

《海纳百川·藏书博览》

简装书库·自然科学总论

（理论、现状及发展）

百名院士科技  
系列报告集  
（上）  
（04）

上海市黄浦区教育信息中心

## 地震及其灾害的减轻

陈颢

国家地震局

陈颢 地球物理学家。1942 年 12 月 31 日生于四川重庆。1965 年毕业于中国科技大学。历任国家地震局地球物理研究所研究员、副所长、所长、国家地震局副局长。并任中国地球物理学会副理事长、中国地震学会副理事长、国际地震学和地球内部物理学会的地震预报和灾害委员会主席。1993 年当选为中国科学院院士（学部委员）。主要从事实验地球物理学、地震物理和地震灾害预测等方面的研究，并取得多项成果。

地震和地震灾害是全世界共同关心的问题。

公元 132 年，东汉的张衡（公元 78～139 年）发明了世界上第一架地震仪——候风地动仪，用以测量地震发生的方位（图 1）。这一测量本身包含着一个本质性的观念，即地震是沿一定方向从远处传来的地面震动。直到 18 世纪和 19 世纪，这一概念才被英国的米歇尔（J. Michell）和马利特（R. Mallet）重新确认。因此，中国张衡研制候风地动仪，被认为是地震科学发展的里程碑。

中国自古以来就一直是世界上最活跃的地震区之一。因此，中国人自然会保存有大量的地震记载，而这些记载现在确实已成为世界各地地震记录中最悠久、最完整的记录。目前地震学家将地震活动分成平静期和活跃期的做法，以及地震虽然会影响很大的地区，但是一般情况下不会在几个地区同时发生的认识，主要得益于对历史地震的宝贵记录的分析。

中国近代地震仪器记录最早始于台北（1887 年）。以后，在台湾相继建立了台南（1898 年）、台中（1902 年）、台东（1903 年）等台站。1904 年，法国耶稣会所属上海徐家汇观象台增设了地震观测项目，建立了中国大陆第一个地震台。1930 年李善邦先生在北京鹫峰建立了中国人自行设置的第一个地震台，并达到当时第一水平。总的来说，20 世纪上半叶中国的近代仪器观测，经历了缓慢而崎岖的道路。60 年代以后，由于经济建设的需要（三峡台网，1958～1960 年）、美国维拉计划（地下核爆炸侦察和核爆炸地震效应，1962 年）的影响以及社会对地震预报的要求（邢台地震，1966 年），现代地震观测系统正式建立并不断发展与完善。

地震科学的产生是密切为经济发展和社会进步服务的。地震科学产生之后，基本上是沿着两个方向发展：一是对地震灾害的预测与预防，减轻地震灾害；二是利用地震波研究地球内部。本文仅就减轻地震灾害方面的问题进行简要介绍。

### 地震预报

全球人口的迅速增加及其在地域上相对集中，经济发展所带来的生命线工程和社会易损性的增加，使得一次地震所造成的损失也在不断地增长，这是一个全球性的现象。本世纪中国大陆死于各种自然灾害的人数中，死于地震灾害的约占一半。因此，在地震发生之前作出某种程度的预报，显然对于

减少人员伤亡和保持社会安定有着重要的意义。

地震预测是人类面临最古老的问题，也是世界范围的科学难题。目前预测方法有两种，一种是理论性方法，另一种是经验性方法。

理论性方法是建立在对地震过程基本了解基础之上的。根据一定的理论模型，推导各种可能的前兆及不同前兆之间的关系，然后通过各种实践的检验来修改模型。目前，这种方法很难对地震预报给出实用性指导，然而它无疑是给出关于地震成因的本质性理解的重要途径。

经验性方法是利用有限的震例，总结出经验性规律推广应用于未来的地震。一般说来，大地震发生之前都会出现一些异常现象，从这些异常现象中提取地震发生的前兆信息并加以综合，就成为用经验性知识预报地震的方法。1975 年辽宁海城地震就是用这种经验方法预报出来的。经验性预报方法的局限性在于前兆异常的机制并不十分清楚。从表 1 所列的预测实例可以看出：我们能够对某些类型的地震作出一定程度的预报，但还不能预报大多数地震。这就是地震预测目前的科学水平（图 2）。

目前的地震预报主要是经验性的。图 2 给出了进行地震预报的逻辑推理框图。 $E_1 \dots E_n$  分别代表震前观测到的各种异常现象，如小地震发生频次的增加、地面变形速率的变化、地下水位变化和动物异常等。 $CF(E_i)$  表示第  $i$  种异常中包含的前兆信息量， $CF(H, E_i)$  表示在第  $i$  种异常出现后发生地震的概率。用不精确推理方法可以将各种信息综合在一起，得到地震可能发生的概率  $CF(H)$ 。在以上框图中， $CF(E_i)$ ， $CF(H, E_i)$  都是根据过去的经验，由专家进行判断而给出的。尽管目前地震预报利用了上面的不精确推理的专家系统，但由于经验有限，震例有限，仍然面临小样本统计学的科学问题。

表 1 地震预报情况一览表

时间	地震	中期预报	短期预报
73.2.6	四川炉霍 $m = 7.6$	无	无
74.5.11	四川永善 $m = 7.1$ 无	无	
75.2.4	辽宁海城 $m = 7.3$ 有	有	
76.5.29	云南龙陵 $m = 7.4$ 无	有	
76.7.28	河北唐山 $m = 7.8$ 无	无	
76.8.16	四川松潘 $m = 7.2$ 有	有	
88.11.6	云南澜沧 $m = 7.4$ 有	无	
90.4.26	青海共和 $m = 7.0$ 无	无	
94.9.16	台湾海峡 $m=7.3$ 无	无	

正是由于目前地震预报的科学水平十分有限，我们在地震预测方面，面临着对策问题：如果我们能准确地预报所有未来的地震，那就不存在着对策问题，需做的事情就是简单地发布预报；如果我们根本不能预报任何地震，那也不存在着对策问题，只需向社会公众宣布无能为力罢了。但我们恰恰处于这两种极端情况之间：我们能够预报一些地震，我们又不能预报所有的或大多数地震，当我们的科学处在这种特殊位置时，如何对待地震预报的对策问题就十分突出了。

目前，地震预报的决策包括预报的提出、科学评审和预报的发布。任何科技人员，只要有可靠的观测资料和一定的科学根据，都可以提出地震预报

意见，但这种意见只能报告给有关部门，不得以任何形式向社会上传播，更无权对外发布。地震部门收到预报意见后，组织有关科学家进行科学评审，经过科学评审后所确定的预报意见是否向社会发布，已不单纯是科学问题，而是涉及到方方面面的社会问题，应由政府来决策。

众所周知，地震预报对社会的影响极大，必须明确权限，以避免给社会造成无谓的恐慌与混乱，尽可能减少不必要的经济损失。一般说来，长期（几年 - 几十年）预报意见，由国家地震局提出，作为国家规划和建设的依据。中期（1 年至几年）预报由每年一度的全国地震趋势会商会提出，经政府批准后，对预报的地区作出防震工作部署，中期预报不向社会公布；短期临震（几天至几个月）预报，由省政府批准发布。在有中期预报地区，如发现明显前兆异常而又情况紧急来不及向省政府报告时，当地市、县政府可以发布 48 小时的临震预报。各种预报发布之后在预期的时间内如无地震发生，由原发布预报的政府作出撤销或延长预报的决定，并妥善处理有关问题。

综上所述，预报管理对策的要点可以概括为：

- （1）鼓励从事预报研究与严格管理预报发布相结合；
- （2）专家的科学判断与政府行政决策相结合。

### 地震灾害预防

地震预报是减轻灾害的重要方面，但由于地震预报在科学技术上尚未完全过关，最大限度减轻地震灾害，不能单单依靠预报。而且，在人类没有充分的证据证明地震预报具有的精确性之前，任何国家政府不会在一个百万人口以上的城市进行紧急疏散和撤离，因为一旦出现误报、虚报或混乱造成的损失不会比一次中型灾害小。因此，利用地震科学的成果，做好灾害预防是十分重要的。

灾害预报包括工程措施和非工程措施两类工作。搞好工程建设的地震安全设防，是减轻地震灾害的最主要的工程措施。1987 年开始，许多地震学家组织起来，开始编制新的中国地震烈度区划图。这张区划图比较全面地考虑了特别是大陆地区的地震活动和地震地质特征，对国际通用的地震危险性分析概率方法作了重要的改进，采用三种不同超越概率水平下的地震烈度作为不同的设防水准。1990 年国家地震局和建设部正式颁布了新一代的地震烈度区划图（1：400 万，1990 年）（图 3），作为国土利用、城市规划和一般工业与民用建筑抗震设防的依据。但是一些重大工程和易于引发次生灾害的工程，必须通过进一步的包括考虑场地条件的地震危险性分析，从而选择相对安全的建设场地和确定合理的设防标准。

建立地震的早期警报系统，也是减轻地震灾害的工程措施之一。加勒比海 Cocos 板块边界，在本世纪已经发生过 42 次 7 级以上的大地震。1985 年 9 月 19 日，在该边界上又发生了一次 8.1 级地震，尽管震中离墨西哥城有 400 公里之远，但由于墨西哥城地基土质条件极差，这次地震仍造成了死亡 1 万人的严重灾害。为此，从 1989 年开始，用了 2 年时间在该地区建立了世界上第一套地震的早期警报系统。由于 Cocos 断层离墨西哥城最近之处也有 320 公里，一旦地震发生，设在断层附近的地震台马上接收到地震信号，该台站立即将发生地震的警报用无线电自动向全国广播。由于无线电波以非常快的光速传播，而地震波以每秒数公里的较慢速度传播，这样，在当地地震波到达墨西哥城之前，人们已从广播中收听到了地震警报，并作出了相应的准备。

1995年9月14日，一次7.3级地震在Cocos断层上发生了，当人们从广播中听到地震的警报后，墨西哥城的人72秒钟后才感到地面的震动。这是地震早期警报系统在减灾中发挥作用的成功例子。近年来，类似的地震早期警报系统，先后在日本、台湾等地投入了应用。

震灾预防的非工程措施，主要是通过各种宣传、教育，提高全民族的防震减灾意识和主动参与意识。如每年选择在一些地区进行防震减灾演习。1980年8月，香港一家报纸载文说，闽南地区“下月中旬可能发生8级大地震”，引起当地部分居民的恐慌。地震学家根据观测资料认真分析，否定了这个消息。由于平时地震知识的科普宣传做得好，该地区很快平息了谣传。对稳定社会秩序、保障经济生产起了良好的作用。

震灾预防实行重点防御、兼顾一般的原则，在对未来地震灾害预测的基础上，设立了地震重点监视防御区作防震减灾的重点地区，强化防震减灾工作。目前重点监视防御区的总面积占国土的10%左右，而预期这些地区中发生的未来地震灾害损失将占全国60%以上。

### 地震科学技术研究

依靠科学技术进步，是减轻地震灾害的根本途径。概括来说，目前正在进行的科技研究可以分成三个方面：

#### 1. 以确定地震发生地点和强度为主要目标的长期预报研究。

板块内部地震孕育的构造环境研究。利用天然地震的地震波研究中国大陆及其邻近地区的地壳上地幔三维结构。配合国际地球断面计划（GGT），中国地震学家负责7条地学大断面的编制。对中国大陆深部环境进行探查。

利用现代空间技术对板块内部的地壳变形场进行测量。应用甚长基线干涉（VLBI）、人造卫星测距（SLR）、全球定位系统（GPS）和合成孔径雷达（SAR）等技术，从地壳变形动力学角预测未来地震发生的地点和强度。

活动构造研究。通过对大陆地区主要活动断裂的大比例地质填图和新生代实验测定，积累主要强震区活动构造的定量化资料。特别重视全新世1万多年以来活动断裂的运动方式、滑动速率，古地震和强震重复率等研究，为进一步开展大陆活动构造体系和动力学提供基础。

板内地震孕育过程的阶段性和周期性研究。一次地震孕育过程中表现出阶段性，许多次地震的活动性表现出周期性。地震活动这种在时间上的不均匀的发展，为几年到几十年的长期地震预报提供了一种新的线索。例如一次大地震发生后，几十年内该地区再次发生大地震的可能性很小。因此，地震孕育构造环境是未来大地震发生的必要条件，而地震活动性的时间特征分析将成为地震发生的充分条件。

#### 2. 以确定未来地震发生时间为主要科学目标的地震短期预报研究。

强化观测系统。观测是利用前兆现象进行地震预报的基础，应增加观测数据和资料的可比较性，以便能够逐步建立板内地震前兆数据库；同时，不断地探索前兆观测的新方法，例如地热前兆方法、电磁波方法和断层气观测等。

加强从异常现象提取地震发生前兆信息方法的研究。应用信息理论，对异常现象中前兆信息量进行提取和分析，研制地震预报的专家系统。把计算机智能化技术和地震预报的经验结合起来。

### 3.开展地震学、工程科学和社会经济学之间跨学科、综合性的基础研究。

吸收现代物理学和其它相关学科的新的研究成果，在物理模型和数值计算方面开展旨在理解地震现象复杂性的震源物理研究。深入开展地震成因、地震孕育过程等方面的理论与实验研究。

加强工程地震和救灾技术的研究，例如：开展预防性工程技术措施研究，进行工程结构抗震设防标准的研究，开展工程结构隔震减震技术和工程建筑物损伤探测技术的开发，提高强地面运动的观测能力和水平。

地震灾害的观测。估计某个地区未来会遭到多大的地震灾害损失，对于减轻地震灾害是十分重要的科学问题。因为未来地震预防和救灾的基础是对未来地震灾害的定量估计。这涉及到工程、社会、经济、心理等众多的学科和方面。中国大陆已作出了未来 50 年的地震灾害损失预测图（1 / 1000 万），但是它只考虑了建筑物的损失。1995 年日本兵库南部地震教训表明，生命线工程和社会功能损失，对于大中城市而言，比建筑物破坏的损失要更加严重。可以预料，地震灾害定量化的预测，将结合地震学、工程学和其它众多学科，形成减灾科学中一个新的生长点。

### 展望

在科学上更深刻地认识地震的本质，是减轻灾害的基础，也是地震科学的发展方向。在这方面，新的观测和新的理论则是发展的重点。地震观测技术在本世纪将全面地进入数字化时代，不仅在记录地震的频带和动态范围方面有新的突破，而且在地震记录的分析解释方面也将会有新的进展。地震是地球整体运动和演化过程中的一种自然现象。从空间角度对地球进行观测将在本世纪成为地震科学的一种新的技术，特别是合成孔径雷达（SAR）和空间定位系统（GPS）的出现，将地震的孕育环境与整个地球的变形与变化联系了起来。本世纪中全球通讯网络（如 INTER - NET）的发展与完善，可以为各国科学家分享其它国家的地震资料和经验，大大加快震例的积累，促进经验性预报的发展。20 世纪最后 20 年中自然科学发展的一个显著特点，就是各个学科几乎在同一时间内都开展了复杂现象的研究。所谓复杂现象，是指用传统的理论难以解释的现象，如天文学中的三体问题，生物学中昆虫数目随时间的涨落，灾害天气的发生、海洋物理中的洋流和赤潮等，面对复杂现象，非线性科学有了长足发展。应用非线性科学中的理论、概念和方法，对地震灾害的预测，将会由目前纯经验方法向动力预测方法发展。

在地震灾害预防方面，由于中国面临由计划经济向市场经济的转变时期，以及所有制的改革，从市场力量的角度对采取减灾工程措施方面有更大的推动。新型抗震材料和设计的广泛应用，建筑物和工程设施抗御地震的能力将会有所提高，但和发达国家的多震地区相比，仍将有一定的差距。

在灾害预防的非工程措施方面，估计会有比工程措施更快的进步。人们已经开始认识到，目前社会公众的减灾意识是十分不够的。社会公众已经知道，在火灾发生时如何使用灭火器，如何进行疏散；社会公众也知道，每一次乘坐飞机时，乘客遇到的第一件事，就是听取飞机乘务员宣讲安全知识，知道在发生紧急情况下应该做些什么。火灾、飞机紧急情况时是如此，那么如何面对地震灾害呢？这方面的知识和宣传是很不够的。在今后一段时期，通过宣传、科普和地震演习，估计这方面会有很大的进展。

历史学家往往以能控制和减轻灾难，作为评价一个朝代功过的重要依据

之一。大禹治水的动人传说和张衡发明地动仪的创举，至今仍广为人民传诵和敬仰。能否积极防御和有效地减轻灾害损失，已成为衡量一个社会文明程度的重要标志。这把尺子在中国历史上，在中国人民心中早就有了，如今已经成为全世界的共识。

作为曾经创造过无数奇迹的中华民族，我们也曾创造过成功预报海城、松潘等地震，取得历史上第一次地震减灾实效，从而令全世界瞩目的成就。今天，科学家们仍将通过坚韧不拔的努力，去实现最大限度减轻地震灾害的目标。

# 城市化与地理信息系统

陈述彭

中国科学院地理研究所

陈述彭 地理学、地图学、遥感应用专家。江西萍乡人。1941年毕业于浙江大学史地系。中国科学院遥感应用研究所名誉所长，地理研究所研究员，中国航天工业总公司、国务院环境保护委员会、国家遥感中心顾问。曾任中国地理学会理事长，资源与环境信息系统国家重点实验室主任，国际地理协会地理信息系统委员会副主席，国际地圈与生物圈计划中国委员会委员，国际空间年地球科学与技术专家组成员，《地理信息系统杂志》特约编委。1980年当选为中国科学院学部委员。1992年当选为第三世界科学院院士。1995年当选为国际亚欧科学院院士。

## 城市化的激流

城市化是人/地关系的焦点，是社会经济发展中，地区性的内外循环相互作用流场中的涡旋。我们可以用地理信息系统来描述、模拟和显示城市化时空变化的图像。高度城市化的结果，使城市中人流、物流、能流和信息流在内循环中高速运行和高度摩擦，正面表现为经济财富的迅速增值能力，高科技力量和人类智慧知识的高度集中，以及物质的高消费和生活的高水准；而负面效应则是城市臃肿和膨胀，贪婪地噬食良田，形成“水泥森林”，造成严重缺水、水质污染、热岛效应增强，传染病易于蔓延，居民的健康水准下降，自然灾害损失上升。人类为城市的经济发展付出巨大的环境代价。每个城市不得不考虑它可持续发展前景，选择它的最佳方案的规模，优化它的功能区划。

### 城市化进程

世界超过百万人口的城市，从1950年至1995年，发达国家由49个增加到112个，而发展中国家由34个剧增到213个。千万以上人口的大城市，1995年为14个，预计2000年将达24个，2015年将达27个。

我国近代设市的建制源于清代。建国前夕共设市67个。建国初按新中国标准共有城市136个，1950~1957年新设市5个，1958~1965年间减少8个，1966~1976年间增加17个，1977~1985年间新设市135个，1986年以后增设市33个。新中国45年累计新设市524个，合并和撤消38个，其中还有62个经历了反复的过程。

改革开放对加速我国城市化进程创造了空前的机遇。

1. 1979~1993年间，国民生产总值（GNP）年均增长率高达9.3%。以1978年/1993年为例对比，第一、二、三产业所占比重发生了巨大的变化。第一产业由28.4%下降至21.2%，第二产业由48.6%上升为51.8%，第三产业由23%上升至27%。经济的迅速发展和非农产业比重的提高，强有力地推动了城市化进程。

2. 1985~1993年，随着乡镇企业的兴起，乡镇企业在全国工业总产值中的比重由18.8%上升至44.5%；从业人数由6979万增到12345万人，年均递增7.4%，从而促进了小城镇的繁荣和众多新城市的诞生。加以由乡村流

向城市从事第二、三产业的民工潮，城市流动人口每年不下 6000~7000 万人。大中城市人口急剧膨胀。

世界十大城市发展预测（人口统计：百万）

1995	2015
1．东京（26.8）	1．东京（28.7）
2．圣保罗（16.4）	2．孟买（27.4）
3．纽约（16.3）	3．拉各斯（24.4）
4．墨西哥（15.8）	4．上海（23.4）
5．孟买（15.1）	5．雅加达（21.2）
6．上海（14.1）	6．圣保罗（20.8）
7．北京（12.5）	7．卡拉奇（20.6）
8．洛杉矶（12.4）	8．北京（19.4）
9．加尔各答（11.7）	9．达卡（19.0）
10．汉城（11.6）	10．墨西哥（18.8）

（据联合国第二次人类住区会议——新华社）

3．90 年代以来，沿海、沿江、沿边城市相继批准对外开放，1993 年全国直接对外开放的市、县已达 1258 个。1993 年进出口贸易总额增至 1957 亿美元，1979~1993 年累计实际利用外资 1379 亿美元。三资企业和出口加工等外向型经济，大力加速了城市化的进程。

4．城市建设引入市场运行机制，尤其是城市土地使用权的转让和房地产业的经营，促进了城市建设自我发展、自我积累的能力。1993 年在全社会城镇和工矿区的基本建设投资中，自筹资金占 48.1%，国内贷款等占 38.9%，外资占 8.2%，国家财政投资只占 4.8%。浙南龙港就是农民集资建成的农民城。

“七五”末期，我国城市约 450 个，人口约 3.2 亿，面积约 4.5 万平方公里，中央对城市发展的基础性投资为 390 亿元；而“八五”期末，城市已增至 640 个，人口约 5.1 亿，面积约 6 万平方公里，基础性投资达 480 亿元。

中国现有建制镇 1.7 万个，比 1995 年同期增加了 783 个，中小城镇所占比例大幅度上升。去年年底，特大城市（市区非农业人口 100 万以上）数目没有增加，大城市（50~100 万）增加 2 个，中等城市（20~50 万）增加了 15 个。

全国城市化水平为 22.74%，辽宁省达 43.73%。青海、宁夏、内蒙、山西等西部地区城市化步伐加快。特大城市中非农业人口增长率为 2.32%，而小城镇达 4.19%。

国家按地区经济布局，以中心城市为核心，制定了全国城市群体联合发展规划。以上海为中心的华东城市群，地理区位相近，类型、规模相似。如长江流域 24 个城市，沿江或沿公路、铁路呈带状分布。目前全国已有 5 个超大型城市群，即沪宁杭、京津唐、珠江三角洲、四川盆地和辽宁中部；还有 8 个城镇密集区，它们是中原、湘中、关中、福（建）厦（门），哈（尔滨）大（庆）齐（齐哈尔）、武汉、山东半岛以及台湾西海岸等城镇密集带。

其他次一级的城镇体系，如欧亚大陆桥、浙赣铁路、京九铁路沿线，以及福州、北部湾为中心的经济协作区，也在逐步形成。

### 城市群（链）及其相互作用

城市化促进城市群的发展，成为某一级区域经济发展的龙头。人们充分利用它在地理区位中的定位，最大限度地扩大它的辐射范围，乃至超越流域分水岭或行政管辖界线，袭夺或兼并其它城市原有腹地，改变原有的流场。

1. 顺应国际化和区域集团化的潮流。随着各国经济结构的调整和地域分工集团化格局的变化，欧洲、北美和东亚三大区域中心逐步形成。亚太是当前和未来世界经济发展最活跃的地区。发挥我国的地缘与区位优势，积极参与欧亚大陆桥和泛亚铁路的建设，实现港澳回归和两岸三通，促进华夏文化圈的经济合作，加速海岸带国际城市化的进程，是更好地与国际接轨，抓住机遇，迎接挑战，全方位地改革开放和建设国际大城市的前提。

2. 加强对城镇体系的宏观调控，逐步优化生产力布局。面对日益加快的城市化进程，要把握好全国、区域和城市之间的协调发展，要以国民经济和区域社会经济可持续发展能力建设为依据，搞好城镇体系布局。把握好区域城市化速度，设市数量和规模，合理布局。城市之间，其功能类型、等级规模不同，作用也不相同，具有相互促进相互制约的作用。我国 80 年代提出“控制大城市规模，合理发展中小城市”，在实际执行曾出现一刀切的现象，间接导致城市基础设施的滞后。90 年代以来，上海、北京等特大城市，一再突破人口控制规模；而各地中小城市，则盲目追求“大城市化”。

3. 城市与乡村的协调发展问题更加严重：城镇和开发区占用和浪费耕地，“六五”期间每年减少 700 万亩；“七五”期间每年减少 1000 万亩；东南沿海城郊，重商轻农，农业投入不足，高产稳产良田被任意占用或弃耕现象尤为突出。城乡结合部和乡镇企业所在地环境恶化，污染严重，最终影响城市本身的健康发展。此外城镇化也是农村现代化的重要标志。

80 年代以来，农村工业与乡镇企业的崛起，为农村城镇的发展注入了蓬勃生机，把农村区域经济增长的轴心从乡村转移到城镇；城镇带动农村产业结构、劳动就业、经济产值乃至生活方式的转变，成为农村政治、经济、文教、金融、贸易、科技、信息的中心和农村经济的发展极和增长极，先进生产力的生长点。

城镇化有利于促进我国传统农业、农村工业和现代工业三元结构的发展与转换。以城镇为依托的工贸小区，是形成集约经营，产生规模效益，促进专业协作，推动横向联合，利于剩余劳动力转移的必由之路。“社会主义有条件比资本主义更快地发展生产力”（邓小平）。各国实现现代化的道路是殊途回归的：早期的英国主要通过独立发明，德、美是通过技术与管理的革新，而日、韩则是通过技术引进、消化、创新，但都离不开国家的经济干预和调节机制。领先与落后不是永恒的。日本用 40 年的时间，完成了欧美 200 ~ 300 年的现代化伟业，有力地证明科学技术是实现现代化的强大推动力和获胜的法宝。

### 城市地理信息系统

在所谓的“国际经济新秩序”中，大城市是全球经济的焦点。权力，对新技术的控制以及传播新象征的能力都集中在城市。随着通信和通信技术的发展，全世界的大城市都联结在一起，各地区的重要城市互相联系的时空距离愈来愈近，信息流代替人流、物流和能量流，人际交往主要通过计算机语言，使城市的作用发生根本的变化。

地理信息系统是城市化过程中信息流场的载体，同时也是加速城市化的催化剂。地理信息系统不仅是用来收集、存储、检索城市化过程的过去和现状，更主要的是返过来辅助城市发展的评估、规划和决策，模拟和预测城市化的未来。

地理信息系统建设与城市化过程的磨合

地理信息系统建设与城市化过程的磨合，大约可以分为三个历史阶段：

第一阶段，是面向土地资源管理。回顾发展中国家的许多大城市的发展历史，由于长期殖民地统治和小农经济的历史流毒，分而治之，各自为政，根本上缺乏整体规划；城市管理的着重点是放在房地产权的宗地登记、查询和检索上，从而开展了超大比例尺的地籍图测绘业务。建立城市地理信息系统的最基础的工作，就是使原有的地籍图（1：500～1：1000）或地形图转换为数字化的空间图形数据库和宗地档案文件库。

第二阶段是面向城市规划。随着工业化的高速发展，交通和通讯、水、气管网等基础设施和商贸、文教、医疗等服务中心的建设，城市的功能分区和流通网络的局域地理信息系统也具备了自动化设计（CAD）和办公自动化的功能，扩大了服务范围，由静态纪录提高到城市化的动态监测与模拟，以及对市政工程设计优化与评估。例如为消防、交通管制、自来水、煤气管理收费、商业网点、学校、医院的调控与布点、桥梁、机场选址、高速公路、地铁建设的选线……等等。城市地理信息系统的建立和应用，对于克服当前片面追求经济效益，牺牲环境为代价的现象，纠正过量占用耕地、污染环境，监测电磁干扰，防治噪声扰民，对于合理强调整城市内部产业结构，加速基础设施等方面，发挥愈来愈显著的作用。我国城市地理信息系统的建设，已经或即将进入这一历史阶段。但还不是所有的城市信息系统都已经达到了这个阶段。与工业发达国家中高度现代化的城市相比，我们还有很大的差距。美国首都华盛顿特区启用 34 个子系统加强城市动态管理，每天发布交通塞断路段预报，即其一例。

第三个阶段，是面向城市可持续发展能力建设。虽然目前尚属于探索阶段，但已展示出更加宽阔的前景。当现代城市继续向集团化的方向发展，卫星城市和城市群落逐步形成，城市的规划、建设和管理扩大到城市辐射所及的腹地，城市化趋向于区域社会经济发展同步的时候，地理信息系统也由于与全球定位系统、对地观测系统（卫星、航空与地面台站网）、数字通信网络的互联、互补，功能有了飞跃的进步，城市地理信息系统具备一定的宏观调控能力，发挥城市作为区域可持续发展中的内核和龙头的作用，预测城市化的前景和可持续发展能力建设的规模，为城市发展战略、长远规划的制定作出更巨大的贡献。例如伦敦市的污水治理与绿化，巴黎的工厂搬迁，莫斯科的地下空间利用，东京的填海造陆，都取得了巨大的社会效益和生态效益。

最近白山市，位于著名的长白山国家级自然保护区，在清华大学的支持下，从社会、经济、环境、资源四个截面着手，根据其产业结构现状和演进轨迹，以遥感和实地调查相结合，建立了区域可持续发展动态数据库，进行分析评价。制定长远产业战略规划、产业政策、技术政策以及教育、金融、法律和社会保障体系。我们高兴地看到，这是城市地理信息系统保护生态环境，参与国际合作的良好开端。

信息网络对城市地理信息系统的支撑

上海是中国人口密度最大的市区，平均每平方公里达 2043 人，远远超过北京和天津，它们各自仅有 628 人和 787 人。上海 2010 年将建成信息港，正在运用计算机和现代通信技术，抓住面向全社会的关键性应用，推动各行各业信息化进程，进行有效的管理，以改变人们传统的工作方式，生活方式，提高劳动生产率。为此，正在进行若干骨干工程的建设：具有宽带、高速、大容量、多媒体等特征的信息传送平台，包括上海信息交互网（SHIX）、上海社会保障网（SSS）、上海国际经贸电子数据交换网（EDI）、社区服务网（SCS）、金卡与商业增值网（GC/POS）。

上海粮油期货交易中心拥有 250 个交易席位，通过 120 个网络和 10 多台小型服务器，延伸出 250 个远程网，以适应粮油期货和商品交易吞吐量与日俱增的需求，保障万无一失的故障自动消除的可靠性。

以北京为中心的首都圈为例，在东经  $113^{\circ} \sim 120^{\circ}$ ，北纬  $38.5^{\circ} \sim 41^{\circ}$ ，面积约 15 万平方公里范围内，布设了密集的地震前兆监测网点，其中精密水准路线 5200 公里，精密重力点 240 个，固定的地壳形变观测点 70 处。国家地震局决定建立全球定位系统监测网，平均点距 100 公里以内，强化部位在 50 公里左右。全区每年普测，重点地区每年 2~3 次。布点加密、观测周期缩短和全球定位系统的应用，有助于中期水平地壳位移的观测和地震短临前兆信息的捕捉。为保障北京首都圈内的城市生命线工程、能源、交通、通信和水利工程的安全，及时提供信息服务。

再以四川省为例，1995 年 10 月，已选用 CLI 公司 Radiance 电视系统作为省会议电视网，采用多点控制器（MCU），联通全省 23 个地、市、州，提供 576 线、每秒 30 帧的图像分辨率、可调速率达 64K 至 2Mbps。并可成功运动于 ATM、DDN、TSDN、CDMA、VSAT 等现有各种网络；实现与国家会议电视骨干网联通，实现出席控制、远程摄像机遥控等功能。其它如吉林、辽宁等经济比较发达的省区，也都在加速境内的信息网络建设，并逐步与全国数据通信网络互联。

全国数据通信网络技术水平正在发生质的变化。国务院办公厅已建成全国政府首脑机构办公决策服务系统（CHINA - PAC），中纪委建立了全国纪检监察计算机网络系统，国家外汇管理局和各证券分公司均已利用数据网开通中国外汇交易系统，国家经贸委建立了全国生产流通信息网络，在全国数据网上，与全国 1000 多家大中型企业形成联网关系。此外，国家经贸委、税务总局、外经贸部、中国科学院、国家教委、中国旅行社、煤炭、铁路、公安、气象等部门，纷纷利用公用数据网平台组建应用系统。1995 年底，这一完整、统一、多功能的公用数字数据网和分组交换网，已通达全国县以上城镇 2000 多个。提供远程教育和医疗服务，会议电视系统、点播视像节目等多媒体通信业务。无论规模能力和技术可靠性，“九五”期间必将登上一个新台阶，使城市信息化发生质的飞跃。深刻影响城乡人民的生产、生活和交往方式和城市现代化的进程。

遗憾的是，祸不单行。我国自行研制的“东方红三号”通信卫星于 1994 年发射失利，由保险公司赔款购买了应急替代卫星，将于 1996 年年底再次使用长征火箭发射；1996 年 8 月发射美国休斯顿公司制造的中星 7 号，是一颗地球同步通讯卫星，原拟用以接替“超期服役”的中星 5 号，不幸再度失败。发射事故使我国卫星通信目前明显落后于印度。

城市现代化

本世纪中叶，尤其是近 30 年来信息革命，使发达国家处于由工业化向信息化转变的过程。现代化不再等同于工业化，信息化即将替代工业化成为现代化的核心，已经是大势所趋，指日可待的事情。信息技术给企业带来竞争和开放的机制，国际间的开放与合作导致更高层次上的竞争，更进一步激发企业的技术和经济活力，这就是信息技术促进生产力魔幻般增长的内在活力。现代化也不能等同于西方化和资本主义化。中国的社会主义建设有条件比资本主义现代化更快。

搞好城市的规划、建设和管理和现代化，具体地说，我赞同建设部毛如柏副部长（1995）的意见：首先需要有城市化意识。特别是沿海地区出现一些区域性城镇群的同时，需要加速与工业化相伴随的乡村城市化的过程，依靠众多的小城镇网络，吸收原来涌向大城市的剩余劳动力；其次要培养现代化意识。应该认识到城市化不仅是农业人口转化为城镇人口的过程，同时也是人民生活方式的改变和人口素质提高的过程。房屋现代化，屋外脏乱差，基础设施欠账太多，文化教育落后，必将影响精神文明建设，制约城市化的进程；第三要具备社会化的意识，包括建立社会化的服务体系，促进第三产业的发展；实现城市综合开发和房地产经营，推动城市按规划进行建设和管理；第四要强化规划意识，包括城镇和人口的宏观布局，城镇职能和性质的定位，城市设计与周边环境的协调。规划不能落后于建设；第五要增强环境意识，注意改善城市居民的生活质量，重视绿化，防治污染，创造宜人的生活环境，而不仅是房屋和马路的建造；最后一点是树立管理意识，抓好市容市貌整顿，从宏观的经济管理到微观的社区管理、行政管理，克服脏、乱、差，保障生产、生活有条不紊。归根结底，这需要决策者观念的根本转变，对城市化和城市规划要有区域可持续发展的意识和环境意识。需要高屋建瓴，遵循城市化自身的规律，因地制宜，因势利导，去进行规划、建设和管理，促进城市的现代化。

# 面向 21 世纪的中国大地 测量“九五”任务纲要

陈俊勇

国家测绘局

陈俊勇 大地测量学家。1933 年 5 月 16 日出生。原籍浙江宁波，生于上海。1960 年武汉测绘学院毕业，1968 年该院研究生毕业。1981 年在奥地利格拉茨技术大学获科学技术博士学位。曾任国家测绘局总工程师。中国测绘学会理事长，国际大地测量协会（IAG）副主席。现任国家测绘局特邀顾问，国际大地测量与地球物理联合会（IUGG）执行局执委。1991 年当选为中国科学院院士（学部委员）。主要从事大地测量、地球重力场及地球动力学等方面的研究。

## 前言

大地测量在理论、技术、方法等方面的研究对象已逐渐从静止的转变成动态的；由陆地表面扩展到海洋，深入到地球内部；离线的信息获取发展到在线的信息获取；由数字的后处理发展到数字的实时处理；短距离的测量发展到长距离的测量；单一学科的研究发展到和其它测绘学科或其它地学学科的综合研究。

### 一、回顾“六五”、“七五”期间完成的大地测量方面的重要工作

1. 平面基准：建立了独立的大地定位，完成了全国天文大地网整体平差（约 5 万个点），具有 3ppm 的相对精度，确立了中国新的二维坐标系统（西安 1980 系）。

2. 高程基准：确立了更符合实际的黄海 85 高程基准，完成了全国二期一等水准网的布设和计算（100 个环，9.7 万 km）

3. 重力基准：在中国多点（13 个点）多次重复进行了绝对重力测量，在中国直接建立重力基准，消除了波茨坦重力原点起始误差及其长距离的传算误差，完成了重力 85 基准网和重力一等网的布测和计算。

4. 空间大地网：建立了国家卫星多普勒网（35 个点， $\pm 2 \sim 3\text{m}$  精度），建成了 VLBI 站一个（上海），SLR 站二个（上海、武汉）。

5. 野外基线长度基准：建立了符合国际标准的最高精度的北京长阳野外基线长度基准；建立了分布全国的十余个 EDM 长度检定场和北京沙河的 GPS 基线检定场。

6. 天文经度基准：完成了全国天文经度基准网的布设。

7. 航摄检定场：建立了对航摄精度、底片畸变、像机质量等进行检定的野外航摄检定场。

8. 其它：二网改造等。

80 年代（即“六五”和“七五”期间）大地测量工作的特点是：按当时世界上的测绘先进技术对 50 至 60 年代所建立的大地测量基准的更新、补充和发展。

二、“七五”末期建议 90 年代我国要完成的大地测量六项重大任务，即：国家第二期一等水准的复测；国家空间大地网的布设；中国地区重力场

参数的精化；全球定位系统（GPS）卫星追踪网的建立；沿海地区陆海相对垂直位移的研究；青藏地区地壳运动的监测。下面将这些任务在“八五”进行的情况作一回顾。同时对这些任务在“九五”的要求和发展进行评述。

## 国家第二期一等水准的复测及 中国地区地壳垂直形变的研究

### 一、目的和意义

1. 遵循《大地测量法式》所规定的每 20~25 年国家一等水准应复测一次的规定。

2. 采取技术措施，消除和削弱第二期一等水准测量中没有顾及的下列四种主要的系统误差，以向国家和社会提供更精确、更可靠的高程数据。

（1）将视距由原规定的 35m 缩短至 30m，并将中丝视线高不得低于 0.5m 的规定应用于下丝，以消除垂直折光的系统性影响。这是我国根据折光理论结合我国多山区的实际作出的世界首创性的作业规定，经过 5 年 5 万公里的实践，资料初步统计表明，每公里往返平均值误差已由原来的  $\pm 0.5\text{mm}$  降低为  $\pm 0.3\text{mm}$ ，达到了削弱水准垂直折光后水准测量精度的世界先进水平。

（2）严格水准外业观测的时间记录，以准确利用观测时间计算潮汐对垂线偏差的影响，以消除潮汐对南北水准路线的系统性影响。

（3）建立专门检验设施，不准对地球磁场有较大响应的自动水准仪进入一等水准作业，以消除地球磁场对高精度水准测量的系统性影响。

（4）通过引进和自建，建立了对水准尺标准长度的分划改正检验设备，以精确改正水准读数的尺长改正。从而消除水准尺长误差的系统影响。

3. 提供更可靠的全国地壳垂直形变及其速率，这将对地学、工程建设和抗灾减灾作出贡献。

### 二、今后任务

1. 目前陆地高程测量中，最精确可靠的还是水准测量。国家二期一等水准的复测工作在“八五”已完成过半，应“遵纪守法”不动摇地在“九五”继续进行下去，按期完成这一国家高程基准的复测与完善。

2. 完成全国地壳垂直形变速率的推算工作。此外，还应利用这一资料结合其它学科，对我国地壳运动的机制及其可能的后果进行研究和做出评估。

## 建立国家空间大地网， 建立国家高精度三维坐标系统

### 一、“八五”期间工作的回顾

国家空间大地网是为了确立我国的三维坐标系统，它不仅可以改善我国原有的二维坐标系统，而且也是地球科学和空间科学的迫切需要，这个空间大地网应包括 VLBI、SLR 和 GPS 技术所建立和施测的站。

我国目前已建成上海、乌鲁木齐二个 VLBI 站。建成了上海、武汉、长春、北京四个 SLR 站。完成了国家 A 级 GPS 网的布设和计算，已交付使用。1995 年已完成国家 B 级 GPS 网（约 760 个点）的布设。

我国的 VLBI 和 SLR 站的地心坐标精度大体上达到了  $\pm 2 \sim 6\text{cm}$ ，有高有低。国家 A 级 GPS 网平均边长 650km，由于采用了当时比较精确的 SIO 精密星历，10 个 IGS 全球 GPS 跟踪站的高精度地心坐标及其 GPS 跟踪数据，这些数据与 A 级网一起平差，因此取得了该网边长的相对精度达  $1 \times 10^{-8}$ ，点的

地心坐标在 ITRF91 坐标框架中的绝对精度达  $\pm 0.2\text{m}$ 。至于根据国家 B 级 GPS 网的初步计算资料表明，其相对精度优于  $2 \times 10^{-7}$ 。

## 二、今后任务

GPS 技术经过这十年发展已趋成熟，无论在定位、测速、测时的精度和应用范围都有了很大发展，特别是在获取地球动力学的数据方面，如监测地壳形变、板块运动、极移等，若和 VL - BI 和 SLR 技术在投资费用、维持费用、技术难度、数据获取率、数据精度等方面比较，GPS 明显处于优势。因此在“九五”期间，现有的 VLBI 和 SLR 要不断提高精度，进入世界水平，并保持作业率，继续发挥多方面的作用，但不宜再投资兴建新的台站。

在“九五”期间国家 B 级 GPS 网应完成数据处理并交付使用。由于 B 级网施测时间长，在数据处理中会涉及不同历元、不同系统的精密星历、不同坐标框架和地壳运动等一些特殊问题，因此要有仔细考虑的平差方案才能保证 B 级网成果的科学性，使它在一个确定的坐标框架内，在一个确定的历元，有较高的相对和绝对精度。

### 中国地区重力场参数的精化， 以适应资源勘探和空间技术的发展

一、继续填补中国大陆的重力测量空白地区。力争用 3 个五年计划（至 2010 年）填补以  $1^\circ \times 1^\circ$  为格网的重力测量空白地区，力争实测分辨率达到  $10'' \times 10''$ 。

二、“九五”期间完成优于  $15 \sim 20\text{mgal}$  精度（含西部地区）的民用  $1^\circ \times 1^\circ, 30'' \times 30''$  的格网平均重力异常值的推算，力争利用重力场模型和可能获得的国内外重力、地形和测高数据，将中国相当部分地区的格网平均重力异常值的分辨率提高到  $5'' \times 5''$ ，并力争达到优于  $8 \sim 10\text{mgal}$  的精度。

三、完成具有分米级精度似大地水准面的推算工作。推算时以国家 B 级 GPS（水准）网为基础，尽可能利用原有的一、二等天文重力水准网，结合重力和地形资料（全球和局部）改善分辨率。

四、大力利用卫星测高资料改善中国海域的栅格平均海面地形和平均重力异常的精度和分辨率。

五、积极开展小波理论应用于（局部）地球重力场的研究和将这一理论应用于中国多山地区的局部重力场表示。

### 着手建立我国实时动态定位和导航服务系统

#### 一、“八五”期间的进展

基本建成上海、拉萨、乌鲁木齐、北京、武汉五个 GPS 高精度 GPS 永久性跟踪站，并已投入正式运行。

二、“九五”期间应进一步完善和发展全国跟踪网，并在此基础上发展成为我国实时动态空位和导航的综合性服务系统。这一服务系统的功能基本包括三个方面。

##### 1. GPS 跟踪站数据的采集、处理和提供信息等服务。

建立 GPS 跟踪网的通讯和数据处理中心，同时它也是 GPS 的服务中心，这个中心的任务是：

- （1）实时或准实时采集跟踪网的 GPS 追踪数据；
- （2）实时或定期处理这些追踪数据，计算跟踪站的坐标和 GPS 卫星轨

道、星钟偏差、电离层改正等参数；

(3) 建立和国内外 GPS 追踪网 (如 IGS) 的通讯联系, 收集国外 GPS 精密星历, 收集 IGS 追踪站的坐标及其 GPS 追踪资料；

(4) 向社会提供 GPS 精密星历、国内外追踪站坐标、追踪资料等有关信息；

(5) 提供 GPS 的硬件、软件、外业、内业服务。

## 2. 建立全国性和地区性差分 GPS (WADGPS 和 LADGPS) 信息服务

我国 GPS 接收设备, 若顾及用于导航的在内, 超过万台以上, 而且由于 GPS 设备的小型化, 多用途, 低价, 它将在任何与地理环境有关的行业中得到广泛的应用。但是由于美国 AS 和 SA 政策影响, 定位精度大大降低, 特别是对实时 (静态和动态) 定位 (包括陆、海、空的导航和制导), 考虑到今后在经济和国防建设、运输和导航的需要, 利用 DGPS 的伪距或相位差分信息进行实时改正, 将实时定位精度由  $\pm 100\text{m}$  提高到  $\pm 1 \sim 3\text{m}$ 。

在“九五”期间, 应在经济比较发达的省会和省城建立 LADGPS 信息服务。这一信息服务由四个部分组成, 一是在一个具有精确地心坐标的大地点上, 装备一台能输出 DGPS 信息的 GPS 接收机；二是将这一信息转输至当地 FM 电台的通讯设施；三是该 FM 电台利用它播发节目频率的边频带发出 DGPS 信息给用户；四是用户的调制解码芯片和 GPS 接收机。

全国性的 WADGPS 信息服务, 投资大, 运作复杂, 要视美国在 AS 和 SA 政策走向而后慎重决定。

## 3. 将 GPS 信息和 GIS 和 RS 结合起来

GPS 的巨大市场和广泛应用或者说它的生命力在于它和 GIS 的结合。一旦 GPS 和各种类型 GIS 结合或集成所生产的 GPS - GIS 装备, 将在各种行业、各种工种、各种领域中得到应用, 这将是今后十年中最有前途的测绘市场。它的实时动态形式, 将是 GPS - RS, 它的技术完善和用户还有待进一步开发。

概括起来说, 实时动态定位和导航服务系统是一种以固定站长期追踪 GPS 卫星, 采集 GPS 追踪站数据, 处理追踪站数据, 提供 GPS 有关信息服务 (包括差分信息服务) 并发展成与 GIS 和 RS 结合的体系。目前追踪站已初具规模, 对轨道计算、定位软件与 GPS 国际追踪站的通讯联系技术都已基本掌握, 因此在“九五”应不失时机的着手建立这一服务体系, 这种集 GPS 追踪, GPS 数据采集, 数据通讯, 数据处理和提供 GPS 信息服务于一体的网络体系, 是一种集成式的系统工程。

陆海相对垂直运动的研究,

为研究全球变化、减灾防灾做出贡献

海平面上升是全球变化中一种长期的、渐进的, 相当长时间内不易逆转的一种灾害性现象, 这一后果结合风暴潮, 对沿海地区的国计民生影响巨大, 危害严重。我国有 18000km 的海岸线, 沿海地区是中国的财富带和生命带, 因此海平面变化不仅是全球变化中世界性的三大课题之一, 更是作为海洋大国的中国在全球变化中的重大课题之一, 通过研究应该提出中国沿海地区海平面相对运动的预测及建立相应的专题地理信息系统和可能涉及的灾害预测和灾害风险评估。

青藏地区地壳运动的监测

由于这个课题涉及全球性的地学问题，引起世界性关注，因此有关部委已利用多种渠道，获得国内外经费资助，在“八五”用 GPS 在该地区重复多次布网，已进行了第一期地壳运动监测工作。此外，还进行了珠峰地区和珠峰高程的第三次复测，并在该地区建立了集大地测量各种技术的一个基本点，可以作为今后珠峰地区和珠峰高程复测的起始点。

“九五”期间应在该地区第二期地壳运动监测的基础上，积极开展该地区地壳运动机制及相关的地质、地球动力学方面的研究。

### 结束语

建议“九五”期间我国的大地测量重大工程项目要在“八五”的基础上，根据现代科学技术的发展，结合我国国情，做出如下安排：

一、国家二期一等水准复测及相应地壳垂直形变的研究。

完成国家二期一等水准复测的外业任务，数据处理任务，地壳垂直变形速率的推算工作。并结合其它学科，开展动力学机制方面的研究，结合实际资料，总结在消除水准测量系统误差方面的经验和教训。

二、完善国家空间大地网，建立国家高精度三维坐标系统。

1. 对我国 VLBI 和 SLR 的关键是提高精度，多得成果。不论是满足需要，还是技术走向，或是投入产出比例，这二类技术在我国不宜再在数量上做进一步发展。

2. 国家 B 级 GPS 网要完成数据处理。由于观测时间跨度长，数据处理中涉及一系列新问题。要提出相应的计算方案解决这些问题。

三、中国重力场参数精化，以适应资源勘探和空间技术的发展。

力争在 2010 年前消灭  $10 \times 10$  的重力测量空白地区。

研究和完成分米级精度似大地水准面的推算，并结合重力和地形资料改善它的分辨率。大力开展利用卫星测高的在海面地形和海洋重力场方面的研究，开展小波理论应用于局部重力场精细表示的研究。

四、着手建立我国实时动态定位和导航服务系统。

将 GPS 追踪资料，星历、星钟差、电离层等有关信息和数据向用户提供服务。研究和开发 GPS—GIS 集成装置在各种领域中的应用。建立一至二个 LADGPS 信息服务台示范台，使这一技术能在大城市应用于实时动态定位和导航等。

五、继续开展陆海相对垂直位移的研究，为全球变化、减灾防灾研究作出贡献。

提出中国沿海地区海平面相对运动的预测报告和可能受到的灾害评估，以及建立一个相应的专题地理信息系统。

六、青藏地区地壳运动的监测和研究

进行第二期地壳运动的监测工作和对它的机制及影响进行研究。

## 西北水资源问题与对策

程国栋

中国科学院兰州冰川冻土研究所

程国栋 冻土学、水文地质与工程地质学家。1943 年 7 月 11 日出生。上海人。1965 年毕业于北京地质学院水文地质与工程地质系,1986 年获美寒区研究与工程实验室名誉研究员称号。中国科学院兰州冰川冻土研究所研究员、所长。国际冻土协会 (IPA) 主席。1993 年当选为中国科学院院士 (学部委员)。主要从事冻土学研究。

西北地区,包括陕西、甘肃、宁夏、青海、新疆五省区及内蒙西部,在战略上是支撑我国 21 世纪的社会经济可持续发展的重要基地。为了实现国家可持续发展战略,开发该地区丰富的矿产和土地资源,缩小东西部发展的差距,发展少数民族经济,安定边疆,以及使西部一些地区尽快脱贫致富,都需要尽快开发和发展这一地区。目前国家已作出开发和发展西北地区的重大决策,加大了对该地区的投入。

西北地区总面积占全国国土面积的  $1/3$ , 土地资源丰富,本地区具有较大的土地开发潜力,是全国宜农荒地资源分布较广的地区;加上本区光热资源异常充足,草场资源丰富;农业生产的农作物病虫害少,发展农牧业有很强后劲,是缓解我国粮食、肉类等农牧产品供需矛盾的希望。在当前土地资源日益耗竭的现实情况下,西北广大未开发和利用的土地资源成为我国 21 世纪可持续发展的战略后备资源。

西北地区矿产资源种类多、储量大,在全国具有举足轻重的地位。此外,本地区具有绵长的国境线,居民仅占全国总人口的 8% 左右,而且还是许多兄弟民族长期安居乐业之处。这说明本区除了具有重大经济价值之外,还拥有国防、政治和社会等方面的重要意义。

开发和建设西北地区是我国国民建设的需要。实现全国人民生活水平奔小康,首先要减少东西差距扩大的趋势,只有建设好西部,西部奔小康,才能实现全民富裕的宏伟目标。

邹家华副总理在“国家计委加快西北经济发展战略座谈会”上指出:“西北地区发展最大的制约因素是水,当然还有其它制约因素,但是在西北地区,制约占第一位的是水,对经济发展影响很大。不把水的问题安排好,出了问题很难办。”国务委员、国家科委主任宋健也提出:“大西北水资源到底能容纳多少人。一方面祁连山的冰在融化,冰川积雪在减少;另一方面又要大发展,是否有个界限,这样才不至于将来大家都要搬家,形成新的楼兰。”

自 80 年代以来西北地区水资源就进入了十分紧张的状态,供需缺口越来越大,缺水城镇增加,工农业用水紧张,农、林、牧间用水矛盾与一条河流上、中、下游间用水矛盾日益尖锐,已经影响到中下游地区生态和社会经济发展,有些缺水地区经济发展受到严重的约束;另一方面水资源开发利用的前景面临着许多新的挑战,这是因为: 淡水资源显得越来越少,不再成为廉价的资源,目前作为后期可取用的淡水几乎均已开发,或者在今后要进行开发的可引用水资源投资昂贵。 这里的人口仍在稳定地增长,随着我国经济向西部转移,势必带来工业、农业和生活需水及其它用水的成倍增加。

人类活动增加，越来越多的废物、废水，污染着有限的可引用水源，尤其是污染地下含水层，在西北地区将带来急剧减少和损失淡水资源的严重后果。

未来新修水利工程，或因投资较高和资金缺乏，或因社会和环境原因而将拖延实施，使本来存在的供需矛盾加剧。因此，面临 21 世纪的环境与发展的重大问题，归纳总结西北地区水资源研究成果，分析目前水资源开发利用的问题和潜力，提出全面统筹规划、合理安排，持续地利用西北干旱区可利用水资源，来缓解西北地区水资源危机十分必要。

## 一、西北水资源的特点

### 1. 高山与盆地相间分布

西北地区高山环列，基本上形成高山与盆地相间的地貌单元。这种地貌格局使水资源在水文气象条件上，不仅存在水平地带性差异，还存在明显的垂直地带性差异。高山的存在能够截获较多的水汽。如天山西部年降水量最高可达 900mm 以上，并且发育有大面积的冰川和积雪。正是由于高山的存在，西北地区才有较多降水，发育了众多的河流，水资源相对丰富，为我国开发利用西部地区提供了有利的条件，并形成众多的绿洲。

(1) 西北的内陆盆地与高山相间分布的地形，使所有发源于高山地区的河流都向盆地汇集，组成向心式水系。一些水量不大的小河在出山后不久即消失于沙漠与戈壁之中；一些水量较大的河流，在盆地的最低洼处储成内陆湖泊。这些内陆河的上游山区大都有冰川的调节，高山冰雪融水补给比重较大，径流量年际变化相对较小，保证率较高。径流在年内分配上，集中在夏秋季，与农作物需要水量最多季节基本一致，有利于农业生产的供水。

(2) 西北地区盆地结构特别有利于地下水的储存，地下水资源比较丰富。一般来说，西北干旱区盆地的降水很少，对盆地地下水的形成和补给意义不大，但由四周注入盆地的河流，几万年几千年以来渗漏到地层下面积成地下海和地下湖，水量估计是相当可观的。据粗略计算塔里木盆地、准噶尔盆地、柴达木盆地和河西走廊山前平原的地下天然资源约为 314 亿立方米。

(3) 西北地区水资源的变化强烈受气候因素影响。西北地区气候条件对水文的影响主要体现在气温上。温度的情势不仅是蒸发的一个重要因素，影响着水分平衡的各个因素，而且山区的温度状况还直接影响着高山冰雪融水和季节积雪融水量的多寡。特别是一些发源于天山、昆仑山、祁连山等山地的河川径流，融水补给占有较大比重。因此山区流域内气温的高低和变化，会直接影响到河川径流量的变化。

### 2. 共同的地貌纵剖面

西北地区每一个内陆河水系，由源头到尾间都要流经山区、山前洪积、冲积倾斜平原，冲积或冲积湖积平原，沙漠等地貌单元。在岩相上则分别为：裂隙基岩，大孔隙洪积砾石，冲积中细砂和粉砂。从而使地下水埋深分布，在平原地区具有自山前向盆地中心逐渐由深变浅的规律。山区的河流多数是山区基岩裂隙水的排泄通道，因而山区的地下水在河流出山前几乎全部转化成地表水，经河道排到山外。河流进入山前平原后，地表水大量渗漏转化成地下水，然后地下水又在适当条件下以泉水的形式溢出地面，变为地表水，并成平原河流。即地表水 - 地下水 - 地表水的转化过程。西北地区平原地带分布着前山构造，因此可以使这样“渗入”、“溢出”的水资源转化过程重复多次。如甘肃河西走廊地区，由径流区到散失区要经过：中高山地区 - 山

麓丘陵区 - 洪积扇群 - 细土平原 - 低山丘陵 - 洪积、冲积、湖积平原。

(1) 地表水与地下水相互间的大量转化表明，西北地区山前平原现存的地表水、地下水、泉水等各种形式的水资源，在成因上有不可分割的内在联系。地下水资源补给来源，绝大部分是地表水的渗漏，而泉水则又是出露的地下水，二者基本上是出山口地表水的转化与重复，不是完全独立的水资源形式。如果不注意西北地区山前平原水资源存在的这种特殊情况，把地表水、地下水、泉水等作为互不相干的，完全独立的水资源形式，进行相加，就会过分夸大实有水资源数量，造成对西北水资源评价和利用上的混乱。西北地区这种地表水与地下水之间的大量转化与重复，有利于水资源重复引用，使利用率提到很高的水平。如转化条件较好的甘肃河西走廊石羊河流域，在合理开发利用地表水和地下水的情况下，流域总水资源的利用率可以达到 75% 左右。

(2) 西北地区水资源的大量转化和重复，对各种形式的水资源的开发和利用有着深刻的影响和明显的制约。只要牵动转化中的一个环节，以下环节将随之发生变化，并影响到水资源的利用方式。如上游修建水库和高标准防渗渠道的施工，渠系利用率的提高，使地表水在洪积扇的渗漏量不断减少，将大大减少地表水转化为地下水的数量，随之使下游地区泉水的溢出量和溢出地点、平原河流的径流量及其以下地区地下水的补给量减少。又如在上游地区大规模开发利用地下水，降低地下水位，将导致下游地区的泉水及平原河流水量大幅度减少。

## 二、西北水资源问题

### 1. 水量较少

#### (1) 水资源现状

西北地区年径流量大约为 1000 亿  $m^3$ ，占全国的 4% 左右。人均占有量和耕地亩均占有量则更少（如表 1、2）。河西走廊地区人均占有地表径流量为世界平均水平的 15.2%，为全国平均水平的 72.7%；石羊河流域分别为 6.9% 和 32.8%；新疆分别为 50.1% 和 23.9%；但乌鲁木齐市则只为 6.0% 和 28.7%。耕地亩均占有年径流量，全国平均为 1, 886 $m^3$  / 亩，河西走廊为全国平均的 39.4%，石羊河流域不及 18.5%，新疆 92.4%，昌吉州只有 21.6%，内蒙西部阿拉善内流区年径流量只有 0.24 亿。

表 1 西北人均占有地表径流量

地区	占世界平均水平	占全国平均水平
石羊河流域	6.9 %	32.8 %
河西走廊	15.2 %	72.7 %
新疆	50.1 %	239 %
乌鲁木齐	6.0 %	28.7 %

表 2 西北地区耕地亩均占有年径流量

地区	亩均占有年径流量
河西走廊	39.4 %
石羊河	18.5 %
新疆	92.4 %
昌吉州	21.6 %

加上部分水资源盐碱度高，难以利用，使水资源可利用量更少，水资源数量贫乏。尤其是西部经济较发达地区，缺水的矛盾更加尖锐。

### （2）未来变化趋势

由于气候变化和人类活动的影响，整个地区呈现干旱化的趋势。自 20 世纪以来，全球变暖，气温波动上升，以 80 年代和 50 年代相比，新疆升高 0.59℃，青海升高 0.31℃，超过全球同期增温 0.24℃；80 年代和 60 年代相比，青海升温 0.47℃，甘肃升温 0.28℃，蒸发和消融增强，显示西北是全球变暖中的敏感地区。与此同时引起水资源量产生了巨大变化，表现在以下几个方面：

冰川：高山固体水库减少，如乌鲁木齐河流域冰川面积从 1964 年的 48.2km<sup>2</sup> 减至 1992 年的 40.9km<sup>2</sup>，损失 15.1%；1 号冰川物质平衡亏损，60 年代为 -53mm/a，80 年代增至 -346mm/a，而到 1990/1991 年增至 -706mm/a。

河川径流：新疆 60 年代年径流量为 805 亿 m<sup>3</sup>，80 年代降为 724.5 亿 m<sup>3</sup>。新疆北部和祁连山东段径流减少显著，新疆南部以冰川补给为主的径流量略有增加。

湖泊：大量湖泊萎缩以至干涸，青海湖 1908～1957 年间水位剧烈下降，平均每年下降 17.2cm，显然经历了一个大的干旱期；1958～1990 年平均水位每年下降 7.4cm，相当于年净亏损水量 3.25 亿 m<sup>3</sup>，其中人为用水因素只占 27%。还有若干湖泊因水资源开发利用不当而干涸，如玛纳斯湖（50 年代面积为 550km<sup>2</sup>）、艾丁湖（50 年代面积为 12km<sup>2</sup>）、罗布泊（30 年代面积为 1,900km<sup>2</sup>）、西居延海（水面曾达 560km<sup>2</sup>）等。

积雪：平原积雪，北疆稳定积雪区域 1978～1987 年 10 年间较 1957～1987 年的 30 年间冬季积雪量平均减少了 13.6 亿 m<sup>3</sup>，高山积雪则略有增加。

地下水：若干地区地下水过量开采，如乌鲁木齐附近、甘肃民勤附近地下水开采量远大于补给量，地下水位下降数十米以至上百米（如乌鲁木齐猛进水库以北承压水埋深 20 年下降了 70～110m）。随着未来气候继续变暖，预期 2030 年左右西北地区温度上升 1℃左右，降水增减的不确定性较大，增加的可能性较大。人为用水因生产发展而大幅度增加，而冰川积雪、湖泊将进一步萎缩，山区许多固体水库的消失，河流水量不稳定性增加。以冰川融水补给为主的河流将经历初期流量增加，后期大幅度减少的过程。

### （3）供需预测

如表 3 所示到 2000 年西北地区预测总缺水量为 150 亿 m<sup>3</sup>，最大缺水将发生在农业生产上，这将给我国未来的农业建设带来极大的阻碍。

表 3 西北干旱区水资源总供需平衡表 \* 亿 m<sup>3</sup>

	工业	农业	畜牧业	农村人 畜饮水	城市生 活用水	不可 预知
总需求	28	470	165	27	5	5
700	4 %	67%	24%	4%	0.5%	0.5%
总供给	地表径流			地下水		
550	450			100		
盈亏	总供给 - 总需求					
	550 - 700					

\*据国家计委及国家统计局资料,西北干旱区至 2000 年缺水 150 亿 m<sup>3</sup>

## 2. 分布不均匀

西北干旱区水资源分布不均表现在两个方面：

(1) 地域上：北多南少，西多东少。新疆水资源集中在较湿润的西北部，阿尔泰和伊犁地区的地表径流量占全疆的 35.6%，而政治、经济、文化和工业中心乌鲁木齐市只有 1.1%。吐哈盆地为新的石油基地，地表径流只有 2.0%。面积约 56 万 km<sup>2</sup> 的塔里木盆地为近年来石油开发的热点地区，地表径流只占全疆的 39% 左右，而且还主要分布于盆地边缘。河西地区三流域，以东部石羊河流域水资源量最少。

(2) 季节上：春旱、夏涝、秋缺、冬少。降水量季节分配的区域性变化较大，受西北环流和北冰洋气流输送水汽影响的北疆地区，降水多集中于春、夏季，秋季次之，冬季最少；受太平洋和印度洋季风环流输送水汽影响的甘肃地区，降水则主要集中于夏季，其次为春秋季节，冬季降水量很少。南疆地区降水的季节分布和甘肃地区类似。除了阿尔泰和塔城等少数区域外，春旱是新疆最大的自然灾害，同时，夏季又经常有洪水泛滥。在河西走廊，4~6 月份河道天然来水量只占 19%~31%，而这段时期灌溉需水量则占全年的 34%~45%，来水量满足不了目前条件下的农业灌溉需要，造成大面积农作物的大量减产。据统计在平水年份，河西地区由缺水而延迟灌溉，使受旱面积占播种面积的 30% 左右。这种状况影响和制约着西北地区的生态环境变化和社会经济的持续发展。

## 3. 水资源严重浪费

西北水资源一方面很紧缺，另一方面浪费现象十分严重，大部分流域沿袭历史上多口引水的方式灌溉，水量浪费大。中游绿洲的平原水库和地下水位较高的地区，由蒸发造成的无效消耗的水量也不少。

(1) 农村：农田毛灌定额大，超量引水，大水漫灌、串灌现象依然存在。北疆地区毛灌定额达 1000~1500m<sup>3</sup>/亩，个别达 2000m<sup>3</sup>/亩，造成水资源的大量损失。目前采用节水措施的农田面积不大，且多为常规节水方法，田间水利用率很低，渠系利用系数平均为 0.3~0.45，加上渠管没有建立完整的引排水控制设施，排水出路不畅。当洪水来临，地下水位抬高次生盐渍化严重。石羊河河川径流引用率为 73%，全流域净利用率为 41%，一半以上水浪费掉；黑河流域河川径流引用率 65%，净利用率仅 31%，近 2/3 的水没有发挥作用。流引用率 65%，净利用率

(2) 城市：乌鲁木齐市人均日耗水量为 89 升/人·日；石河子为 100

升/人·日。自备井人均平均用水量为 220 升/人·日。由于自来水管理不严格和收费较低造成浪费十分严重。

(3) 工业生产：工业生产上浪费水的现象也较普遍。工业生产综合万元产值需水量兰州地区为 370 吨，乌鲁木齐为 707 吨，西宁为 1764 吨，而东部青岛仅用 97 吨，体现西北工业生产耗水量较大。

#### 4. 水环境恶化

水环境恶化包括：土地荒漠化、土壤盐渍化和水体污染化。

##### (1) 土壤荒漠化

中国沙漠化土地约为 149 万  $\text{km}^2$ ，占全国总面积 15.5%，西北地区荒漠化土地则占荒漠化总土地的 90%。

土地荒漠化正在逐渐蚕食人们赖以生存的绿洲，新疆 90% 以上的人口聚居在占总面积的 4% 的绿洲上，前景也不容乐观。在过去 25 年间，西北干旱区土地荒漠化约为 15 万  $\text{km}^2$ ，每年以 0.2~0.3 万  $\text{km}^2$  速度增加，其主要原因在于浪费水资源和不合理开发利用水资源，如再不断加大治理强度，后果将不堪设想。

##### (2) 土壤次生盐渍化

西北干旱区由于水资源利用不当，土壤盐渍化面积约为 3000 多万亩，占全国盐渍化土地的 1/3。新疆有 1883 万亩盐渍化土地，占总耕地面积的 30.6%，而南疆为 484 万亩，占耕地总面积的 48.8%。

##### (3) 水体污染化

由于灌区回归水和城市、工业废水的排放，地表水、地下水污染严重。

塔里木河阿拉尔站近 30 年来矿化度逐渐上升。

1960 年 5~12 月矿化度为 0.33~1.28g/L；1965 年洪水期为 0.36~0.45g/L，枯水期为 2.0~3.5g/L；1966~1977 年为 0.44~1.02g/L，枯水期为 2.56~5.4g/L；到了 1981~1984 年矿化度变为 0.4~4.0g/L；1988 年最大矿化度超过 7g/L。

乌鲁木齐市水磨河沿岸几家纺织、印染、皮革和化工厂排放的未处理的废水约为  $4 \times 10^3 \text{m}^3/\text{日}$ 。1985 年乌鲁木齐市污水为  $0.78 \times 10^8 \text{m}^3$ ，其中工业废水为  $0.53 \times 10^8 \text{m}^3$ ，有害物质为 200 多吨，而废水处理仅占总污水的 32%，造成地下水污染面积超过 400 $\text{km}^2$ 。

石羊河 70 年代中至 90 年代初，开采地下水量累计超过  $36.28 \times 10^8 \text{m}^3$ ，地下水位下降 2~17m，绿洲内部形成面积达 986 $\text{km}^2$  的三个漏斗。下游民勤提取地下水  $4.5 \times 10^8 \text{m}^3$ ，地下水矿化度上升 1~7g/L，使 7.6 万人和 12.4 万头牲畜饮水困难，37 万亩耕地弃耕。由于水质恶化使西北地区地方病加剧，如青海北乐都居民饮用硫酸盐含量较高的水，得地方性腹泻；饮用含碘较低的自来水，得地方性甲状腺肿瘤。而宁夏固原地区由于水中含氟高，使氟骨病普遍存在。陕西延安、甘肃庆阳地区易得克山病和大骨节病就是由于本地水中含较高的腐殖酸和硒的含量过低。

### 三、可引水量和可用水量

可引水量系指流域内运用各种水利设施和手段引进渠道和管道的毛水量（包括重复引水量）。由于在西北干旱区地表水与地下水之间有较大数量的转化，水资源可重复引用，因此，它可大大超过流域的水资源总量。如新疆乌鲁木齐河流域，水资源总量为  $6.431 \times 10^8 \text{m}^3$ ，而可引水量为  $8.478 \times$

108m<sup>3</sup>，是水资源总量的 131.8%。河西石羊河流域的水资源总量为 16.995 × 108m<sup>3</sup>，可引水量达到 18.569 × 108m<sup>3</sup>，是总量的 109.3%。

可用水量系指通过各种水利设施和手段输送到用水户的水量，在农业上为末级渠道引水量，在工业和生活上则为各用户的供水量。根据水量平衡原理，由于水资源在输送和循环过程中不可避免地要有蒸发损耗，能够利用的只是其中的部分，所以可用水量总是要小于水资源总量。如乌鲁木齐河流域可用水量为 5.579 × 108m<sup>3</sup>，是总量的 86.8%；而石羊河流域为 12,875 × 108m<sup>3</sup>，是总量的 75.7%。水资源最大可引量和可用水量与流域水利化和水资源开发利用程度密切相关，渠系和田间水利用率越低，可引水量越大，可用水量越小。

#### 四、对策

对于西北这样一个特定的地区要搞好水资源的合理开发利用需要做到：强化管理，科技兴水，增加投入。

##### 1. 强化管理

西北水资源管理工作滞后，至今仍大体上实行清朝雍正年间的“均水制”。从横向上看，本区域跨越新疆，内蒙，陕西，甘肃，宁夏等地区；从纵向上看，农业、水利、林业、环保、城建等部门分别管理农、林、牧、工矿业、城市用水。这种格局无法按流域实行科学的管理，所以必须改变现在管水体制，尽快成立按流域统一的，有权威的水利管理机构。健全各级灌区水管所（站），统一管理水利工程，协调用水，监督各用水户遵守水法、水规，按方收费，实行全流域强有力的统一的调度。只有这样才能克服目前水资源开发利用上的诸多弊端。这种按流域统一管理的体制可确保水资源合理、高效的开发与利用。

##### 2. 科技兴水

西北地区水资源合理开发利用是一项复杂的系统工程，必须依靠科技兴水，努力使科学技术与治理实践密切结合，加强典型示范，培训专门人才，重视适用技术的推广和新技术的应用研究，要在管理的全过程中贯穿科学技术的应用，把科技转化为生产力，真正做到科学管理。

依靠科技兴水，要做好四方面的工作即摸清家底、合理配置、高效利用、优化环境。

##### （1）摸清家底

一个地域空间总存在一个阈资源，对承载能力的大小起主导作用。湿润地区，水资源充沛，因而起主导作用的是土地资源和矿产资源。但在西北干旱区，水资源有限，而土地资源和矿产资源相当丰富，因而水资源就成为西北干旱区的阈资源，水资源的多少决定了其承载力的大小。所以在西北地区要使社会、经济持续发展必须搞清水资源的家底，了解水资源可利用量的多少，为此需要：

预测在气候暖干化、冰川退缩的情况下，未来出山口径流的变化。加强上、中、下游河道水量预报和估算，评价流域环境质量。目前河西流域的现状用水情况大致清楚，但还有需进一步查明的问题，如甘蒙输水渠修建后，黑河地表水对地下水补给的影响问题仍需进一步研究，维系绿洲的生态用水量也待进一步查明。

##### （2）合理配置

在摸清家底的基础上，应按照“以水定地、以水定人口、以水定发展规模”的原则，对西北干旱区内陆河流域的水资源进行合理配置。按照流域是一个完整的地表水和地下水相互联系的生态系统的观点，科学地处理好上、中、下游用水关系；农、林、牧、生态与工矿、城市用水关系。地表水和地下水联合开采的关系，以求得社会效益、经济效益和生态效益的统一。

处理好节水和调水的关系。按照西北地区的实际情况，应以节水为主，适当调水，调水也应是在节水基础上的调水。从长远发展看，必要的跨流域调水工程是需要的，要在全流域规划的基础上，作好工程前期的可行性论证。

开展流域水资源多目标规划和管理的研究。

### （3）高效利用

西北地区必须建设高效节水型环境。无论是农、林、牧、工矿城市用水还是生态用水，都要从高效节水的观点出发去考虑问题，要像推广计划生育那样推行高效节水，在宣传、措施、技术、队伍上落到实处。节流是目前缓解西北干旱区缺水矛盾的关键所在。一方面西北干旱区节流潜力很大，另一方面是既缺水，又因开发管理不善和技术条件落后，造成水资源大量浪费。目前西北地区水资源的利用率仍很低，一般情况下每方水仅生产 0.2 ~ 0.5 公斤粮食或 0.1 ~ 0.8 公斤生物生产量，若按目前在试验地的经济用水种植，不仅可大大节约用水，而且还可提高单位水的产值和产量。

引起灌溉水浪费主要为渠系渗漏和田间损失。渠系渗漏的原因有渠系工程不配套，灌区工程配套水平低，渠道防渗衬砌率低。目前渠系利用系数仅达 0.30 ~ 0.55。即使在渠系利用较高的河西灌区，也是经过十多年努力由原来 0.3 提高到现今的 0.55，若增加农田水利工程投入，以提高渠系利用系数入手，在农田灌溉上节约 10% ~ 15% 的用水量是完全可能的。田间损失是由于农田灌水技术落后，土地不平整，耕作粗放，灌水不适时适量，管理水平低造成，因此从加强农田基本建设，平整土地，改大块灌为小块灌、改漫灌为畦灌等都是最简单有效的节水措施，节水也可以达 10% ~ 15%。只要在已建成的灌区中采取节水措施，就可以挖掘出很大潜力，如采用了喷、滴灌、渗灌和地膜覆盖耕作等新的节水灌溉技术，节水潜力更大。此外西部地区在工业、林业上节水潜力也很大。

### （4）优化环境

西北地区生态环境十分脆弱，而水资源的开发利用又对这种脆弱的生态环境有决定性的影响，“有水是绿洲，无水是沙漠，水多盐渍化”。所以在西北地区水资源开发利用上必须贯彻生态环境优先的原则，以求得生态效益和经济效益的统一。生态环境的变化具有一定的调控性。人类在开发利用西北地区自然资源过程中，变自然生态系统为人工生态系统，使其向高效能方向发展。生态环境的变化又具有必然性。其中有些变化对人类有利，是追求的目标；有些变化对人类不利，需避免、防止。有些变化是可以避免的，有的则不可避免。片面强调保护，使生态系统回到低效能自然平衡中的想法是不切实际的；片面强调经济效益而严重破坏生态环境是不可取的。所以开展西北干旱区天然绿洲转化的有效途径的研究十分必要。

## 3. 增加投入

要达到水资源的合理开发利用，投入是关键。

（1）西北地区水土资源开发潜力很大，应成为我国未来农业经济开发重点区域。水利是命脉，按照国家向中西部倾斜的政策，考虑到西北地区的长

远发展，国家应在投入上对西北的水利建设有所加强。

（2）节水为主、适当调水是西北地区水资源合理开发利用的基本原则。但国家目前的政策导向不利于节水的提倡。1995 年国家对农业增加投入 35 亿，其中 30 亿用于大中型水利工程，对小水利工程投入较少，而在节水方面投资更少，使西北水资源的经济效应未能充分发挥。建议国家在政策导向上采取鼓励节水的有效措施，促进西北地区开发和利用水资源新模式的尽快形成。

# 现代土壤学中的农业持续发展问题

赵其国

中国科学院南京土壤研究所

赵其国 土壤地理学家。1930年2月25日出生。湖北武汉人。1953年华中农学院毕业。曾任中国科学院南京土壤研究所所长、研究员。现任中国科学院农业研究委员会主任、江苏省科协副主席；中国土壤学会理事长、国际土壤学会盐渍土委员会主席、国际土壤学会东亚和南亚土壤协会主席等职。1991年当选为中国科学院院士（学部委员）。

主要从事土壤地理、土壤资源评价等研究。曾获国际道库恰耶夫奖和多项国家科技奖。

“民以食为天，食以土为本”。土壤是人类生存的基本资源，是农业发展的重要基础。当前在我国传统农业正向高产、优质、高效的现代农业转变时期中，土壤学也正在随着社会发展，朝向现代土壤学的方向转变。因此如何从土壤及现代土壤学的观点，特别是从土壤肥力与土壤植物营养的观点，正确地认识与解决我国，包括江苏省当前农业持续发展中所面临的问题，具有重要的理论与实践意义。

## 一、现代土壤学的发展趋向

随着社会的不断发展，土壤作为人类赖以生存的重要自然资源，亦正在逐渐或迅速地发生变化，当今土壤学已由原来仅研究土壤本身向土壤圈及其与各圈层之间的关系的方向扩展。

土壤圈是地球上气圈、水圈、生物圈及岩石圈交界面上的一个圈层，它处于四个圈层的中心，既是地球各圈层物质循环与能量交换的枢纽，又是地球各圈层间相互作用的产物。由于土壤圈处于地圈系统，即上述四个圈层的中心，因而它具有：永恒的物质迁移与能量交换；最活跃与最丰富的生命力；“记忆块”与“基因库”；时空变异与限制性；资源的再生、利用与保护等特性，并且具有支持与调节生物过程与养分循环（对生物圈）；影响大气组成，水平衡与释放温室气体（对气圈）；影响降水分配与平衡（对水圈）；影响土壤发生与地质循环（对岩石圈）等功能，它的作用在于通过土壤圈与其它圈层的物质交换影响全球变化，通过人为活动对土壤圈的强烈作用，对人类生存与环境起重大影响。

因此，从土壤学的发展看，今后的研究共有两个方向：

第一、研究土壤圈与地球其他圈层的关系。

第二、研究土壤圈物质迁移与能量平衡对人类生存环境（持续农业）的影响。

上述研究方向可概括为以下四项研究任务：即土壤圈物质循环与全球土壤变化；水土资源时空变化、开发利用与恢复重建；土壤肥力演变规律、发展趋向与调控对策；农业持续发展、区域治理与生存、环境建设，其中通过土壤圈物质与养分循环，研究与解决农业持续发展与生态环境建设是关键。

## 二、现代土壤学面临的挑战

从当前社会与经济发展对土壤的要求看，现代土壤学正在面临着严峻的挑战。

### 1. 人口与粮食

到本世纪末，世界人口总数将达到 62.41 亿，其中发达国家 12.72 亿，发展中国家 49.69 亿，将来世界粮食需求增长率对发达国家应在 1.2%，发展中国家应在 3.1%~3.7%才能满足社会发展的需要。所以到 2000 年，世界粮食的需求量为 21.3~22 亿吨，比 1990 年的粮食总量要净增 3.5 亿吨。面对这样的严峻形势，生产条件落后的发展中国家将承受巨大的粮食生产压力。

目前我国人口每年正以 1400 万净增人数增长，预计到本世纪末，人口总数可达 13 亿左右。以人均 400 公斤的年消费水平计算，需要粮食 5.2 亿吨，然而要在仅占世界耕地面积 6.8%的土地上，获得世界粮食生产总量的 23.6%，任务是极为艰巨的。

江苏省 1991 年人口是 1949 年的 1.95 倍，1993 年人口为 6967 万人，粮食总产 3035 万吨，人均达 435 公斤，从全国看，粮食产量较高，但 30 年来，由于人口增长，人均耕地已不足 1 亩，耕地负载量比 60 年代增加 2.5 倍，问题也十分严峻。

### 2. 资源与环境

当前，全世界拥有耕地 7.3 亿公顷，预计到本世纪末可再扩大耕地 1.8 亿公顷，总共为 9.1 亿公顷。但是，由于人类不合理的开垦土地，近年来土壤退化不断加剧。全球范围内的水土流失面积已发展到总土地面积的 16.8%；沼泽化、沙漠化的面积也分别达到总面积的 10%和 33%；次生盐渍化面积约 12 亿公顷；耕地被侵占近 2 亿公顷；20%耕地存在着养分亏缺；在 76 个发展中国家中，森林以每年 1130 万公顷的速度砍伐，而造林仅为 110 万公顷。世界上仅有 0.27%的水资源可为农业、工业和城市利用，有人预测，不出 20 年，淡水的供给将不能满足需要。

我国的水土及森林资源按其绝对量来说名列前茅，但人均占有量很低。人均耕地、林地和草地分别仅占世界人均量的  $1/3$ 、 $1/5$  和  $1/4$ ；水资源总量居世界前列，而人均只占世界的  $1/4$ ；森林资源居世界第七，但人均量是第 130 位。在此情况下，土地承载压力巨大。全国中低产田已占总耕地面积的  $2/3$ ，目前约有 2000 万公顷的耕地受到干旱威胁。水土流失面积占国土总面积的  $1/5$ ；沙漠化的土地达到 3330 万公顷，并且平均每年以 15 万公顷的速度扩展；草原退化面积 8700 万公顷，并且每年以 120 万公顷左右速度增加。随着工业的发展，污染日益严重，每年废水排放量为 368 亿吨，烟尘排放量为 1445 万吨，受污染的耕地面积约 670 万公顷，酸雨对江南农业生产的影响也越来越严重，仅  $\text{SO}_2$  的危害，每年可达 270 万公顷。

江苏省人多地少，自然资源有限，土地总面积 10.28 万平方公里（占全国 1.1%），总人口 6843 万人（占全国 5.7%），建国以来，累计占耕地 1887 万亩，实际减少 402 万亩，人均耕地由 2.77 亩降至 1.2 亩（按农业人口计），低于全国水平。低产田 4538 万亩，占耕地 66%（耕地面积为 6782 万亩），每年废水排放总量近 4 亿吨，全省几乎找不到未受污染的 1 级水，太湖地区 80%的河湖呈不同程度的富营养化。

面对上述挑战，今后相当长的时期内，提高粮食生产是主要的任务。现代土壤今后的发展必须为人类享有充足的食物和清洁的环境作出贡献。

从一般意义上讲，提高粮食生产可通过扩大播种与灌溉面积、合理增施化肥、选育优良品种、采用先进的科学技术、实行集约化经营、增加劳动力投入等途径来实现，归结起来是扩大生产规模和提高集约化程度。对于扩大生产与土地规模，对我国来说潜力不大，全国仅有荒地 3300 万公顷，可利用的草原 2 亿公顷；可利用的淡水水面及沿海滩涂 1300 万公顷。江苏省耕地的后备资源仅有 600 万亩，其中海涂约 200 万亩，荒地与荒丘约 400 万亩，据分析，若在本世纪开发 1100 万公顷的宜农荒地和垦殖 90 万公顷的滩涂，需要投资 740 ~ 1060 亿元，这是现有国力难于承担的。因此，重点宜放在提高资源的集约化与利用效率，即从解决粮食增产与农业持续发展的途径着手，其中包括五点：（1）中低产田的综合治理；（2）提高化肥利用率；（3）提高水资源，特别是土壤水资源的综合利用率；（4）提高现有耕地集约化程度；（5）优化农业生态模式。同时，必须采用开发和治理并举的政策。防止造成环境污染，对社会形成公害和产生经济效益。

### 三、土壤肥力与农业持续发展

土壤肥力是土壤的本质特性，土壤的概念是和它的肥力分不开的。由于土壤具有肥力，并能不断地提供植物（包括农作物）生长所需的各种土壤因素，保持农产品产量与质量的稳定与提高，因此，土壤肥力是农业持续发展的重要基础。

#### 1. 土壤肥力的概念

土壤肥力是指“土壤在某种程度上，能不断地同时供应在植被生长期中所需要的养分、水分、空气与热量的能力”。这一概念，共包括以下内容：

第一、土壤养分、水分、空气与热量（即养、水、气、热）是土壤在生物与环境共同作用下不断发展形成的，它们处在不断循环与再循环的相互作用中，人为活动是决定土壤肥力因素发展方向的基本动力之一。

第二、土壤肥力处在持续（提高）、退化与重建的动态平衡中并具有明显的时、空特征，在自然条件、特别是在人为作用影响下，土壤肥力处于持续（提高），退化与重建的相互转化的不稳定阶段。

第三、土壤肥力（养分）退化与肥力（养分）重建过程是普遍存在的，人类的任务在于调节这两个相反的过程，使其向有利于土壤肥力提高的方向发展，其中调节土壤生态系统养分循环与平衡是关键。

第四、土壤肥力的保持与提高是在动态平衡中建立的，除土壤肥力退化外，需在土壤物理性质改善基础上（空气与热量平衡），根据不同植物的需求，调整养分与水分的比例与水平，并注意有机无机肥料的平衡施用，其中调节再循环过程是核心。

第五、由此可见，土壤肥力是建立持续农业的重要的物质基础，通过调节土壤退化与重建过程，不断培育持续高产的土壤肥力，是建立持续农业的根本措施。

#### 2. 土壤植物营养在持续农业中的作用

土壤植物营养元素，即土壤养分是土壤肥力的主要组成部分，它对农业持续发展有重要影响。

据我国 1978 ~ 1984 年 6 年统计，每亩增施化肥 4.1 公斤，增产粮食 68 公斤；1984 ~ 1993 年 9 年间，每亩增施 6.1 公斤，增产粮食 34.92 公斤。这与过去记载的每公斤化肥（养分）能增产粮食 8 公斤，粮食增产有 35% 是靠

施用化肥的结果相一致，说明氮、磷、钾肥的施用对作物增产的明显影响。

首先，氮素是作物营养元素之首，施用氮肥是提高农产品产量最有效的手段之一。据联合国 FAO 统计，1991 年全世界氮肥施用量为 8000 万吨氮（相当于 4.0 亿吨硫酸铵），其中，我国氮肥施用量达 1726 万吨氮（相当于 8630 万吨硫酸铵）占世界氮肥用量的 21.6%，为世界首位。江苏省氮肥施用量 157 万吨，占全国 9%，但值得注意的是，各种氮肥品种的氮素，当季利用率均不高：硫酸铵为 30%~42.7%，尿素为 30%~35%，碳酸铵为 24%~31%。这是因为，氨挥发和硝化 - 反硝化作用的结果。据近 30 年的研究，水田化学氮肥损失为 50%，旱地为 40%，即每年损失的化肥氮量相当于 3884 万吨硫酸铵，价值人民币 285 亿元，如果把氮素损失减少 10%，每年即可减少损失 30 多亿元。此外，农田生态系统中加入的肥料氮的损失通过径流及淋洗进入水体（ $\text{NO}_3$  等），不仅污染饮用水，而且也引起河、湖富营养化，如太湖地区 50% 的饮用水样中  $\text{NO}_3$  浓度超标，38% 的井水样  $\text{NO}_3$  浓度超标，因此，如何合理施用并控制氮肥损失，是氮肥在农业生产的重要问题。

磷也是重要的植物营养元素之一。据有关资料“磷是不能重复利用的资源，如以每年耗磷矿 9400 万吨计算，世界磷矿的储量只能使用 100 年”。据 1993 年统计，我国磷肥用量已达 750 万吨（ $\text{P}_2\text{O}_5$ ），江苏省 38.3 万吨，占全国 6%，但当季植物只能利用 10%~25% 左右，有近 75%~90% 的磷肥积累在土壤中，其数量相当可观。研究表明，磷肥施入土壤后，大都被固定，各地区土壤全磷通常高于有效磷几百倍。由于长期施用磷肥（1991 年我国磷肥消耗为世界第二位），我国从 70 年代中期起，农田磷素循环即基本达到平衡。因此，如何利用土壤中的累积态磷，是重要的科学问题。此外，随着土壤中累积态磷的增加，释放到径流中的磷将会增加，水体中只要含 0.02ppm 的磷，将使水体开始富营养化，并威胁水生生物的生存，这一问题也应引起注意。

我国钾肥资源紧缺，钾素化肥的利用近年虽有增加（1991 年，我国钾肥消耗量占世界第四位），但从钾的投入与产出量比较，每年均为亏缺，近年亏缺量达 500 万吨左右。1993 年，全国施用钾肥仅 212 万吨，江苏省 7.9 万吨，占全国 3%。从目前情况看，要从作物中将所摄取的钾素全部归还给土壤仍很困难。因此，耕地土壤严重缺钾的状况将继续存在。

微量元素在氮、磷、钾施用的基础上，也出现不平衡与亏缺情况，并对植物生长起限制作用，它们在植物营养中也很重要，我国从 50 年代开始，广泛开展了土壤、作物微量元素含量丰缺研究和微肥施用技术的试验示范，制定了几种主要作物锌、硼肥的施用技术规范，取得显著效益。

除了氮、磷、钾素以外，有机肥也是很重要的植物营养来源，并对农业持续发展有重要影响。我国是具有施用有机肥传统的国家，1990 年与 1949 相比，我国有机肥增加了 2.6 倍，但由于化肥用量增加，有机肥在肥料总量中的比重不断下降。80 年代初，有机肥与化肥各占一半，1990 年有机肥占总肥料的 37.4%，其中 N、 $\text{P}_2\text{O}_5$  分别占 23.8% 和 31.7%，而  $\text{K}_2\text{O}$  占 79.3%，说明有机肥在调节氮、磷、钾比例中的作用。但目前有机肥用量不断减少的趋势，值得引起注意。

此外，土壤 - 植物根际营养自 70 年代末以来已成为土壤学研究的最活跃领域之一。我国对在水稻根 - 土界面的显微特征、根际养分浓度梯度变化、禾谷类作物缺锌条件下根系特定分泌物等方面，都开展了大量研究，这些研

究对推动农业持续发展具有重要的理论与实践意义。

以上简单概括了我国在土壤植物营养研究方面，对农业持续发展所取得的进展。但从粮食增产与植物营养，特别是氮、磷、钾肥投入产出的平衡情况看，还存在不少值得重视问题。

### 3. 土壤植物营养在促进农业持续发展中的问题

当前，在我国农业持续发展，特别是在加速粮食增产的形势下，如何注意在施肥条件下，土壤植物营养的投入、协调与平衡，具有重要的理论与实践意义。

#### (1) 调整氮、磷、钾的施肥比例，注意平衡施肥

最近的研究表明，我国在化肥大量投入初期（以 1978 年为代表，全国化肥总量为 884 万吨），全国各个地区粮食单产均随化肥增加而提高；在化肥大量投入中期（以 1984 年为代表，全国化肥投入总量 1739.8 万吨），东北、西北、华北和西南地区粮食单产继续随化肥增加而增高，但在东南地区，则出现了粮食单产增长速度与化肥使用量增长速度不成比例的现象；在化肥大量投入的近期（以 1993 年为代表，全国总用量达 3156.3 万吨），东南地区出现了增加化肥而减产的趋势，其他地区虽保持多施化肥多增产的势头，但增产强度有所差异。产生这种现象的原因，从植物营养平衡的角度看，主要是我国化肥一直以氮肥为主，到 1993 年，仍占施肥总量的 68.5%，氮、磷、钾比例为 1 : 0.31 : 0.12。江苏省的比例为 1 : 0.24 : 0.05，而 1985 年世界化肥的比例已达 1 : 0.43 : 0.37。值得注意的是，在过去氮肥充分施用和磷肥不断补充的情况下要特别重视钾肥及微量元素的补充和平衡施用问题。此外，必须注意不同地区、不同土壤特点，并针对作物需求，提出不同的 N、P、K 比例，采用平衡施肥技术，只有这样才能保持农产品产量的稳定增长。

#### (2) 充分发挥农田养分循环的肥源潜力

从土壤植物营养元素在农田中再循环的角度看，根据我国实情，需要逐步建立低能源（化肥）投入、高养分循环与高作物产出的持续农业发展模式。通过研究，如按 1989 年农业资料计算，我国目前可能用于养分再循环的肥源潜力高达 3514.3 万吨养分，其中包括人畜粪肥、秸秆、绿肥和饼肥，这些养分比我国 1989 年的化肥总量多 1.96 倍，比同年消耗化肥量高 1.69 倍，是当年化肥进口量的 4.5 倍。人畜粪含有丰富的氮素，秸秆主要含钾，水稻籽实中氮、磷占地上部分总量的 60%，玉米占 70%，小麦占 80% 以上，小麦秸秆含钾量占总量的 80%。所有这些充分说明，我国农业增产在发挥农田养分再循环的肥源潜力上有着广阔的前景。

为了充分发挥农田养分循环的潜力，首先要在农田养分再循环的基础上，建立定量的有机养分的施肥体系。现在可以通过建立模型，计算出某一有机肥源（如秸秆还田）条件下，化肥（如钾肥）的合理用量。第二、要注意绿肥种植与秸秆还田，江苏省过去绿肥面积曾达 3000 万亩，现仅 500 万亩，如能提高到 1000 万亩，则可占水稻面积的 27%，每亩水稻可增产 10% 左右，达到平衡有机质的作用，据了解全省近年约有 3500 万吨秸秆被烧掉。第三、江苏不少地区有泥肥施用，城肥下乡，复合肥施用的习惯，这是发挥农田养分平衡的有效措施。此外，粪肥施用引起的污染，有机肥与化肥的配合施用，均是当前农业持续发展中，值得注意解决的问题。

#### (3) 不断防治土壤肥力（养分）退化

土壤退化，特别是土壤养分退化，是当今全球及全国共同关注的问题。

土壤养分退化主要是人类长期对土壤资源不合理利用的结果。在我国 4400 万公顷养分退化的中低产田中，普遍缺氮，59.1%缺磷，22.9%缺钾，50%的耕地土壤有机质在 5~20 克/千克之间；南方占耕地 66%的 2000 万公顷的低产田，普遍缺氮、78%缺磷，58%缺钾，90%缺硼和钼，49%缺锌。江苏省近 10 年内，土壤有机质含量除太湖及里下河地区外，均有所减少，土壤磷素稍较稳定，土壤钾素归还严重不足，土壤速效钾含量每年以 2.3 毫克/公斤的速度减少。据最近统计，我国南方长江中、下游及东南沿海在 1949~1958 年、1958~1978 年、1978~1984 年三个时期中，粮食增长占全国总量分别为 58%、59.8%和 59.5%，其增长率接近全国的 60%，而 1984 年至今的 10 年间，北方各片粮食增长量占全国 97.5%，而南方片下降到 2.5%，其中东南地区 9 省 10 年粮食反而减少了 39.8 亿公斤，由“南粮北调”变为“北粮南调”，分析原因，除因播种面积与复种指数减少外，土壤养分退化与耕地贫瘠也是重要原因之一。

最近，通过我国东南丘陵区旱地土壤养分退化评价研究，按照土壤养分退化等级标准，对该区 10 省 619 个县 113 万平方公里范围内，1994 年土壤中各种养分状况，编制了三幅土壤养分分布图，这些图幅表明，我国东南地区（包括江苏省江南丘陵区 8 个县）近年来土壤养分贫瘠化问题已经达到十分严重的程度。

针对上述土壤养分退化问题，结合近年来在南方工作的经验，提出应注意以下几个方面：

第一、通过合理耕作，增施有机肥，防止养分的侵蚀与淋失。这是克服养分数量退化的重要措施。由于各种养分施入土壤中均有不同程度的淋失（包括土壤侵蚀），并在不同施用时期中养分形态有不同转化，而且养分增长速度也有所不同。针对此特点，应采用各种防止养分淋失的耕作、施肥措施，使土壤养分的形态转化与增长速度满足植物生长的需要。

第二、通过合理施肥注意养分库重建，防止养分有效性退化。养分有效性退化表现在磷、铵、钾素在土壤中的固定，因此必须对不同开垦利用的红壤进行平衡施肥，实验表明，经过 4 年合理施肥，退化红壤的养分库可发生变化。此外，只要养用结合，不断补充肥源，红壤已退化的养分是可逐渐重建的。

第三、注意生态系统中的养分循环和平衡，防止养分发生生物消耗性退化。在旱地、水耕、林草及果园生态系统中，土壤养分的循环与平衡各具特色。应通过不同生态系统，提出配套的施肥、耕作及管理措施与方案，促使土壤肥力不断提高和保持稳定。

总之，土壤养分退化防治必须从上述三方面，即防止养分有效性退化、数量退化及生物消耗性退化着手，通过生态系统养分循环和平衡的综合措施，才能取得成效。

#### 四、现代土壤学在农业持续发展 中应研究的问题

现代土壤学在农业持续发展中应研究的问题很多，但主要包括以下三个方面。

##### 1. 持续农业与土壤圈物质循环的研究

应研究以下六个结合：即农、牧、微（生物）相结合；无机、有机相结

合；内、外循环相结合；土壤物质循环与景观生态结构优化相结合；传统技术与现代化技术相结合；物质循环与环境保护相结合。

## 2. 土壤肥力与农业持续发展的研究

维持和提高土壤肥力，达到稳定、均衡和协调供应养分，是发展持续农业的关键。研究内容具体包括九个方面：（1）不同生态系统中土壤肥力演变规律研究；（2）高度集约化条件下施肥制度的建立；（3）区域土壤养分消长规律及肥料需求预测；（4）土壤 - 植物根际营养研究；（5）土壤生物工程（内容包括研究植物营养的遗传特性，养分吸收的分子机制以及植物营养性状的遗传学改良等）；（6）植物营养元素在土壤中的化学行为及其有效性研究；（7）持续农业条件下土壤氮、磷、钾研究（包括：提高氮素利用率，减少氮素损失，控制损失的氮素对环境质量可能产生的不利影响，在土壤磷素的研究中，重点探讨施入土壤磷肥的转化，及作物磷素营养之间的关系，特别是磷在水稻土中的行为（吸附、解吸）以及与水稻生长的关系；研究钾在土 - 根表面的化学行为和生物学行为，同时，探讨钾肥和气候因素的交互作用，钾的循环与生物钾肥的开发利用；（8）集约农业条件下新出现作物对养分需求特点的研究。（9）施肥技术和提高肥料利用率的研究。

## 3. 土壤水分平衡与调控的研究

土壤是唯一能保持可用淡水的庞大场所，因而研究土壤水的平衡运动及其溶质运移的关系，不仅对提高水资源利用率，促进农业的持续发展，而且对改善生态、环境有重要意义。在水分问题的研究中，除应研究区域水文整治与农田水分调控；农田水量平衡；根际土壤环境与植物耗水的关系以外，还必须进行水分良性循环的研究，这是因为，我国水资源用量已占全国总用量的  $1/5$ ，占全国能利用水资源的  $1/2$ 。当前水体污染正日益加重，全国 95000 公里河川，有 20% 受到污染，其中 25% 已受严重污染。江苏省地表水人均占有量为全国的 15%，实际上水资源相对贫乏。据统计，全省废水排放量居全国第二位，排放密度居第一位，水污染事故与赔款居第一位。太湖水质恶化与富营养化的进程明显加剧，1990 年藻类大爆发，损失达 1.3 亿元。在海州湾、废黄河口、启东咀等地，其水质与底泥的污染值均高于其他地区。水环境的恶化，必将给滩涂开发带来严重影响，江苏全省施用化肥共 5301 万吨，若按上述流失量计算，则进入水中的化肥量为 530 万吨，其损失与影响可观。

为此，必须开展对水环境的研究，包括统一社会对环境认识，加强对水环境的管理；防止海水环境污染，加强节水研究，减少水体污染负荷；重视与加强太湖环境与水质污染的治理；注意防治水污染与提高资源利用率的密切结合等。

# 五、江苏省在提高耕地质量、 促进农业持续发展方面应注意的问题

近几年来，由于城乡经济建设的不断发展，江苏省在耕地利用开发与农业持续发展上出现了四个突出矛盾；一是人地矛盾；二是农贸需求与供应矛盾；三是经济发展与生态环境建设矛盾；四是土地利用与耕地质量矛盾。从这些矛盾的根本看，解决土地的数量与质量，即保护耕地，提高耕地质量是关键。

江苏省以 6824 万亩耕地，养育着 6843 万人，人均耕地已不足 1 亩。据粗略统计，30 年来，全省耕地平均每年减少 25 万亩，人口却增长了 80 多万，

一增一减，使耕地负载量比 60 年代增加了 2.5 倍。可是本省可开发宜耕地资源还不到 160 万亩。从耕地质量看，由于耕作管理粗放，有机肥大量减少，投入不足，造成土壤有机质、钾素不断下降，某些微量元素在土壤和作物上的缺乏面积越来越扩大，土壤耕层变浅，容重增加，抗逆能力下降。全省现有中低产田 4538 万亩，占耕地面积的 66.21%，此外，在苏南经济发达及太湖地区，由于耕地利用中盲目过量施用化学氮肥（水稻施用氮肥每公顷达 120~450 公斤，平均达 345 公斤/公顷），不但造成浪费，而且如前所述，对土壤、水体及农产品产生严重污染，并由于过量施用氮肥，造成土壤 N、P、K 失调，特别是钾素亏缺，据太湖耕地测定，每年每亩缺钾 7.5 公斤，这是影响耕地质量的重要问题。

针对上述情况，要提高全省耕地质量，保证农业持续发展，必须注意以下问题：

第一、珍惜耕地资源，控制耕地的非法占用，对废弃地进行科学复垦，以稳定基本耕地面积，保证耕地数量。

第二、不断提高耕地质量，既要从兴修水利、治水改土、植树造林、平整田地等措施来改善农田生态环境，又要采取耕作、轮作等措施来培育土壤。在肥料施用，首先应控制太湖地区水稻氮肥用量，一般以每公顷 120~180 公斤为宜，如果能增施有机肥，则化学氮肥用量还可以减少。同时采取“补钾工程”措施，促进土壤养分平衡，以不断提高耕地质量，达到农业稳定高产。

第三、加强对全省 4538 万亩中低产田进行培育改良，在增加投入的基础上，如果针对各种类型中低产田存在的障碍因子采取综合治理，以每亩增产粮食 50~100 公斤计算，则可增产粮食 22.7~45.4 亿公斤。看来只要增加投入，集中消除 1~2 个障碍因子，调整好水、肥、气的协调关系，每亩增产 100~200 公斤粮食是并不困难的。

第四、积极开展下列科技兴农项目：

（1）加强沿海滩涂开发，建立 1 万亩中低产田改良区及 10 万亩示范区。

（2）在太湖常熟市藕渠镇建立设施农业试验示范工程中心，开展现代设施农业的研究。

（3）建立与健全江苏省耕地保护与质量监测网络系统，对重点地区的耕地进行质量监测。

（4）宁镇杨丘陵区，发展潜力大，应提高土地综合地力，种植经济果、林、发展节水农业与节水配套措施，如旱育秧、高产旱作、滴管、喷溉技术工程，积极开展这方面的试验示范研究。

（5）开展规模农业社会化服务体系的配套施肥技术的示范与研究。

## 六、结论

1. 随着社会经济不断发展，现代土壤学研究的总方向是：“研究土壤圈物质组成，性质和物质循环、能量转化及其对人类生存环境，特别是农业持续发展的影响”。这是当前自然科学发展有资源环境影响下，对土壤学研究提出的新趋向。

2. 现代土壤学面临人口与粮食、资源与环境的严峻挑战，土壤学今后的发展必须为人类享有充足的食物和清洁的环境做出贡献。解决粮食增产与农业持续发展的途径是扩大播种与灌溉面积；合理增施化肥；选育优良品种；

实行集约化经营；改良中低产田及优化生态模式。

3．土壤肥力是建立持续农业的重要物质基础，从土壤植物营养的角度看，必须注意解决调节 N、P、K 施肥比例与平衡施肥；充分发挥农田养分再循环的肥源潜力与不断防止土壤养分退化三个方面的实际问题。

4．江苏省在土地利用与农业持续发展上，当前存在四个主要矛盾，其中土地数量与质量，即保护耕地与提高耕地质量是关键，因此，必须采取控制耕地占用与提高土壤肥力的有效措施，并积极开展科技兴农项目。我们深信，只要通过努力，江苏省必将为全国跨世纪的经济与农业持续发展，做出更大的贡献。

# 热喷涂技术和材料

丁传贤

中国科学院上海硅酸盐研究所

丁传贤 材料表面与界面专家。1936 年 2 月 11 日出生于江苏省海门市。1959 年毕业于复旦大学。现任中国科学院上海硅酸盐研究所研究室主任、研究员。1995 年当选为中国工程院院士。主要从事等离子喷涂涂层配方、工艺、性能、结构、应用和相关应用基础研究，并取得多项重要成果。

机械零件和钢结构的破坏多自表面开始，诸如腐蚀、氧化、磨损以及热疲劳破坏的发生。因此，采用涂层技术对表面实行保护，可使部件寿命大幅度延长，这比采用整体材料既经济又方便。此外，涂层技术还可赋予材料新的功能，主要有红外辐射、化学催化、生物相容等等。总之，涂层技术是一种量大面广、效果显著的材料保护和表面改性方法，应给予高度重视。

在众多的涂层技术中，热喷涂技术占有显著的地位。早在 19 世纪初，美国的 M.Schoop 首先将氧 - 乙炔焊炬用来喷涂金属线材，从此开始有了热喷涂。由于航天、航空、核工业的快速发展，对材料的要求日益苛刻，热喷涂技术得到了飞速发展，先后发展了等离子和爆炸喷涂。80 年代初期，低压等离子喷涂和高速火焰喷涂技术的出现，使热喷涂技术形成了一个完善的体系。

随着科学的进步，对热喷涂技术的工艺与工艺参数加强了控制，并配合计算机技术，不仅步入了先进材料的研究领域，而且在高技术产业和传统工艺技术改造中获得了广泛的应用，并取得了明显的效果。据报道，1990 年北美热喷涂技术市场约为 8 亿美元，预计 2000 年可达 20 亿美元。1994 年美国高性能陶瓷涂层的销售额为 5.25 亿美元，预计 2000 年可达 9.40 亿美元，其年平均增长率可达 10.2%，占各类陶瓷材料之首。在我国，热喷涂技术和材料的推广应用亦取得了明显的社会、经济效益。1981 ~ 1985 年期间的年销售额为 17 亿元，1986 ~ 1990 年期间为 24 亿元。

## 一、热喷涂技术

在热喷涂过程中，粉末或丝状材料经高温熔融，形成液体或液体加固体的微粒。以较高的速度碰撞于基体材料表面，形成具有不同功能的涂层材料。

热喷涂工艺主要有火焰喷涂、电弧喷涂和等离子喷涂三种，它们的工艺特性和适用范围现分述如下：

### 1. 火焰喷涂

火焰喷涂主要是利用氧 - 乙炔燃烧产生高温火焰，将喷涂材料熔融，再利用周围压缩空气使熔融材料或微粒喷射黏附于基材表面。由于燃烧气体的温度限制，喷涂材料的熔点一般低于 2500<sup>o</sup>C。火焰喷涂方法比较简单，设备也不复杂，因此在工业上被广泛应用。最近又开发出一种超音速火焰喷涂，采用氧 - 丙烷或氧 - 丙烯为燃料，其喷射速度高达音速的两倍，熔融粉末颗粒的速度可高达 400 米 / 秒，约分别为火焰喷涂的 4 倍和等离子喷涂的 2 倍。故涂层更为致密，结合强度大，特别适合于喷涂碳化物涂层。另外，此种方法有沉降效率高，涂层性能稳定等特点，预计是开拓涂层市场的有效技术途

径。

## 2. 电弧喷涂

以金属丝作为喷涂材料的电弧喷涂与其他的热喷涂方法有很大的不同，它是由两根作为喷涂材料而不断被消耗的载流金属丝短路，产生连续电弧而使金属丝端部熔融，用高速冷空气射流使熔化的金属丝端部雾化喷射到基材表面。冷喷涂是电弧喷涂的一个特点，即喷涂时不会提高基体表面的温度。另外，喷涂效率也比线材火焰喷涂提高 2~6 倍。电弧喷涂成本低，约为火焰喷涂的 1/10，设备投资为等离子喷涂的 1/3，但它只用来喷涂金属丝材，应用受到一定的限制。

## 3. 等离子喷涂

等离子喷涂是热喷涂技术中最为重要的一种。利用直流电弧放电，把高温加热的氩气、氮气、氦气等气体部分电离成离子束，在电弧放电部位四周强制流过低温气体，产生热收缩效应，使电弧放电部位断面缩小，导致能量密度和电流密度升高，最高温度可达 20000℃。由于等离子喷涂温度高，气氛可控制，可以用来喷涂各类高熔点的金属、氧化物和其他各种材料。最近 10 年开发的真空等离子喷涂设备，不仅使涂层的品种扩大，质量提高，而且可以进行新材料的合成和材料表面的改性。例如，在低真空下，利用等离子技术合成金刚石膜。在氮气中进行钢表面氮化，提高它的硬度，扩大应用等。

## 二、热喷涂涂层材料的性能

由于热喷涂技术的工艺手段很多，所以喷涂材料的选择范围很广。从塑料、低熔点金属，到难熔金属、陶瓷及其混合物。任何一种具有稳定液态的材料，至少可以用其中一种方法喷涂。同时，热喷涂涂层材料性能各不相同。表 1 列出了等离子喷涂涂层的物理性能。

表 1 涂层的物理性能

涂层材料	气孔率 ( 体积% )	体积密度 ( g/cm <sup>3</sup> )	假比重 ( g/cm <sup>3</sup> )
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> - 1	30	2.58	3.75
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> - 2	5.7	3.23	3.47
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.7	4.52	4.72
ZrO <sub>2</sub>	8.7	5.52	5.73
TiO <sub>2</sub>	6.0	4.01	4.26
80 % Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> - 20%TiO <sub>2</sub>	6.0	3.48	3.71
80 % WC - 20%Co	10.8	13.87	15.56
75 % Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub> - 25%NiCr	10.8	6.16	6.89
80 % Ni - 20%Al	5.7	6.42	
W	12.0	15.19	18.20
Mo	13.5	7.85	9.15
53 % NiAl - 47%ZrO <sub>2</sub>	7.1	6.27	6.32
50 % W - 50%ZrO <sub>2</sub>	12.2	9.32	
50 % Mo - 50%ZrO <sub>2</sub>	9.8	6.8	

由表 1 可知，涂层有 5%~30%的气孔率，与喷涂工艺参数密切相关。涂

层体积密度与假比重的差异，表明涂层中还有一定量的闭口气孔，等离子喷涂涂层中加入适量的金属可提高涂层的抗折强度，见表 2。

表 2 涂层的抗折强度

涂层材料	抗折强度 ( MPa )
$\text{Al}_2\text{O}_3$ - 1	49.0
$\text{Al}_2\text{O}_3$ - 2	55.6
$\text{Cr}_2\text{O}_3$	74.7
$\text{ZrO}_2$	49.0
$\text{TiO}_2$	82.1
80 % $\text{Al}_2\text{O}_3$ - 20% $\text{TiO}_2$	89.4
80 % WC - 20%Co	112.7
75 % $\text{Cr}_3\text{C}_2$ - 25%NiC	274.4
80 % Ni - 20%Al	348.9
W	117.6
Mo	127.7
53 % NiAl - 47% $\text{ZrO}_2$	169.5
50 % W - 50% $\text{ZrO}_2$	66.6
50 % Mo - 50% $\text{ZrO}_2$	112.7

表 3 为涂层的显微硬度和摩擦系数。由表 3 可知，等离子喷涂涂层具有低的摩擦系数和高的硬度。图 1 为涂层的导温系数。

表 3 涂层的显微硬度和摩擦系数

涂层材料	显微硬度 ( GPa )	摩擦系数 ( 与不锈钢配对 )
$\text{Al}_2\text{O}_3$	9.2	0.12 - 0.20
$\text{Cr}_2\text{O}_3$	10.0	0.14 - 0.15
$\text{TiO}_2$	8.2	0.10 - 0.15
80 % $\text{Al}_2\text{O}_3$ - 20% $\text{TiO}_2$	10.4	0.10 - 0.11
80 % WC - 20%Co	12.1	0.11 - 0.13
75 % $\text{Cr}_3\text{C}_2$ - 25%NiCr	10.5	0.13 - 0.15

由图 1 可知，大多数氧化物涂层的热扩散系数随温度的升高而减小，而  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  和  $\text{TiO}_2$  涂层的热扩散系数却温度的升高而增大，这有利于抗磨损。 $\text{ZrO}_2$  涂层具有低的热扩散系数，是理想的防热材料。

### 三、热喷涂涂层材料的主要功能

热喷涂涂层具有耐摩擦和润滑、热保护、抗氧化、抗腐蚀、导电和电绝缘、生物医用、化学催化、复合材料制备及部件修复等功能。概述如下：

1 .耐磨涂层是热喷涂技术的最大应用方面 ,通常具有高硬度、低气孔率、坚韧、与基体结合力强等优点。采用合适的组分，还可以减少摩擦。主要的喷涂材料有镍基合金和钴基合金、碳化物、硼化物、氧化物等。航空发动机是热喷涂涂层的最大应用市场。航空发动机叶片的凸台、密封部件加涂等离

子喷涂碳化钨、氧化铝、硅藻土涂层，以提高耐磨和密封性能；燃烧室等部位采用耐热涂层保护。汽车工业的同步齿环和活塞环，通常采用火焰喷涂铝涂层。加涂耐磨涂层的钢铁工业、造纸工业的轧辊，可提高产品质量。采用氧化铝 - 氧化钛涂层的化纤工业的部件，可提高零件的耐磨性和消除静电。石化工业的磨环和轴套，加涂氧化铬、氧化铝 - 氧化钛涂层，解决了跑、冒、漏、滴等问题。耐磨涂层的主要用途和功能见表 4。

表 4 热喷涂耐磨涂层的主要应用

领域	零部件	涂层材料
航天工业	火箭喷嘴	W
航空工业	叶片、密封环	WC、Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 、硅藻土
汽车工业	活塞环、齿环	Mo、Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> - TiO <sub>2</sub>
汽车与机械工业	轧辊、叶片	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 、WC、Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub> 、硬质合金
造纸与印刷工业	轧辊、印刷辊	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 、WC、硬质合金
纺织工业	导纱器、喂入轮	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 、Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> - TiO <sub>2</sub> 、Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
动力工业	叶片、喷嘴	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 、NiAl、Mo
化纤工业	磨环、轴套	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 、Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> - TiO <sub>2</sub>

## 2．隔热涂层

隔热涂层，又称热障涂层，主要有氧化铝和 CaO、MgO、Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、CeO<sub>2</sub> 和稳定的氧化锆组成。这些具有高的熔点和低导热系数的涂层，含有众多的气孔，体积气孔率在 5%～30%之间。气孔的存在，进一步降低涂层的导热系数，提高涂层的隔热效果。

为了提高氧化物隔热涂层与基体的结合力，通常用 NiCr、NiAl、NiAlCrY 各种金属涂层作为结合涂层。防热涂层主要用于火箭发动机和航空发动机燃烧室防热，也用于化工行业和冶金工业高温热保护。NiCrAlY - ZrO<sub>2</sub> 涂层用于航空发动机叶片，可使叶片使用温度提高 150℃，发动机的热效率提高 1%。若能获得工业应用，效果甚大。

为了减小涂层与基体金属的热应力，提高涂层的热冲击能力，近年来发展成功金属 - 陶瓷梯度涂层。此类涂层已在火车和汽车柴油机活塞顶上获得了试用，不仅提高了活塞的使用寿命，而且提高了柴油机的效率。

汽车发动机的热喷涂市场潜力很大，可望在以后的十年内有大发展。美国汽车制造商都有积极的热喷涂涂层研究和发展计划，拟在汽车汽缸内衬和排气部位使用热障涂层，在活塞环、阀、凸轮、曲轴等部位使用耐磨涂层，这些涂层将提高部件的使用寿命和热效率。

## 3．抗氧化和防腐蚀涂层

抗氧化和防腐蚀涂层主要是金属和氧化物涂层，前者为 NiCr、NiAl、NiAlCrY、WCoCr、Zn、Al 和 ZnAl 的合金，后者主要为 ZrSiO<sub>4</sub>、MgO - ZrO<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 涂层。MgO - ZrO<sub>2</sub> 涂层具有极好的抗熔融钎和铀腐蚀能力，可防止熔炼过程中石墨坩埚的污染。氧化铝涂层浸渍有机树脂后，可用于化学工业冷凝器和其它装置的抗酸碱腐蚀。NiCrBSi 和 WC 涂层具有良好的抗气蚀能力，可用于轮船螺旋桨的防气蚀。火焰喷涂的 Zn、Al 和 Zn - Al 合金涂层进行长效防腐十分有效，可用于电视铁塔、桥梁、水闸、输电铁塔、竖井井筒等大型

工程。近年来，在电弧喷涂铝合金涂层表面加封孔剂，对舰船防腐取得了十分满意的效果。在海岸大桥钢结构表面喷涂铝合金防腐，能取代油漆，可以节省大量维修资金和人力。

#### 4．喷涂成型

涂层是由熔化了的颗粒堆积而成，涂层具有一定的强度。采用热喷涂技术可制备异型和复杂形状的部件，这比常规方法更为经济、方便。采用真空等离子喷涂，以石墨作为模型，已制备出性能优良的钨和钼坩埚和管材。大功率等离子喷涂设备（100kw 以上），用来喷涂氧化铝氧化锆材料，成功地制备厚为 15mm 的大尺寸制品，其经济性与实用性优于传统方法的陶瓷制品。此外，用等离子喷涂技术还可以制备颗粒、晶须、纤维补强的复合材料。

#### 5．医用生物材料

热喷涂技术主要是等离子喷涂技术，它是制备医用生物材料的重要方法之一。金属具有较高的强度，可以制成各种形状的人工骨和人工齿根，但其生物相容性较差；陶瓷材料不与人体体液作用，脆性较大，使其作为生物材料受到一定的限制。发挥二者的优点，克服缺点，以金属材料（主要为钛合金）为骨架，在其表面喷涂生物玻璃、氧化物、羟基磷灰石等制成复合材料，已在临床上得到应用。

表 5 为热喷涂医用生物涂层材料的特性。

材料 性能	生物惰性涂层材料			生物活性涂层材料		
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> （1）	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> （2）	ZrO <sub>2</sub>	活性玻璃	羟基磷灰石	微晶玻璃
气孔率（%）	30	5.7	8.7	0	13.2	12.3
体积密度 （g/cm <sup>3</sup> ）	2.58	3.23	5.52	2.90	2.78	3.00
抗折强度 （MPa）	49.0	55.6	49.0		46.7	45.3
剪切强度 （MPa）	19.3	23.2	21.0		21.2	20.8
与体液的反应	涂层在体液中不溶解、与体液无反应			各类涂层在体液中均有一定程度的溶解性		
与机体的反应	涂层与机体组织无反应			涂层与机体组织之间形成中间层，并且逐渐转化为机体骨组织		
与骨组织的结合	物理固定，形态固定			生物固定，生物活性固定		
优点	材料硬度大，而磨损			材料能促进机体骨组织生长		
应用	人工关节、人工齿根			人工骨、齿根等。		

#### 6．其它功能涂层材料

热喷涂光、电、磁陶瓷是热喷涂技术的又一重要研究、开发、应用领域。喷涂铝、铜金属是典型导电涂层。氧化铝、氧化锆涂层是很好的电绝缘材料，可用作磁流体发电机的通道壁材料。热喷涂氧化锆涂层具有较好的离子迁移性能，已成功地用作汽车传感器零件，亦用来作为氧传感器探头，测定钢水中的氧含量。

从 60 年代开始研究热喷涂的光学材料和磁学材料，包括铁氧体、氧化物、碳化物、金属硬磁合金。等离子喷涂 Sm / Co 和 NdB 等材料，由于快速凝

固，在沉积物中含有细颗粒，为磁性应用提供了特殊的优势。如非常小的磁畴，典型的 P / M 结构，提高了沉积物的磁性。

热喷涂涂层的又一重要研究开发领域是制备节能材料。将  $\text{ZrO}_2 - \text{TiO}_2 - \text{Nb}_2\text{O}_5$  喷涂在电热元件表面，不仅将电热元件的辐射系数由 0.72 提高到 0.85，而且辐射率向长波方向扩展，大大提高了电热元件的能量利用率。制碱工业和电解水制氢工业消耗大量的电力，若能降低电解槽中的氢、氧过电位，具有明显的节电效果。采用等离子喷涂技术，喷涂 Ni - Al - Mo 涂层，再除去 Al 相，形成多孔的 Ni - Mo 涂层，可使电解室的电压降低 0.2V，达到节电的目的。

应当指出，热喷涂技术的另一重要研究课题是合成金刚石膜。金刚石膜具有极高的硬度，高的导热系数和禁带宽度大等特点，在新技术产业方面具有广泛应用。因此，世界各国的科技界与工业界采用各种方法合成金刚石膜。合成金刚石膜的主要方法有下列四种，即热丝化学蒸气沉积、等离子气相 CVD 法、燃烧火焰法和等离子喷涂法。其中受到广泛注意的是等离子喷涂技术。在低压等离子喷涂室中，注入  $\text{CH}_4$  和  $\text{H}_2$ ，在基体材料表面沉积金刚石膜，金刚石膜的生长速率可达 920 微米 / 小时，是其它方法无法比拟的。

#### 四、结束语

热喷涂技术种类齐全，使用方便，涂层材料变化无穷，可根据不同的要求进行选择，是节约原材料，提高工作效率的重要途径，既可为新兴工业服务，又可为传统工业技术的改造服务。

# 光电子技术和产业的发展

干福熹

中国科学院上海光学精密机械研究所

干福熹 光学材料、非晶态物理学家。1933 年 1 月 3 日出生于浙江杭州。1952 年毕业于浙江大学。1959 年获前苏联科学院硅酸盐化学研究副博士学位。曾担任中国科学院上海光学精密机械研究所所长、中国科学院上海分院副院长。1980 年当选为中国科学院院士（学部委员）。主要从事光学和激光玻璃，光电子材料方面的研究。

光电子学技术是继电子学技术之后发展起来的一门新兴技术，是由光学技术与电子学技术相结合而形成的。本世纪 60 年代激光技术的产生，极大地推动了光电子学技术的发展，可以说，光电子学技术是电子学技术在光频波段的延伸与扩展。

当代社会和经济发展中，信息的容量日益骤增，随着高容量和高速度的信息发展，电子在速度、容量和空间相容性上的缺点，使电子学和微电子学遇到其局限性，而光作为更高频率和速

度的信息载体，会使信息技术和发展产生突破。信息的探测、传输、存储、显示、运算和处理将由光子和电子共同参与来完成。所以，光电子技术的主要应用在信息领域。

光子也可以做能量的载体，因此，强激光可以应用于材料加工、医疗手术、同位素分离、核聚变等方面，成为光电子技术另一应用领域。

光电子技术产业包括光电子材料和元件、器件和装置以及系统和应用。往往在材料和元件上的突破，才使得光电子技术得到应用而形成产业。例如，本世纪 70 年代初在工艺技术上解决了低损耗的熔石英纤维和长寿命的半导体激光管后，才有可能实现光纤激光通信，以后作为主要的光电子技术产业进入信息领域。光电子产业是本世纪后期迅速兴起的一个新产业，也是本世纪以来发展快、应用综合性高的新技术产业，与生物工程和材料科学一起被誉为 21 世纪三大新型高技术产业。

经过近 30 年的发展，光电子技术在以下几个方面发挥了重要作用并且在国内外已形成了规模生产的光电子产业：

1. 光存储技术。主要为光盘存储技术，包括只读式（ROM）、一次写入多次读出式（DRAW）和可擦重写式（DRAW - E）各种光盘片和驱动器等。短波长记录和高密度光盘存储技术以及纳米、全息和三维超高密度光存储技术为主要发展方向。

2. 光输出和输入装置。主要包括激光打印机、复印机、传真机等。采用紫外激光器，改进喷墨技术，开拓新的感光材料以提高分辨率和输入输出速度。

3. 光电子显示技术。一般指液晶技术（LCD）和发光二极管（LED）为主的平板显示器及装置，有些国家已包括了阴极射线管（CRT）显示器。以高清晰度电视、电视电话、汽车用及个人数字化终端显示为主要目标，发展高效高光亮度多色发光二极

管、场致发光平面显示器（FED）、有源矩阵型液晶显示器（AMLLCD）、薄膜二极管液晶显示器（TFT-LCD）等技术。

4. 光通信技术。主要为光纤通信，包括光纤、无源器件和系统装置（干线、区域、用户网络）。提高光电子集成器件和光纤的性能，降低成本，采用多波复用、光孤子技术、高速传输和交换技术等，除了长距离高速信息传输和管理系统外，今后更侧重于短距离光通信，如：光缆电视、监控网和局部演示系统等。

5. 激光技术。主要为半导体、气体和固体激光器及其应用装置。半导体激光器主要应用于光通信和光存储；固体和气体激光器就用于激光加工，计量和激光医疗；激光的军事应用主要在测距、雷达、制导和武器。

目前国际上公认，光电子产业以日本最为发达。1995 年日本光电子产业的生产规模见表 1，总产值为 433 亿美元。表中的五大类技术的产品产值为 162 亿美元（光存储）、90 亿美元（光

输出和输入装置）、66 亿美元（光电显示，不包括 CRT）、53 亿美元（光通信）和 15 亿美元（激光），其分布见图 1。光电子技术系统、设备和元件的比例为 1：6：3。光电子设备中主要为光盘，其次为输入输出设备，见图 2；而光电子元件中以显示元件为主，见图 3。这就概括地显示了日本光电子产业的结构。

美国光电子工业发展协会（OIDA）1994 年报道 1993 年全球光电子产业产品（主要为元件、材料、器件和装置）总产值为 750 亿美元，预测 2003 年为 2300 亿美元，2013 年世界市场为 4360 亿美元，年均增长率为 9.5%，见图 4。目前，美国光电子产业以光电显示（包括阴极射线管 CRT）为主（占 30%），其次为光通信和光存储（各占 20% 左右）。1994 年总产值 100 多亿美元。

光电子技术的主要技术突破产生于美国，在 R&D 方面走在世界的前列，而光电子产业的形成又往往在日本，这主要是日本注重生产技术和家用（Consumer）市场的开发。巨大的投资产生了巨大效益。至今，日本在半导体激光器、激光打印机、液晶显示器、光盘产业等方面在世界上处于垄断地位。美国 OIDA 在对比了美国和日本的光电子技术发展情况后，认为美国首先要在光电显示、光通信和光存储产业中加强生产技术的发展；光通信产业要注意市场开发；光电显示要加强制造业；光存储要加强研究开发。制定出了 5 年、10 年、15 年和 20 年的发展规划，要奋起直追，见表 2。

表 1 日本光产业生产规模（1995）

总产值	43 , 378 亿日元（ ~ 433 亿美元）
光盘	1 , 614 , 798 百万日元（ ~ 162 亿美元）
驱动器	851 , 169 百万日元
光盘	768 , 631 百万日元
光输出输入装置	898 , 055 百万日元（ ~ 90 亿美元）
激光打印机	514 , 538 百万日元
复印机	181 , 327 百万日元
传真机	178 , 063 百万日元
光显示	658 , 771 百万日元（ ~ 66 亿美元）
LCD	587 , 283 百万日元
平板显示	39 , 843 百万日元
装置	31 , 646 百万日元
光通信	524 , 598 百万日元（ ~ 53 亿美元）
系统装置 （干线、区域、用户）	330 , 636 百万日元
光纤	140 , 876 百万日元
无源器件	53 , 086 百万日元
激光	147 , 908 百万日元（ ~ 15 亿美元）
气体、固体	23 , 994 百万日元
半导体	75 , 057 百万日元
装置	48 , 857 百万日元

表 2 光电子工业发展预测

OIDA（Optoelectronics Industry Development Association）

1994 世界市场总产值：1993 年：750 亿美元；2003 年：2300 亿美元

OIDA recommendations

	光显示	光通信	光存储	光复制输入和输出
市场发展				
美国制造业				
制造技术				
标准和计量				
研究和开发				

新积极性      增强效应      维持强度      一般

\* 光通信包括通讯、数据传输、光开关和光计算

我国从 60 年代起就开始发展激光技术为主的光电子技术。激光科学技术的研究和发展受到国家的很大重视，在国防建设和社会应用上起了重要作用。我国光电子产业的原始基础是军事光学、军用光电子学和红外技术。自 60 年代以来，我国完全依靠自己的力量，研制出“神光”核聚变高功率激光装置、激光分离同位素装置、军用靶场激光经纬仪、激光卫星测距仪、高速摄影机、红外线扫描仪等重要的大型光电子设备，并在此过程中，形成了实

力雄厚的 10 多个光电子技术研究基地。70 年代末, 光纤通信的研究和开发也在我国兴起。自行研制出四次群 (256Mb/s)、五次群 (565Mb/s) 和  $4 \times 622\text{Mb/s}$  波分复用光纤通信系统, 完成了近 500 公里光纤光缆, 近 20 条光纤光缆干线, 建立了百余城市的网络。实现了 21km, 2.5GHz 光纤孤子通信, 研制出红外量子阱探测器和  $1.3\mu\text{m}$ 、 $1.5\mu\text{m}$  激光器。80 年代中期光盘技术和光电平面显示技术得到发展。国家组织了“七五”、“八五”科技攻关, 自行研制出可擦重写磁光型和相变型数字光盘和驱动器, 开发出高性能的光盘库、光盘应用系统和电子出版系统。在光显示方面研制出场致发光平面显示器和超扭曲向列型液晶显示器。已研制出 10 英寸 STN 彩色显示器, 铁电液晶的研究也得到发展。近 10 年中激光加工 (应用于汽车、冶金、和电子行业等) 和激光医疗技术 (外科、皮肤、心血管、治癌等) 都有较大的发展。为了发展我国光电子技术和产业, 国家建立了若干个国家重点实验室和工程研究中心。但应该指出的是, 光电子技术在我国主要是在研究和开发上, 产业的形成是比较迟的, 规模也比较小。1991 年我国的光电子技术的产值为 15 亿人民币, 其中光纤通信 4 亿元, 光盘 2 亿元, 显示器件 3 亿元, 光学传感器 1.5 亿元, 发光管 2 亿元, 激光和红外产业 1 亿元。

我国实行改革开放政策以来, 由于“军转民”的战略转移, 以及吸引外资和引进成套光电子技术的生产线, 使我国光电子产业有大幅度的增长, 1993 年的产值约为 35 亿人民币, 1995 年的产值达 100 亿, 各类产业的发展见表 3。但占世界光电产业的产值仍不到 5%。

国际社会, 特别是发达国家对光电子学技术给予高度重视, 今后将更注意光子的作用, 继光电子学后光子学技术正在崛起。如美国把“电子和光子材料”和“微电子学和光电子学”列为国家关键技术, 认为“光子学在国家安全与经济竞争方面有着深远的意义和潜力”, “通信与计算机研究与发展的未来属于光子学领域”。

光电子产业的前景是非常好的, 10 年后的市场规模将比现在扩大 10 倍。表 4 列举了从 1995 年到 2003 年世界市场中各类光电子产业的发展。技术和产业的发展决定于市场, 而市场依赖于社会 and 人们的需求。显然, 民用或家用市场是今后光电子技术应用的主要方面。

也要正确分析我国光电子产业的市场。如上所述, 光电子技术的主要应用领域是在信息方面, 当然主要是在民用信息领域。由于我国人口众多, 家用光电子产品有着巨大的市场。以光盘技术产业例, 1993 年的总销售值只有 3~4 亿人民币, 而 1995 年达 30 亿人民币。这主要是由于 CD、VCD 光盘进入了家庭。今后随着个人电脑和多媒体技术进入家庭, 将带来光电显示器、光电通信器件、光盘存储产品的巨大市场。

今后光电子技术和产业的发展趋势如下:

目前光纤通信在长距离和主干线应用上已趋完善的情况下, 今后光纤通信的主要市场是在区域网络、计算机网络和多媒体通信进入家庭。所以, 价格低廉、高性能的有源和无源光电集成化的功能元件将有很大的发展。光存储无疑是以进入家庭市场的高密度光盘存储技术为主, 同时以低价格的海量存储器代替磁存储, 光盘将作为主要的多媒体的存储介质。从表 4 可以看到激光声盘的产量将下降, 而激光视盘和计算机用数字光盘将上升。随着个人电脑的普及和大屏幕、高清晰度电视的兴起, 平板型光电显示和光电输入和输出设备将会有很大的增长。到下世纪初, 在光电显示中 CRT 仍占主要生产

地位，而 LCD 会有很大的增长，其中以 AMLCD 技术为主，而大屏幕显示以场致发光为主，60%的显示器应用于办公自动化。光输出和输入技术则以提高分辨率和输入输出速度为主要方向。在光电子技术中激光技术是起主导作用的，先进的激光推动了诸如光通信、光存储和光处理等光电子技术的发展，而激光技术产业本身是不大的。激光技术的重要应用还存在于军事和国防应用上，如测距、雷达、制导和战术武器等以及重大的科学实验上，如激光核爆模拟、激光战略武器、激光分离同位素等。所以，国外对激光技术的 R&D 投入很大，如表 5 所示，1994 年世界激光产品的销售仅 12 亿美元，其中美国为 5 亿美元，而美国政府在与激光技术密切有关的重大实验工程的 R&D 上投入了 6 亿美元。

表 3 国内光电子产业发展

	种类 1991 (亿元)	1993 年 (亿元)	1995 年 (亿元)
光显示			
LCD	3	5	10
LED	2	4	5
光存储	2	5	30
激光和红外	2	3	5
光通信	4	10	15
光输入输出	1	4	15
其它	1	4	5
总计	15	35	95

表 4 国际光学和光电子产业发展

种类	1993 (亿美元)	2003 年 (亿美元)
光显示		
LCD	60	150 (其中 AMLCD 占 75%)
LED+场致发光	15	150 (60%用于办公自动化, 25%用于影视音响)
CRT	200	2000
光存储 (光盘)	150	300 (CD - DA 从 70%降到 20%, VCD 从 10%升至 40%, 计算机用数字光盘从 0%升至 50%)
光通信	100	300 (光纤光缆从 70%降到 50%, 计算机网络从 10%升至 40%)
光输入和输出	35	150
激光	12	30
光学 (照相机, 望远镜, 光学元件和仪器)	70	150
总计	500	2300
	700 (+CRT)	4000 (+CRT)

对进一步发展我国的光电子技术和产业，提出以下几点措施和建议：

1. 加强 R&D 的投入，建立我国的技术基础和支撑

国外主要的光电子技术企业，皆以年产销值的 5% ~ 10%投入 R&D。除了

发展新技术和应用基础外，主要用于生产技术和生产设备的提高和开发。相比之下，我国在光电子技术的 R&D 投入实在太低。光电子技术产品的生产设备大部分是专用的，而我国高技术设备的开发和制造基础较薄弱。因此，近 10 年内我国在光电子技术和产业的建立中，不得不从国外引进生产技术和设备。如果同时我国在光电子技术发展中有更大的投入，有我们自己的技术支撑和技术基础，就容易引进国外先进技术，而且可以在国外技术的基础上开发出更完善和更新的技术，否则引进设备由于缺乏先进性，将很快被淘汰。这也是我国光电子技术和产业能较快地和在经济效益方面较好地发展的关键。

表 5 全世界激光市场 ( 1994 ~ 1995 )

激光器总产值：	12.00 亿美元
二极管激光管：	4.73 亿美元
光存储：	0.86 亿美元
光通信：	3.07 亿美元
固、气激光器：	7.67 亿美元
激光应用领域总产值：	230.00 亿美元
信息领域占：	70 %

## 2. 有自己技术基础的外向型合作

我国光电子技术的各方面应用还滞后于国外先进国家，因此我国光电子技术产业是外向性的。开发国外市场和引进国外先进技术，寻找合适的国外合作者对发展我国光电子技术产业十分重要。但是这种合作不全是依附性质的或是来料加工和装配性质的，这需要有自己的技术基础，需要组织研究和开发单位以及工程技术中心积极参与重大引进项目和重要中外合作项目。目前这种参与特别是有组织的参与太少，而且参与的作用太小。

## 3. 首先发展材料和元件技术和生产基地

光电子材料和元件是发展光电子技术和建立产业的基础。光电子材料和元件是紧密结合在一起的，是很难分割的，它们的发展是要和装置与系统密切沟通而且互有反馈。至今我们还是重视装置和系统的发展，因为这比较容易显示。如上所述，光电子产业的发展中材料和元件与装置和系统差不多各占一半，而且不论是光存储、光显示和光通信，往往又是材料和元件的发展而推动了技术的更新。全部用进口材料和元件建立的装置和系统产业是不能持久和缺乏竞争力的。

## 4. 跨行业 and 部门的组织光电子产业促进会和技术发展协调咨询会

光电子技术是多种学科技术的组合，而它的应用也是多方面的，很难归类于哪个部门和哪个行业。目前我国光电子产业的形成，一部分是国家政府部门有计划建立的，而另一部分是根据市场发展，计划以外组织的（集资、合资、中外合作），因此，跨行业 and 部门组织光电子产业促进会和技术发展协调会，跟踪了解国内外光电子产业和技术发展情况，研究我国光电子产业的发展战略对发展重大问题提出建议和咨询意见，协助实行行业的宏观规划与管理。

建议把光电子技术作为有带动性的高、新技术，把光电子产业作为 21 世纪的支柱产业来抓，制定相应的技术政策和产业政策，对“九五”期间选

中的研究项目、攻关项目、中试项目，从发展科学技术，促进产业化的角度给予大力支持，加大投资强度，对目前已逐步形成的大型生产集团和生产项目，统一步骤和协调发展，使之成为我国的产业支柱。

## 微 - 纳尺度科学与技术

王立鼎

中国科学院长春光学精密机械研究所

王立鼎 精密机械和微纳机械专家。1934 年 12 月 2 日出生于辽宁辽阳。1960 年毕业于吉林工业大学。中国科学院光学精密机械研究所研究员。兼任中国仪器仪表学会精密机械学会精密机械工艺与材料专业委员会副主任，中国科技大学和吉林工业大学兼职教授。1995 年当选为中国科学院院士。是我国著名的精密齿轮专家之一，从事亚微米及纳米机械、微型机械领域等的研究。

### 一、概述

本世纪初开始，物理学在探索微观世界方面取得了辉煌的成就，建立起人类对电子、原子结构、晶体结构、分子结构、短波长电磁波、物质波、质能互变、量子原理等的深刻认识。本世纪中期开始，又在分子生物学、半导体、受激辐射等科学以及随后的扫描隧道显微术等方面取得了重大突破，使科研手段和应用技术的研究也向微观世界大步前进。

对微观尺度物质世界的认识与直接改造是纵贯本世纪的自然科学和技术科学诸重大方向中发展势头最猛的一个。各主要发达国家的科学领导部门都已预见到其在科学和应用上的头等重要地位，将它列为跨世纪的十几个研究方向之一。

从 60 年代至今，以微电子为先驱，在短短的几十年时间里，芯片的集成度提高了几个数量级。微电子还推动了微光学的发展，诞生了光电子学。80 年代末期，借助于半导体 IC 工艺制作出微米级静电马达，从此又诞生了崭新的微机械领域。

随着对微观科学与技术的深入研究，随着当今世界对功能密度、信息密度不断追求，以 1990 年国际上召开的第一届纳米会议为标志，建立了更加微观的纳米科学与技术（Nano ST）科学体系。

半个世纪前的科学发展其独立性特点较浓，近代科学的发展趋势，具有显著的科学间交叉、渗透与综合等特点。在微电子、微机械与微光学之间，在技术上逐渐形成三微集成，以致多微集成。在纳米领域里也将是如此，以期实现日益深化的功能密度、信息密度的追求。

“微”的科学与技术已从诞生趋向成熟，有的已形成，另一些正在形成庞大的产业。“纳”科学与技术的萌发，立即引起了国际上的极大关注，科学家们从“微”科学与技术的发展中，可以预测到“纳”科学与技术将给世界带来更大规模的技术革命。

要使“微”与“纳”的科学与技术为人类造福，必须着眼于从基础研究做起。目前，科研经费仍很紧张，对从事“微”与“纳”的科学与技术应用基础研究有个如何安排其位置的问题。不久前，中央领导对基础研究有这样的意见：“对前沿的科技项目要有所赶，有所不赶，对于可以充分利用我们的长处或我们在这一领域已有相当积累，相对来说不需要巨大投资，而一旦突破可以带动新产业革命的项目就应该赶，在稳住一头中也要抓住重点”。

“微”与“纳”的科学技术，在本文中归纳为“微-纳尺度科学与技术”。它的科学意义与价值，是符合中央领导同志所说的“前沿的科技”、“有所赶”的那一类型。

“微-纳尺度科学与技术”，概括了微米科学与技术（微电子、微机械、微光学等）和纳米科学与技术（纳米材料、纳米机械、纳米生物、纳米电子、纳米化学等）的综合范畴。

## 二、本领域的国内外现状及发展超势

### 1. 微米科学与技术方面

1958年，美国研制成第一块IC电路，开创了世界微电子学的历史。经历5个阶段，集成度提高了2个数量级。1988年，日本用亚微米级的微细加工技术，在硅片上刻线线宽 $0.8\mu\text{m}$ ，芯片集成度达4Mb DRAM，从而进入了超大规模集成（ULSI）时代，1991年线宽 $0.6\mu\text{m}$ 的芯片投产。1992年线宽 $0.5\mu\text{m}$ 的16Mb芯片投产；1994年线宽 $0.35\mu\text{m}$ 的64Mb芯片投产。

我国微电子技术与国际先进水平相比差距很大，落后10~15年。80年代中期，研制成功线宽 $2.5\mu\text{m}$ 的64Kb芯片。80年代末期，研制成功线宽 $1\mu\text{m}$ 的1Mb芯片，但尚未向大生产转化。最近，成都光电所研制成功线宽 $0.8\sim 1\mu\text{m}$ 的光刻机。

目前，美、日等国正在研究深亚微米级缩小投影式软X射线光刻技术，在实验室条件下，线宽已达 $0.2\sim 0.1\mu\text{m}$ ，可望2000年以前使芯片集成度达到1Gb。

微电子机械系统（MEMS，简称微型机械）始于美国用IC工艺制作出毫米级以下的硅静电马达，它是80年代末迅速发展起来的一门综合性新兴学科。微型机械包含微能源、微驱动器、微传感器（如声、光、热、力、电、化等）、微控制器和微操作器等构成，集成于一个微小的空间，实现一种或多种设定的功能。它是一个多科学交叉为一体的科技前沿领域。由于微型机械在生物医学、航天、国防、工业、农业以及家庭具有重要的广泛的应用前景，在它诞生仅仅几年的时间里已成为当今世界范围内的热点技术。

美国已投入上千万美元研究微型机械，美国国会并把微机械列入21世纪重点学科发展规划。日本在微机械方面的研究虽然起步晚于美国，但目前注重程度和投资强度均超过美国。1989年日本成立了微型机械研究会，调集科学界产业界的精密机械、半导体技术、医疗仪器和医学方面的研究人员进行开拓性的全面研究开发。1992年，通产省正式启动一项为期10年，耗资约1.9亿美元的“微型机械研究计划”。日本政府又投资3000万美元，筹建一座新的“微型机器人中心”。90年代初，德国研究技术部将微型机械系统工程列为新开发的重点项目，为之提供了4亿马克的经费。德国创造了LIGA工艺技术，制作出微机械和微光学元件与系统。前不久，又补充了6亿马克用于微机械研究。西欧的英国、荷兰、瑞典、瑞士、比利时、挪威、加拿大等国家也相继投资进行微机械研究。日本对西欧的统计，只是联合研究微机械LIGA工艺一项就有72个单位参加。在国外，不只是大学和研究所参与研究微机械，企业部门也投资参与或组成联合体投资微机械研究。

1993年在微型机械领域，国外已研制出直径0.8mm的电磁式电机、4.8mm的电机驱动的4轮小汽车，微型传感器已开始用于汽车自动驾驶和安全保障系统等。

我国微型机械的研究起步于 1989 年,长春光机所微机械工程研究室、上海冶金所国家传感技术开放实验室和清华大学等单位,承接了国家基金委、中国科学院设立的微机械三个重点课题及一般课题,从事微机械基础理论、制作工艺、装配及测试技术等方面研究。已制作出数百微米尺寸的静电马达、直径 3mm 可输出力矩与功率的压电马达、微流量排放系统单元等。在国家科委的攀登计划中,微型机械研究开始了微机械综合系统的研究工作。自 1995 年末开始,国防科工委将投入较多的经费从事微惯性测量装置的研究。

在 2000 年以前,国际范围内的微型机械研究,主要是侧重基础理论和基础工艺研究,同时开展系统组成和应用研究。在 21 世纪将形成大规模的高技术产业。

1987 年,在加拿大召开的光通信会议上,日本内田先生应邀作了关于“微光学”的特邀报告,开始诞生了一个新的学科领域。1988 年,在德国汉堡召开了第一次微光学国际会议。会上收录 23 篇论文,并把“微光学”定义为发展三维微小装置(或器件)的光学技术。

微光学的诞生与发展也是同其他学科相关联的。随着发光二极管、半导体激光器取代钨灯和单色光谱灯,半导体探测器取代光电管和光电池,光纤技术的出现,光学与微电子学的相互渗透,电子器件的快速微型化以及相关科学的发展,从系统的观点出发,迫切要求系统结构(包括光学系统结构)微型化,从而诞生了微光学。

近年来,由于微光刻工艺的迅速发展,美国研制的微光电一体化芯片及衍射光学元件为主的微光学称之为“现代的微光学”技术。以衍射光学(二元光学)元件为主的微光学元件将是下一步发展的主流。另一方面,集发射、处理、接收为一体化的光学芯片(如 Bell 实验室研究的 SEED 器件)及阵列化将是微光学系统的一个重要趋势。美《科学新闻》在回顾 1993 年重大科技成就中报道,研究人员演示了第一台多种用途的光学计算机,这里包含了各种微光学器件的应用。

在我国,长春光机所在衍射光学元件设计和制作技术上,完成了 Damman 光栅、菲涅耳透镜阵列的制作。利用常规光学 CAD 和衍射元件校正像差的 CAD 软件设计正在进行之中。西安光机所是国内研究梯度折射率具优势的单位,它可用于复印机和光通信中。上海技物所正在研制较低集成度的光电神经元芯片。北京光电子工艺中心,在完成“863”的 307 专题中研制了 SEED 器件。清华大学金国藩院士带领一个组从事二元光学研究。

在微米科学与技术发展的过程中,各分支学科间的交叉、渗透越来越多,多学科技术集成化与综合而强化功能以致创造新的体系已成历史必然。如微电子与微光学的结合形成了微光电子学。而借助微电子工艺基础发展起来的微机械元件和微光学元件,逐渐实现光机电三微集成化以致多微集成化系统。

## 2. 纳米科学与技术方面

纳米科学与技术(Nano ST)是一门极有前途的新兴科学。广义地说,纳米科学与技术可定义为在纳米尺度上的工程学,一般泛指 100nm~0.1nm 的尺度范围。

Nano ST 的产生源头可追溯到 50 年代末,当时美国物理学家 Richard Phillips Feynman(诺贝尔奖获得者)曾提出,逐级地缩小生产装置,以致最后直接由人类按需排布原子,制造产品。这在当初只是一个美好的梦想。

1977 年，麻省理工学院的德雷克斯勒认为，上述想法可以从模拟活细胞中生物分子的人工类似物 - 分子装置开始，并命名为纳米技术（Nanotechnology）。1982 年，G.Binnig 和 H.Rohrer 发明了扫描隧道显微镜（STM），以空前的分辨率为我们揭示了一个“可见的”原子、分子世界。到 80 年代末，STM 已不仅是一个观察的手段，而且是一个可排布原子的工具。STM 与 AFM（原子力显微镜）借助于隧道电流效应，用扫描探针实现直接观测原子、分子以及生物蛋白（DNA）结构。不仅如此，还可用探针迁移物体表面层原子，使它们成为有序图形。IBM 公司首次实现原子排布组成的“IBM”和美洲地图，而后中国科学院化学所排布出“中国”和中国地图。其尺寸仅为 200nm × 200nm。1990 年 7 月在美国巴尔的摩召开了第一届国际 NST 会议，这标志着纳米科学与技术作为一门学科开始得到科技界的共识。当时，冠以纳米（Nano）新名词、新概念不断出现，如纳米电子学（Nanoelectronic）、纳米材料学（Nanometer scale materials）、纳米生物学（Nanobiology）和纳米显微学（Nanoscopy）等等。国际刊物《Nanotechnology》和《Nanobiology》等出版。

NST 的历史还很短，而其进展却很引人瞩目。如纳米生物学中的蛋白质机器 - 生物传感器和生物分子计算机等；纳米电子学中的量子效应、隧道效应及共振隧道二极管、量子阱激光器及量子干涉仪等；纳米材料学中的纳米陶瓷、金刚石、晶体和非晶合金材料的制备、结构、特性、改性与应用研究；纳米机械学中的纳米分辨率的驱动系统与工作母机；纳米化学中的分子自组织合成方法；STM 已作为纳米尺度的表征与制作工具等等。

NST 的潜在重要性毋庸置疑，Nano 时代的到来不会很久。美国最早成立了 Nano 研究中心，开展了预研究，IBM 公司和德克萨斯仪器公司是积极参加者。美国自然科学基金会将 NST 作为优先支持的项目，从 1987 年开展所谓 M3 工程，美国国会又把 NST 作为 21 世纪重点发展的科学技术项目。日本制定了庞大的国家规模的 NST 研究计划。早在 1985 年，在日本研究发展合作组织（JRDC）的领导下，制定了先进技术的开拓研究（ERA - TO）规划，共 14 个课题，其中 12 个与 NST 有关。日本国际贸易与工业省另提供 1.87 亿专项拨款发展 NST，并制定了一个 10 年发展规划。英国政府在财力困难的条件下也支持 NST 研究。在 1992 年之前，来自 128 个公司的 350 名成员参加了 5 个 NST 课题研究。在 1992 年，英政府又投入 1280 万英镑用于 17 个 NST 项目的研究。IBM 公司首席科学家阿姆斯特朗认为：“正像 70 年代微电子技术产生了信息革命一样，NST 将成为下一信息时代的核心，……”我国科学家钱学森也认为：“纳米左右和纳米以下的结构是下一阶段科技发展的一个重点，会是一次技术革命，从而将引起 21 世纪又一次产业革命”。

在我国，1990 年 3 月中国科学院组织了纳米固体讨论会，1991 年 11 月又组织了多学科 NST 研讨会，1992 年 8 月，中国真空学会组织了第一届全国 NST 学术会议，论文报告百余篇。1994 年和 1995 年，国家教委、国家自然科学基金委、国防科工委和清华大学主办两届全国性的微米 / 纳米科学与技术学术研讨会。第二届会议丁衡高主任、朱光亚主席、韦钰副主任和王大珩等十几位院士到会，盛况空前。在短短的几年时间里虽列项的大课题极少，但对这一领域有兴趣、愿意介入的不下数百人。单在纳米材料领域就有 70 ~ 80 个单位在研究与开发。中科院的北京化学所、北京大学、上海原子核所和中国科大等单位已建造了中国自己的扫描隧道显微镜（STM），为开展我国纳米生物

学、纳米材料学、纳米电子学和纳米化学研究掌握了重要工具。同时，在建造 STM 中采用了部分纳米机械技术。我国 NST 领域的各分支学科都已开始启动研究，只待有远见有魄力的组织，有集中的较大投入，定会得到更快的发展。

### 三、该研究领域的应用前景和应用价值

该领域中可见的和潜在应用前景和应用价值，在前面已略述一二，全面介绍和全面估价还难以做到，因为它主要还处于基础研究和应用基础研究阶段。

在微米科学与技术中，就拿发展只有几十年的微电子来说，它的影响之深和应用之广已众所周知，当今，电子产业居各业之首。电子学的发展水平与产业规模，已经成为衡量一个国家国力和现代化程度的主要标志。刚刚兴起的微机械，又被各发达国家列为科技发展规划中的重中之重，成为世界性的十大科技之一。因为它可以实现单细胞操作，在人体器管与血管里定位、定量施药与手术。它可以使各种复杂装置与仪器袖珍化、微型化，进而一方面可进入航天等专门领域，另一方面还向便于携带和普及发展。它可以把电池、电机、传感器（声、光、磁、热、力、电等）、控制器和执行器集成于一个芯片的大小，去执行各种各样的功能，远超过一个微电子芯片所能达到的功能。微机电再与微光学结合与集成，则进一步又可以生成五彩缤纷的各种产品，开拓崭新的应用领域和市场。

在纳米科学与技术这个更微观而却是更宏伟的领域里，中外许多科学家都做了十分美好的发展前景预测。例如，预测纳米电子芯片可比微电子芯片再提高几个数量级的集成度。在纳米生物学中，人们从事研究蛋白质的结构（如 DNA 的螺旋形态）、构成去了解生命现象，通过改变基因来改变生物功能。在纳米生物学领域可以创造与制作纳米化工厂、生物传感器、生物分子计算机元件、生物分子计算机、生物分子马达以及生物分子机械人等。在纳米材料学和纳米化学中，实现分子、原子级操作，可以创造人工新物质等等。

对于微米科学与技术和纳米科学与技术所形成的微 - 纳尺度科学与技术广阔领域里，其应用前景和应用价值可归纳成如下几点：

1．设计制造出新材料，由多种成份组织而成，具有指定的性能，或具有新的表面性能，如吸附、催化、换能……

2．按需要改造生物物种，改变农业面貌。

3．设计制造新器件，由微 / 纳尺度的光学、电子、机械、传感器等集成。

4．使产品超微型化，具有节材、节能、小惯性、易控制、高速度、高信息密度、高功能密度、高互连密度等。这些超微产品（如测试仪器、通讯、办公或医疗设备、计算机和特种加工机器等）不仅能大幅度提高工作效率，降低成本，缩减实验室与办公室占地面积，还有可能在工、农、商、交通、运输或事故抢救现场就地即时处理问题，得出结果。这些产品易于普及，将能创造广阔的新市场，建立新产业。

5．微 - 纳尺度科学与技术，其多样性及领域之广是微电子不能比拟的。尽管我国在世界发展微 - 纳尺度科学与技术中会遇到微电子工业基础严重落后的不利因素，但是，由于其覆盖面之广，有很多我国的特色可资利用，机遇会远远大于挑战。