01=3.499$	2.535*
pH 值	用 $CaCl_2$ 浸提	0—5　$t(7)0.05=2.365$　$t(7)0.01=3.499$	3.089*
		5—10　$t(7)0.05=2.365$　$t(7)0.01=3.499$	4.370**
	用 KCl 浸提	0—5　$t(7)0.05=2.365$　$t(7)0.01=3.499$	3.112*
		5—10　$t(7)0.05=2.365$　$t(7)0.01=3.499$	4.104**
有机 C %		0—5　$t(7)0.05=2.365$　$t(7)0.01=3.499$	−2.478*
		5—10　$t(7)0.05=2.365$　$t(7)0.01=3.499$	−2.555*
全 N 含量 (%)		0—5　$t(7)0.05=2.365$　$t(7)0.01=3.499$	−1.759
		5—10　$t(7)0.05=2.365$　$t(7)0.01=3.499$	1.483
速效 K 含量		0—5　$t(7)0.05=2.365$　$t(7)0.01=3.499$	3.627**
		5—10　$t(7)0.05=2.365$　$t(7)0.01=3.499$	−0.043

注：* 表示 $\alpha=0.05$ 显著，** 表示 $\alpha=0.01$ 显著

3. 有机 C 含量

采用稀释热法测定土壤活性有机 C 时，发现土壤表层 0—5cm 土层中，由 5.99%下降至 5.01%，差异性检验 t 值为 −2.478* 差异显著；5—10cm 上层中由 4.01%降至 3.41%，而在 10cm 以下土层中则由 3.44 增至 3.52%。

林火对土壤有机质的影响，随着火温增高而加剧，据报道在 100℃时，有机质开始损失，100—200℃时，产生挥发性有机物质，200—300℃时，85%的有机质被破坏。[10]。但也有报道，

在低强度火烧时，林火对土壤有机C再分配的影响，不单纯地表现为减少趋势。我们的试验也有类似结果，如在土壤表层（0—5cm 和 5—10cm）有机C减少，变率分别为－16.4%和－15.0%，而在10cm以下土层中，有机C含量增加，变率为2.3%。（见表2）又如我们1993年调查1988年强度火烧迹地，表层土壤有机C为1.77%，而相邻未火烧对照林地，表层有机C为2.56%，经5年之久强度火烧迹地，表层有机C仍较低。

4. 全N含量

林火后土壤营养元素中以N素最易挥发，一般当温度200℃时就开始挥发。我们的研究表明：土壤表层全N含量均有所减少，如在0—5cm土层中，火前平均全N含量为0.64%，火后为0.55%，变率为－14.4%，而10cm以下，土层中火后全N含量略有增加，变率为5.8%。

关于火烧后土壤全N含量变化报道不一，Wells曾报道在控制火烧期间0—10cm矿质土层中，全N含量下降。Grier于1975年也曾报道，强度火烧时，采伐剩余物N素挥发达72%—97%，而中度火烧时仅挥发11%—38%。福建林学院在马尾松林火烧迹地下，测定土壤中全N含量也有类似结果[6]。但也有一部分学者研究材料报道，林火后土壤全N含量变化不大，如Wrighi和Baley(1982年)。总的来说，控制火烧对土壤全N含量的影响较为复杂和多变。

5. 速效K

火烧加速营养物质的循环速率，增加土壤速效养分，Hetech(1980)关于林火后松林土壤化学性质变化中指出，在10cm以下土层内火后K、Ca、Mg和P的含量均有所增加。我们对火后土壤速效K的分析结果近似，即火烧对速效K影响仅限于0—5cm土壤表层，5cm以下就影响较小（表2）。而四川省林业科学研究院测定火后速效K呈减少趋势，这一点与我们是不一致的。

（四）结论与讨论

（1）林火燃烧随着林火强度的升高，土壤表层有机C损失加剧。在中、弱度地表火云南松林下，地表有机C平均损失20%以下，而在强度火烧迹地，经过5年之久表层土壤有机质仍未能恢复。

（2）火后矿物营养元素中以N素最易于挥发，在中、弱度地表火云南松林下，土壤全N含量平均减少15%左右。控制用火可加速营养物质循环，可燃物形成灰分，少量矿质钾转化为速效钾，平均表层增加15%左右。

（3）火后土壤pH值增高酸度减低，有利于微生物活动和加速营养物质循环。

（4）弱度和中度地表火，未将土壤的有机质表层烧光，基本上不影响土壤结构。在燃烧不完全的云南松林下，林火前期土壤容重平均降低9%左右，总孔隙度也略有增加。

（5）通过我们的研究认为，在控制用火林地，当林火强度不大时，对土壤理化性质影响，仅限于土壤表层，故今后取土样层次可改为0—2cm，2—5cm，5—10cm即可，尤其在林火前期调查更应如此。

综上所述，在云南松林下，实施控制用火对土壤理化性质的影响，有一定积极意义，是一项重要的营林措施。林火对林木生长，群落演替、更新状况等的影响，将在以后陆续报道。

参 考 文 献

[1] 美卡尔·福格编·华东林业规划设计院编译·林业手册·北京国际文化出版公司,1990

[2] 郑焕能等编著·林火生态·哈尔滨:东北林业大学出版社,1992

[3] 中国土壤学会农业化学专业委员会编·土壤农业化学常规分析方法·科学出版社,1983

[4] 杨建贵等·火烧对土壤的影响及经济效益分析·森林防火,1992(2),P3-7

[5] 杨玉盛等·火对森林生态系统营养元素循环的影响·森林防火,1992(3),P11-14

[6] 李忠凤等译·燃烧对森林土壤物理性质的影响·国外林业,1990(2),P26-27,43

[7] 李振同·试论火烧对森林土壤生态系统的影响·森林防火,1989(2),P22-23

[8] 吴利华等译·林火对土壤化学的影响(一)·国外林业,1991(4),P17-20

[9] 宋志杰等编著·林火原理和林火预报·气象出版社,1991

[10] Henry A Wright and Arthun W Bailey. Fire Ecology-United states and Southern Canada. 1982

[11] Marin F## Alexander. Let the Forest Burn. 1974

Influence of Fire on Soil property under the canopy of Yunnan Pine

附　录

世界林火研究最新动态

赵宪文　袁凯先
（中国林业科学研究院资源信息研究所）

摘要　介绍最新国际林火动态，世界范围内的林火研究进展、国际合作以及对我国林火研究的启示。

森林作为生物圈的主要组成部分，对人类的生存至关重要。然而森林破坏—环境恶化—森林火害陡增—森林进一步破坏的恶性循环，像影子一样跟随现代文明一同到来。火灾是森林的大敌，是森林灾害的一个重要方面。

(一)近年来世界各地森林火灾频繁

1993 年希腊创造了其林火史上的纪录，在防火季(3—10 月)林火发生 2417 起，(以往最高年火灾次数不超过 1100 起)47000hm² 林地被烧。希腊北部发生的毁灭性火灾，许多典型地中海植被烧尽。

俄罗斯 1993 年野外火灾次数 14509 起，过火面积 719400hm²。

历史上西班牙 70%的过火面积不到 1hm²，而 1993 年与 1992 年比较，超过 1hm² 过火区增加到 34%。20 次火大于 500hm²，烧掉了 43335hm²(占总数的 49%)，8 月末在 Dos Agunos 一场火烧了 7050hm²，其中 1050hm² 是森林。

波兰 1992 年野外火 9305 起，20%是林火。损失 37000hm² 森林，8 月的森林火灾，一次烧掉 9060hm²。

美国 1993 年 10 月和 11 月南加利福尼亚州发生 12 次火灾，损失森林面积 84000hm²，162 人死亡，1241 栋建筑被毁，造成近 5 亿美元的损失。

非洲的稀树草原火灾形成和输送了大量 O_3 和 OH 进入大气层。

阿根廷大火使草原变干，灌木侵入，85%适口性差的杂草滋生。1993 年冬(6—9 月)Chaco 区西南部大约 10 万 hm² 林地被付之一炬，西南部 5000hm² 稀树草原也被烧殆尽，引起本区生态环境的破坏。

应当指出的是，90 年代后期随着严重干旱的到来，火灾从非洲东移，从北南移，从欧亚大陆转向海岛地区——东南亚。使当地的热带林产生了一系列林火，数百万公顷热带林被破坏。严重损害整个地区的生态平衡。1987 年和 1991 年的加里曼丹火灾，引起了国际上对野外火给人类和环境带来不利影响的重视。

(二)林火研究最新动态

1. 林火观察

丹麦1989年夏季一场火烧掉了Jutland北部一大片被保护的田地，结果发现对蔬菜生长有利，于是决定烧掉另外几块地。阿根廷通过近10年的评估，看出频繁发生的火灾是生态系统的组成部分，实际上低强度火对草原生长有利，使阿根廷大多数地区低产量草地得以改善，火的周期为3—5年。

而在东南亚则另是一番景象，由于近年来森林火灾陡增，使得大气变浊。

2. 火烧试验

1988年阿根廷国家农牧业技术研究所(INTA)开始进行火烧研究，每次试验面积为150hm²。在试验中收集土壤有机质，土壤总氮，覆盖草灌密度和相应的气候状况，在火烧试验中注重研究控制：

——火不影响土壤中的有机质和总氮量。

——植被和所期望的草品种密度增加。

——至少在最初2年间草的存贮率增加。

——不期望的草其品种覆盖下降，但不影响其总密度。

——对牧豆树老树影响最低。

——对灌木伤害最少。

丹麦对火烧试验进行了较多的研究，他们把归入到田野(牧场)里的林木砍掉并堆放成排，以减少损害。

3. 火的基础研究

1993年由欧共体(EEC)支持，在希腊地中海地区的Chania试验室研究了林火的一些基础理论问题，包括：

——火行为·林火模型。

——综合处理。

——热·温感应。

——火生态、火影响、火管理。

——燃烧区恢复，林火防护。

——保护低纬地区地中海森林，避免火损。

阿根廷的INTA从1991年开始研究火生态和计划火烧。

在波兰，火险模型研究已有构想，近日将开始实施。他们认为，空间信息系统是建立这个模型的有用工具。该系统包括：林分类型群落组成、森林档案数据、地形数据、更新以及气候状况等。

俄罗斯的研究还有一个新方向，核污染区森林火灾的预防。1986年切尔诺贝利核电站泄漏，污染了周围森林，一旦发生森林火灾就会产生第二次污染。为此，1993年5月18—19日，在Klintsi, Briansk举行了污染监测和灭火技术的会议，在报告中展示了污染范围内的更新图和1992年林火发生信息，以及污染森林中火的全面调查(发表在《欧亚北方火生态系统》卷中)。会议的重点是，高放射性浓度森林一切营林活动将停止；控制可能导致附近地区的二次污染，随着火险增长，必须加强防火和控制的研究，加强防火体系和基础服务等。

4. 遥感研究

遥感方法作为灾害监测手段，特别是在时间分辨率方面以及宏观性方面的优势，已被越来越多的国家使用。

芬兰为NOAA AVHRR数据而设的自动化林火管理工作站已经投入工作。林火监控软件是自己开发的，接收到的NOAA图像通过数据传送网络送给工作站。

芬兰站是1993年夏季运行的。工作范围包括芬兰南部4个区、俄罗斯南部地区和希腊陆地部分等。从6月1日到8月20日由芬兰气象所接收NOAA图像，共报出66个林火点，后被一一查证。有2处火在芬兰版图以外，其余均被确认有火，有一处火仅30hm²。

1992年是波兰火灾大发生年，他们用1992年9月和1993年5月收到的法国SPOT XS和XP图像以及ERS-1(1993年夏)，即时地监视了燃烧的状况。ERS—1和SPOT图像在估计燃烧面积时可以达到同一精度，但关于火烧迹地残留森林的结构信息在SPOT上近红外段有较好的鉴别，而微波影象的空间特性决定了ERS—1鉴别迹地是有困难的。

近年的研究表明了NOAA信息与土壤水分、植被类型和蒸发量之间的关系。其研究成果的结论之一是确定了在波兰估计森林火险用NOAA AVHRR是有潜力的，研究的基础就是NOAA图像提供的信息与确定火险的参数有关。

卫星监测林火技术在俄罗斯已使用多年，与各国的情况一样，传统卫星的传感器监测能力有一定局限，如被云遮盖，火点较小等。空间"卫星"计划与俄罗斯签定了一个合作研究、发展传感器的计划，旨在①火险评价②监测小于0.01hm²与云覆盖无关的火。航天飞机传感器将在1994年的林火季节试验，然后被安置在"自然"(Priroda)平台上(与"和平"Mir轨道站相匹配)，1995年发射后期望它与国际全球燃烧项目(IGBP)、国际北方林演替研究协会(IBFRA)一起进行地面真实试验活动。德国航空航天研究所(DCR)、航天传感器技术研究所(柏林)最近提出了一个项目：为侦察、分类和追踪火情而专门设计一种传感器，建议俄罗斯、德国间合作。

5. 林火系统

林火数据库(FFD)是提供信息的基础，波兰的FFD存贮32种关于林分燃烧的信息，火灾期的气象因素、燃烧类型、面积数、林火特性及火灾控制信息，这些数据对分析林火危险是非常有用的。上述信息加上森林图的信息形成以林火管理为目的的GK基础数据。1992年这个空间信息系统参加了Kuznia kaciborska火烧面积和周围森林相关评估工作。波兰遥感与空间信息中心和比利时Gent大学遥感与森林经理试验室的联合工作所调查的区域属于上silesia地区的高密集工业区。信息系统被用于鉴别林火。它将作为森林档案图、土地立地图、地形图以及由航空、卫星图像和地形数字高程(DTM)模型所得到的各层信息的基础，当关系数据库加到FFD后，将包含林分税收描述、附加信息、特性校正和环境变化监测等功能。

林火防护系统进一步发展：基于空间信息层(包括森林图、遥感数据)，加其它关系数据库(描述部分林分税收)、火险预报及火警程序。

6. 研究动向

美国将研究火行为模型、火生态和生态系统，可燃物特征定量化和天气预报、空气质量有关的气象学。

俄罗斯将研究航天飞机上用的传感器，以及污染地区的林火研究，如在火行为研究中核辐射的传输模型，易燃物调查方法，逐日火行为空间预报。

波兰将用遥感和GIS相结合监测林火，主要工作有：

一 全国森林火险分区。

——林火监测。

— 火损调查，损失评估和迹地恢复监测。

地中海沿岸国家和东南亚地区将从经济、生态、环境、历史和民族以及大气等方面来综合研究林火，利用遥感优势，横向拓宽领域研究火与土地利用的关系，利用 GIS 的支持，纵向利用资料，对耕作、人为破坏和火的历史进行研究，进行多种信息的综合。

在非洲津巴布韦地区，结合非洲稀树草原状况对火行为、土地利用和生态系统、人的期望进行研究。

(三)国际合作和会议动态

1992 年 9 月，俄罗斯科学家和管理人员组成的访问团，参观了美国亚利桑那大学、大峡谷和 Tonto 国家林火试验室和各种空中加油载体。同年另一代表团再次访美，考察火管理、空中加油和烟雾断。

1993 年，俄罗斯与蒙古签定向蒙古提供灭火器材直升机、降落伞和小型器材的协议；向克罗地亚提供两架直升机帮助用于护林防火，并且将向中华人民共和国提供简单农业用防火通讯设备和微波设备。

1994 年初德俄联合召开会议，商讨共同研究传感器的技术问题。

东南亚地区将进行长期合作，从经济、习俗、历史等角度研究空中的烟尘，将由德国弗莱堡大学 J. G. Goldammer 主持。

地中海区域的 FIRESCHEME 是另一项联合研究活动。研究全球大气化学和燃烧(IGBP/IGAC)、全球变化与陆地生态系统(GCTE)等，是世界林联(IUFRO)和国际北方森林演替协会的联合研究项目。全球大气化学和燃烧项目中的生物量燃烧试验(IGBP—IGAC—BIBX 与 FIRE SCHEME)的协调员也是 J. G. Goldammer 而 FIRE SCHEMR 项目的协调员是葡萄牙的 J. M. Pereira 近日将召开战略性会议讨论草案。

随着研究的深入，以及全球环境的联合行动日益增加，林火研究区域性合作也日趋成熟，全球一些区域性合作计划：亚洲北方火研究(FIRECAN)、国际北方森林演替研究协会林火工作组(IBFRA　SRF)、南方热带大西洋地区试验(STARE)、近赤道大西洋大气化学与传输(TRACE—A)、南非火·大气研究(SEAFIRE)、东南亚火试验(SEAFIRE)、地中海环境生态、社会、文化、历史和火信息系统研究(FIRESCHEME)。

SAFARI 是 STARE 的子项，是与 TRACE—A 相关的课题，1992 年林火季节在南半球同一范畴研究。SAFARI 1994 年的工作是南非无火影响大气背景调查，在 1994 年 3—4 月无火季节内进行。研究的宗旨是辅证 1992 年以来火研究的成果。成果证实，由南非林火形成的热辐射气团覆盖在南大平洋上空的对流层内，弄清了烟雾，O_3 的构成和传输机理。

FIRESCAN 和 IGAC—BIBEX 和国际北方森林研究协会(IBFRA)领导下工作，主要进行大规模火试验：如 1992 年在克拉斯诺亚尔斯克的试验：主要是调查在北方针叶林区的高密度林分中，林火对林分更替作用，用东西方先进的方法论进行研究。试验于 1993 年 7 月准备就绪，参加国有俄罗斯、加拿大、美国、芬兰、挪威、瑞典和中国。计划中的会议，近期有：第二届堪培拉国际林火研究大会(1994 年 11 月 21—24)、林火模型国际大会(1995 年 6 月)、第 20 届国际林联世界大会(1995 年 8 月 7—12 日)等。

(四)对我国林火研究的启示

我国开展林火研究已多年,传统的研究有一定的积累,如东北林业大学在林火基本理论方面的研究。1987年5月6日的大兴安岭林区特大火后,中国林火研究和扑救登上了一个新台阶,研究范围从基本理论、预测预报、扑救、灾后损失评估、到飞机探火、卫星监测等,几乎涉及林火的各个方面。各级防火组织也把防火工作摆在重要位置,出现了许多研究实体,也有许多研究成果。如中国科技大学的火行为研究室,哈尔滨的船舶学院的火灾监测体系、林业部调查规划设计院的林火监测系统。中国林业科学研究院目前正进行"西南林区等火灾监测评价"国家攻关课题的研究等。笔者认为,在目前较好的形势下,我们应积极吸取他人的经验,调整好我们的研究方向,避免走弯路。

1. 加强火烧试验的研究

火是生态系统的一个组成部分。人们应当积极地用它促进生态环境的改善。目前我国多根据已有火灾进行研究,如森林火灾预防,灾后评估等;而少见配合较大范围的火烧试验的综合性研究。

2. 积极引入高新技术方法

①用航天遥感图像的自动化识别技术,形成全国区域性监测网。通过计算机由下而上传达各种有关林火的信息。

②对各种卫星资料监测火的能力,及应用范围,进行研究评价。

③用航天遥感资料进行宏观火险预报,以及中、长期预报。

④新型传感器研究,如对小而积林火识别和穿透云层的传感器。

⑤以空间信息识别、管理为中心,功能齐全的GIS的研制。

⑥地面—航空-卫星监火体系的建立。

3. 加强区域性合作

①加强国内区域性合作,健全地域性的(如南方9省市、西南地区等)研究项目、机构和运行系统,克服小而全低水平重复的弊端。

②积极参加世界区域性研究。

我们要积极参加国际林火的区域性研究,以进一步促进我国在这些方面水平的提高,开阔眼界,增强我们在国际上的地位和参与意识。目前仅在一些项目内(如FIRESCAN)有我国联络员,这是不够的。

我国在许多领域内研究水平并不低,完全有资格跻身于国际有关研究的领域中去。

“西南林区等火灾监测评价系统”使用说明书①

易浩若
（中国林业科学研究院）

1. 概述

本系统用于利用气象卫星和相关的信息源实时监测我国西南重点林区的森林火灾。它是专题在“八五”攻关期间，研究西南林火的时空规律，NOAA—AVHRR 林火信息特征及其提取技术，林火仿真模型，林火损失评估模型，灾后生态恢复等多方面成果的结晶。用户根据推荐的不同操作流程，在总控菜单下，依屏幕提示操作，可得出所需的林火识别结论。

本系统接受 NOAA—AVHRR 1B 格式数据，不限定数据输入时所用设备、介质和方法。林火结论的输出方式由用户选择以图像、盘文件和屏幕显示均可。

2. 结构

系统由 22 个软件模块组成（详见 3.2），全部装在一个二级总控菜单下，呈树状结构，如图 2.1。

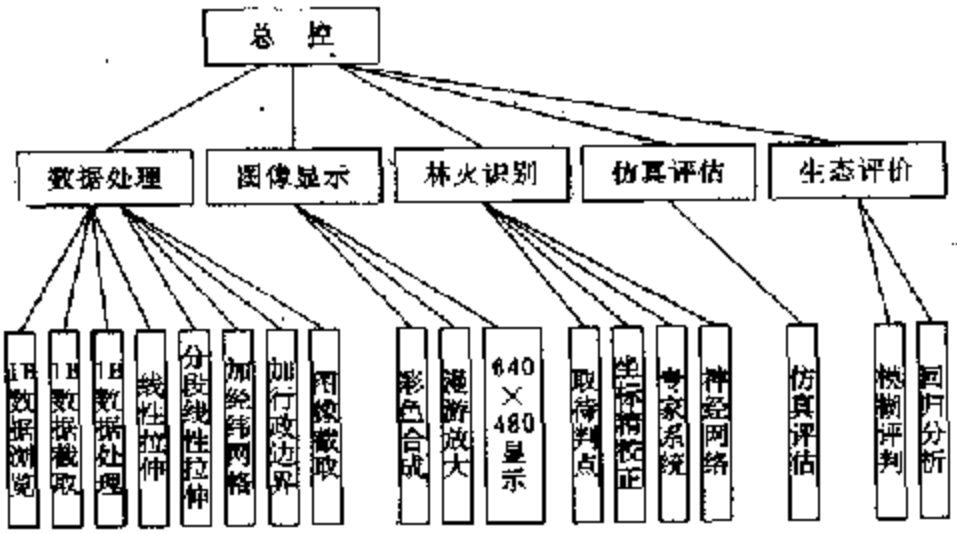


图 1 系统结构

① 参加人还有纪平、孙小天、于芳、范建容、余光辉、蔡炳峰、罪艳忠、何新泽。

3. 安装

3.1 运行环境

适用于 386 微机(装有 387 协处理器)或 486 微机，640K 以上内存；
DOS 操作系统；
系统文件中占用硬盘 50MB，运行时需硬盘空间 40—80MB；
VGA 彩色显示卡。

3.2 文件清单

可执行文件 22 个：

MAIN. EXE	II. EXE	DSP. EXE
R1B. EXE	YPENET. EXE	NEWROAM. EXE
C1B. EXE	TRANo. EXE	JRE. EXE
NDP. EXE	SORT1. EXE	YY. EXE
LS. EXE	SUB. EXE	NNW—RS. EXE
RLS. EXE	MKRGB. EXE	TFILE. EXE
LLC. EXE	ROAM. EXE	FUZZY. EXE
		REGRESS. EXE

数据文件 6 个：

MIN　　云、贵、川、广西省界
FOREST. GRD　　西南重点林区森林分布及土地利用图
或：FOREST. ENC+DESCODE. EXE。
MIN. GRD　　四川、云南县级行政区划
或 MIN. ENC+DESCODE. EXE
YF　　西南林区县级统计数据
YGCP. DAT　　推荐使用的地面控制点
WIDEMO$_2$　　推荐使用的固定热点子集

3.3 保存原有 CONFIG. SYS 和 AUTOEXEC. BAT 文件，编辑新 CONFIG. SYS 文件

FILES=40
BUFFERS=40

编辑新 AUTOEXEC. BAT，建议使其尽可能简单，不宜挂入任何网络，以节省常驻内存容量。

3.4 装入全部文件，若背景文件有压缩形式(*. ENC)者，应调用 DESCODE. EXE，将其解码为 *. GRD 文件。

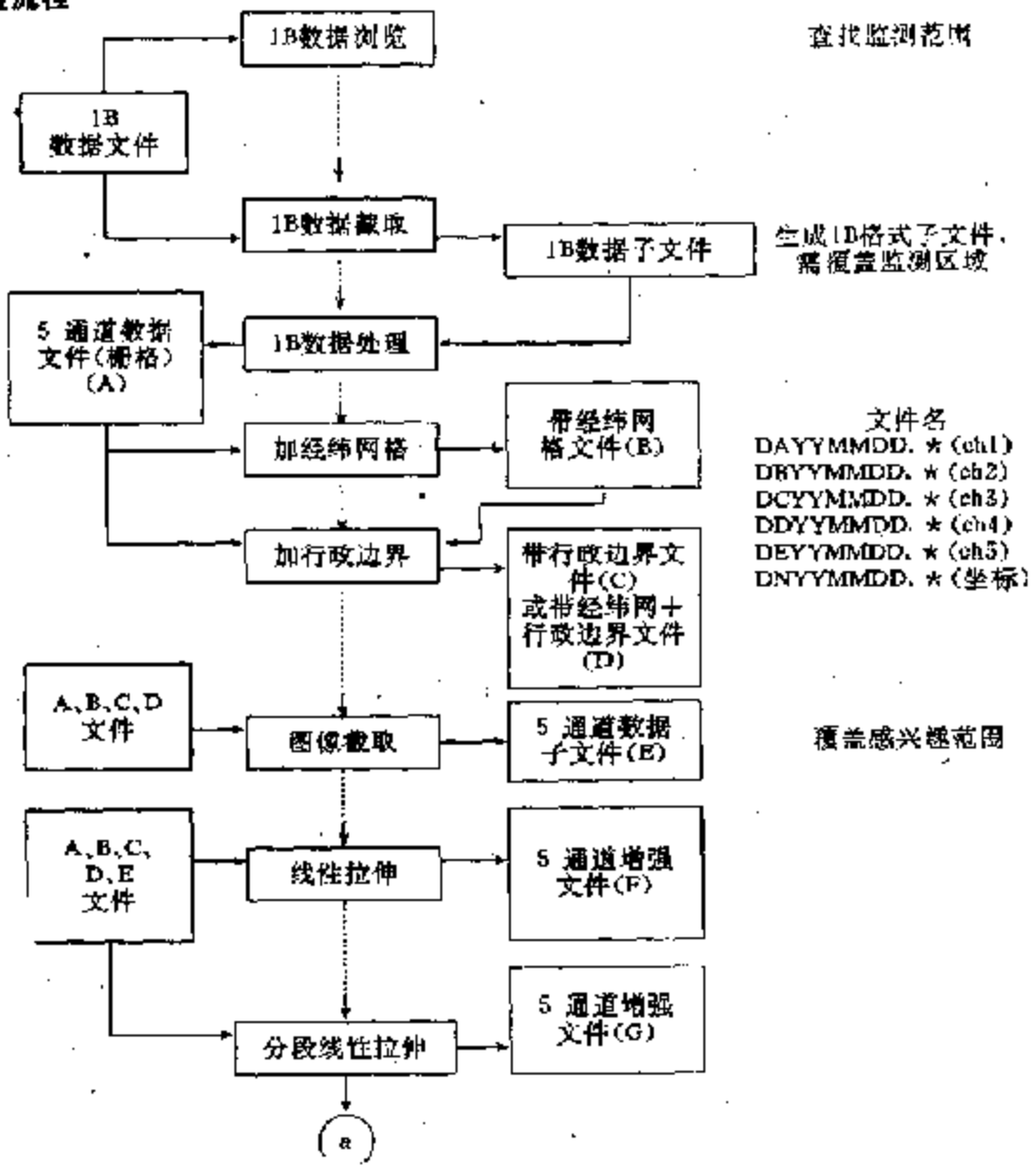
3.5 保存 YGCP.DAT 和 WDEMO$_2$ 文件，编辑适宜本地区的相应数据文件。可使用任何编辑软件，点个数不限，但必须严格按照所提供的文件格式。WDEMO$_2$ 文件名应直接使用，可编辑其内容，不可变更该文件名。

4. 监测运行流程

本系统建议按照如下几个流程之一运行：

- 完整流程
- 标准流程
- 快速流程

4.1 完整流程



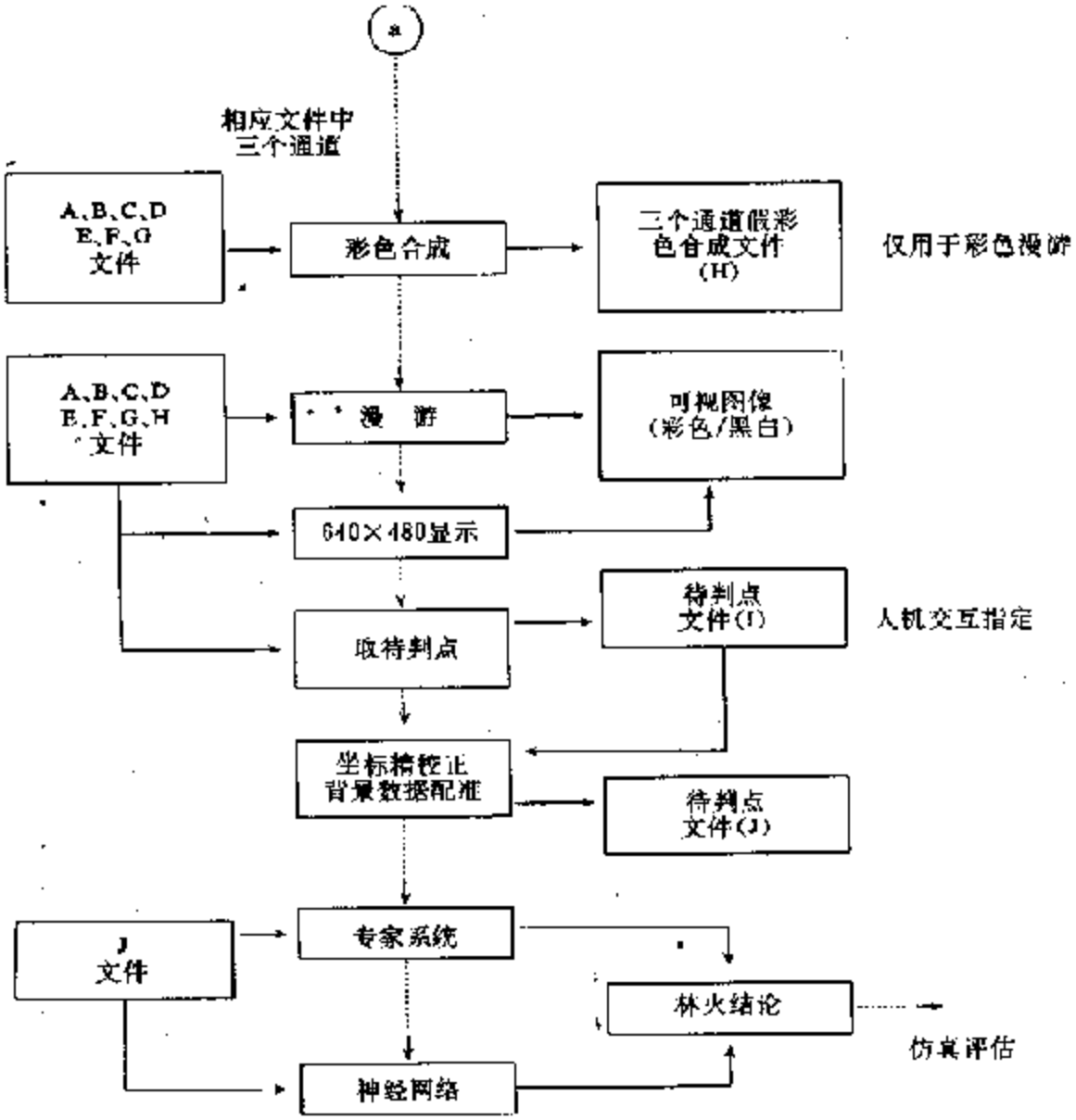

a
相应文件中
三个通道
A、B、C、D
E、F、G
文件
彩色合成
三个通道假彩
色合成文件
(H)
仅用于彩色漫游
A、B、C、D
E、F、G、H
文件
漫 游
可视图像
(彩色/黑白)
640×480显示
取待判点
待判点
文件(I)
人机交互指定
坐标精校正
背景数据配准
待判点
文件(J)
J
文件
专家系统
林火结论
仿真评估
神经网络

图 2 完整流程框图

4.2 标准流程

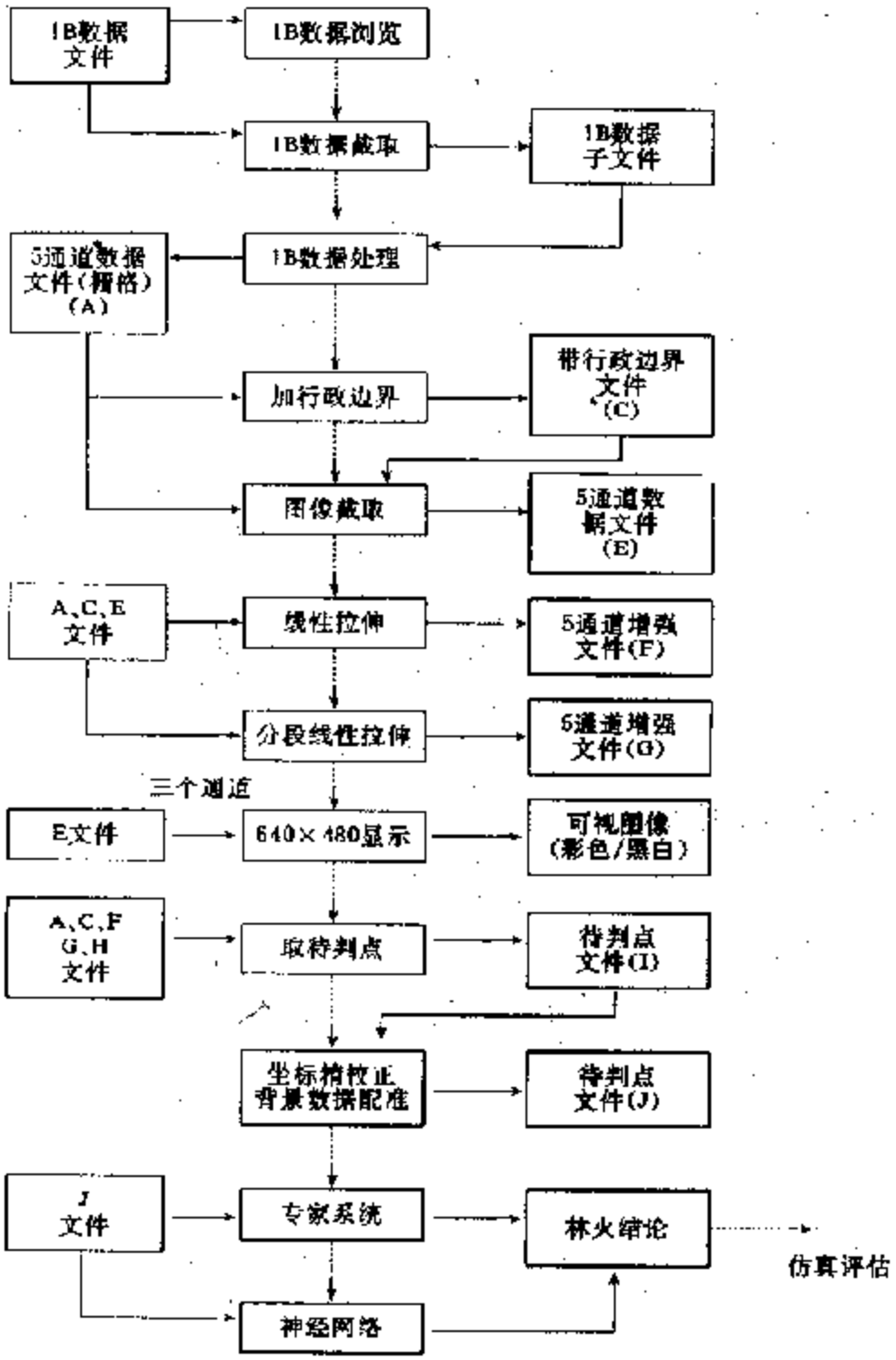


图 3 标准流程框图

4.3 快速流程

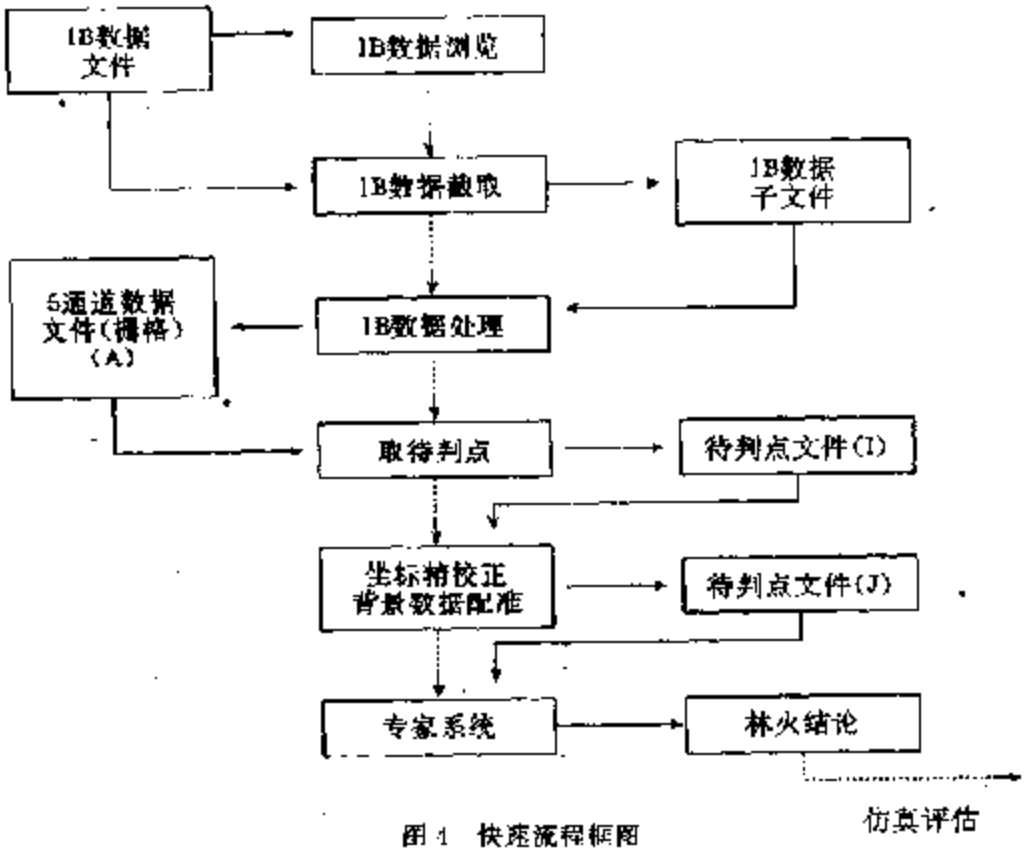


图 1 快速流程框图

5. 各软件模块操作指南

每个软件模块在运行中需干预时，都有屏幕提示，届时用户输入信息主要有：

- 运行参数：文件名、栅格数据行、列数等；
- 路径选择：继续/中止、显示彩色/黑白等；

用户遵循下面提供的例示来操作，将有利于正常运行。

5.1 数据处理

5.1.1 1B 数据浏览

(1)输入 1B 数据文件名，

(2)输入要看的数据块号(首块-1)，注，关于 1B 格式说明，请阅有关资料。

屏幕显示指定块中数据，首列标出顺序号(16 进制)

其右各列为顺序显示 1B 数据(16 进制)

(3)打 E 退出。

5.1.2 1B 数据截取

(1)输入待截取的文件名，

(2)输入要生成的文件名，

(3)输入要截取的起始数据块号(首块=1)，

(4)输入要截取的长度，注意：1B 数据 2 块是 1 条扫描线。

5.1.3 1B 数据处理

(1)输入气象卫星号：(NOAA)11 或 12，

(2)输入要处理的 1B 数据文件名，

(3)输入该轨数据的接收时间： YYMMDD. AM(上午)
YYMMDD. PM(下午)
YYMMDD. NG(夜间)

例：1994 年 4 月 5 日上午数据应输入：940405. AM

该模块处理 1200 条扫描线需 10 分钟，运行时和结束后有提示。

注意：硬盘应有足够可用空间，该模块生成的文件所占空间小于原 1B 数据文件长度。

5.1.4 线性拉伸

(1)输入要拉伸处理的文件名，

(2)输入下限灰度值(>0)，建议值=15，

(3)输入上限灰度值(<254)，建议值=30，40，

注意：处理后生成文件名后缀为 .H。

5.1.5 分段线性拉伸

(1)输入要拉伸处理的文件名，

(2)输入原始数据折点的灰度值(1—100)，建议值—40，80，

(3)输入生成数据折点的灰度值(1—200)，建议值=90，130，

注意：处理后生成文件名后缀为 .HH。

5.1.6 加经纬网格

(1)输入 NOAA 数据坐标文件名， 提示：DN??????. *，

(2)输入波段数； 建议值=3，

(3)逐波段输入文件名和颜色码， 建议值DA *. * 时 14，
DB *. * 时 30，
DC *. * 时 65。

(4)输入文件最大行、列号，

(5)输入各波段生成的文件名，

注意：应与原文件名顺序对应。

5.1.7 加行政边界

(1)输入 NOAA 数据坐标文件名， 提示：DN??????. *，

(2)等待运行约 1 分钟后，输入要加行政边界的 NOAA 数据文件名，

(3)输入边界线的色码值，

(4)输入文件最大行、列号，

(5)输入生成文件名。

5.1.8 图像截取

(1)输入要截取图像的波段数，

(2)逐波段输入待截取的文件名，

(3)输入待截取的文件最大行、行号，

(4)输入截取起始行、列号(即以行、列号由小向大顺序计算的最小行、列号)，
(5)逐波段输入截取生成的文件名，注意与原文件名对应，
(6)输入生成文件的最大行、列号。

5.2 图像显示

5.2.1 彩色合成

(1)输入红色波段文件名，　建议名=DC??????.*，
(2)输入绿色波段文件名，　建议名=DB??????.*，
(3)输入蓝色波段文件名，　建议名=DA??????.*，
(4)输入文件最大行、列号，
(5)输入生成的彩色文件名。

5.2.2 漫游

(1)输入要显示的文件名，
(2)输入文件的最大行、列数，
(3)输入首屏显示的起始行、列号，
(4)输入首屏显示的终止行、列号，
(5)选择图像显示是彩色(C)或黑白(G)。

5.2.3 480×640 显示

(1)选择图像显示是彩色(C)或黑白(G)，
(2)选黑白后，输入要显示的文件名，
(3)输入文件最大行、列号，
(4)输入显示的起始行、列号，
(5)选彩色后，
(6)输入红波段文件名，
(7)输入绿波段文件名，
(8)输入蓝波段文件名，
(9)输入文件最大行、列号，
(10)输入显示的起始行、列号。

5.3 林火识别

5.3.1 取得判点

(1)指定使用文件是合成彩色文件(C)还是单波段文件(G)，
(2)输入文件名，
(3)指定有无附加文件，　提示：该系统判断林火需五个波段，因此输入 Y，
(4)指定附加文件个数，　提示：4，
(5)依次输入附加文件名，　提示：顺序为：

DA??????.*，
DB??????.*，
DD??????.*，

DE??????.*，

(6)输入图像最大行、列号，

(7)输入显示的起始行、列号，

(8)输入显示的终止行、列号，

(9)输入将生成的样本文件名，建议 SYMMDD.AM(PM,NG)，

(10)输入将生成的火点文件名，建议 FYMMDD.AM(PM,NG)，

(11)逐一选取待判点，

· 功能键：

移动光标 F1+光标键 一次移 1 个点距，

F5+光标键 一次移 5 个点距，

F10+光标键 一次移 10 个点距，

Ctrl+W 显示 5×5 灰度(颜色)值，

Ctrl+Z 放大 5×5 域，

Ctrl+M 清除标注，

· 选取待判点 Ctrl-s 记录光标所指定的点作为待判点。

注意：每个待判点文件最多含 50 个待判点，欲判多于 50 个点时，请生成多个文件。

5.3.2 坐标精校正

(1)输入 NOAA 坐标文件名，提示：DN??????.*，

(2)指定由盘文件(D)还是由键盘(K)输入控制点数据，建议用 D。

注：请提前编辑控制点数据文件，文件名任选，其格式为：

控制点个数(整型数)

在图像中的列号，行号，经度，纬度(4 个浮点数)

例：2

100.8,200.0,100.3788,24,8888

105.0,206.0,106.8888,25.1234

(3)输入控制点数据文件名，

(4)输入将生成的校正过坐标的待判点文件名。

5.3.3 专家系统

(1)输入校正过坐标的待判点文件名，

(2)判断结果可屏幕显示，

同时存于 Y.RPT (全部待判点的结论)，

YF.RPT(林火点的结论)，

注意：请及时保留结果文件。每次运行后，将把上次运行的结果文件(*.RPT)，改名为 *.BCK 保存，但以前的文件已被覆盖。

5.3.4 神经网络

(1)请输入火点文件名，

(2)请输入结果文件名，

(3)请输入待判图像的 CH1 文件名，

(4)请输入待判图像的 CH2 文件名，

(5)请输入待判图像的 CH3 文件名，

(6)请输入待判图像的 CH4 文件名，

(7)请输入待判图像的尺寸(列，行)，

显示计算结果：

火点序号(在图像中的列行号及 RS 结果)

若 RS=1.000 表示该处有火，若 RS=0.000 则无火，

(8)任击一键，返回主菜单。

5.4 仿真评估

5.4.1 数据管理

5.4.1.1 地形因子

5.4.1.2 气象因子

今日的数据是否输过(Y/N)?

确认所有数据退出？(Y/N)

5.4.1.3 森林因子

按任意键继续

5.4.2 蔓延计算

5.4.2.1 林火火源

落入本区域火源点数为，

请输入火源点号数。

5.4.2.2 蔓延计算

需要模拟时间。

5.4.2.3 损失计算

正在进行损失计算请稍候。

5.4.3 模拟显示

5.4.3.1 二维显示

林火蔓延示图，

按任意键继续

5.4.3.2 三维显示

视向，

夸大比(1:?)，

三维林火蔓延显示。

5.4.3.3 林火强度

火场林火强度示图，

按任意键退出。

5.4.4 系统服务

5.4.4.1 林火报告

5.4.4.2 森林火险

林火火险预报。

5.4.5 退出系统

5.5 生态评价

5.5.1 模糊评判

5.5.1.1 求解多项式

(1)输入矩阵维数，

(2)选择从键盘还是文件输入矩阵数据。

5.5.1.2 求特征根

(1)输入多项式的维数，

(2)选择从键盘还是文件输入矩阵数据。

5.5.1.3 检验

(1)输入实根个数，

(2)选择从键盘还是文件输入矩阵数据，

(3)输入原始矩阵维数。

5.5.1.4 求权重

(1)选择从键盘还是文件输入，

(2)输入矩阵维数，

(3)输入上一层因素的权重，

(4)指定是否是最后一层因素。

5.5.1.5 求评判值

(1)输入样地总数，

(2)输入评价的项目数，

(3)输入样地数据文件名，

(4)输入因素权重文件名。

5.5.1.6 DOS SHELL

(1)执行DOS命令，

(2)按任意键返回程序主菜单。

5.5.2 回归分析

(1)输入数据文件名，

(2)输入结果文件名，

(3)输入样本数。

“西南林区等火灾监测评价”
专题参加人员名单

专题主持单位：中国林业科学研究院资源信息研究所
中国科学院成都山地灾害与环境研究所

专题主持人：赵宪文（中国林业科学研究院资源信息研究所）
周万村（中国科学院成都山地灾害与环境研究所）
易浩若（中国林业科学研究院资源信息研究所）

子 专 题：林火分类分级标准和全国林火灾害危险程度分区评价
负责人：刘琼韶（中国科学院成都山地灾害与环境研究所）
参加人：邹仁元　黄丽荣　孙育秋

子 专 题：西南林区等火灾背景数据库及危险区划分
负责人：朱启疆（北京师范大学资源与环境科学系）
参加人：于　芳　张振威　高　峰

子 专 题：林火卫星遥感监测及早期报警技术
负责人：易浩若（中国林业科学研究院资源信息研究所）
参加人：纪　平　何筱萍　张厚忠

子 专 题：森林火灾红外遥感快速监测分析判读技术
负责人：蔡登逵（林业部调查规划设计院）
参加人：游先祥　曹　森　李金正　蒋岳新　李秀林　邢永国

子 专 题：林火行为、损失评价及减灾辅助决策模型
负责人：彭世揆（南京林业大学）
参加人：余光辉　蔡炳华　孙小兵　方有清　封为忠　周　麟

子 专 题：森林火灾后生态变化遥感监测评价技术
负责人：高世忠（中国科学院成都山地灾害与环境研究所）
参加人：游先祥　范建容　唐季林　郭　洁　张晓丽　丁昭全
马光亦　杨晓明　唐雅青　黄雪樵　兰立波

子 专 题：森林火灾遥感综合试验
负责人：赵宪文　周万村　易浩若　纪　平（中国林业科学研究院资源信息研究所）
徐仁宽　王向龙
参加人：全体人员

Monitoring and Assessment of Forest Fire in the South-West of China

Summary

"Monitoring and Assessment of Forest Fire in the Area of the South West *etc.* of China" is a national key research project of "the 8th five-year plan" which is hosted by the Chinese Academy of Forestry and Chengdu Institute of Hazards and Environment of Chinese Academy of Sciences, corporating with the College of Forest Research and Environment of Nanjing Forestry University, the Institute of Forestry Inventory and Planning of Forestry Ministry, the Geography Department of Beijing Norm University and the Beijing Forestry University. It took of 4 years. The entire research concerning forest fire was conducted by 35 experts who are consisted of 90% professors and postgraduates.

The main study fields include fire forecasting, division of fire danger, early detecting of forest fire, developing the background database of forest fire, simulation of fire behavior, fast assessment of fire-loss and evaluation of ecology and regeneration in the post-fire. All the research works mentioned above are based on remote sensing techniques and its data. At the same time the study is deals with monitoring forest fire by means of infrared scanning data obtained from the aircraft. Finally, a multiplantform system has been developed.

The research work and related background database covering an area of 900000 km^2 is mainly aimed at the South-West of China but the study results should be practical and directive for other areas in China such as the effective fire monitoring in the North East and Nei Mongol in China in the spring of 1994 and 1995. The research project not only presents a reliable and operational system but also achieves many progresses about theories of forest fire and has its own distinguishing features.

Now a brief description dealing with the research work is described as follows:

The research works of forest fire have been going on for many years in China. Many papers concerned were published. However, the systematic studies which are dealed with remote sensing are not too many. Since the key project is able to organize and coordinate the experts of the various study fields to conduct a large-scale research work, it appears its own advantage. In the present, the project has successfully fulfilled the study work and show the following progresses.

1 A systematic study for an entire process of forest fire has been conducted

The systematic feature of the study is expressed as follows:

1.1 The research work is dealed with forecasting of forest fire, fire simulation, fast assessment (airborne and astronautic) and ecological evaluation after the fire.

The follows are the basic results involved in the study and the study reports concerned.

1.1.1 Forecasting of fire danger

(A) Classification and division of forest fire danger

Instead of the traditional way which is a kind of nested classification and division, a method of comprehensively assessing and scoring was used to make a division map on the grid. In this way it is easy to update data. Besides, a study of the division method under the support of GIS was implemented (see reports 1—4).

(B) In the aspect of forecasting of fire danger the study presented the idea and method of using RS data to estimate the amount of litter directly, and the behave of forest fire in the South West of China has been macroscopically analyzed by means of the autoregression and stochastic process.

In addition, a preliminary study of correlation relationship between the forest fire and the El Ni·no has been made (see report 11).

1.1.2 Early detecting of forest fire

Based on knowledge of the expert system and supported by the background database, the accuracy of RS forecasting for forest fire was greatly improved (from 10% to 80%) and the index problem of distinguishing forest fire from non forest was solved (see reports 5—10).

1.1.3 Fire simulation and fast assessment

(A) By using of the factors available, the comprehensive indices for fire spreading were formulated. On the basis of background database, the situation of the fire field can be displayed in time. So the decision for extinguishing forest fire can be quickly made. Using the digital inversion technique, a method of estimating mortality of the forest trees and fire area was developed under the support of GIS. Consequently, it provides a basis for fast assessment of the project (see reports 14—18).

(B) The infrared RS techniques from the aircraft play a distiguishing role for fast assessment. It is the first time to monitor forest fire by using data available from multichannel scanner AADS—1268 for forestry in our country. The techniques are able to detect a fire point of size 0.3m×0.3m. The fire-beat model and technique of fast interpretation and analysis appear creative and effective (see reports 12—13).

1.1.4 Ecological evaluation in the post-fire

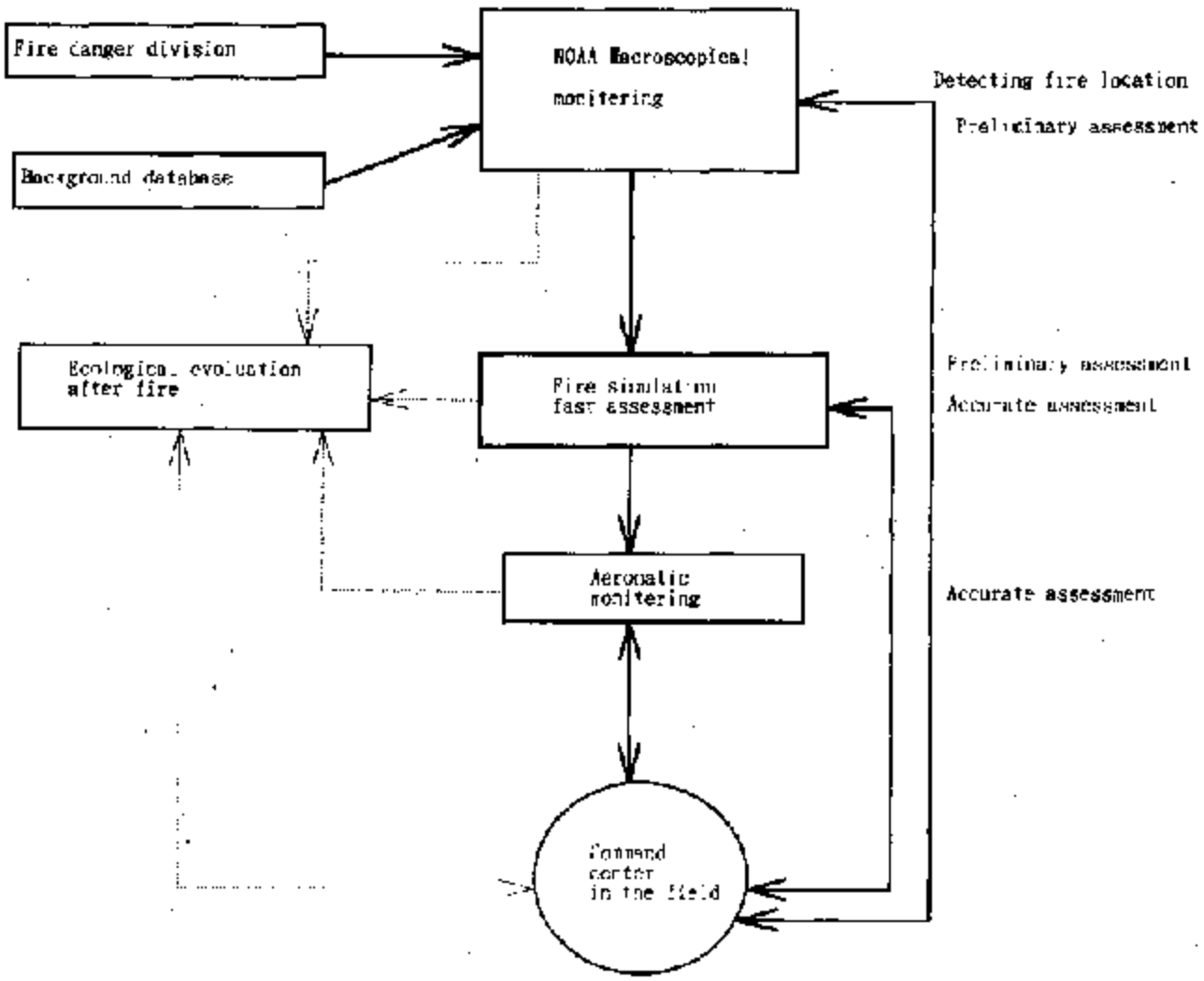
Instead of the traditional field survey, the approaches of using vegetation indices were

used in the study. The model of monitoring and assessing dynamic changes of ecology environment (in the post-fire) was developed. It fills the gap in the study field concerned and briefly summarizes the relationship between forest fire and changes of ecology and environment and regeneration through a way of RS technique and fuzzy discrimination model (see reports 19—23).

1.2 The project developed a monitoring system of multiple platforms from the field→aeronautics→astronautics and completed the study of monitoring forest fire from microscope to macroscopy.

1.2.1 The design of the project fully reflects an idea of combining airborne techniques with astronomic to establish a system of monitering forest fire at the multiple levels. The aeronatic RS monitoring should be carried out for day and night during the rash seasons of forest fire. Once a forest fire happens, the fire location will be immediately determined and the preliminary assessment can be then made. After that, in response to the fire, the plane will quickly fly in order to obtain further information concerned and make a detailed assessment. In this process the contact with command center should be made at all times to minimize fire damage.

The following frame expreses the idea stated above.



According to the present situation of the study, the objectives mentioned above have been completely fulfilled. The targets which have been completed are as follows:

(A) If the macroscopically monitoring is supported by background database, the forest fire of less than 1 hm^2 could be detected. Through the test made in 1994 and 1995 the accuracy of detecting forest fire achieved 85%.

(B) In response to a forest fire the simulation of fire spreading will immediately start, and then a dynamic process of fire spreading will be shown to the commanders. The display of fire intensity and spreading tendency will provide a direction for firemen to put out the forcest fire.

Supported by GIS and the techniques of extracting information of the forest fire, it is able to estimate burnt forest area and volume damaged by the fire with accuracy of 95% and 85% respectively.

(C) The study of air-monitoring shows that a point of 0.09m^2 of fire can be detected. This can provide the guarantee for the accurate assessment of the forest fire. Furthermore, the project developed a set of methods concerning image processing, calibration and area calculation which lay a foundation for accurate assessment.

(D) Ecological evaluation

According to the test for the methods presented by the project in 16 burned areas, the results are satisfied for the demand of the key project and consistent with practice.

1.2.2 From microscope to macroscopy, the project carried out a systematic study for forest fire. Previously, the study was difficult because of few study ways. But at this time, the research work is consist of a series of studies which cover a range from detecting a fire point of 0.09 m^2 → ecological evaluation of several 10 hm^2 → analysis of fire tedency in a province → establishment of background database for an area of 900000 km^2 → division of fire-danger in a whole country → correlation analysis with the global El Ni $\cdot$ $\bar{n}$o. The whole study series are characterized by the combination of between models and RS.

1.2.3 In the monitoring process, information available from various sources fully play the respective roles and form a organic integral to complete monitoring of forest fire.

(A) The time efficiency of NOAA data is incomparable with other data. The practice expressed that only NOAA data is able to monitor such a hazard which dangers a twingkle. The practice shows that NOAA data with the set of techniques developed by the research project is able to monitor the forest fire of less than 1 hm^2.

(B) Based on a plenty of information, TM imagery is able to provide a strong support for accurate assessment and ecological recovery. Under the technical guarentee provided by the project, the assessment for forest fire can meet the demand of the research contract and the evaluation for ecological recovery is consistent with the local situation.

(C) Without saying, the scanning system containing 11 bands is flexible and its imagery is accurate. Besides, the band layout covers the range of TM and NOAA bands. The information given by the data is quite sufficient, compatible and convinient for application.

2 The new progresses of remote sensing techniques in application to monitoring forest fire

As stated above, the RS techniques and their data have been used in the study series. This would widely open the field of vision and allow advanced science and technology be applied to the field of monitoring forest fire. Therefore, the monitoring level was improved and also made RS itself further develop.

2.1 Intelligent techniques of extracting fire information are dealed with both image processing and expert knowledge so that the qualitative factors can be combined with the quantitative.

2.1.1 The techniques of extracting for information of forest fire obtained from NOAA data can be concluded as follows:

(A) Through scaling of bands 1,2 and 3 the satisfied results can be obtained.

(B) The linear combination of band 3 and 4 can reduce the disturbance caused by the reflectance of the open area.

(C) When making calculation of transformation for producing a thermal image through temperature of the ground surface derived from values of band 3, the correction of optical path and the problem of value saturation of the band should be taken into account.

(D) On the basis of band 3, the discriminent method for distinguishing sub-pixels is presented according to unusual changes with time and space.

(E) The application of expert system and support of background database improve the accuracy of detecting forest fire.

2.1.2 The approaches of extracting fire information from TM imagery

(A) The study presented two ways of linear combination which are able to increase the difference between the fire and background and reduce the disturbance caused by vegetation and humidity.

(B) In order to determine the hazard degree, methods of the likelihood difference and vegetation index have been used.

(C) The accuracy of estimating area of the burn is about 95% because of using the methods mentioned above. The study of mortality for the burnt trees makes the accuracy of estimating volume-loss reasonable.

From this, the study indicates a possibility for the application of TM data in estimating fire-loss accurately.

2.1.3 The technique of extracting fire information from thermal-infrared images

The extracting technique special for fire-loss information, is only a preliminary test but it appears effective and feasible.

The main points of the technique are as follows:

(A) In order to distinguish the objects concerned and avoid the saturation of band values

of the vairous objects, it is better to fly at the night.

(B) It is effective to rely on processing of using multiple bands.

(C) Combining the modified parameters, the difference between band 9 and 10 can be used to distinguish the thermal and fire points.

(D) The ratio combination of the thermal-infrared, near-infrared and visual bands is usefull to assess fire loss.

(E) The fast analysis method presented by the projet provides a possibility for fast and accurate assessment.

The practice shows that techniques mentioned above are feasible and effective.

2.2 The correlation analysis between RS data and fire-parameters widely open a way for the application of remote sensing.

In the studies of fire-loss assessment, evaluation of ecological changes and combustible material, the analysis mentioned above has been carried out.

2.2.1 In the study dealed with assessment fire loss, the effective method of estimating area of the burn from RS data was developed based on the gain principle of RS data and correlation analysis of fire traces.

2.2.2 On the basis of analysis of forest spectral characteristics, the correlation relationship between feature changes (pattern, structure, color tone, grey level) of different temporal images and the data from the regular inventory was derived in the ecological evaluation of the post-fire. The results show that TM images are quite sensible and reliable in response to the dynamic tendency of ecological changes in the post-fire. Through vegetation indices and ratio values calculated from RS data the approaches of monitoring and evaluating ecological changes in the post-fire has been obtained.

2.2.3 Based on the previous works the correlation relationship between RS data (multiband density, ratio values and a couple of interpretable factors) and forest volume can be determined. In turn, on the basis of correlation relationship between dry timber and weight leaves the weight of leaves can be determineed according to the ecological theory. Finally, the way of calculating the amount of litter can be obtained.

2.2.4 In the study of detecting fire through a scanner installed in the plane the equation about scanning data and the fire point on the ground has been derived. Therefore, it is easy to distinguish weak fire, strong fire, iron mill and other objects and be displayed. Also, it can make unusual temperature correspond to the image related.

The works mentioned above can be thought of a kind of meaningfull exploring for the application of astronomic RS data in forestry, and it would further open the study field. Some of the works are creative.

3 Progresses of mathematical models and computer application techniques

3.1 The application of a lot of mathematical models further move the project study towards quantitave direction. A wide use of quantitative factors and models indicates a progress in the study field to some extent. In the study the researchers made a great effort and obtained a lot of results, which enriched the RS application theory. Therefore, it further puts the RS appication forward in the forestry.

3.1.1 In the study of mechanism of fire spreading, a non-linear fit-algorithm was developed based on calculating every component of a direction vector. From this, a system model of fire behavior was estabished in the form of the state equation. This method is not only convinient to predict and simulate forest fire but also able to regulate the system in time. In the study process the well-known Rothermel model was modified and the empirical formula was added in order to avoid tedious works of data input and output, and make the system more feasible.

3.1.2 In the division and classification of the fire danger the weighted and accumulated model containing indices of fire danger was developed. It effectively expresss the spatial distribution of fire danger involved in the data of the database.

3.1.3 Estimation of forest mortality in the post-fire is based on the behavior of forest fire and forest conditions. In the case of the fire intensity given, the burnt height of trees can be estimated, then the distribution model of trees at the different burnt height-classes can be obtained. After that, the mortality of an entire stand is available. The research results stated above have a practical meaning for forest regeneration in the post-fire.

3.1.4 In the ecological evaluation of post-fire the comprehensive evaluation model for ecological environment in the post-fire was developed by means of the technique of comprehensive fuzzy-discrimination of multiple hierachies. In turn, a model of litter with time series was introduced. Also the model of dynamic evaluation was established.

3.1.5 In the study of forecasting fire danger, the expression of foliage weight obtained from standing volume was derived. At the same time, the accumulated model of litter with time was developed. This would provide a quantitative support for forecasting fire danger in a certain area.

3.1.6 In the study of aeral thermal-infrared imagery, a fire-heat model was produced and the combination of multiband information was taken into account. Then linear and nonlinear coefficents, which had been modified for distinguishing the objects, were determined. Therefore, the model is more practical. Imagery FWD obtained from this makes the area estimation of fire point fast.

3.2 Progresses of computer techniques in application to monitoring forest fire.

3.2.1 In the study of fire simulation an extra-extending algorithm was presented using

the attributive raster data. The algorithm is based on the characteristic of extra-extending of the fire spreading, and very fast to find a spreading path. In addition, data configuration, setting fire flags, indentifying the edge of raster, topographical factors and *etc.*, were taken into elaborate account. In the case of processing multiple fire sources, the calculation and display of fire spreading are also available.

3.2.2 In the study of the precaution system of fire danger, the idea of using artificial neuron network for simulating forest fire was presented. Based on using data NOAA/AVHRR the topology of the network and mathematical model of forest fire were given. Also, the expert system based on the neuron network was configurated. Besides, the algorithm and derivation for obtaining knowledge were presented. The correct use of the expert system and support by database much improved the accuracy of precaution.

3.2.3 The background database dealed with forest fire is an important mainstay for precaution of fire danger

The presently created database is the newest result for the study. It contains several 10 types of spacial and attributive data concerned with forest fire. It was produced on the basis of 1 : 500000 map which was made by the projection of orthoaxis-cone with equal angles and covered by standard double lines of longtitud and latitud. The data covers an area of 900000 km^2 in the South-West of China and occupies 60 MK memory. Since the formats of original data are not same and the data is required a great deal of data processing. It is overloaded for a microcomputer, and makes the design of database with a scale 1 : 50000 for an area in which forest fire frequently happeded was also created. The design of database was optimized so that the database has a distinctive feature for processing a great deal of data based on a small system.

In addition, the project independently developed an entire set of data management software. So the database can be connected with the data of different formats and make operation for many images and inquiry for many aspects.

3.2.4 A new algorithm, which successfully completed a color-synchronous display on a microcomputer in VGA mode by using of RS data, was presented. The dislaying effect is similar to that produced by synchronous imagery of 3 bands in a true color mode but its cost is very low. In this study the technique for displaying NOAA images was successfully used.

In order to display and save the produced results the programm of creating RGB color files, which is able to change the data of 3 bands into one of a single band and display, was developed. It can save disk space.

4 An operative system was established

The key project of "the 8th five-year plan" demands for providing an operative system for each sub-project. All research contents of the project such as frame design, determination of the study plan, integration of subsystems, comprehensive tests and preliminary operation

surround the goal.

4.1 "Emergency plan" means the system should be operative. Usually, the hazard-break is abrupt. Therefore, when accepting the project, researchers should have a consideration for "emergency". The final objectives of the project involve: (A) a preliminary assessment should be presented during 1 2 days after fire; (B) a detailed report should be given after 2 weeks.

Apparently, the present system can start at all times. When the system has not been totally fulfilled, it can still make an "emergency plan", which is dealed with collecting information from two aspects: airborne RS and astronautic RS, data processing, fast assessment and a series of arrangements about organization and coordination in order to prepare for the "emergency". So, when the fire in Xixang in China took place in the 31th of May in 1995, the system had operated for two days and presented a report of assessment for the State Scientific and Technological Committee. It provided a strong support for assessing the fire situation and fully reflected the guiding idea of "emergency" in the project.

4.2 The intension of operative system is not only confined to a fast starting but also accurate and non-error.

The system provided by the project is based on a lot of basic studies and then able to conduct effective and accurate assessment. For instance, through its operation for two years, 168 forest fires have been detected.

The results indicate that the accuracies of detecting forest fire meet the demand given by the research contract. It means the system is operative and reliable. This is because that the software was developed on the basis of the studies about detecting of forest fire, techniques of enhancing fire images and distinguishing sub-pixels. Also, the softwares of database management, assessment of forest fire and ecological evaluation have the same function, and then are operative and reliable.

4.3 A series of index sets was established

For an integrate and operative system, establishment of an integrate index set is important.

4.3.1 In the study of fire behavior under the consideration for information available, the parameters concerning temperature, humidity, combustible material and topography were defined. They were obtained through modifying previous study or making data-fit according to the local conditions. The tests showed that these indices and models related were suitable for the local practice and the programs concerned are operative and reliable.

4.3.2 In the previous studies, first, the estimation of average burnt height was made according to spread speed and forest fire intensity. Then the mortality of trees was estimated based on the average burnt height. Instead of using the previous method, in the present study, first, two types of relationship: (A) a distribution of burnt trees in terms of height classes of burnt trunks and (B) mortality of trees at different height classes of burnt trunks are established. Then according to these relationships the number of died trees at each of