

# 定量遥感的发展与创新

李小文<sup>1,2,3</sup>

(1. 中国科学院 遥感应用研究所, 北京 100101; 2. 北京师范大学, 北京 100875;  
3. 遥感科学国家重点实验室, 北京 100101)

**摘要:** 对遥感科学面临的问题、定量遥感研究的意义作了总结, 讨论了定量遥感的几个重要的基础研究问题。特别强调了中国遥感学者在定量遥感方面的学术思想和研究进展, 就几何光学模型、尺度变换、尺度效应和尺度纠正、病态反演作了研究、回顾与展望。指出定量遥感的四个研究方向: 第一, 在像元尺度上对基本物理定律进行检验及修正, 开展尺度转换研究, 提高定量遥感精度。第二, 开展遥感与非遥感信息数据融合的模拟试验, 探索地表时空多要素的尺度转换规律。第三, 进行多角度、多时相、多光谱相结合的混合像元分解和亚像元信息提取, 运用多阶段的反演策略, 提高反演的精度。第四, 基础研究和应用示范相结合, 估算高难度的地表时空多要素, 推动相关学科的发展。最后, 作者回顾了自己从事遥感科学研究经历中的‘阵痛’与艰辛, 坚信国家需要自主创新; 对于真正的原始创新, 客观公正的评价迟早是会到来的。

**关键词:** 定量遥感; 几何光学模型; 尺度效应; 病态反演; 原始创新

中图分类号: P237

文献标识码: A

文章编号: 1003 - 4978(2005)04 - 0049 - 08

## Retrospect, Prospect and Innovation in Quantitative Remote Sensing

L I Xiao-wen<sup>1,2,3</sup>

(1. *Institute of Remote Sensing Applications, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;*  
2. *Beijing Normal University, Beijing 100875, China;* 3. *State Key Laboratory of Remote Sensing Science, Beijing 100101, China*)

**Abstract:** The retrospect and prospect in quantitative remote sensing are discussed in this paper. The paper summarizes the challenges on remote sensing applications, and lays emphasis on quantitative approaches to remote sensing. The Chinese scholars' thought and methodology on quantitative remote sensing, e.g. geometric-optical model, scaling effect and correction, and ill-posed inversion, are reviewed systematically. Based on the recent advances of the Chinese school, four research directions of quantitative remote sensing are concluded. Finally, the author offers his experiences of fighting, suffering, sadness and delight in academic research, and believes that truth and innovation will finally be accepted without fear or favor.

**Key words:** quantitative remote sensing; geometric-optical model; scaling effect; ill-posed inversion; original innovation

### 1 遥感科学面临的问题

1970年代以来, 卫星遥感主要采取垂直观测方式, 获得地表二维信息; 并基于地面目标漫反射的假定, 对获取的数据作一些简单校正后利用地面目标的光谱特性作有监督或无监督的最大似然率分类, 或经验判读。但随着遥感技术的发展及其面临的各种新的要求, 人们越来越迫切需要弄清楚地表与光辐射之间相互作用的机理。

例如, 尽管卫星云图已经很直观地显示了各种气团的运动趋势, 但中、长期的天气预报准确性仍然很不令人满意。其主要原因之一就是在大气的动力学模型中, 需要知道大气下垫面的反照率 (影响地面和大气温度) 和粗糙度 (影响气流运动)。而目前的遥感手段只能提供个别方向上的反射率, 把它当作半球反照率, 对

收稿日期: 2005-09-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (40371078)

作者简介: 李小文 (1947 - ) , 男, 中国科学院院士, 长江学者特聘教授, 从事地学与遥感信息科学领域的基础研究工作。

植被结构也只能提供非常有限的信息。这样,天气中长期预报很难准确,甚至短临预报,气团,气旋的运动都常常会突然偏离模型预计的运动方向和速度。例如几天前的麦沙台风,北京虚惊一场。老百姓挖苦说,不怪气象局,怪台风的名儿取得不好,是“没啥台风”。我们搞科学的当然知道预报总是很难的,不应该怪气象局。几年前,当我还在波士顿的时候,预报说有特大暴风雪,全市放假,老百姓抢空了超级市场的水和食品,把发电机抢购脱销,结果,暴风雪拐了个弯走了,白白损失了多少亿。所以气象预报需要遥感的服务,美国的气象泰斗 Robert Dickinson 院士才找到我们要求合作。国内的秦大河院士,吴国雄院士等也希望我们遥感能提供更好的数据服务。麦沙台风过后,许健民院士总结教训说,问题在于遥感数据没有同化进预报模型。但是,差别在 Dickinson 能帮我们申请或共同申请课题,而到目前为止,我们未能从国内气象行业拿到或者共同申请到一分钱。不管怎么说,如何使遥感更好的服务于气象、水文,是我们面临的迫切任务。

又如,从国家建设的角度来说,全国农田面积和使用情况的调查、粮食估产、长江上游水源涵养林的情况调查、沙漠化与草场载畜量的变化、长江三峡工程库区生态环境变化的动态监测等,都需要遥感技术提供及时、准确的数据。在更小范围上,例如大熊猫栖息地林下箭竹生长的调查、小流域融雪径流的预报等无不需

我们要对地表与光的相互作用有透彻的理解。全球尺度上植被的光合作用情况随二氧化碳的增加和气温的升高而引起的变化,以及对大气的组成和温度的反馈无法定量,相关研究难以得出令人信服的一致结论。

在遥感应用飞跃发展之后,人们逐渐认识到遥感不单纯是高新技术在地学上的应用,而是有自己本身的科学问题。比如 1998 年长江洪水,虽然可以较好地应用遥感监测水灾、并评估损失,但无法做出防灾预报。如果遥感能为中长期天气预报提供宏观动态的下垫面参数,可望大幅度提高天气预报的精度;但遥感科学的基础研究尚不足,制约了遥感信息应用。迄今为止,遥感研究面临两大问题:需要实现从定性到定量的过渡;需要多学科交叉,加强基础研究。两大问题表现在三个方面:

第一,对遥感精度要求越来越高,遥感数据量越来越大。目前,我们面临海量遥感数据与新应用需要的有效信息匮乏之间的供需矛盾。例如,美国议会指责 NASA:“迄今积累的遥感数据,有 95% 从来没有人看过。解决该矛盾需要多发卫星、提高光谱和空间分辨率;或者注重多学科交叉,对遥感数据进行地学解释,采用定量方法提取信息和知识。第一个办法牵涉到大量的经费和相当的工作积累,而第二个办法,中国学者有研究优势。

例如,传统的地表蒸发量用蒸发池或蒸发器,在孤零零的点上测量供水充足条件下的蒸发量,再假定区域蒸发量与区域供水成单调递增关系,无限充足时趋近于蒸发池测量值。这样,给定供水充足度,区域的蒸发量与蒸发池的点测量值成正比。七十年代以来,新出一个“互补相关理论”,大意是说,如果区域的空气湿度由区域的蒸发量决定,那么,区域蒸发量越小,蒸发池的蒸发量就越大,因此,区域量与点测量值成反比。是耶非耶?离不开对数据的地学理解,包括“区域”的大小、气候区划、供水充足度的变化,等等。

第二,随着遥感应用范围越来越广,遥感应用对遥感本身提出了更高的要求——时空多变要素,如图 1 所示。图中左边六类时空多变要素是右边五大相关领域迫切需要的,也是长期想要而不能得到的关键输入参数和验证数据。获取六类要素的时空定量分布,可以推动五大领域的发展。

第三,遥感科学基础研究严重不足,需要多学科交叉。陈述彭先生认为遥感科学是“一门综合性的科学,它借助物理学的基础,数学的方法,计算机的手段,以及地学、生物学的分析,解决对地遥感的科学理论和实际问题。”所以遥感科学是一个很大的交叉,而定量地学描述,从某种意义上,是科学和艺术的交叉。经过几十

十年来的发展,中国已经是遥感应用的大国;但应用主要是范围外延,项目扩大,遥感技术突破不多,根本原因是基础研究薄弱,缺乏多学科人才的共同努力。形成很多部门都搞遥感,基础研究跟不上,应用水平难以再上台阶的状况。要成为遥感科学的强国,就必须通过加深对海量遥感数据的地学理解,通过多学科交叉和协同努力,把遥感基础研究搞起来,在从定性遥感到定量遥感上有所突破,打下进一步发展的坚实基础。

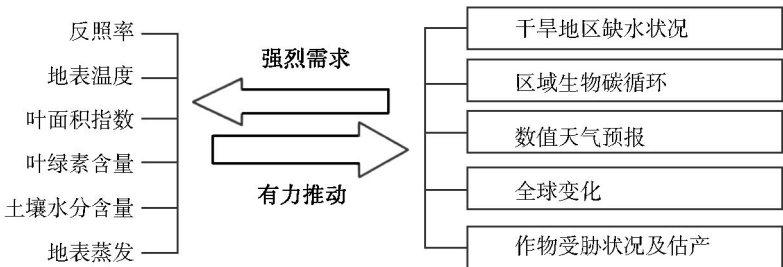


图 1 定量遥感的五大相关领域与时空多变要素需求

## 2 定量遥感研究的意义

定量遥感是利用遥感传感器获取的地表地物的电磁波信息,在先验知识和计算机系统支持下,定量获取观测目标参量或特性的方法与技术。作为新兴的遥感信息获取与分析方法,定量遥感强调通过数学的或物理的模型将遥感信息与观测地表目标参量联系起来,定量地反演或推算出某些地学目标参量。定量遥感是当前遥感研究与应用的前沿领域。

定量遥感研究的意义表现在以下方面。首先,中国正面临着日益严重的资源环境问题,而遥感在国民经济、社会发展和国防安全中起着越来越重要的作用。例如遥感可以为经济持续稳定发展提供动态基础数据和科学决策依据,为重大自然灾害提供及时准确的监测评估数据;并且在地质矿产资源调查与大型工程评价、天气预报和气候预测、海洋监测和海洋开发等方面起到不可替代的作用。

第二,全球变化研究面向一系列重大的全球性环境问题,所涉及的范围极其广泛,具有高度综合和交叉学科研究的特点。遥感作为获取地球表面时空多要素信息的手段,是对全球变化进行动态监测所必需的。

第三,就像望远镜的发明,推动了一系列重大的天文和物理发现,遥感不但大大提升了解决我们面临的资源与环境问题的能力,而且将推动地球系统科学的发展。二十年前,当时的美国地理学会会长著文批评一批较年青的地理学家以计算机和遥感为技术手段,打着科学的旗号,篡改地理学作为一种描述性艺术的实质。以加州大学圣巴巴拉分校(UCSB) David Simonett为首的一批地理学家联名著文反驳。后来的事实证明,凡是没有抓住遥感与GIS这一机遇的地理系,纷纷走向衰亡。但是AAG前会长的话也有一定的道理,遥感不仅仅是高新技术的应用,而且是一门新兴的交叉学科,牵涉到对地表的描述。

综上所述,不论从国家的国民经济建设、全球变化问题,还是从地学的发展看,定量遥感研究具有重要的理论与实践意义,关乎人类的福祉和未来。

## 3 定量遥感研究现状及中国学者的主要学术思想

### 3.1 几何光学模型

模型是对自然现象的抽象和简化,要求同时具备一定的逼真性与简单性;但逼真性与简单性往往存在矛盾。要同时达到逼真性与简单性,就一定要抓主导因子。一般说来,抓准了主导因子,逐步增加次要因子,能靠牺牲简单性来增加逼真性。但是,主导因子不一定是根本因子,根本因子可能有很多不同途径去影响最终的结果。主导因子可能只是这种因果途径中的一条,甚至是“欺骗因子”。所以,模型的简单性原则就是在相似逼真性的情况下,通过改变主导因子导致大为简单的模型,则简单的模型更接近于找到了根本性的因子,是更好的模型,甚至可能是一场革命。

遥感基础研究的辐射传输学派由诺贝尔奖获得者 Chandrasekhar创立于1950年代,成功应用于大气;前苏联院士 J. Ross于1960年代应用于植被;后来应用于土壤、冰雪等;该学派从1970年代以来曾在遥感机理研究中一统天下。但辐射传输理论都是基于体积散射介质的水平均匀性,本质上是与像元大小无关的,尺度不变的。在遥感像元尺度上,地球陆地表面大量呈现非均匀的复杂结构,且以表面散射为主,辐射传输理论难以给出合理解释。对大气来说,体积散射元的近似是逼真的,虽然模型复杂一点(偏微分—积分方程,无解析解),但迄今没有比RT更合适的模型。对植被来说,Big leaf(大叶近似)作为大气的下垫面,或者把植被处理成绿色气体(green gas)都证明丧失了逼真性,只剩下复杂性。对复杂地形来说,表面散射占主导地位,体积散射元的假定更难成立。Kimes的三维辐射传输模型,就是对水平均匀RT模型的一种改造,以适用于森林;但在RT方程的框架下,逼真性的改进靠的是复杂性的增加。

针对辐射传输理论的局限性,李小文与 Strahler开展了系列研究工作,提出了几何光学模型,主要考虑地物的宏观几何结构,在解释复杂地表的反射特征时有其简单、明晰的优势,得到国内外遥感学界的普遍承认,国际知名专家、美国科学院、工程院院士 R. Dickinson,美国遥感界先驱者之一、堪萨斯遥感实验室前主任 Moore教授,我国遥感界奠基人陈述彭院士,美国宇航局副局长 Asrar教授等人高度评价几何光学模型。

### 3.2 尺度效应

不同的自然现象有不同的最佳观测距离和尺度,需要适当的距离和比例尺,才能有效、完整地观察,并不一定是距离越近越好,观测越细微越好。例如,对海岸线长度的测量问题是地学描述中尺度效应最典型的例

子. 对这一测量值尺度效应的研究, 在 1970 年代中期启发形成了分形理论和分数维这样全新的数学概念, 并进而发展成为分形几何. 遥感科学中尺度效应的研究更为困难, 在陆地遥感中, 不同地物光学性质的尺度效应很少得到研究.

遥感研究中一个重要的尺度问题是不同分辨率遥感图像之间的关系. 一种观点认为两者的关系是简单平均值, 没什么好研究的. 已故美国地理学遥感之父 David Simonett 就坚持认为遥感不仅是一门应用技术, 还是一门科学. 它的多分辨率或多尺度是现代技术无法解决的科学问题. 不同分辨率遥感图像之间不是简单平均关系, 而是与地表状况和目标(地学)参数的性质相关. 因此, 遥感图像的尺度问题本质上是地学与其他学科的交叉.

20 年前, 普遍流行一个误解, 就是: 如果像元内所有元素都是各向同性的漫反射表面, 则像元一定也是漫反射表面. 由于已经观察到大量地表像元的非漫反射特性, 所以大量研究都致力于表面元素的非漫反射特性. 当时作者为 D. Simonett 的研究生, 用一个简单的几何光学模型(图 2)说明了像元的非漫反射特性主要是像元尺度上地表的三维结构决定的, 从而奠定了李小文—Strahler 几何光学模型系列的基础.

互易原理是电磁学、光学的基本假设之一, 是辐射传输理论的基石, 曾被当作检验遥感数据质量的标准, 但受到测量界的强烈反对, 争论长达 20 年. 李小文等人给出了像元尺度上互易原理失效的条件: 在像元尺度上, 空间均匀的入照产生空间不均匀的反射, 且明暗两区之间串线不对称, 则互易原理在像元尺度上失效. 李小文等人用一个简单几何光学模型(图 3)说明上述条件, 在 IGARSS 1999 年会议上发表后引起轰动.

普朗克定律是人类科学史上最伟大的成果之一, 是现代物理学的基石, 但它在对地遥感中的直接应用, 要求地表状况满足一定的条件, 物理学家都知道这一点. 但是

40 年来普朗克定律一直未经修正直接应用到对地遥感, 成为地温遥感精度上不去的根本原因之一. 问题在于地学家很难修正地表状况, 大多数又不敢修正物理定律. 我本人亲耳分别听见几位物理学的权威说: “地表状况不满足普朗克定律的条件, 你们就别用! 但不用怎么办呢? 走投无路的情况下, Becker, 李小文等人斗胆试图将它修正到遥感像元的尺度. 李小文通过修正“像元平均有效发射率”的内涵, 使普朗克定律能直接应用于像元尺度地温遥感. 但目前的修正, 仍受制于缺乏理想的地学描述手段, 需要像元平均材料发射率、二向反射比、平均温度、组份温度方差、组份温度与组份材料发射率的协方差等统计量. 模型的复杂性降低了它的实用性, 我国学者正继续努力寻找更简练的景观特征参数化手段.

综上所述, 遥感科学要研究的尺度问题之一是: 物理定律、原理用在遥感像元尺度时是否需要修正、如何修正.

遥感科学要研究的第二个尺度问题是尺度转换问题, 即同一地物不同观测尺度的参数估计结果是否要求一致、如何提高参数估计精度. 例如: TM 影像得到广泛应用后, 人们发现用 TM 估算的农田面积显著不同于过去用 AVHRR 估算的农田面积; 这种差别随地区不同而不同, 缺乏规律性. 分析这种差异的产生, 主要是由于田块边缘的混合像元造成的, 而田块边界的长度正比于混合像元的数量. 而这是一个典型的分维问题, 要解决 TM 估算面积和 AVHRR 估算面积本质上的差别, 离不开对田块破碎程度的描述. 为解决这一问题, 中国学者首次提出了“直方变差图”的概念. 该方法克服了变差图(Variogram)的不足, 通过定义图像中驻点和边界点分析地物的空间分布规律, 获取地类面积随尺度变化的关系, 进而基于破碎度的降尺度转化反演高分辨率地类面积.

尺度效应不是一个新的概念, 但它是遥感科学的关键问题之一. 我们用几何光学模型来解释不同尺度

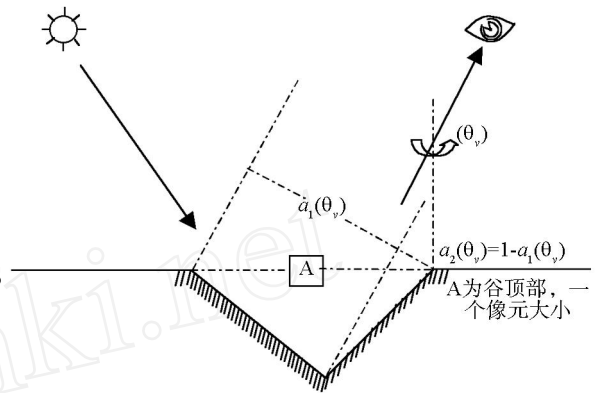


图 2 像元内处处朗伯像元尺度上非朗伯

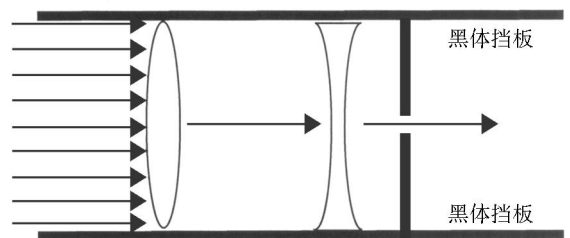


图 3 像元内处处互易像元尺度上非互易  
(李小文等 IGARSS '99 模型的透射等效)

上量的内涵的变化、量的性质的改变、以及物理定律的适用性。所提出的新概念和新方法已被国外同行专家所接受。我们的研究也发现:波谱测量的同时必须测量地物的结构、环境等配套参数,波谱数据才能更好地用于不同观测尺度的地面目标。从模型反演地表参数,需要积累大量的背景测量数据的支持。这为 863 重点项目建立“典型地物标准波谱知识库”提供了决策依据。

3.3 病态反演

定量遥感的反演问题就是根据观测信息和前向物理模型,求解或推算描述地面实况的应用参数(或目标参数)。而反演的困难在于应用参数往往不是控制遥感信息的主导因子,或者说是非敏感参数,只能为遥感信息提供弱信号。由于地表太复杂,而遥感信息总是有限的,所以,定量遥感本质上是病态反演。

目前国际上对地遥感反演的主流仍坚持沿用高斯的最小二乘法,坚持“定量遥感反演的必要条件是独立观测的个数大于未知数的个数”(简称“第三公设”)。地表是一个复杂的开放的巨系统,未知的参数几乎是无穷的,而遥感数据总是有限的,接受第三公设,采用最小二乘法,其结果是只能估计最敏感的少量几个参数,而这几个参数往往不包括应用所需的时空多变要素,导致了定量遥感与应用需求之间巨大的缺口,和普遍的悲观情绪。李小文明确提出“对地定量遥感本质上是欠定问题”的观点,强调必须综合考虑未知参数的敏感性与不确定性,尽量把遥感获取的宝贵信息分配给时空多变要素,而不是反复反演相对稳定、相对已知的敏感因素、在低水平上重复。最小二乘法是解决超定问题的基本方法,遥感获取信息的瞬时性、有限性和地表遥感模型的复杂性,使我们不能把解决超定问题的成熟办法当作教条。

我们对传统的遥感反演理论的第三公设提出了挑战,提出了病态反演的主要思路:第一,先验知识的积累和在反演中的表达和利用;第二,分阶段目标决策,即对数据空间和参数空间进行多次分割。从建立数学模型、从遥感观测来解未知数的研究内容来看,定量遥感似乎理所当然是纯科学的问题。但地球是一个复杂的巨系统,遥感数据量总是有限的,只有合理表达和充分利用一切先验知识,才能从有限的遥感数据中挖掘出应用需要的时空多变要素的信息。如何简洁有效地定量描述我们对地表的先验知识,像尺度效应的研究一样,也是定量遥感成功的关键。

病态反演就要求知识库的支撑,建立中国典型地物结构波谱知识库的构想,就是为了病态反演。波谱知识库集波谱测量数据、遥感图像数据、遥感先验知识数据、遥感分析模型于一体。除了这些,数字地形模型(DTM)和地表覆盖类型(LULC),也是知识库里很重要的一部分。目前中国已制定了地物波谱数据库建设的系列技术标准与规范,将典型农作物、岩矿、水体波谱数据和配套参数入库,包括新采集地面测量和遥感像元波谱数据以及图像样本数据;正在建立与波谱数据库一体的知识库和模型库,提供面向国家重大行业应用需求的波谱数据库应用示范。模型库建设方面,除了收集整理成熟的模型,还要建立通用模型、波谱模拟模型、遥感应用模型。

病态反演中,究竟怎么才能最简洁地用最少的参数描述像元内的地形特征呢?我们研究了直方图的尺度效应,发现它很有希望是比变差图更好的地学描述工具,并建议用“直方变差图”来描述地形或数字图像的空间特征。另一方面,随着分辨率的降低,边界混合像元的比例将逐步增加。边界直方图反映的是给定灰度(高度),给定尺度上等高线的长度,这种直方图的尺度效应表达兼具直方图和变差图的优点。

4 定量遥感研究展望

在国家基金委,科技部二十年的持续支持下,遥感基础研究的中国学派已经有了一个雏型,遥感科学国家重点实验室将在宏观尺度上以几何光学为主,局地尺度上吸取辐射传输理论和其它理论,形成适用于像元尺度的遥感科学理论;并以信息论为基础,在遥感反演中强调知识的积累、合理表达和利用,支持在不同尺度上(时空多变)目标参数的定量估计。中国学派的学术思想与国外的对比如表 1 所示。在定量遥感领域,中国学者具有自身的优势,可望获得更多的原创性成果。

表 1 中外学者学术思想比较

	国外研究现状	中国学派(雏型)
遥感信息产生机理	辐射传输理论	几何光学
尺度效应	点-面信息转换	尺度效应,尺度纠正和尺度转换
反演	最小二乘法	病态反演

基于中国学派的学术思想,定量遥感有四个重要的研究方向.第一,要以尺度效应为核心,在像元尺度上对基本物理定律进行检验及修正,开展尺度转换研究,解决提高定量遥感精度的关键科学问题.国外虽然已经看到尺度效应的存在,但尚未抓住物理本质.第二,开展遥感与非遥感信息数据融合的模拟试验,探索地表时空多要素的尺度转换规律.国外虽然已经认识到地表要素并非完全自相似,运用纯数学的分形、多重分形、自仿射的方法,效果并不理想,但尚未提出具体的思路和方法.第三,进行多角度、多时相、多光谱相结合的混合像元分解和亚像元信息提取;运用多阶段的反演策略,显著提高反演的精度.在国外遥感界尚未提出比这种综合方法更有效的反演思路.第四,基础研究和应用示范相结合,估算高难度的地表时空多要素,有力推动相关学科的发展.

## 5 创新的阵痛

前面讲到中国的遥感基础研究能够做得比外国人好,是不是有点吹牛皮呢?这不是自吹,主要还是想给读者打气、加油.如果我们的确做得比外国人好,就要理直气壮地说,如果说都不敢说,甚至想都不敢想,还有什么自主创新可言?

大家知道,创新首先需要敢于思索,然后需要付出艰苦的努力.但大家也许不知道创新的阵痛.打完了气再给大家讲一讲阵痛,讲一讲艰辛.

我是学电子出身的,后来搞图像处理,遥感,成了 UCSB 地理系 D. Simonett 的研究生.他跟我强调尺度效应,我是半信半疑的.直到后来 A. Strahler 要我作课题,研究针叶林树冠阴影与其反射的关系.当时已经不少人怀疑二者是有关系的,但从数学上讲不清.比如一个 J. Smith 教授的学生,在树林里作了大量辛苦的测量,测量结果表明,树冠的郁闭度和地面阴影的面积基本上不相关.我觉得有违常识,就仔细阅读了他们的测量方法、数据和处理方法,发现他们的郁闭度测量和阴影面积的测量是在  $10\text{m} \times 10\text{m}$  的网格上测量的,但从树高和太阳角来算,阴影应投射到  $10\text{m}$  以外,所以他们的结论是错误的.要弄清二者的相关,必须在更粗的网格上作相关分析. Strahler 觉得有道理,但告诉我说这个 J. Smith 是个大权威,你说他署名文章结论错了,也许今后会惹麻烦,应该向他请教一下.于是,把我的分析寄给 J. Smith.很快有了回信, Smith 认为我的分析是对的,他们选的尺度不合适.从而开始了我 25 年漫长的创新与阵痛交替的生涯.

1981 年我的第一个几何光学模型,虽然载入了美国《遥感手册》第二版(1983),但只能算一个小成果,阵痛也很轻微.无非就是明明白白正确的事,也得请教一下权威认可.而且 Smith 后来对 Strahler 和我都很支持; NASA 的遥感科学计划一开始(1983 年左右),就和 Strahler 联合申请到了一个三尺度森林建模的项目.

1985 年我作 BRDF 模型的时候,唯一可用来验证的成套测量数据是 Kimes 提供的.作为学电子出身的我,立即注意到他的测量数据不满足互易原理.于是我请教他是否测量误差太大.他回了一封长长的信,说测量误差绝对大不到那个程度,互易原理在野外测量中有问题,并举出了几种互易原理可能失效的场景.他举的场景不能说服我,但是我相信了他数据的质量.怎么办呢?我不得不放弃了为树冠亮度(模型中参数之一)建模的结果,把该参数作为实测参数,这样既不背叛大学二年级老师教我的原理,又不与野外测量的行家争论不休.这样“蒙混过关”,文章发表在 1986 年 IEEE TGARS.

但是为树冠亮度建模毕竟是模型进一步发展的自然需求,所以此后查阅了有关文献,发现测量数据与互易原理不符的争论从上世纪五十年代中期关于实验室测量数据就已经开始了,搞测量的和搞理论的争论不休,谁也说服不了谁.我也没有必要去趟浑水,所以就把疑问暂时放到一边.

冷战结束以后,更多的物理学家进入遥感领域.这本来是好事,有助于学科交叉.但是个别物理学家觉得他们肩负着“反修防修”的历史使命.挨头刀的是 Walthall 的 BRDF 经验模型.

一位物理学家注意到这个经验模型不符合互易原理,就擅自(也许沟通过,但我不知道)在经验模型上加上一个因子,变成自己的满足互易原理的模型.我觉得有些霸道,但事不关己,一笑置之.

但树欲静而风不止,有人把我 1986 年的 BRDF 几何光学模型推导、简化成“半经验模型”,这下“原形毕露”,原来李小文 - Strahler 模型不满足互易原理.所以有几位物理学家要求我同意也加上一个因子,让这个半经验模型变成互易的.我提出两个条件:(1)测量数据支持他们的要求;(2)或者证明互易原理在像元尺度上成立.一位英国物理学家觉得挺难,就放弃了.另一位德国物理学家觉得互易原理天经地义,李小文不

应该提条件,你同意我加,不同意我也加,就把模型改成互易的,模型名称中的李改为“互易的李”。我表明我不同意这样改,但也无法制止他。一位美国物理学家 W. Snyder,看起来比那位德国物理学家客气一点,非要先说服我再改,但骨子里其实更霸道。在“说服”我的时候,他写道:“互易原理是物理学中一个基本原理,只是我进入你们遥感界以后,才遇到六个学地理的博士(!),居然不相信互易原理。这个括弧里的惊叹号明显是挖苦我们这六个(含我本人)学地理的博士不懂物理学的基本常识。这就把我逼上梁山,不得不站在学过互易原理的地理博士的立场上和他展开了长达数月的论战。论战是通过 Email 公开进行的,抄送给了若干有关人士,包括我两个正念研究生的孩子。我坚持赫姆霍兹互易原理是点对点关系,他必须证明复杂地表三维结构的像元尺度上仍然有效,开始他认为没有必要,后来他证明一次我驳倒一次。但他仍坚持其轻蔑态度,直到他引用一本美国热物理学的经典教材(Siegel & Howell)中的一条证明,严格论证了遥感像元尺度上互易原理普适。这次他本身的证明是无懈可击,连我的孩子都悄悄给我发 Email,说:“爸,这下你惨了,该认输就认输吧!为了教育孩子相信自己是正确的,就不能轻易认输,我琢磨这条 Siegel & Howell 证明两天一夜,终于发现这条证明中存在循环论证,因而不成立。我推翻这条证明的逻辑是清楚的,说理是充分的, Snyder 也驳不倒。但美国人似乎有他们自己的行事方式,他马上打电话向 Howell 求救。原著者仔细听取了我的结论后,承认我是对的,他们的证明不成立。Snyder 马上通知我此事,表示这一回合认输。我沉浸在胜利的喜悦中不到两天,刚好和我琢磨这个“证明”废寝忘餐的时间差不多,“阵痛”就来了。Snyder 给我发来了他投往“Applied Optics”的论文第一稿,他毫不客气地是第一作者,万正明(我们 Email 论战的证人)为第二作者,我只为第三作者,文中只提到是我“质疑”了这个定理。我气不打一处来,但万正明和 Strahler(我们 Email 论战的我方证人),都劝我算了,以后对这个 Snyder 小心些就行了,不值得再和他费力耗神争什么。但我还是咽不下这口气,想:“你 xx 的英文写得快,老子中文也不慢。就把阐述我的观点和推翻那个证明的中文文章投往《自然科学进展》署名李小文、万正明。后来两篇文章均发表在 1998 年。”

经历了这次美式“阵痛”,此后我即不再与 Snyder 有任何私下讨论;有争论也公开发表,包括前面提到的 1999 年 IGARSS 会议论文。在会上 Strahler 代表我宣读论文后,很多国家的遥感专家都祝贺我终于把这个事讲清楚了。我也就沾沾自喜,以为一个宁馨儿已经呱呱坠地,没注意到祝贺我的多半是地理学家,更惨烈的阵痛还没来呢。尤其是前面提到的普朗克定律的尺度效应和尺度纠正方面的系列文章在国内外发表以后,我更产生了一种错觉,以为大家已逐步接受了这一概念,有什么争论,能让学生答复的,尽量让学生去答复,尽量让学生作第一作者,有助于学生成长。但弊端就是容易被审稿人毙掉。例如,2001 年我一个博士生作第一作者的文章(三维结构非同温像元热辐射的尺度效应)投往《自然科学进展》,审稿人 C 提了三条否定意见:

(1)什么是尺度效应?尺度一般是指空间距离或时间长度。所谓“尺度效应”应该指尺度变了,物体的规律需要作某些修正,而对“Planck 定律”提什么“遥感像元尺度纠正”都是不科学的。本来 Planck 定律就没有什么“尺度纠正”的问题,一块平板(假定它为同温同质)其热辐射亮度的方向性决不会因为它们的几何尺度改变而改变。其实作者所要讨论的问题是“非同温混合像元”的热辐射亮度在 2 空间中的分布规律问题。作者所用“像元组分温差造成的尺度效应”一句也是错误的,因为温差怎么能与尺度变化相联系呢?事实上是组分温度的不同分布确实对非同温混合像元热辐射亮度在 2 空间中的分布规律有影响,而不是什么“尺度”在起作用。

(2)作者说  $T_0$  是介于组分温度  $T_i$  间的像元参考温度,这样  $T_0$  可以取无穷多个值,它的任意性很明显,而公式(3)明确表明  $g(r)$  与  $(T_v - T_0)$  之间是非线性关系,所以可以肯定地说,当  $T_0$  取不同值时,  $g(r)$  值在变,一个取值不定的物理量还能有确定的物理意义吗?这是起码的物理常识。

(3)于“V”型谷的模拟计算早已是有定论的问题,因为人们用 V 型体做近似黑体,所以作者的讨论缺乏新意。

作者的答复是:(此处略,可索取)。

我当然不鼓励年轻人这样尖锐地答复审稿先生,这样做通常是要吃亏的。但当时实在是很火,又正在“阵痛”中。1997 年左右,我应邀用几何光学模型为美国 NASA EDS/MODIS 热红外产品解决方向性问题,也同时申请到国家一个攀登项目,从此“侵入”了热红外领域。刚进入别人的领域,我还是比较谨慎的,课题组内请了一位教遥感物理教得比较好的老专家来为我们攀登项目保驾护航。没想到他书教得虽好,自己对创



新也有欲望,但并不太支持我跑到热红外领域来创新,一进入课题组,他就反对用几何光学模型来解决热辐射的方向性问题,要搞 TES(温度与发射率分离)。这是学术问题,我耐心和他讨论,花了一年左右的功夫,才说服了他我申请攀登项目的方向是正确的。然后他和他的学生在这一正确方向上迅速出成果。我虽然注意到他们有故意回避正确引用我在这方向上的原创性文章的倾向,但只要是攀登课题出成果,不提我的贡献这还可以忍受。但后来越演越烈,只要我的学生的文章送到他手上审,几乎就没有生还的可能。这就太过份了,一为学生的前途,二为课题的成果,我不得不支持学生把问题说透。问题说透了,编辑当然知道审稿人 C 是谁,这篇文章才“死里逃生”,发表在 2002年初。

行文至此,我有些担心读者会认为我这样和人讨论,去说服别人,是不是太吃亏?我不这样认为。看起来是吃了点亏,但归根到底是有益的。比如没有和 Snyder 的反复辩驳,我很可能永远注意不到 Siegel & Howell 书上那一条证明,自然也就谈不上去推翻它。在攀登项目内的公开讨论,对整个课题组理清思路,统一认识,快出成果,绝对是有利的。偶尔有个别人占点小便宜,只要不碍大局,不必计较。所以我仍然建议读者多公开讨论,多交流,才能成大气候。

攀登课题的“阵痛”拖的时间长了一点,还不算很痛,也基本上还是 Snyder 式的。惨烈的“阵痛”发生在后来,但故事就不细讲了。总之,创新的过程中除了自身的努力和客观难度以外,还会遇到不少社会上,体制上的困扰,像小人侵权,外行评内行,门户之争,学科冲突等等。这时候,一定要熬得住,要坚信国家需要我们自主创新。只要我们真的是在创新,客观公正的评价迟早是会到来的。

#### 参考文献:

- [1] LIX An Invertible Coniferous Canopy Reflectance Model [D]. MA. Thesis University of California, Santa Barbara, 1981.
- [2] LIX, STRAHLER A H. Geometric-Optical modeling of a conifer forest canopy [J]. IEEE Trans on Geoscience and Remote Sensing, 1985, GE - 23 (5): 705 - 721. Collected in SPIE's Milestone Series of Selected Reprints on Optical Remote Sensing Theory and Measurement, ed J. A. Smith, pp. 88 - 104, SPIE Optical Engineering Press, 1997.
- [3] LIX, STRAHLER A H. Geometric-Optical bidirectional reflectance modeling of a conifer Forest Canopy [J]. IEEE Trans on Geoscience and Remote Sensing, 1986, GE - 24 (6): 906 - 919.
- [4] LIX, STRAHLER A H. Modeling the gap probability of a discontinuous vegetation canopy [J]. IEEE Trans on Geoscience and Remote Sensing, 1988, 26 (2): 161 - 170.
- [5] LIX, STRAHLER A H. Geometric-Optical bidirectional reflectance modeling of the discrete crown vegetation canopy: Effect of crown shape and mutual shadowing [J]. IEEE Trans on Geoscience and Remote Sensing, 1992, 30 (2): 276 - 292.
- [6] LIX, STRAHLER A H, WOODCOCK C. Hybrid Geometric Optical-radiative Transfer Approach for Modeling Albedo and Directional Reflectance of Discontinuous Canopies [J]. IEEE Trans on Geoscience and Remote Sensing, 1995, 33 (2): 466 - 480.
- [7] LIX, WANG, HU J, STRAHLER B A. On utilization of prior knowledge in inversion of remote sensing model [J]. Science in China (Series D), 1998, 41 (6): 580 - 586.
- [8] LIX, WANG J, STRAHLER A. Apparent reciprocity failure in BRDF of structured surfaces [J]. Progress of Natural Science, 1999, 9 (10): 747 - 752.
- [9] Li Xiaowen, Strahler A H, Friedl M. A Conceptual model for effective directional emissivity from non-isothermal surface [J]. IEEE Trans on GARS, 1999, 37 (5): 2508 - 2517.
- [10] LIX, STRAHLER A H, FRIEDL M A. A Conceptual Model for Effective Directional Emissivity from Nonisothermal Surfaces [J]. IEEE Trans on Geoscience and Remote Sensing, 2000, 37 (5): 2508 - 2517.
- [11] 李小文,王锦地. 植被光学遥感模型和植被结构参数化 [M]. 北京:科学出版社, 1995.
- [12] 李小文,万正明. 互易原理在二向性反射研究中的适用性 [J]. 自然科学进展, 1998, 8 (4): 456 - 460.
- [13] 李小文,王锦地. 地表非同温像元发射率的定义问题 [J]. 科学通报, 1999, 44 (15): 1612 - 1616.
- [14] 李小文,王锦地, A. H. STRAHLER. 非同温黑体表面上普朗克定律的尺度效应 [J]. 中国科学 (E 辑), 1999, 29 (5): 422 - 426.
- [15] Snyder, Wan W Z, Li X. Thermodynamic constraints on reflectance reciprocity and Kirchhoff's law [J]. Applied Optics, 1998, 37 (16): 3464 - 3470.
- [16] 苏理宏,李小文,王锦地. 典型三维结构像元热辐射尺度效应模拟 [J]. 自然科学进展, 2002, 12 (1): 51 - 55.