

《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）
（02）

上海市黄浦区教育信息中心

空间天文学——当代科学前沿

艾国祥

中国科学院北京天文台

艾国祥 天体物理学家。1938年2月17日出生于湖南益阳,1963年毕业于北京大学。1993年当选为中国科学院院士(学部委员)。现任国际天文学会太阳活动委员会副主席,1997年升任主席、国家自然科学基金“太阳磁场与速度场观测和研究”重点项目组长,美国基金会与中科院合作项目“中美太阳联测”、国家科委与日本文部省合作协议项目“中日太阳物理合作”中方首席科学家等职务,并在太阳物理观测研究中取得重要成就。

一、空间天文学发展状况

空间——太空,是地球稠密大气层之外的范围(100~120公里高之外),是除陆地、海洋和大气层之外,人类的第四环境。空间——太空,是包括地球卫星、太阳系飞船、星际飞船等的活动范围。从一定意义上讲,空间天文活动包括气球和火箭,甚至包括机载天文仪器的探测。本文仅涉及航天器天文的活动范围,即第四环境中的天文探测。

1957年至1993年9月30日,全世界成功的空间发射为3548次,其中美国占27.5%,前苏联(俄)占68%,日本占1.3%,欧空局占1.5%,中国占0.9%;已发射航天器4500余个,含多星发射,美国成功发射航天器1366次,失败159次,占11%,全世界载人飞船164次,科学航天器为841个,占19.13%。与天文学有关的大约400个(前苏联的难以全面统计),约占10%左右。

全世界航天方面,大概花费了12000亿~15000亿美元(平均一次发射大概花3亿美元,一个航天器平均2.5亿美元)。估计与天文有关的开支,为1200亿~1500亿美元左右,占10%左右(美国至1993年实际开支4074亿美元,若换算到1993年的等值数是7391亿美元)。欧洲空间局在1993年的预算中,空间科学占10.4%(不包括微重力与应用卫星),为294MAU(2亿美元),这个预算不包括发射费用。欧洲空间局的空间科学项目中有10项,除一项地球物理卫星之外,其他9项都是空间天文项目。美国宇航局1989—2005年经费中,共投入2195亿美元,其中空间科学(不包括运载和发射)为493.7亿美元,占22.5%。空间天文学是重要领域,地面的天文设备,只有很少数投资能够达到1亿~3亿美元;空间天文用航天器的平均投资为2亿~4亿美元,而大型空间天文活动花几十亿美元的,已达几十次。30多年来,空间天文设备的花费大约是地面天文设备的10倍左右。大型项目,如Appollo登月计划、行星际探测站、IUE(紫外天文卫星)、IRAS(红外天文卫星)、COBE(宇宙微波背景辐射探测器)、Hipparcos(天体测量卫星)、Hubble(空间望远镜)、ROSAT(X射线卫星)、GR0(射线卫星)、Yohkoh(太阳卫星)以及SOHO等,都是耗资几亿甚至几十亿美元的项目。著名的Hubble空间望远镜,长13米,直径4.3米,主镜口径2.4米,总重12.5吨,研制历时13年,运行5年,耗资超过了30亿美元。它具有0.1角秒的成像分辨率,可观测到比地面观测暗40倍的天体,使观测天体的数目增加数

百倍；光谱范围有紫外、红外、可见光，集高新技术之大成，是空间天文发展史上的重大里程碑。去年底发射的太阳和日球天文台（SOHO）是十几个国家联合发射的太阳和太阳系飞船，耗资达 20 亿美元，载有 12 大设备，对太阳和日地空间环境将进行史无前例的重大探测。

21 世纪初，超大型月基和空基的直径 10 米~16 米的光学望远镜、卫星群天文光学干涉仪、大型 射线天文台等正在预研究。月基 16 米望远镜预计花费 50 亿~100 亿美元（2015 年建成）。笔者曾参加 COSPAR（国际空间科学协会）1993 年汉堡会议，随后又参加 IAU（国际天文协会）海牙大会，深感天文学在空间科学中的突出地位（我估计为 50%），感到参加 COSPAR 大会的天文学家似乎已超过参加 IAU 大会的人数，而且级别高、费用多，看来空间天文成了天文学的主要领域。

就第二次世界大战后的现代科学而言，从笔者不完全了解的情况来看，似乎没有一项科学事业的规模和投资，超过了空间天文学。物理学关于基本粒子的研究和加速器制造是耗资巨大的，但比之空间天文学，仍有明显差距，可以夸张点讲，空间天文学是现代科学的“天之骄子”。空间天文学成了现代科学十分突出的前沿。

二、空间天文学成了科技发展的前沿热点

1. 空间天文观测的优势和困难

天文学是一门依赖观测的科学，观测台址则是天文学发展的最重要基础之一。纵观天文台发展历史，观测台址有过四次变迁：市中心（北京建国门古观象台、伦敦格林尼治天文台）——远郊（基特峰天文台、兴隆天文台）——远山、远海（欧南台、夏威夷天文台、加纳利天文台）——太空。

天文观测走向太空，这是太空独有的最佳观测条件所决定的，也是天文学发展的内部动力所需要的。空间天文观测的优点是，全波段、全时段、全方位、无大气抖动和散射光、超长干涉基线。这些特点决定了天文观测向太空发展的必然趋势。与传统天文观测相比，航天器提供的不仅仅是观测，它还能游弋到行星际中去，实地采样和近距探测。

空间的天文探测是一项高科技事业，主要困难是技术难度大，投资大，周期长，并且具有较大的风险。这些困难是对一个走向现代化，并将自立于世界民族之林的国家，提出的严重挑战和考验。

2. 天文学的第三次大发展

一门科学的发展，有其内部的运行规律和发展动力（如到大气外去观测，无疑是一种必然的趋势），但是一门科学的发展，只有与社会发展的大需要结合之时，才会有突破性进展和辉煌成就的出现。

天文学发展的动力有两条，其一是人类已有的认识与天文学无穷无尽未知世界之间的矛盾，推动人类不断去认识宇宙，这是天文学科长期存在和发展的基础；其二是社会发展的需要和强大作用，这是天文学能否获得巨大发展的关键。历史上，天文学第一次辉煌的发展，是发达农业社会需要的结果，为了农业季节、历法以及记时的需要。我国古代天文学的辉煌成果，是第一次辉煌发展的典型代表。天文目标的神秘色彩，被统治阶级利用来维护其地位，天文常被用于预测重大政治事件和朝代的兴衰变迁，这对天文学获得重视和经费是有利的，但限制和束缚了对宇宙天体目标本质的科学研究。天文学的第二次辉煌是从哥白尼—伽利略—牛顿—爱因斯坦关于日心说、望远

镜、牛顿力学、相对论力学建立和发展之中出现的。在现代科技的创建中，天文学做出了巨大的贡献。第二次突飞猛进，充分体现了天文学对现代自然科学的巨大贡献，并奠定了发展的基础，也是冲破神学对天文学（对自然科学）束缚的胜利。这一进展不仅有重大科学价值，而且具有明显的政治和社会意义（例如日心说的斗争），因此为社会广泛关注。

天文学发展的第三次辉煌出现在第二次世界大战后，人类进入了空间科学技术的时代。在此期间，人类利用空间技术对于行星地球、太阳、太阳系（行星及其卫星、彗星、小行星）、银河系及更为遥远的天体，获得了大量崭新的知识和突破性进展。空间科技的产生，是伴随巨大的政治和军事的需要而发展起来的。天文学为这个发展做出了显著贡献，反过来又借助空间技术的发展，使天文学进入全波段天文学的时代，并构成第三次的辉煌发展。

3. 天文学是空间科学技术发展的必要基础

天体力学为各种人造天体的轨道计算和设计，提供了理论基础和方法。天体测量对人造天体观测、确定其轨道、方位和距离，并提供精确的时间。恒星准确的方位和自行知识，卫星敏感器的制作，为人造天体的姿态控制提供依据。天体物理研究关于太阳系物理（流星、小行星、月亮、大行星、彗星）的知识；关于太阳物理（太阳辐射、爆发、太阳风）研究的成果，以及宇宙线的情况的了解，为人造天体以及宇航员提供了空间环境知识，并做出太阳活动的安全期和通讯骚扰预报等防护措施（空间天气学及预报）。太阳辐射的能谱为空间太阳能源的利用，以及航天器的热状况的设计提供依据。天文仪器和方法，包括各种望远镜的知识和设计，各种高灵敏接收器的原理和应用，都为航天部门的遥测遥控所广泛应用。概括起来，天文学在航天器轨道、定轨、姿态、时间、能源、通讯、热状态、遥控、遥测系统、空间环境方面以及各种有效载荷等方面均有重大运用和作用。

天文学作为一门基础科学，它对社会的直接影响，自古至今都表现在对社会提供时间、历法和方位上。自近代史开始的四百多年来，它对社会的影晌，主要是科学的影响，通过牛顿力学和相对论力学的建立而体现出来。二次大战之后，空间事业的出现和发展，是天文学作为基础科学，全方位的（天体力学、天体测量、天体物理、天文仪器及方法）第一次对社会的发展做出重大的贡献。可以毫不夸张地说，没有近代天文学，就不会有今天的航天科技及其应用。近代天文学是航天事业发展的重大而必要的基础。这也是一个基础科学一旦被运用，就能转化为巨大的社会力量的生动实例。

4. 空间天文是集政治、军事、空间技术、物理学、天文学等 5 个方面的共同科学事业，即综合性、战略性交叉科技事业

物理学关于基本粒子的研究与天体演化研究出现了新的汇合趋势，物理学的各种辐射与物质相互作用的理论，在全波段天文学发展中经受考验并得以发展。天文目标的多种多样性、对飞行器的多种奇特要求，均把技术能力运用到极限，促进了空间技术的发展，并为空间技术的应用打下了基础。天文学中的各种望远镜及其接收系统、自动控制系统，为航天提出了方法和技术。天文学在空间科技发展中的独特作用，是其它基础学科所不具备的。二次大战后，许多实例说明，不少精明的政治家利用天文学为公众关心的特点，施展政治才能，不少军事家也利用天文卫星进行军事项目的实验和预研，至于航天技术专家利用天文卫星来提高其技术水平和实验更是家常便饭。这样，空间科学便成为一个国家强大的重要标志，空间天文学便成了政治家和

大众支持的科学热点。

三、空间天文学的巨大成就

*地球辐射带的发现和磁层的确立*太阳风的发现——日球确立，行星际磁场的确立

*月球及近地行星、彗星性质的新发现

*太阳耀斑认识的推进

*太阳日冕被发现具有极丰富的活动和大量物质抛射

*宇宙微波背景辐射的证实、COBE 卫星探测有利于大爆炸学说

*红外造父变星测量表明，哈勃常数太大，导致宇宙年龄太小，小于一些恒星的年龄，将引起现行天体演化有关模型的修正

*1987ASN，膨胀云被拍出来（HST）

*原是大于质量 200M 的恒星被分辨开后，实际是多星系统

*发现许多红外星系光度非常高，与类星体类似，有利于发现原星系或尘埃星系的形成，如 F10214 + 4742，有 $3 \times 10^{14}L$ 和 $3 \times 10^{11}M$ ，是至今最显著的红外源

*发现高亮度红外源与相当部分的射电源相一致

*发现织女星恒星外行星系统，发现原星盘系统

*COBE 探测到宇宙背景辐射的不对称性，并与黑体辐射有偏离

*Hipparcos 获得 1.5 毫秒位置和 1 毫弧秒 / 年的自行精度

*ROSAT，EUV 使源增加 400 倍，有 80000X 射线源

*X 射线双星际，黑洞存在的可能性，低质量 X 射线双星的准周期振荡

*发现 M87 星系中心周围有高达 200 万公里 / 秒的向心会聚速度，可能是含有一个几十亿个太阳质量的黑洞

四、中国空间天文学发展的探讨

1. 历史上，中国科学和技术有过辉煌的成就，为世界科技的发展做出过杰出的贡献

当前我国正在为摆脱 100 多年来的不发达状态，为在下世纪中期发展成为科技强国而努力。毫无疑问，在科学和技术上也应对世界做出新的贡献。就天文学而言，由于当前主要发展趋势是空间天文学，在这方面我国有其特殊的有利发展条件。在建设强大国家的进程中，我国老一代政治家和科学家，以超凡的胆略和魄力，发展了我国的空间技术，发射了中国的火箭和卫星。这是中国人引以为自豪的伟大成就，将成为传世之宝。自推行改革开放的发展战略以来，我国空间技术的应用，包括军事、通讯、气象、资源、材料，都做出了积极的安排，并取得了长足的进步，中国已经成为空间大国之一。我国的空间技术，是真正够得上“五大强国”地位的领域（美、俄、欧、中、日），是在空间技术的综合方面具有世界先进水平的国家。在这个领域的建立过程中，我国的天文工作者，在轨道、观测、空间环境、时间和技术等方面做出了应有的贡献。我国的天文工作者有责任在今后 10 ~ 15 年、15 ~ 30 年、30 ~ 50 年之内，充分利用我国的空间技术条件，有所作为，积极发展空间天文学，并促进空间技术发展。

2. 空间技术、空间应用和空间科学的协调发展

我国空间科技的发展战略，应该在继续加强空间技术（发射、卫星、通

讯、控制和接收等)和空间应用(军事、通讯、资源、气象等)的同时,把空间科学(天文、生命、材料、地球物理)的发展提到议事日程上来,并做出长远规划。历史经验、目前能力、国际上的发展趋势都表明,忽略空间科学发展,将不仅仅是影响其科学本身的现代化,而且从长远观点看,将严重影响和限制空间技术及其应用的发展(缺乏技术创新和技术储备,把很多的基础科研工作者隔离在外,智力和新技术就会短缺)。我国是世界空间大国,但又不是第一流空间大国。我国的空间技术多属仿制,创造性尚有所不足,除经济实力尚不足之外,科学基础较薄弱,也是原因。目前,国内在卫星技术、卫星姿态控制和稳定性、探测分辨率、空间环境预测、轨道精度等方面以及各种有效载荷方面均有待赶上世界水平,这些不足之处在一定程度上,与空间科学没有做出适当安排有关。空间科学与基础科学一样,好比植树造林,这是利在当代,造福子孙的大业。我们不妨想一想,在20年、30年、50年之后,当中国成为第一流的大国之时,当中国成为人类社会发展的主要动力之时,我们向谁去仿制呢!那就必须依靠基础研究,在空间技术不少方面依靠空间科学和空间天文学的发展,从现在开始就重视它们的协调发展。外国经费安排的情况,在空间技术、空间应用(包括军事)和空间科学上的比例大体是4:4:2,我国理应做出调整,增加空间科学活动的投入,以保证持续和长远的发展。

3. 中国空间天文发展的建议

尽管我国空间天文有较好的发展条件,但这些条件并未完全得以利用,加上技术复杂、投资多、周期长、风险大,使得我国空间天文学的发展,呈现出非常困难的局面。因此,提出如下发展设想,以探讨中国空间天文学的发展。

天文学的各分支的科学工作者,要更多关注空间天文学的发展,在自己所从事的领域内,提出有创新、有重大价值的课题,开展科学目标和方案性的预研究,借以形成中国空间天文学发展的科学基础。这种小型的不花很多经费的探讨应有5~10项,形成储备和候选项目,等待机会——机会只给有准备的人。

利用各种搭载和空间技术实验,尽可能做一些练习性,甚至独出心裁的小型实验,加强与空间技术部门的联合和合作,扩大影响,锻炼队伍。

选择有重大影响的项目,突出来,形成有世界水平的国际影响,如像日本的X射线天文计划那样,跻身于世界先进行列,甚至处于领先地位,使我国空间天文有大的显示度和影响。由于空间项目周期长,应尽快做出安排。

除了天文界的努力之外,关键性的一项措施,应该是组织落实。目前似乎存在着各个国家主管部门都没有将空间科学作为一项重要的工作抓起来的问题,因此空间科学的发展仍有待于明确归口主管部门,并做出切实的长期规划,否则就会再拖上十几、二十年,仍处于不发达状态。

五、空间太阳望远镜

1. 基于空间天文是天文学发展的主流方向,高分辨的太阳磁场研究是天体物理学的一个重要前沿。鉴于太阳活动对人类和空间环境的严重影响,应借助我国高水平的空间技术,并把我国科学卫星水平提到一个新的水平,特提出空间太阳望远镜:在2001年(太阳第23周峰年)发射总重2.0吨左右的卫星,太阳同步极轨,三轴稳定,姿态稳定度为6角秒左右,轨道高730

公里左右，运行 3 年，由长征 4B 发射。有效载荷是主望远镜为口径 1 米的光学望远镜，带 8 通道二维同时光谱仪，以及 4 个软 X 射线望远镜、白光日冕仪、白光-H α 望远镜、宽带频谱仪、太阳和行星际射电频谱仪等。正在与德国学者进行评估和合作研究，以期获得两国国家联合立项。

2. 其主要目标如下：

通过实现高空分辨率（0.1 角秒）和高时间分辨率的多层次的、太阳矢量磁场和速度场的观测，实现太阳物理研究的重大突破。

空间环境的扰动来自太阳磁场的变化，即太阳耀斑。此项目重点是，耀斑及地球物理和空间环境效应；将在 23 周太阳活动峰年期间，为空间环境（空间天气）预报和人类灾害影响的研究预报提供重要依据，并争取重大进展。

使我国卫星技术及有关的高新技术提高到先进水平。如姿态控制达到 6 角秒水平，望远镜成像达到 0.1 角秒，软 X 射线达到 0.5 角秒等。

3. 主要特色分析：

0.1 角秒的成像分辨能力。Hubble 望远镜几经努力，实现了 0.1 角秒的成像分辨能力，这是光学波段的成像分辨率的一个重大里程碑，比地面分辨率提高了一个数量级。它的天文成就很大一部分，都来自这个被突破的性能。空间太阳望远镜成像分辨率，比之 Hubble 望远镜，除要求达到 0.1 角秒之外，还有进一步的要求：其一，是在太阳强光照射之下实现，这就要求能克服较大的热不均匀性；其二，它是对偏振光进行探测，要求在信噪比为 10000:1 的情况下能正常工作。这两点在天文学的研究上有重要价值。0.1 角秒的成像分辨率的突破也有重要应用价值，如对地侦察和观测时，当卫星高度为 100 公里~500 公里时，其分辨能力为 5 厘米~25 厘米，将有很大的实用价值。

0.1 角秒的磁元探测能力，在天文上将是一项重要的突破，在宇宙电动力学的各种研究中，无疑将引起新的进展，这是许多国家想要实现的大目标。

0.1 角秒的成像分辨能力，将促使我国成像光学技术达到国际领先水平。

Stokes 参数轮廓的同时观测。以往的三大光谱仪（光栅、傅里叶和可调滤光器）在实现成像光谱探测时，都不是同时的，因此，只有相对低的时间和空间分辨率，特别对快速变化和爆发过程的探测无能为力。我们创新的两维同时光谱仪，是光谱仪发展史上的新里程，它能同时获得二维成像面上的磁场、速度场、温度、密度、电子密度、压力、元素丰度等众多物理量，对天文学发展有重大意义，并在其它领域预示着新的应用前景。历史上，光栅光谱仪就是一个太阳物理学家发明的，后来成为了光谱学的核心仪器。

4. 把我国的卫星技术推向新的高度

一个 2 吨的科学卫星从整体来说是对我国卫星技术的新挑战、新发展。

6 角秒的三轴稳定姿态控制，将把我国卫星三轴稳定长期停留在 6 分（360 秒）的状态，提高近两个数量级。过去之所以提不高，是由于长期缺乏新的要求的结果。科学卫星的要求将起到促进作用。

0.1 角秒的可见光探测能力和 0.25~0.5 角秒的 X 光探测能力。

5. 世界科学显辉煌

这个卫星有较多的世界第一：是空间天文学的一个重要领域（太阳物理、

日地关系、空间环境等) 和一个新里程碑, 并将在 21 世纪, 使我国空间天文达到世界领先水平; 将提高我国科技现代化在国际上的显示度, 我们期待国家支持这个投资较大但适度的项目。尽管有难度, 但有能力克服, 我们期待这一意义重大的科学项目的实现。

加速器非核应用与国民经济

谢家麟

中国科学院高能物理研究所

谢家麟 加速器物理学家。1920 年 8 月 8 日生于河北武清，1943 年毕业于燕京大学，1951 年获美国斯坦福大学物理系博士学位。历任中科院高能物理所副所长、八七工程加速器总设计师、北京正负电子对撞机工程经理、合肥国家同步辐射加速器工程总顾问、国家高技术主题专家组顾问和中国粒子加速器学会理事长、中国高能物理学会副理事长等职。1980 年当选为中国科学院院士（学部委员）。主要从事加速器物理与技术等方面的研究并取得重要成就。

一、引言

带电粒子加速器（以下简称加速器），是研究核物理、高能物理，认识微观世界的一个主要手段，随着 60 余年加速器物理和技术的发展，它衍生出许多不属于核物理、高能物理研究的非核应用，与国民经济发生了密切的联系。本报告的目的就是试图简单地就此加以介绍。

核物理、高能物理都属于基础研究的范畴，表面看来，无关当前的国计民生。实际上基础研究的结果直接奠定了人类今天的文明、文化和高生活质量的基础。以物理方面的基础研究而言，没有本世纪初伦琴对 X 光的发现，就不会有现今诊断疾病的不可少的手段——X 光透视；没有汤姆逊对气体导电的研究，赫兹对电磁波的实验，普朗克量子论的提出，就不会有今天与人类生活息息相关的无线电、电视、雷达、激光、半导体、计算机等等；没有核物理领域的基本研究，就不可能出现原子能、同位素等等。事实上，在早年科学大师们刻苦耕耘的基础上，人类至今仍在不断地通过研究与发展，采摘其结果，开拓其应用，享受其效益。至于作为高能物理、核物理基础研究的手段——加速器，与国民经济的发展又有什么联系呢？这就是本报告将要讨论的问题。下面我们首先介绍加速器及其发展概况，然后阐述它的一些主要应用，以便说明它与国民经济的联系。

二、加速器——人类认识微观世界的主要手段

自古以来，人类就试图了解自身以外的客体事物的本质，所用手段，不外是手足、耳目所及。后来，由于科技的发展，在大的尺度方面，有了望远镜、天文望远镜、射电望远镜等，使人类可以观测到约 10^{26} 米的宇宙空间（约 100 亿光年的距离），可以探索宇宙形成的初期的遗迹；在小的尺度方面，通过光学显微镜、电子显微镜、隧道扫描显微镜，可以观测到从微米到纳米的范围。但更小尺度的物体就只能用另外的间接的手段来观测了，这个手段就是加速器。加速器产生的粒子的能量愈高，就愈能观测更小的物质组成。目前已经测量到原子、原子核、核子（质子、中子、电子等）和夸克，尺度从 10^{-10} 米到 10^{-18} 米。最近又观测到夸克以下层次的“基本”粒子存在的迹象（图 1）。为了研究更小层次的物质结构和运动规律，就需要更高的能量，

这就是物理学家建造能量愈来愈高的加速器的根本原因。（图 2）

这里应该指出，建造高能加速器的目的是研究“基本”粒子。“基本”粒子与天体演化在尺度上是两个极端，但近年为人们广泛接受的大爆炸宇宙形成理论，表明在宇宙形成之初的高温、高密度的状态下，物质存在的形式也只能以极基本的粒子形态出现。因此，研究其小无内的高能物理学又与研究其大无外的宇宙学相联系了。

三、加速器发展简述

加速器发展初期，由于它能量较高可用以产生核反应，人们管它叫做“原子击碎机”。这个名称正像后来使用“原子能”一样，是一个历史上的误解，正确的提法应该是“核子击碎机”和“核子能”才对。

加速器的基本工作原理是带电粒子在电场中受力而得到加速。当然，在粒子能量很高时，它运动的速度接近光速，变化很少，而明显增加的是它的质量。因此叫它为加质器也许是更恰当的。

早期的加速器使用直流高压加速带电粒子，叫做高压加速器。为了克服直流高压不能避免的击穿的限制，发明了使用高频电压的直线谐振加速器。为了使粒子在同一高频电压间隙能多次得到加速，采用磁场偏转粒子使做近似的螺旋运动，半径逐渐扩大，多次通过间隙，同时使它的角速度与高频角速度相等。这叫回旋加速器。使用它可以产生多种放射性同位素。它的发明人劳伦斯为此获得 1938 年诺贝尔物理奖。当粒子能量进一步提高，质量随能量提高而明显增加，以致回旋率逐渐降低而与高频间隙电压不能维持同步，这就构成了回旋加速器能量的极限（对质子而言，约为 25MeV）。显然，如果让垂直于磁场的高频加速电场的频率随粒子回旋速度而变化，就可以维持同步的关系了。这种高频电场频率周期性变化的加速装置叫同步回旋加速器。它可以把质子加速到 700MeV 左右。由于它的周期性的工作状态，输出电流只约有一般回旋加速器的万分之一。后来又发明了使用特殊磁场分布的等时性回旋加速器，它既突破了回旋加速器能量的限制，又避免了同步回旋加速器因高频频率周期性变化而导致的低流强的缺点。不过，它使用的仍然基本上是实心的磁铁。磁铁重量和加工就构成了提高能量的技术上的限制。一个 450MeV 的同步回旋加速的磁铁重量已高达 2200 吨。为了摆脱这个提高能量的限制，发明了使用环形磁场的同步加速器。1952 年又发明了强聚焦原理，结果使磁铁重量大大地减少，可将质子加速到 TeV (10^{12} 电子伏) 的量级了。

使用加速后的粒子打靶，产生高能反应进行实验时，由于反应产物向前运动携带的动量，加速粒子只有一部分能量用于产生反应，能量愈高，这部分有用能量所占的比例愈少。为了克服这个限制，发明了对撞机这种特殊的加速器形态，它使两束高能同类粒子或正、反粒子在加速器中对头相撞。这样全部加速器能量都可用于产生高能反应。因此，近年建造的高能加速器，无例外的都以对撞机的形式出现。

图 3 给出加速器能量随年代增长的势态，可说是上文的一个概括的总结。由图可见，经过大约 60 年的发展，加速器的能量提高了 9 个数量级。这样的增长速度，在各种科学技术的发展史中是很罕见的。图中也清楚地说明

了当一种加速器的能量增长达到了原理或技术的极限时，人们就会发明一种新的加速器取代它，继续向能量的高峰攀进，使人有“山穷水尽疑无路，柳暗花明又一村”之感。人类无穷无尽的创造力，在加速器物理和技术的发展史中得到很好的验证。

四、加速器的应用

加速器发展的动力本来源自高能物理和核物理基础研究的需要，但在发展过程中，人们逐步认识到它在许多科技和国民经济领域，有着广阔的十分重要的应用，这样，加速器就开始沿着基础研究和应用两个不同方向分道发展了。下面表 1 给出加速器的主要应用，我们将摘要分别加以介绍。

(一) 医疗应用

1. 治疗应用

加速器应用于肿瘤治疗（放疗），已有 50 余年的历史，其基本原理是利用加速器产生的粒子束或射线的电离作用，最大限度地破坏肿瘤细胞而最少地影响正常组织，这是当前癌症治疗的三大手段（放疗、药疗（化疗）、手术）之一。调查表明，癌症患者 80% 要接受放疗，我国每年新发病患者即达 160 万。癌症是城市居民和农村男性居民中排列第一的死亡原因。为了满足患者的治疗需要，估计约需 3000 台医用加速器。

表 1 加速器应用要览

| | | | | |
|------------------|--------|--|------------------|--|
| 医 疗 应 用 | 治 疗 | 射线 电子束 质子束 中子束 重离子束 光子束 介子束 | 能 源 应 用 | 干净能源 核废料处理 自由电子激光聚变趋动 等离子体加热微波源 重离子趋动聚变 聚变反应堆材料试验 |
| | 诊 断 | 同位素生产 正电子断层照相 双色心血管造影 准单能 X 光照相 | 国 防 应 用 | 闪光照相 电子学器件加固 剂量校准 无损探伤燃料检查 核爆模拟 |
| 工业应用 | | 聚合物改性 喷漆固化 医疗器械消毒 机械零件表面活化 离子注入 线及中子探伤 食品灭菌与谷物杀虫 | 环 保 应 用 | 污水处理 废气处理 化学废料处理 |

评判不同粒子束或射线治疗肿瘤的有效程度是根据电离作用在人体内的深度分布曲线，因为电离作用结合相对生物效应就表征了对癌细胞的破坏能力。图 4 给出一些粒子束和射线的剂量在水中（模拟人体）人体中的电离分布，由图可见，它们各自适应不同位置的病灶。目前看来，最为理想的照射手段是使用重离子束（如碳离子等），它的电离分布曲线很窄，进入人体的

表层剂量较低，故如确知肿瘤位置，则通过对离子能量的控制（决定电离曲线峰值的位置）和流强的调制（决定电离峰值的大小），可以设定肿瘤各部位的剂量，取得三维最好的疗效。日本在千叶县已建成一台重离子医用加速器（HIMAC），投资超过 3 亿美元，这么高造价的治疗装置，显然是难以推广的。美国 LOMALIN-DA 医院使用的质子加速器，每年约可治疗 1000 名患者，造价近 5 千万美元，可能较易推广。

放射疗法的一个重要发展，是从多个方向将束流或射线照射肿瘤，这样，肿瘤剂量与健康组织剂量的比例就可以大大提高，在一定程度上弥补了非理想的剂量分布。刀、X 刀就属于这个范畴。从剂量分布的角度看，手术开腹时作一次性大剂量照射，杀死手术残余的靠近重要器官的瘤细胞，可能会对疗效有所改进。放疗的另一发展途径是将含有对人体某器官有亲附性的元素的化学药品注入人体，然后使粒子束或射线与之作用。例如：利用脑组织对硼的吸收和硼对热中子的吸收的“硼中子俘获疗法”，可以用质子加速器的 p-Li 或 p-Be 反应提供中子；另一种是“光子激活疗法”。利用同步辐射加速器产生的 X 射线，激活注入体内的药物，在特定的部位发生作用。这时要求 X 射线能量与药物的吸收谱线相近，故有足够强度的准单能 X 射线的产生成为重要的环节。

2. 诊断应用

自从放射性同位素广泛用于医学诊断（治疗）以来，回旋加速器就成为主要的生产工具。目前世界上约有 60 台能量为 30MeV 左右、流强为 300 微安左右的回旋加速器从事缺中子同位素生产。与研究使用的加速器不同，它们必须是紧凑、小型而且运行方便，可靠性高，以便在医院现场生产短寿命的同位素，如铊-201、碘-123 等。

回旋加速器应用的另一重要方面是在正电子断层显像装置中，正电子发射断层显像，是采用发射正电子的短寿命核素标记的药物的方法。从体外动态地观测人体吸收葡萄糖、氨基酸等在分子水平的生理、生化过程。它既是早期诊断某些疾病的工具，又是研究人脑认知活动的独特手段，目前世界上此项装置已有 100 余台，它包括回旋加速器或其它能发射正电子同位素的加速器、放射性药物合成、分析系统以及正电子照相机。

（二）科技应用

1. 同步辐射装置

当高能量的电子在加速器中受磁场偏转而沿弧线运动时，将产生高亮度的广谱电磁辐射。这种电子强烈的发光现象于 1947 年首先在美国通用电器公司的一台同步加速器中被发现，因而名为同步辐射。同步辐射最初是被看成限制圆形电子加速器提高能量的障碍，后来逐渐认识到它在物理、化学、生物、地质、天文等学科的研究工作中具有广泛的应用，由此在世界范围内得到极大的发展，由寄生于高能物理实验发展到专用装置，又由一般专用装置发展到以插入元件为主的高亮度装置，迄今已经经历了三代。目前建成的和正在建造中的第三代同步辐射装置已有 15 台，下面将要谈到的自由电子激光为特征的第四代光源，也是遥遥在望了。我国有与北京正负电子对撞机兼用的第一代装置，合肥的第二代装置和台湾的第三代装置，目前正在考虑在上海建造一台性能更为优异的设备供科技界进行前沿研究之用。

同步辐射装置无疑是加速器的重要应用之一，因为大家对它比较熟悉，

这里就不拟多谈了。只想提一提一个极有发展前景的例子：使用同步辐射进行的微加工。它可以制造微型的电机、齿轮、传感器、执行器、手术器械等，尺寸大小约为几十到几百微米，汽车安全气囊的加速度传感器、光纤开关、微透膜等都已经初步研制成功。将来很可能发展为一个重要的高技术产业。

2. 自由电子激光装置

自由电子激光是加速器产生的高能电子在极性交替变化的磁场中做扭摆运动而产生的电磁辐射。它虽名为激光，但与常规的基于电子在原子、分子中能级跃迁而产生激光的工作原理完全不同，只是由于两者产生的都是相干辐射，因而使用了“激光”这个名称。

自由电子激光的工作物质是高能电子束，它携带巨大的能量，故具有产生极强的光辐射的潜力，而且波长连续可调，光束质量优异。1977年自由电子激光振荡器发明之后，曾被美国纳入“战略防御计划”（俗称“星球大战”），耗资10余亿美元，希望能达到破坏对方战略导弹的目的；后来由于政治格局的变化和研制过程中遇到的巨大的技术困难，此计划以失败而中断。不过，自由电子激光的非军事应用，却在继续发展，如大功率自由电子激光在化纤或其他化学工业方面的应用，美国连续电子束加速器实验室（CEBAF）和俄罗斯新西伯利亚核物理研究所都在兴建装置。使用直线加速器或储存环产生高亮度、短脉冲的自由电子激光作为第四代光源的研究，正方兴未艾，势将对科技发展起重要的推动作用。

（三）工业应用

加速器用于工业生产，以低能加速器和离子源为主，包括辐射加工、无损探伤、离子掺杂等方面。

辐射加工是通过加速器产生的电子束对高分子材料照射导致聚合物交联，从而改善性能。电缆经过辐照，可以大大提高耐温，辐照后的热缩薄膜或管材，有加热后恢复原形的“记忆”，都有十分广泛的应用，我国已经形成了年产值达10亿元的产业。辐射还可缩短喷漆、彩印的固化时间，减少了贮存待干的厂房面积。药品、手术器械和食品的消毒、灭菌、保鲜是辐照应用的另一些方面。

使用电子加速器产生射线，用于大型机械锻、铸件中的无损探伤，已有几十年的历史。近年一个有意义的发展是将加速器与核物理探测技术相结合，对集装箱进行加速、定时透视检查。此装置已由清华大学研制成功，它对进出口贸易频繁的经济发达国家的海关，显然是一个必要的设施（图5）。

使用离子源产生的不同能量、脉宽的各种离子束注入到基金属中渗杂、改性或者制造新材料，已经得到了应用。使用回旋加速器将金属或陶瓷等机械零件的表面薄层活化，再根据放射性产生的射线，测量其磨损情况，这是检验各种耐磨措施（如用离子注入提高硬度）的有效方法。

传统的中子探伤是使用反应堆进行的，如涡轮叶片、核燃料、爆炸物等的探测。近年发展起来的一种小型RFQ加速器，可把质子或氘加速到几个Mev，用以轰击铍靶，就可制成可移动式的强中子源。电子束焊接一般需在真空中进行，如果采用1Mev左右的小型电子加速器进行深层焊接，就不需要将被焊物体放在真空室内，而可以大大加快操作的速度。

（四）能源应用

1. 裂变反应堆

利用裂变反应发电（核电站）已是一些国家的主要发电设施，也是解决人类未来能源的一个重要途径。目前世界已有 1 / 5 的电能来自核电，我国大陆也有秦山和大亚湾两座核电站在运行中。

不过，核电也存在一些问题，最主要的就是核废料的处理。长寿命的高放废料半衰期有的长达亿年，如何处理就构成一个棘手的问题。目前的办法是首先加工使之浓化、固化，然后找一个安全的地方贮存、深埋。这是十分困难而且耗资巨大的措施。另一方面，现在的核电站多以 ^{235}U 为燃料，它只占天然铀资源的 0.7%，长期燃料资源的考虑要求使用快增殖堆将含量较丰的 ^{238}U （或 ^{232}Th ）加以利用。

针对以上核电的问题，日本、前苏联和美国很早就提出了使用加速器驱动嬗变技术（ADTT）的方案，它可将高放废料转化为短半衰期或根本无放射性的废料。这些方案的主要思路是利用强流质子直线加速器（约 1Gev 能量，100ma 流强）的质子束轰击周围有裂变的物质的液态铅靶，产生的中子经慢化、倍增后，与经过适当处理的循环流动的核燃料及裂变产物相作用。图 6 是这个方案的示意图。

ADTT 方案可用 Th 发电，同时燃烧核废料，若设计为次临界状态，则因加速器可以瞬时停止，故整个装置比较安全可靠。它发出的电能约有 20% 供加速器运行，而其余的 80% 则可并入电网使用。

ADTT 和鲁比亚（C.Rubbia）等人最近提出的能量放大器发电是很具有吸引力的干净、安全的能源，受到科学家的青睐。当然，它也有它的问题：首先是强流加速器的技术困难，它的束流损失必须极小（约为每米纳安的量级），不然会将加速器高度活化；可靠性必须很大；再则是初始投资十分庞大。不过随着科技的进步，技术问题可以克服，投资要求也会下降，这种干净、安全的电站是迟早会出现的。

2. 聚变反应堆

核聚变反应可以释放能量一事，约在 80 年前就被科学家发现了。例如氢的同位素氘氚聚变，就可产生氦核和中子，同时放出 17.6Mev 的能量，而氚又可由氘产生。氘在海水中丰富的蕴量，作为聚变能源的燃料，估计可供 10^9 年之用。聚变反应堆的放射性较裂变堆为低，安全性高，可以说是取之不尽、用之不竭的理想能源。

建造聚变反应堆发电目前正在沿着两条可能的技术路线发展：一是磁约束，一是惯性约束。哪个更为易于实现，目前尚无定论，但两者都与加速器有关。

对磁约束装置而言，托卡马克型的闭合环形等离子体装置占有重要的位置，它的运行参数已接近建堆的要求，装置中的等离子体需要射频电磁场进行驱动与加热。荷兰已建成使用加速器的自由电子脉泽，作为下一代等离子体聚变装置加热的微波源。另外，为了加热等离子体、驱动电流及填充燃料，基于加速器离子源技术的中性束注入器，也在一个装置中取得圆满的结果。

对惯性约束装置而言，需要使用激光或离子束将热核燃料压缩到极高密度并加热点燃。目前激光驱动最为常用，一般使用钕玻璃激光器。但到正式建堆时，需要考虑能量效率，而钕玻璃激光器的效率是偏低的，因此有的研究所在进行以自由电子激光器代替钕玻璃激光器的探讨。

使用加速器产生的离子束轰击靶球的惯性约束聚变装置有它独特的优

势，就是效率高，重复频率高，并可长时间使用。诺贝尔奖获得者鲁比亚曾提出了一个使用重离子加速器和自由电子激光结合的系统方案。

不论最后聚变反应堆发电采用哪种方案，当前有一个共同的亟待解决的问题就是能耐强烈中子轰击的建堆材料的研究。目前国际上正在考虑建造作为强中子源的聚变堆材料试验加速器，来检验各种材料的性能。

（三）国防应用

1. 闪光照像

使用能量为几十兆电子伏、流强为几个千安、脉宽为几十纳秒的感应电子直线加速器的聚焦电子束产生极强的 X 光，可进行核武器内爆系统的流体动力学及有关的瞬态过程的试验，美国已建造三代这样的装置，即 PHERMEX，FXR 及 DARHT。

2. 电子学加固和辐射剂量校准

电子直线加速器产生的束流打靶产生的 γ 射线，可模拟核爆的辐射，用以研究电子学器件的辐射加固或剂量仪器的校准。

3. 无损探伤

为了检查导弹内部，特别是使用固体燃料时燃料块间的缝隙，已经研制成装在汽车上的电子直线加速器，以便在现场进行探测。

4. 核实验模拟

核武器改进和检查，除地下核试外，可在实验室建立惯性聚变反应研究装置，产生微型热核爆炸，在参考实际核试验测得的数据，就可以相当可靠地模拟核爆过程，改进性能，了解状态。

（六）环保应用

前苏联新西伯利亚核物理研究所曾生产过大约 120 台电子加速器供国内外应用，其中包括下水道废水处理和电厂排烟的净化应用。在当前人类面临严重缺水的情况下，将废水处理后合理使用，显然是应该认真考虑的措施。燃煤电厂的废气中含有 SO_2 ， NO_x ， HCl ， HF 等，造成严重污染，在日本、美国、德国、波兰、俄罗斯都在研究使用加速器的电子束进行处理，试验结果表明在多种处理技术方案中，电子束法是很有竞争力的。我国成都电厂拟兴建一个规模居世界之首的电子束废烟处理工程。

使用脉冲电子束处理化工废料中的毒性，也在试验研究之中，原理是通过射解形成自由基，而自由基对拆裂化学键是十分有效的。

（七）加速器应用产生的经济效益

讨论加速器应用产生的经济效益，是一个复杂的问题，因为有些社会效益是不能以数字度量的，有些是间接的，即便是直接效益，由于牵扯方面很广，也难以确切地统计。不过有一点是肯定的，就是加速器的非核应用，已给社会带来了十分巨大的经济效益。

就上面提到的 6 个方面应用而言，国防应用对一个国家的安全至关重要，但经济效益却难以度量。同样，关于医疗应用，人的生命是无价的，又怎样用经济效益来表达呢？国外曾有人根据放疗患者平均工作寿命的延长，再参考其增加的产值来估算放疗的经济效益，这个数字是十分惊人的，但也只能供参考而已。

加速器的科研应用（包括核与非核）产生了新的学科分支（如同步辐射、自由电子激光等）和带动各种科技的发展，其结果当然是伴随着巨大的经济效益。世界上功率最大的速调管，规模最大的超导致冷系统，体积最大的超

高真空系统等等，都是因研制加速器而出现的。西欧核子中心曾对 160 家承担高能加速及实验设施的高技术工厂（包括电子、电器、真空、焊接、精密机械、光学仪器、计算机等）进行过调查，把由于承担任务而导致的营业额的增加和成本的减少与合同金额的比数称为效益，统计结果表明平均效益为 4.2，这也许可以作为间接效益的举例吧。

直接的经济效益，应该表示扣除成本后同一产品应用加速器技术之后与应用之前的产值的差异，譬如一种规格的电缆辐照改性前后价格是不同的，机械工具硬化处理前后价值也是不同的。这些方面的数据，仍有待于收集和整理。

五、结语

从上面远非全面的介绍，可以看出加速器在非核领域有广阔的应用，而且许多应用还在发展之中，有些则已经形成相当规模的产业。就医疗应用而言，世界上医用电子直线加速器现有 2000 ~ 3000 台；生产同位素和正电子发射断层显像的回旋加速器约有 200 台，制造这些加速器的工厂、大学、研究所仅在国内就有近 10 个。如果没有经济效益的话，这种情况是不会出现的。可以预言，随着非核领域加速器的进一步应用，它必将为人民保健、国家安全、科技进步、工业生产做出更大的贡献，有力地推动国民经济的发展。

核燃料及其循环使用

王方定

中国原子能科学研究院

王方定 化学家。1928 年 12 月 21 日生于辽宁沈阳。1953 年毕业于四川化工学院。历任核工业部九院二所研究室主任、所副总工程师，中国原子能科学研究院研究员、院科技委主任，中国核工业总公司科技委顾问。1991 年当选为中国科学院院士（学部委员）。主要从事核武器研制中的放射化学工作，取得多项重要成果。

一、前言

人类利用能源的水平与人类文明的发展息息相关。随着人类社会的发展，世界能源结构已经经历了两次重大的变化。自本世纪 70 年代以来，能源结构又进入了以煤、核能和再生能源等多种能源替代以石油为中心的新的转变。40 年来，从第一座试验性核电站运行（苏联，1954，5000kw）开始，到 60 年代进入实用阶段，至今已有 30 个国家发展核电，正在运行的核电站已达 437 座。根据 1995 年的统计，核发电量已占世界总发电量的 17%，其中法国（76.14%）、比利时（55.52%）、立陶宛（85.59%）的核电已超过总发电量的一半。我国秦山和大亚湾核电站也已投入商业运行，此外还有：秦山、大亚湾二期和辽宁核电站正在筹建中。我国核电站技术已经出口（巴基斯坦恰希玛核电站是目前我国最大的高技术出口项目，该核电站功率 30 万千瓦，于 1993 年 8 月 1 日动工，现已进入全面安装阶段，预计将于 1999 年并网发电），是世界上继美、法、加、俄后第五个核电技术输出国，也是世界上少有的几个具备整套核燃料循环体系的国家之一。

在控制核武器扩散方面，核燃料是最敏感的对象。追踪生产核燃料的能力或取得燃料的途径是估计一个国家能否制造核武器的重要方法。

在我国《国民经济和社会发展的“九五”计划和 2010 年远景目标纲要》中，“能源工业”一段里提到我国发展核能的方针是：“大力推进核技术的和平利用，重点发展核电，配套建设核燃料循环体系”。下面先对核燃料循环体系作一轮廓的介绍。

在核反应堆中能燃烧（产生自持的链式核反应以提供能量）的材料称为核燃料。核燃料进入反应堆前需要进行一系列处理，包括：矿石的开采，从矿石中提取和精制燃料元素——铀，铀的转化，铀的同位素浓缩，燃料元件的制造。组装成的燃料组件在反应堆中燃烧，剩下的乏燃料取出反应堆后又需要进行一系列处理，包括：中间存储，铀、钚、裂变产物和超铀元素的分离，可利用燃料再进入反应堆燃烧，以及放射性废物的处理和最终处置。由于从乏燃料中分离出的铀和钚可以重新制成燃料元件，再次进入反应堆中燃烧，形成燃料的循环，所以把这种核燃料从矿石开采到最终处置的全过程叫核燃料循环。

二、核能及核燃料

无论是木材、煤炭、石油或天然气燃烧，发生的都是化学反应。所释放

的能量只与原子的外层电子的能量有关。一般都是电子伏特 (ev) 量级。而核能则来自位于原子内深层的原子核，原子核虽然在体积上只占原子的极小部分（半径为原子的 $10^{-4} \sim 10^{-5}$ ），但却集中了几乎全部原子的质量。根据 Einstein 质量与能量的当量关系：

$$E=mc^2$$

（式中 c 是光速 $3 \cdot 10^{10}$ 厘米 / 秒），可见原子核中蕴藏着巨大的能量。即：对于质量 m 的能量是等于该质量乘以光的巨大速率的平方，因此每一单位质量都有巨大数量的能量。同等质量的物质发生核反应放出的能量要比发生化学反应放出的能量大数百万倍。例如一公斤铀燃烧（裂变）放出的能量（ $\sim 2 \cdot 10^{10}$ 千卡）相当于 250 万公斤煤燃烧所放出的能量，而一公斤氘燃烧（聚变）放出的能量相当于 750 万公斤煤燃烧放出的能量。

人类文明发现这样巨大的能量只是最近几十年的事。正如 Einstein 在《 $E=mc^2$ ：我们时代最迫切的问题》一文中所说：“如果每一克物质含有这样大的能量，为什么它会那样长期地没有引人注目呢？答案是够简单的：只要没有能量向外面放出，就不能观察到它。”1939 年，德国科学家 Hahn 和 Strassmann 用中子轰击铀，使一个铀原子核分裂成两个较轻原子核时，实现了这一巨大能量的释放。被用作玻璃和陶瓷的颜料的铀一跃成为人类划时代的新能源。铀从此成为最重要的核燃料，成为最敏感的战略物资。

原子核由中子和质子组成（最轻的氢原子核由一个中子和一个质子组成，自然界中最重的铀原子核由 146 个中子和 92 个质子组成）。但是任何一个原子核的质量总是小于组成该核的全部中子和质子的质量的和。这一质量之差称为原子核的结合能。结合能是原子核结合紧密程度的度量，结合能越大（生成该核时释放出的能量越大）原子核结合越紧密。

不同原子核具有不同的平均结合能是实现释放核能的基本核性质。当平均结合能较小的原子核转化成平均结合能较大的原子核时，就可释放核能。中等质量核素的平均结合能最大，而轻或重核素的平均结合能较小。轻核素尤其突出。这就是说：当把轻核素聚合成较重的核素（例如把氢聚合成氦）或把重核素分裂成较轻的核素（例如把铀分裂成钼和锡）时，将伴随着释放能量。这就是通常所说的聚变和裂变。可以发生聚变或裂变的核素不少，原则上都可能成为核燃料。聚变必须在很高的温度下才能进行，所以也称热核反应。裂变则须在中子激发下才能进行。

目前在聚变能的释放上，虽然已经实现了氢弹爆炸，但由于还不能控制它，所以还不能用作民用的能源。裂变能则已经成功地用于发电，也就是我们常说的核电站。

铀是目前核电站可用的唯一的天然核燃料。它由 ^{235}U 和 ^{238}U 两种同位素组成，各占 0.7% 和 99.3%。目前商用核电站只利用了 ^{235}U ，可见对天然核燃料的利用效率是很低的。为了提高核燃料的利用效率，显而易见就是用 ^{238}U 作核燃料。这可以使 ^{238}U 吸收一个中子变成 ^{239}Pu （钚，它具有和 ^{235}U 相似的核性质）来实现。此外，天然存在的钍（ ^{232}Th ）也可以吸收一个中子变成具有和 ^{235}U 相似核性质的 ^{233}U 。今天我们所指的核燃料一般包括：铀（U）、钚（Pu）、钍（Th）三个元素，尤以铀为最重要。

三、核燃料循环

核燃料以反应堆为中心循环使用。

(一) 铀的开采、冶炼、精制及转化：铀是比较分散的元素。世界上重要的产铀国家有：加拿大、美国、独联体、澳大利亚、刚果、尼日利亚等。我国的东北、西北、西南及中南地区都蕴藏有铀。但是可提供一定铀产量的铀矿石的含铀量的品位较低 ($10^{-4} \sim 10^{-2}$)，掘出的含铀矿石必须经过复杂的化学富集，才能得到可作粗加工的原料。过去开采铀矿石都采用传统的掘进方式（耗能大、成本高、生产周期长，还有运输、尾矿等问题）。近来根据铀矿石性质的多样性，又开发了地表堆浸、井下堆浸以及原地浸取等方式。

我国的铀矿石属低品位等级，一般在千分之一含量就要开采，成本较高。为了降低成本，充分利用低品位矿石，80年代以来就积极开发堆浸、地浸技术，现已投产。例如地表堆浸，处理品位为 8×10^{-4} 的沙岩矿，成本降低 40%。原地浸取工程也已经开工。原地浸取采矿的优点是：成本低（投资只有掘进的 $1/2$ ）、工艺简单、节约能源（省去了磨碎、运输等工序，可节约能源 60%）、节约劳动力、减轻劳动强度（节约劳动力数十倍，工人进行流体物操作，劳动条件大为改善）、矿山建设周期短、可以充分利用低品位铀资源。因此受到重视而被称为铀矿冶技术上的一场革命。

浸取液经过离子交换、萃取以富集铀，再经过酸性条件下沉淀（与铀金属及碱土金属分离）和碱性条件下溶解（与过渡元素分离）以进一步净化铀，最后得到铀的精炼物。将此精炼物进一步纯化，并将铀转化成低沸点的 UF_6 。（升华温度：1 大气压下 56℃；0.13 大气压下 25℃），即可用作浓缩 ^{235}U 同位素的原料。

(二) ^{235}U 同位素的浓缩： ^{235}U 是唯一天然存在的易裂变核素。不同设计的反应堆需要不同浓缩度的铀（如：压水堆——当前核电站应用最多的堆型——需要 2~3%；游泳池堆需要 10%；快堆需要 25%；高通量材料试验堆需要 90%）。而核弹则需要更高的浓缩度。因此生产浓缩铀是核工业中十分重要的环节。

同一元素的同位素化学性质相同，只在质量上有所差别。利用这一差别可以实现同位素的浓缩/分离。核素越重，质量差别越小（如：氢、氘相差一倍；而 ^{235}U 、 ^{238}U 则相差 ~1%）。可见实现 ^{235}U 同位素的浓缩，技术上的难度很大。

利用因质量不同而引起的速度效应或离心力效应可以分离同位素，并已达到工业化的程度。它们分别是气体扩散法和气体离心法，此外空气动力法也有了中间工厂。

气体扩散法：这是已实现工业应用多年（1946~）的大规模生产方法。其原理是：不同分子量的气体混合物在热运动平衡时，具有相同的平均动能，因而速度不同。由 $M_1 V_1^2 = M_2 V_2^2$ 可得： $\sqrt{M_1/M_2} = V_2/V_1$ ，即轻分子运动速度稍大于重分子运动速度，从而实现同位素分离。

由于升华温度适当（工作时可呈气态，存储及运输时可呈固态）， UF_6 是唯一可用的工作介质。下图是气体扩散法的示意图。由图可见：轻分子碰撞扩散膜的次数比重分子多，由于膜上有允许 UF_6 分子通过的微孔，穿过膜的 UF_6 中， ^{235}U 同位素略有浓缩（浓缩程度用上述的 $\sqrt{M_1/M_2}$ 表示，称为分离系数 α ；这里应为： $\sqrt{352/349} = 1.0043$ 。这只是理论值，实际值远低于此，一般不超过 1.002）。由于单级的分离效果很小，为了达到一定的浓缩度，需要串联许多级才能完成（3%需要一千多级，90%需要几千级）。

扩散膜是气体扩散法的关键技术。它的孔径在 $0.01-0.03\mu$ ，每平方厘米有几亿个微孔，还要能经受住 UF_6 的腐蚀和两端的压差；由于需不断压缩穿透过膜的低压 UF_6 ，继续进行扩散分离，所以要消耗大量电能；压缩气体消耗的功，转变成了废热需要排除，所以要消耗大量冷却水（大型扩散厂每公斤分离功单位约需消耗 $2500\sim 3000\text{kw/hr}$ 的电能，一座年产量 9000 吨分离功单位的扩散厂，需要附设 240 万 kw 容量的电站；排除压缩废热相当于电站排热量的 $1/2$ ）。

气体离心法：在强离心力的作用下，可以实现轻、重同位素的分离。在离心力作用下，重分子在离心机的外周浓集，轻分子在轴线浓集。分别引出气体流，便可得到贫化和加浓两种流份。

离心法比扩散法的分离系数高（外周线速度 300 米/秒时， ~ 1.058 ），因此只需要较少的级数便可得到扩散法同样的分离效果。如为了获得 3% 的 ^{235}U 只需要 100 级左右。但因为单级离心机的生产量很小，所以每一级需要联合多台机器，才能实现一定的产量。一座年产 6000~10000 吨分离功的大型分离厂，需要一二百万台离心机，可见它的维修工作量是很大的。它的突出优点是电能消耗小，约为扩散法的 $1/10$ ，现正在逐步取代扩散法。

高转速的离心机是本方法的技术关键，（理论上，单位时间内的分离功数量与转筒外周速度的四次方成正比，与转筒长度成正比）一般要求达到 300~500 米/秒的外周速度，当转筒直径为 10 厘米时，相当于 6~10 万转/分。这需要开发高强度的材料（如高强度合金、纤维复合材料）和长寿命的离心机。

激光分离同位素：上述两种方法虽然都已具有工业应用的意义，但是他们也有共同的问题，即：（1）必须把许多分离效果很小的单元串连成庞大的系统；（2）消耗相当大的电能。这些都使分离功的成本很高（轻水堆核电站燃烧费中，铀加浓约占 $1/3$ ，其中 60% 是电费，35% 是基建费），因此人们不断地研究新的分离方法。激光法就是目前被认为最有希望的方法。

在原子或分子中，各同位素的吸收光谱有细微的差别。利用单色性好的激光有选择地激发某一种同位素至特定的激发态，然后与未被激发的同位素分离。

例如对于金属铀蒸气，许多吸收谱线都很窄。可以用单色性好的激光束选择性地激发 ^{235}U 原子使其电离，而不激发（电离） ^{238}U 原子。电离了的 ^{235}U 原子经过电磁场被偏转而与 ^{238}U 分离。它有以下显而易见的优点：（1）有很大的分离系数，单级分离即可生产出轻水堆用的浓缩铀（天然铀 6%）；（2）贫料丰度能降到很低；（3）可以用其他分离方法已不能用的尾料（2% ^{235}U ）作进料。

（4）其它方法：热扩散法，质量扩散法，空气动力法等都是曾经研究过的方法。其中南非的 UCOR 法（一种空气动力法）已经在大型中间工厂中实现。

（三）燃料元件的制造：核燃料的燃烧过程和化学燃料的燃烧过程相似，是一个不断消耗燃料、产生废物的过程。但是核燃料是具放射性的物质，核反应产生的废物具有更强的放射性，都不能像化学燃料那样直接与环境相接触，而需要加以密封包装，制成燃料元件才能进入反应堆。

不同类型的反应堆，需要的燃料形式和燃料元件形式不同。现以目前建造数量最多的核电站压水堆说明燃料元件及其制造：

动力压水堆普遍采用低浓度 UO_2 陶瓷燃料（ ^{235}U 浓缩度 1.66~4.4% 的难

熔化合物如：铀的碳化物 UC，氧化物 UO_2 ）。将烧结、磨光的 UO_2 陶瓷芯块（芯块的高度 / 直径 $\sim 1:1.5$ ）装入包壳管（ $\phi=10\sim 15\text{mm}$ ； $L\sim 4\text{m}$ ），使芯块在管内叠成柱形。包壳材料用锆合金（Zr-4 合金：Zr-Sn 合金中添加少量 Fe、Cr），壳厚 $\sim 0.7\text{mm}$ 。为防止芯块变形挤胀包壳，两者间留有微小空隙（ $\sim 0.1\text{mm}$ ），为改善因此而发生的传热性能变坏，管内充以氦气（20~30 大气压）。最后焊封包壳管（是阻止放射性物质外泄的第一道屏障），成为燃料棒。

将若干根燃料棒按一定的排列方式组合在一起即成为（棒束型）燃料元件。压水堆采用 $14\times 14\sim 17\times 17$ 的正方形。

燃料元件是在十分苛刻的条件下工作的（核燃料的能量高度集中，在反应堆中燃烧的时间又很长，核电站中大约 3~4 年，核潜艇中可达十年以上）。在反应堆中长时间地受到强中子流的辐照，高流速、高温冷却剂的冲刷，裂变产物的辐照和化学侵蚀等诸多作用下，还要求燃料元件在整个工作期间保持其性能、形状、尺寸稳定。因此所用的燃料元件（核燃料及包壳管）必须耐高温、耐辐照、耐腐蚀并有良好的机械性能和核物理性质。这不仅要求选用特殊材料，而且还要求材料有很高的纯度（如硼含量需在 10^{-7} ）。为了确保燃料元件安全可靠，新元件还要在完全仿真的条件下进行运行考验。可见燃料元件制造成本很高，这一费用约占燃料费的 30%。

（四）在反应堆中燃烧：功率为 100 万千瓦压水堆核电站所用反应堆中，上下堆芯板间插入 193 根燃料组件，为反应堆堆芯，初装料共约 80 吨铀（浓缩度 2.6%），元件在堆内停留时间三年。

堆芯置于厚重的压力壳内（也是阻止放射性物质外泄的第二道屏障），使热水（用作冷却剂及中子慢化剂）在 120~160 大气压，300~330 °C 下将核燃料产生的热带出，在一回路产生蒸汽。一回路和堆本体又都包在安全壳（或混凝土材料）内，成为阻止放射性物质外逸的第三道屏障。有此三道屏障，使核电站安全有了保证。

（五）乏燃料后处理：燃料在堆中燃烧（即铀裂变成为中等质量的核素），产生吸收中子的毒物， ^{235}U 浓缩度减小，燃料元件也可能发生变形、肿胀等现象，到了一定程度，必须将燃料元件取出反应堆。这种燃料称为乏燃料。

乏燃料的组分主要是： ^{235}U （浓缩度 0.83%）， $^{238}\sim^{242}\text{Pu}$ ，Np，Am，Cm，及裂变产物。其中 ^{235}U 和 $^{239},^{241}\text{Pu}$ 是核燃料，可以回收再用作反应堆进料；同时也可提取其他核素供科学研究或工、农、医学之用。这一主要以回收 U，Pu 为目的的过程称为乏燃料后处理。其简要过程为：

1. 乏燃料元件的“冷却”：燃料元件从堆中卸出后，必须放置一段时间，才能保证所得产品的纯度或产率，也才能使化学分离操作在较低的放射性水平下进行。如：为了保证分离出的铀中无 ^{237}Np ，需冷却到 ^{237}U 衰变完全，（ ^{237}U 经衰变生成 ^{237}Np ， $T_{1/2}=6.75$ 天）；为了得到 ^{239}Pu 的最大产率，需冷却到 ^{239}Np 衰变完全（ ^{239}Np 经衰变生成 ^{239}Pu ， $T_{1/2}=2.35$ 天）等。考虑到放射性毒素和挥发性都很强的 ^{131}I 的 $T_{1/2}=8.05$ 天，将碘的完全衰变作为控制冷却时间的主要因素。对压水堆核电站的乏燃料一般至少需冷却 150 天左右。这时，只剩下十几种较长半衰期的裂变产物核素和 U、Np、Pu、Am、Cm 的长寿命核素。较长半衰期裂变产物的放射性强度约下降 30 倍（ $3.76\times 10^9\text{Ci}\rightarrow 1.14\times 10^8\text{Ci}$ ）。

燃料元件一般放在特制的水池中冷却。

2. 乏燃料元件的首端处理：为了进行乏燃料的化学分离，需将燃料元件组合体先行解体，然后除去包壳，将芯块溶解。这个过程称为首端处理。

组合的燃料元件，从水池中取出后，首先用机械切割法（锯、铣）分解，以卸除非燃料构件部分如：端件、定位格架、元件盒等。

分解得到的元件棒被切割成短段（2~5 厘米），使芯块暴露出来，然后选择适当的化学试剂（可用硝酸使能溶解芯块而不溶解元件包壳）使芯块（U、Np、Pu、Am、Cm、及裂变产物）溶解，而锆合金包壳不溶。溶解液经过调整价态（如铀呈 4 价，钚、镅呈 3 价）以便下一步分离。

3. 化学分离：将可重新进入核燃料循环的铀、钚与燃烧中生成的裂变产物分开并达到必须的纯度，是乏燃料后处理的主要内容。

Purex 流程是广泛用于处理动力堆低浓铀核燃料的化学分离方法。

“共去污”和“铀、钚分离”两过程是化学分离流程的关键。都采用有机溶剂 TBP 萃取法。基本原理是利用不同元素在不同条件下在有机相和水相中的溶解度不同而进行分离。在共去污过程，铀和钚同时被萃取入有机相而与裂变产物和锕系元素分离。水相中集中了燃烧产物（放射性废物）。应用核能的高放废物就是从这里产生的，需要作专门处理。有机相中的铀、钚经还原反萃（将钚还原成不被萃取的 3 价状态），使钚进入水相而与铀分离。再将铀、钚分别净化到燃料纯的标准。

化学分离的难点在于：溶解液组分复杂约 20 种元素共存于溶液中；属于这些元素的放射性核素有 35 种左右其辐射作用不仅使操作复杂化，而且会导致萃取剂的变化；为了满足核燃料再循环使用时对核性质和辐射安全的要求，产品要求的纯度很高（如铀的净化需要 10^7 ，钚的净化需要 10^9 ）；为此在分离过程中，要不断地进行分离纯化，一般要进行三次纯化，才能达到要求。分离纯化是利用元素的化学价态不同时，在水和有机相中的溶解度不同；和介质的组成不同（氧化性、还原性、酸度、浓度等的不同）时，对不同元素的作用不同来进行的。这样，在每一化学步骤，都有复杂的操作过程。成为乏燃料后处理最关键的内容。

乏燃料后处理工厂的基本特点是：放射性强和有临界安全的危险（核燃料在一定条件下，可能达到超临界状态而产生射线辐照和放射性污染）。对前者要采取屏蔽措施，使与生态环境相隔离。主要是用混凝土、钢材将工艺设备包装在内（热室），用机械手操作；对后者要用控制物料浓度、质量、设备周围物质、容器大小来防止。

乏燃料后处理的产品是可作为核炸弹的敏感物质，因此是核监督的重要对象。主要的对象是 ^{235}U 和 ^{239}Pu ，近来由于 ^{237}Np 的积累不少，几个核大国正打算也加以控制（美、俄、英、法、日共议后认为目前世界上已有 4 吨 ^{237}Np ，2010 年将达 12 吨）。

（六）核废物的管理：核燃料的生产、使用过程中将产生放射性废物。废物主要来自核燃料在反应堆中燃烧时产生的强放射性裂变产物，但它被包在燃料元件包壳中，固定在一定位置上，并不外泄；待成为乏燃料从堆中取出，在后处理工厂经解体、去壳、溶解、化学处理等步骤，便产生固体、液体、气体三种状态的废物，简称“三废”。可见，放射性三废表现上都在乏燃料后处理工厂产生（占核工业的 99%）。

固体放射性废物：核燃料后处理厂解体燃料元件组合体的各种部件及退

下的包壳等固体废物，可先行减容，然后埋藏。对一些有机废物（棉花、纸张、树脂等）可以压缩减容埋藏，也可以焚烧减容埋藏。

液体放射性废物：核燃料芯块溶解后所进行的化学处理过程，是排放液体废物的主要过程。它含有裂变产物元素和超铀元素。由于在流程的不同出口，排出废液的放射性强度不同，可按其放射性水平分为高、中、低三类放射性废液。这三种废液必须严格分开，分别处理。

高放射性废液是后处理厂产生的。它含有几乎全部裂变产物元素和超铀元素。其中含 的长寿命超铀元素危害大、时间长，是所处理废液的重中之重，是全世界普遍关心的问题。为此投入了大量人力、财力，研究了许多方案。主要思路是：将高放废液与玻璃（陶瓷、人造岩石）原料一起熔融，煅烧成稳定的玻璃体，然后深埋在稳定的地质层中。虽然做了许多工作，但尚未在工业上完全实践。因此，现在的高放废液都还储存在不锈钢罐中。另一思路是将高放废液先进行化学处理，把寿命长、毒性大的超铀元素分离出来，然后再进行物理处理，使之变成寿命短的核素，再作深埋处置。这样，废物处置的安全性将更加可信。

中、低放射性废液来自后处理厂及其它生产、科研部门。可以实行浓缩（蒸发、沉淀、离子交换、渗透），然后将放射性浓集液、残渣用水泥或沥青固化，净化后的水可以排放。

气体放射性废物：后处理厂的废气主要是 ^{85}Kr 、 ^{131}I 、 3H ，反应堆及其它生产、科研部门也可能产生废气。 ^{131}I 危害较大。吸附法是净化气体常用的方法。对于危害小、量少的废气可以用高烟囱排入高空。放射性气溶胶（<微米量级的粒子）是造成人体内照射的主要威胁，因此在通过烟囱排放前，需要过滤。

四、核燃料循环的发展前景

人们对核燃料循环的研究，主要着重在两个问题。即：充分利用核燃料资源和使核燃料的利用清洁化。

1. 充分利用铀（钍）资源：目前核能主要是利用 ^{235}U ，但它只占天然铀中的 0.7%，即使考虑到压水堆的转换比为 0.6，天然铀的利用率也只有 $0.7\% + 0.7\% \times 0.6 = 1.1\%$ 。目前已探明世界上（经济上）有开采价值的铀为 500 万吨，而一座 1000 兆瓦（100 万千瓦）的核电站，要消耗的铀为：初装量 365 吨+年补充量 174 吨（运行 30 年约需天然铀 5500 吨）。能源专家按年增长率 2.5%（1989～1990 的低潮增长率）估算，现有储量只能维持到 2035 年左右。可见用现在类型的核电站，铀作为燃料资源并不丰富。

但是如果能将天然铀中未被热中子堆利用的、占 99.3% 的 ^{238}U 利用起来，情况将发生本质的变化。

利用快中子增殖堆能够解决这个问题。在快中子增殖堆中，有足够富裕的中子能将 ^{238}U 转换成 ^{239}Pu 。 ^{239}Pu 与 ^{235}U 相同，是可以燃烧的。这样就可以把铀资源的利用率从 ~1% 提高到 60～70%，可见铀资源在能源中的位置所起的作用。再加上快堆对燃料的利用比热堆充分（能耗大 3 倍左右），就可能更充分地利用铀。这样人们就不必再为化石燃料的污染环境（我国烧煤每年排入大气的 SO_2 1460 万吨，烟尘 2300 万吨，此外还有世界性的温室效应）和引起交通紧张（我国煤运量占铁路的 40%，占海运的 30%，而 1000Mw 电站需要运输的煤量为 330 万吨）而烦恼。

和 ^{238}U 相似, ^{232}Th 也能吸收中子而转换成能做核燃料的 ^{235}U 。但因 ^{233}U 中的 ^{232}U 的子体具有很强的放射性, 操作起来很不方便, 近来除印度这样的铀资源匮乏而钍资源丰富的国家外, 其他国家暂时放弃了对它的研究。

2. 核能应用清洁化: 后处理厂共去污流程产生的高放废液的最终处置, 是人们最关心的问题。它含有反应堆中产生的全部裂变产物、镅和超铀元素。裂变产物的放射性在储存 300 年后将降到比天然铀矿还低的水平。而镅、镎、钷等超铀元素在储存几十万年后仍保留有相当的水平。一座 1000Mw (e) 的核电站每年将生产 25 公斤超铀元素 [1990 年世界核电站装机容量为 325870Mw (e), 可产生超铀元素 ~ 8 吨, 如果用 U+Pu 的混合燃料此值还将加大]。对于这样长寿命的放射性物质, 进行几十万年的长期埋葬, 不能不引起公众的忧虑。

缩短放射性废物辐射危害达到环境允许水平的时间, 将从根本上消除这一疑虑。这样人们就能够从有人类历史文献记载的时间尺度来评价地层的稳定程度, 从而做出不容置疑的结论。这个目的可借用中子嬗变长寿命裂变产物和超铀元素的方法来实现。

在中子作用下, 上述元素或嬗变成稳定的核素 [如: $^{99}\text{Tc} (n, \gamma) ^{100}\text{Tc}$ ^{100}Ru], 或经过裂变反应燃烧成短寿命裂变产物 [如 $E_n > 0.5\text{Mev}$ 时的 $^{237}\text{Np} (n, f)$; $^{241}\text{Am} (n, \gamma) ^{242}\text{Am} (n, f)$], 这时不但清除了长寿命核素, 而且还为核燃料提供了能量, 达到一举两得的目的。

高放射性废液经过上述物理处理后, 剩下的只是半衰期 30 年左右的裂变产物 (^{90}Sr , ^{137}Cs 等), 只需要几百年的时间就可达到安全水平。

五、结束语

我国是世界上的核大国, 具备一整套核燃料循环体系。这一套宝贵财富是在老一代革命家和科学家的关怀和具体指导下建立发展起来的, 至今已经 40 年了。40 年来在全国各方的无私支援下, 我国的核燃料生产不但满足了核武器、核电站的需要, 而且尚有富余, 可以出口 (微堆、核电站等)。近十年来, 在 863 计划中, 核能技术也成为能源技术领域的重要内容之一。但是在新形势下也还存在着许多困难: 设备陈旧、工艺老化、后继乏人、资金不足等。但核工业部门的全体人员, 在第二次创业的鼓舞下, 是有信心夺取新的胜利的。

21 世纪初石油化工 技术进步的展望

李大东 闵恩泽

中国石油化工总公司石油化工科学研究院

李大东 石油炼制催化剂和工艺方面的专家。1938 年 2 月 24 日生于北京。1962 年毕业于北京大学化学系。现任中国石油化工总公司石油化工科学研究院院长，教授级高级工程师。兼任中国石油学会常务理事，石油炼制分会主任，中国化学会催化专业委员会主任等。1994 年当选为中国工程院院士。长期从事石油加工催化剂的研究与开发。

闵恩泽 石油化工催化领域的专家。1924 年 2 月 4 日生于四川成都。1946 年中央大学毕业。1951 年获美国俄亥俄州立大学博士学位。历任石油化工科学研究院总工程师、副院长、首席总工程师、学术委员会主任等职。曾任中国石油学会副理事长、中国化学会常务理事等。1980 年当选为中国科学院院士(学部委员)，1992 年当选为中国科学院学部主席团成员和化学部副主任。1993 年当选为第三世界科学院院士，1994 年当选为中国工程院院士。长期从事工业催化剂的研制与开发，成果丰硕。

我国石油化学工业(以下简称石化工业)包括从原油生产汽油、煤油、柴油、润滑油等石油产品的石油炼制，也包括以蒸汽裂解生产的乙烯、丙烯等为原料生产合成树脂、合成橡胶、合成纤维以及基本有机原料等的石油化工。到 1994 年底，我国原油加工能力已达到 1.81 亿吨/年(其中中国石化总公司 1.52 亿吨/年，占 84%)，在世界上排第四位。从世界前十位炼油公司排序看，中国石化总公司已成为世界第三大炼油公司，列于英/荷壳牌公司和美国埃克森公司之后。1994 底我国乙烯生产能力达 238 万吨/年(其中中国石化总公司 210 万吨/年，占 88%)，在世界上排第八位。迈入 21 世纪初我国石化工业又面临一个不可多得的历史发展机遇，振兴石油化工建设支柱产业初步设想是：第一步，到 2000 年，使原油年加工能力达到 2 亿吨左右，乙烯年生产能力达到 500 万吨左右，基本形成支柱产业的框架；第二步，到 2010 年，原油年加工能力达到 3 亿吨以上，乙烯年生产能力达到 800~1000 万吨，使我国石化工业有一个更大的发展，在技术上达到世界先进水平。这样，展望 2010 年国际和我国石化技术进步的前景就成为值得探讨的一个问题。回顾石化技术进步的历史，技术进步可以有两类：一类是在原技术基础上的连续式技术进步；另一类是另辟蹊径，转移到一个全新的科学技术知识基础上的非连续式技术进步。下面试图从技术进步的推动力，去展望国际和我国石化工业这两类技术进步的前景。

一、国外炼油技术进步的展望

国外炼油技术进步的推动力主要来自环境保护、保健和安全的严格要求。国外为保护环境，要求使汽油和柴油成为“环境友好”产品，对其质量制定了严格的规格指标。例如 1990 年美国清洁空气法(修正案)规定，将逐步推广使用含氧汽油(Oxy-Fuel)和新配方汽油(Reformulated Gasoline)，减少汽车废气等空气的污染。汽油组成将发生深刻的变化，不仅要求限制汽

油的蒸汽压、苯含量、芳烃和烯烃含量等，还要求在汽油中加入相当数量的含氧化合物，比如甲基叔丁基醚（MTBE）、甲基叔戊基醚（TAME）。这种新配方汽油的质量要求已推动了生产汽油的有关炼油技术沿着下列方向发展：

催化裂化由单一生产高辛烷值汽油，通过开发新催化剂和改进工艺，转向既生产高辛烷值汽油，又生产异丁烯、异戊烯等醚化原料，同时还要减少裂化汽油中的芳烃含量；

催化重整要降低操作苛刻度，以减少重整生成油中的芳烃含量；

异丁烷与丁烯烷基化生产高辛烷值汽油组份，原料烯烃将扩大到包括丙烯、丁烯和戊烯；

轻质烷烃异构化，其原料将由正戊烷、正己烷扩大到正庚烷；

由于甲基叔丁基醚、甲基异戊基醚等含氧化合物已成为汽油的重要组份，其生产技术将不断改进，包括配套所需增产异丁烯的正丁烯异构化技术，新的含氧化合物的生产技术如从丙烯生产二异丙基醚等还会继续开发。为了降低汽油中的苯含量，轻汽油馏份苯加氢抽提蒸馏分离苯等技术均在开发。同时，炼厂还减少汽油中丁烷与 C_5 馏份的调入以降低蒸汽压，将它们作为石油化工原料。由上可见，由于汽油是石油炼制工业中最主要的产品，其质量的变化已对石油炼制技术带来多么深刻和广泛的影响，而上述这些影响将继续推动有关炼油技术的连续式技术进步。

柴油是另一重要的石油产品，新的“环境友好”柴油要求硫含量不大于 0.05%，芳烃含量不大于 20%，同时十六烷值不低于 40。这些要求将推动现有柴油加氢技术，开发新催化剂、改革工艺等来达到上述目的。“环境友好”汽油、柴油等的推广应用，还会对润滑油质量提出相应的要求，也将推动其技术进步。

以上这些环保要求已大大推动了近年炼油技术的发展。进入 21 世纪初还将继续推动炼油技术沿着这些方向的连续式进步。

炼油技术除受环境保护因素的推动外，21 世纪初还会有原油资源、产品市场等因素影响炼油技术发展。延迟焦化还会不断改进，渣油加工的组合工艺也会发展。从世界石油资源的开发趋势来看，原油有变重趋势，同时高硫、高金属原油增多，这将增加今后渣油加工的难度，所以开发焦炭选择性更好、更能抗重金属污染的渣油催化裂化催化剂仍是重要的课题。渣油固定床加氢处理仍会继续向多床层和多个反应器体系发展，用多种不同功能的催化剂来对付劣质原料油。从石油产品市场的构成看，柴油的需求量将会增加，这将推动进一步改进催化剂的选择性来提高加氢裂化所产柴油的收率，同时开发从气体烯烃叠合生产柴油馏份的技术。

展望 21 世纪初，炼油技术的重大突破可能有三：一是固体酸异丁烷 / 丁烯烷基化，二是馏份油的生物催化脱硫，三是使用固体碱的汽油、煤油硫醇氧化脱臭。为了代替 HF 、 H_2SO_4 催化剂以减少环境污染，各大公司均在大力研究环境友好的固体酸烷基化工艺，一种负载型液体酸烷基化工艺也已中试成功，准备开始工业试验。一套柴油生物催化脱硫中试装置正在建设。据称生物催化脱硫可比现有技术减少投资 50%，节省操作费用 15%。生物催化脱硫也适用于汽油和原油脱硫。这些是可望发生于 21 世纪初炼油技术的非连续式技术进步。采用固体碱代替苛性碱溶液的汽油、煤油硫醇氧化脱臭技术正在开发，其目的是避免废碱液排放引起对环境的污染。新催化材料的发现，新催化反应工程的应用也可能带来一些技术突破，如新型超大孔分子筛的发

现，纳米级分子筛的合成及应用，新催化膜反应器的应用等。

二、我国炼油技术进步的展望

为了充分利用石油资源，多产轻质油品，我国石油炼制从 60 代至今一直是走深度加工的道路。深度加工技术以发展催化裂化为主，这是把 350 ~ 520 减压重油馏份裂化为汽油并副产柴油和液化气的一种工艺。我国开发成功了多种催化裂化工艺和一系列催化裂化催化剂。对于 > 520 渣油的加工，掺渣油催化裂化工艺近年来得到迅速发展，还进一步发展了延迟焦化、减粘、溶剂脱沥青等工艺。同时对这些渣油装置加以联合，开发成功多种组合工艺，进一步提高了轻质油收率。此外，还发展了高压加氢裂化，把重油更多地转化为喷气燃料和柴油。对于提高汽油辛烷值，已有半再生式和连续移动床两种形式的催化重整。对于油品精制，已开发了多种加氢精制工艺和催化剂品种，为了综合利用好催化裂化副产的大量气体，已有异丁烷 / 丁烯烷基化和异丁烯醚化等生产高辛烷值汽油组份的技术，还有生产化工产品的技术，如顺丁橡胶、聚丙烯、异丙醇生产技术等。我国炼油技术基本上是六七十年代依靠自己力量开发的，近十年也引进了一些炼油新技术，进一步提高了水平，这是我国炼油技术今后前进的基础。

展望 21 世纪初，我国炼油技术的发展，其推动力和发展主要有几方面：

(1) 为了利用有限的原油满足大幅度增长的石油产品市场需要，要求进一步提高轻油收率。目前轻油收率平均为 60%，2000 年希望达到 75%。由于催化裂化是我国重油转化为轻质油的主要手段，所以催化剂要形成品种系列以满足各种原料油、装置和产品分布的需要，特别要开发高选择性的裂化催化剂以增产轻油，开发生焦少的渣油裂化催化剂以达到多掺渣油，同时还要大力降低裂化催化剂生产成本。渣油催化裂化进一步提高，延迟焦化、溶剂脱沥青等渣油加工工艺要进一步完善，同时优化匹配各种渣油加工组合工艺，提高轻油收率。

(2) 从我国市场的需要出发，柴油消费量大于汽油消费量。受价格因素的影响，我国每年的柴油产量却小于汽油产量，南方一些地区大量进口柴油。这一产品结构需要改变，要开发多产柴油的催化裂化催化剂和工艺。由于催化裂化从本质上讲是生产汽油为主的手段，提高柴油收率受到一定限制，因此还是要靠发展加氢裂化来大幅度增产柴油，特别是要开发投资省的中压加氢裂化技术。此外，开发烯烃叠合生产柴油馏份的技术也是一条新途径。

(3) 面对国内、国际两个市场，汽油需要升级换代，适应国内市场需要，要推广使用 90 号高辛烷值汽油及无铅汽油，同时生产一部分新配方汽油出口。有关催化裂化、催化重整等技术均要按此方向发展。近年已开发成功多产烯烃和高辛烷值汽油 (MGG) 的技术，多产异丁烯、异戊烯 (MIO) 的催化裂化技术等，仍要继续提高。要进一步提高醚化、烷基化技术水平。

(4) 我国炼油厂所炼原油种类将日益增多，国内以低硫、石蜡基原油为主，但也有高酸性、环烷基原油等，还有高粘度的稠油。今后还要大量进口中东的高硫、高金属、高沥青质原油，炼油技术也要适应这些原油性质的变化，特别是开发高硫原油加工技术，防止设备腐蚀，精制油品等。对于高硫原油渣油的加工，发展加氢处理脱硫、脱氮、脱金属、脱沥青技术是十分迫切的任务。

(5) 我国炼厂的原油加工能力还要大幅度提高，利用现有炼油装置，消

除“瓶颈”，通过技术改造提高处理能力是经济有效的途径。为此，需要开发技术以提高原油蒸馏、催化裂化、加氢裂化、延迟焦化、半再生式催化重整等处理能力。

此外，我国炼厂装置的大型化（1000 万吨 / 年规模）、计算机的应用、污水、废气等的处理也将面临一系列科技问题，需要开发新技术来加以解决。对于国外已开发的属非连续式技术进步的技术，我国也已开展研究。如固体酸烷基化已按自己的新构思在开展研究，还在开展固体碱的汽油催化脱硫醇研究。跟踪国外生物催化脱硫的科研工作尚待开展。争取 21 世纪初在这些领域有中国自己的创新技术。

三、国外基本有机原料、合成树脂发展的展望

对于基本有机化工原料的生产，环境保护技术的开发，除开发污染物（废气、废水、废渣等）的治理技术以治标外，已转向治本，即化学加工技术的开发由过去首先强调目的产品的转化率，转向重视化学反应的选择性，企图减少副产品的生成量，减少废物排放，以减少治理环境污染的费用，甚至追求达到无副产物生成的“零排放”技术。对于烃类选择氧化，国外正大力提高这类反应的选择性。提高烃类选择氧化的选择性，不仅能降低生产成本，而且还能减少副产品对环境的污染。如正丁烷氧化制顺酐，由流化床氧化已发展到提升管晶格氧氧化，选择性已大幅度提高，其它为烃类的晶格氧氧化也正在开发；近年分子筛作氧化催化剂是分子筛应用的重大发展，钛硅分子筛过氧化氢氧化苯酚、丙烯等，选择性大幅度提高，成为新一代的环境友好工艺，前者已工业化；均相络合催化氧化也是大力研究的领域。预期到 21 世纪初这类环境友好的烃类选择氧化制醛、酮、酸等的技术会有大发展。国外正寻找固体酸催化剂来代替一些石化过程中所用的 HF 、 H_2SO_4 、 AlCl_3 催化剂以减少环境污染和改善劳动条件。在苯与烯烃烷基化生产乙苯、异丙苯、长链烷基苯等过程中已开发成功使用分子筛催化剂的新过程，到 21 世纪初还会有新的改进。为了减少溶剂挥发污染环境，采用水做溶剂进行化学反应甚为理想，近年来水溶性均相络合催化剂受到重视，这是原因之一。同时水溶性均相络合催化剂易于与产品分离，克服了油溶性均相络合催化剂与产品互溶而分离麻烦的缺点。丙烯水溶性均相络合催化氢甲酰化制丁醛已工业化，其它烯烃的氢甲酰化、羰化等正在开发。由上可见，环保的要求，正推进新一代基本有机化工原料生产工艺的开发，其中大多数是非连续式技术进步。

由于原料费用通常占石化产品成本的 60% ~ 70%，利用廉价原料生产石化产品始终是石化工业技术发展的方向。近年来的发展趋势是用烷烃作原料生产石化产品。液化气芳构化制造芳烃已工业化，丙烷氨氧化制造丙烯腈已在中试，从丙烷、丁烷、异丁烷制造相应的烯烃有多种工艺，展望到 21 世纪初，利用烷烃代替烯烃为原料生产石化产品会有新进展。由于每年发现的天然气储量大于消费量，世界天然气的储量不断增长。从长远看，天然气将成为生产石化产品更重要的原料。所以，各国均在大力开发甲烷氧化偶联制乙烯、甲烷脱氢偶联制芳烃、甲烷控制氧化制甲醇等技术。这些技术尚有不少技术难关需要攻克才有工业化可能。

国外预测未来聚烯烃将变得更为重要，将形成一种“聚烯烃材料工业”。80 年代烯烃聚采用金属茂催化剂是一项重大技术突破。其特点是催化活性高，大约可达 10^6 克聚合物 / 克金属；单一活性中心，使聚合物的分子量均

匀；可制备具有特殊优异性能的树脂，如所生产的间规聚丙烯具有较好的透明性、耐辐射性等。金属茂聚烯烃催化剂已迅速工业化，预计到 1996 年底，所产的聚乙烯、聚丙烯、聚苯乙烯等将达到 86.8 万吨/年，到 21 世纪初，这种采用金属茂催化剂的烯烃聚合技术还会继续大发展。

四、我国石化技术发展的一些展望

我国现代化大型石油化工联合企业基本是靠引进国外技术建立的。近年来在消化、吸收的基础上，引进装置所用的催化剂绝大多数实现了国产化，其中有的达到国际先进水平。对于乙烯、丙烯等烯烃的生产，开发成功自己的 CLB—1 和 SH—1 两种蒸汽裂解炉型，同时还自主开发成功我国的 DCC 重油催化裂解制烯烃技术。对聚烯烃、基本有机化工原料的生产技术已开展大量研究和开发。以上这些是今后技术前进的基础。

展望 21 世纪初，我国石化技术的发展，对于我国近年开发成功的 CBL-1 和 SH-1 两种蒸汽裂解炉，还应优化裂解炉设计和结构，提高裂解温度、缩短停留时间、降低烃分压，从而提高烯烃收率和热效率，同时增加对原料的适应性和操作弹性，此外还要扩大规模。蒸汽裂解的原料要轻质化、多样化和优化，因此要继续开发各种原料的加氢改质技术，以充分发挥现有蒸汽裂解炉的潜力。我国自主开发的重油催化裂解制丙烯的技术，为发展石油化工开辟了一条新途径，还要从催化剂、裂解装置结构等方面继续完善，以保持国际领先水平。

到 21 世纪初，我国基本有机原料的生产技术，要在消化、吸收引进装置的前提下，继续有所创新。已达到国际先进水平的环氧乙烷、丙烯腈、二甲苯异构化、乙苯脱氢等催化剂要继续开发，争取达到领先水平。同时以这些催化剂为基础，完成配套的工艺、专用设备开发，形成自己的成套技术。大力开发环境友好的基本有机原料生产技术，努力在分子筛催化剂合成乙苯、分子筛催化剂合成异丙苯、异丙苯氧化分解制苯酚和丙酮、烯烃水溶性均相络合催化氢甲酰化合成丁、辛醇和高碳醇、液固流化床合成烷基苯等方面有所突破，形成我国的专利技术。

到 21 世纪初，对于合成树脂技术的开发，要加快聚乙烯、聚丙烯引进装置所用催化剂的更新换代，特别要大力开发金属茂催化剂，迎头赶上世界先进水平。同时也要在聚乙烯、聚丙烯的工艺技术和关键设备等方面有所突破，形成自己的成套技术。如丙烯聚合环管本体——气相流化床组合工艺，浆液法高密度聚乙烯生产工艺等。从市场需要出发，努力增加合成树脂的品种，重点开发一些专用料，如农用塑料系列专用料、包装用系列改性新产品材料、家电、办公用具用系列专用料、汽车用系列专用料、工程塑料及合金系列材料等。同时还要重视己烯-1、4-甲基戊烯-1 等共聚单体制备技术的开发，以便能通过共聚增加塑料的品种牌号。

五、加强定向性基础研究以创新

“基础性研究性和高技术研究，是推进 21 世纪现代化建设的动力源泉”。石油炼制和石油化工发展的历史经验告诉我们：石油炼制和石油化工技术的重大技术突破往往来源于新催化材料的发现、新反应工程的开发和廉价原料的新化学反应的利用。近年来，我国在这些有关石化工业发展的重大科技领域已开展了定向性的基础研究。在新催化材料领域，已在新型分子筛、

杂多酸、固体超强酸、固体碱、金属超微粒子、非晶态合金等方面广泛开展研究，发现了一些新技术生长点。在新反应工程领域，催化蒸馏、液固流化床、超临界反应、磁稳定流化床等领域，研究工作已经展开，也有一些进展。关于廉价原料的新反应，我国对甲烷氧化偶联制乙烯、甲烷控制氧化制甲醇、乙烷丙烷氧化脱氢等也已进行了大量的研究，有的研究已取得可喜的进展。我们应大力加强这些定向性基础研究，争取在科学技术知识上有所新发现，形成新构思，开发成功几个中国独特的石化技术，21 世纪初在世界上占有一席之地。

中国合成纤维的需求与发展

袁晴棠

中国石油化工总公司

袁晴棠 女,石油化工专家。1938年5月12日出生于河南省南召县。1961年天津大学毕业。现任中国石油化工总公司总工程师,高级工程师。兼任中国石油学会副理事长。1995年当选为中国工程院院士。长期从事国内乙烯裂解技术开发,组织石化总公司的科研开发和重大科技攻关,取得多项重要成果。

合成纤维工业是为纺织工业提供原料的重要原材料工业。合成纤维自本世纪30年代工业化以来,已有60年的发展历史。由于性能优良,用途广泛,原料来源丰富,不受自然条件限制等因素,发展相当迅速。世界合成纤维产量1950年仅6.9万吨,1990年已达1552万吨,40年间平均年增长率达到14.2%。同期,天然纤维(棉、毛、丝、麻)的年平均增长率仅2.5%。合成纤维在纺织纤维中占的比例从1950年的0.7%提高到1990年的38.2%,预计2000年将达到42%。1995年世界合成纤维产量为1819万吨。合成纤维工业的发展使纺织原料结构发生了重大变化。

合成纤维是合成材料的重要组成部分,合成纤维的发展对解决12亿人口的穿衣以及粮棉争地问题有着密切的关系,在国民经济中具有重要的作用。为了加速合成纤维工业的发展,国家已在“九五”计划和2010年远景目标纲要中把合成纤维和合成纤维原料作为发展重点加以规划。因此,本文拟对我国合成纤维的需求与发展做一简要叙述。

一、我国合成纤维工业的现状

我国合成纤维工业50年代末期开始发展,1970年总产量3.6万吨。70年代中期,随着我国石油化工的发展,先后建立了上海、辽阳、天津、川维四大合纤基地,为我国合成纤维工业的发展奠定了基础。80年代,又引进了一批国外先进技术,建设了仪征及上海石化二期等大型合纤工程,进一步推动了我国合成纤维工业的发展。进入90年代,我国的合成纤维工业持续增长,1994年合纤产量为205.72万吨(其中涤纶151.53万吨、锦纶201.18万吨、腈纶18.46万吨、维纶5.62万吨、丙纶9.93万吨)。1995年,产量为250万。全国合纤生产能力已达290万吨/年,仅次于美国,居世界第二位。

1983年,中国石油化工总公司的成立,促进了我国合成纤维工业的发展。经过十几年的努力,1995年,石油化工总公司拥有合成纤维单体生产能力133万吨/年,占全国总能力的90%;合成纤维生产能力55.2万吨/年,占全国总能力的19%,在我国合成纤维工业生产中具有重要地位。

80年代以来,我国合成纤维工业虽然有了长足的进步,但与国民经济发展的需要相比,仍有较大的差距。一是合成纤维的产量仍不能满足纺织工业发展对原料的需求。1994年,我国进口合成纤维超过100万吨。其中,涤纶和腈纶缺口较大,分别占到进口合成纤维总量的60%和35%。大量合成纤维的进口,不仅耗用外汇,而且对世界合成纤维的需求产生了影响。如日本的

合成纤维生产 1994 年除尼龙长丝外，均较 1993 年增长了 1.8%，主要原因是对中国等国的出口激增所致。1995 年日本合成纤维产量继续增长，总产量达 151 万吨，比 1994 年增长了 2.3%。此外，合成纤维原料（单体）的进口量也较大，1994 年进口 DMT（对苯二甲酸二甲酯）、乙二醇、丙烯腈、PTA（精对苯二甲酸）、己内酰胺、尼龙 66 盐等合成纤维单体 57 万吨（见表 1）。1995 年进口上述合纤单体 81.9 万吨（见表 2）；二是产品结构有待调整。1990 年世界上四大纶的比例是涤纶：锦纶：腈纶：丙纶为 54.8：24.9：15.0：5.3。同期，我国五大纶的比例是涤纶：锦纶：腈纶：丙纶：维纶为 72.2：7.8：8.5：7.4：4.1。1994 年为 73.7：9.8：9.0：4.8：2.7。其中，涤纶的比重已占到 70% 以上，远高于世界平均水平，而锦纶和腈纶的数量明显不足，这在我国合成纤维进口品种构成中也有所反映；三是合成纤维品种单一，差别化率低。发达国家如日本合纤差别化率在 30% 以上，并已开发出具有复合功能的第三代、第四代合成纤维。目前，我国合纤新品种少，差别化率低，只有 10% 左右；另外，国内合纤在装饰及工业领域的应用也有待进一步开发；四是技术和装备水平需要进一步改进和提高。

二、需求预测

纺织工业是我国的传统工业，也是传统的出口产业，1994 年出口额占我国出口总额的 29.4%。合成纤维工业直接依存于纺织工业，我国生产的合成纤维绝大多数都用于纺织工业，直接出口的纤维只占极少数。反过来，纺织工业对合成纤维工业的依存度也越来越高。1994 年，纺织工业所需的 780 万吨纤维中，仅涤纶、腈纶、锦纶和丙纶就达 282 万吨，约占 36%。1994 年国内合成纤维及单体消耗见表 1。

目前，我国合成纤维工业满足不了市场需求。无论是单体、聚合物，还是纤维的产量都有缺口。产品结构、品种、牌号以及生产技术还有较大的差距。因此，大力发展合成纤维工业，为纺织工业和相关工业提供原料，解决人民群众穿衣问题，是“九五”期间石化工业的一项重要任务。

表 1 1994 年国内合成纤维及单体消耗

（单位：万吨）

| 品种 | 产量 | 进口量 | 出口量 | 表观消费量 |
|---------|--------|-------|-------|--------|
| 涤纶 | 151.53 | 66.39 | 2.17 | 215.75 |
| 腈纶 | 18.46 | 38.52 | 2.38 | 54.60 |
| 锦纶 | 20.18 | 5.27 | 0.53 | 24.92 |
| 丙纶 | 9.93 | 0.25 | 0.003 | 10.18 |
| DMT | 22.57 | 1.31 | 0.05 | 23.83 |
| 乙二醇 | 38.99 | 12.90 | 0.55 | 51.34 |
| 丙烯腈 | 19.11 | 5.10 | 0.002 | 24.21 |
| PTA | 71.88 | 23.93 | 0.70 | 95.11 |
| 己内酰胺 | 2.40 | 11.54 | 0.002 | 13.94 |
| 尼龙 66 盐 | 3.89 | 2.73 | 0.006 | 6.61 |

中国石化总公司咨询公司根据其宏观经济需求预测模型，按“九五”计划确定的 8% 的国民经济增长速度，对 2000 年我国合纤需求进行了预测，结

果列于表 3。预测结果表明，到 2000 年，国内合纤需求量接近 400 万吨 / 年（不包括聚酯等聚合物）。与之相适应，合成纤维的主要原料也要有一个较大的发展。国家“九五”计划和 2010 年远景目标纲要确定：到 2000 年，合成纤维原料生产能力将增加到 480 万吨 / 年（含聚酯等聚合物）。

表 2 1995 年国内主要合纤原料（单体）生产和消费表
(单位：万吨)

| 品种 | 产量 | 进口量 | 出口量 | 消费量 |
|---------|------|------|-----|-------|
| DMT | 23.7 | | | 23.7 |
| 乙二醇 | 42.5 | 20.5 | 0.5 | 62.5 |
| 丙烯腈 | 23 | 6.6 | 0.2 | 29.4 |
| PTA | 90.3 | 40.1 | 1.3 | 129.1 |
| 己内酰胺 | 6.6 | 12.4 | 0.1 | 18.9 |
| 尼龙 66 盐 | 4.4 | 2.3 | 0.1 | 6.6 |

表 3 2000 年合成纤维及其单体预测
(单位：万吨)

| 品种 | 产量 |
|---------|-----|
| 涤纶 | 251 |
| 腈纶 | 63 |
| 锦纶 | 35 |
| 丙纶 | 23 |
| 维纶 | 5 |
| 乙二醇 | 106 |
| 丙烯腈 | 81 |
| PTA | 219 |
| DMT | 30 |
| 己内酰胺 | 29 |
| 尼龙 66 盐 | 17 |

三、发展展望

党的十四届五中全会提出了今后 15 年的奋斗目标和战略任务。到 2010 年，要实现国民生产总值比 2000 年翻一番，使人民的小康生活更加宽裕，形成比较完善的社会主义市场经济体制。这一宏伟的蓝图也预示着我国的合成纤维工业将有一个大的发展。

为满足国民经济发展的需要，合纤工业按年平均递增 8~9% 的发展速度进行预测，到 2000 年可望接近 400 万吨 / 年的生产能力。发展合纤的重点是合纤原料。合纤原料增长速度要高于合纤抽丝发展速度。发展合纤原料（单体）的重点是发展精对苯二甲酸（PTA）、乙二醇（EG）、丙烯腈（AN）、己内酰胺（CPL）和尼龙 66 盐等。

合成纤维的发展仍以涤纶为主，适当增加锦纶和腈纶的比例。涤纶在国内外都是合纤的重要品种。1994 年世界涤纶产量总计 1107 万吨。预计 1995~

2000 年涤纶、涤短纤维将分别以 4.6% 和 1.9% 的年平均增长率发展。我国涤纶的产量已从 1990 年的 104.2 万吨提高到 1994 年的 151.5 万吨。预计，到 2000 年涤纶产量将超过 240 万吨 / 年。与此同时，锦纶和腈纶也将得到进一步的发展，以调整在合纤构成中的比例。

通过开发合纤新品种，发展功能性特种合成纤维的生产和应用，到 2000 年，使差别化纤维在合纤中的比重由目前的 10% 提高到 15% ~ 20%，以满足衣着、装饰和工业用合纤的需要。

鉴于石化总公司所属企业合纤原料（单体）的生产能力占全国生产能力的 90%，因此，在合纤维工业的发展中，石化总公司承担着提供合纤原料的艰巨任务。面对合纤工业加速发展的形势，石化总公司在“九五”期间十分重视合纤的发展，并做了相应的安排。在发展方针上实行三个为主：一是以发展合纤单体为主，为我国纺织工业提供原料；二是以发展涤纶、腈纶为主，适当发展锦纶和丙纶，维纶主要生产工业用纤维；三是以现有老企业、老基地的改扩建为主。根据资源条件和合理布局，新建装置原则上在老企业内建设，不布新点。老装置的改造和新装置的建设都要采用先进技术，力求达到经济规模。

四、若干思考

从合成纤维工业目前的水平出发并考虑到 2010 年我国长远发展目标以及在人口、耕地等方面的压力，在今后合成纤维工业发展中，有以下几点思考，值得引起注意。

1. 为了满足国民经济发展和人民生活水平提高的需要，未来 15 年，合成纤维工业必须要有一个新的发展。但是合纤的发展又受合纤原料发展的制约，因此，在我国未来合纤工业发展中，要特别注重合成纤维原料的发展。

2. 我国未来 15 年对合纤产品的巨大需求，吸引了世界厂商来华投资建厂和推销产品，占领市场份额。考虑到我国在加入世贸组织之后，国内合纤企业将面临巨大的竞争压力。面对这种形势，依靠技术进步，加强科学管理，是提高企业竞争力的唯一出路。

3. 国外的合纤工业，已经进入成熟时期，但是技术进步仍然很快。为加速我国合纤工业的技术进步，要加大科技投入，组织好科研开发工作，大力加强合纤科研开发基地的建设。要加快已经确定的上海石化“国家合纤工程研究中心”的建设，力争“九五”期间在新技术、新品种、新牌号的开发方面发挥作用。当前，要抓好丙烯腈、腈纶等成套技术的开发工作，为合成纤维工业的发展提供技术支撑。

4. 在未来合成纤维工业的发展中，要注意调整产品结构。在发展涤纶的同时，注意增加锦纶、腈纶的比重，适当发展丙纶；要发展差别化纤维，注意提高合成纤维的差别化率；要加强非服用纤维的发展，扩大合成纤维的用途，增加经济效益。

提高重大混凝土工程耐久性对 节约资源能源、保护环境意义重大

唐明述

南京化工大学

唐明述 无机非金属材料专家。1929年3月31日出生于四川省安岳县。1956年南京工学院研究生毕业。现任南京化工大学名誉所长、教授。1995年当选为中国工程院院士。主要从事水泥等无机非金属材料的研究,并取得多项重要成果。

前言

建国以来,特别是改革开放以来,我国的基本建设取得举世瞩目的成就。在世纪之交的未来若干年内,我国的基建规模必将以高于世界平均水平的速度发展。1994年我国水泥产量已超过4亿吨,在世界上遥遥领先,约占世界总产量的 $1/3$ 。相应的混凝土工程量在世界上也名列第一。为使我国人民生活水平达到或接近先进国家的水平,水泥和混凝土需求量还要成倍增加。根据预测2025年和下世纪30、40年代,我国人口将分别达到15亿和16亿。以人均年水泥用量500kg计,则水泥产量将要求达到7.5~8亿吨。这个数字相当于当前世界水泥产量的 $2/3$,约为1950年世界水泥产量6倍。按目前投资计算要将水泥年产量增加4亿吨,需投资4000亿元,还有矿山建设和铁路运输的巨大压力。而问题的另一面是我国一些重要自然资源人均占有率很低,人均占有耕地和人均占有量年径流量均为世界平均水平的 $1/4$ 。人均能源储量也是少的,煤约为平均值的50%,油为12%。因此,我国必须走资源节约型的国民经济发展道路。要改变投入多产出少的传统的经济增长模式,提高经济整体素质和效益。就涉及混凝土工程的基本建设而言,最关键的任务是提高质量,延长混凝土工程的使用年限,减少巨额维修费用。从战略出发可以考虑分两步走,首先是力争所有重大混凝土工程,如港口、大坝、桥梁、高速公路、机场等达到预定的30~50年的使用寿命。第二步应考虑综合运用国内已有的先进技术,使桥梁、大坝等混凝土工程寿命达到100~125年以上,机场、预制构件等寿命达到50年以上。则将节约大量资源能源。由于基建投资中,水泥混凝土工程所占比例不少,据称当前一亿基建投资将需水泥3~4万吨与之配合,因此延长工程寿命对于节约资金也是十分可观的。这方面发达国家已有深刻教训,根据美国1988年报道,美国混凝土基础工程(公路、桥梁、大坝、供水系统等)估计价值达6万亿美元。而其后每年用于维修和重建费用将高达3000亿美元,即大约相当于我国1990年国民生产总值。目前,我国正处于建设的高潮,若不吸取教训,重视提高工程寿命,同样将在未来若干年内深感维修和重建费用的严重负担并制约进一步发展。因此,从国情出发,现在就在各个方面采取措施,提高工程质量,为发展耐久性混凝土而努力,必将获益匪浅,造福于子孙后代。

一、水泥混凝土有广泛应用的发展前景

在人类发展过程中混凝土已逐渐成为人类社会生活、文化生活的基础,

城市化、高速公路、港口码头、立交桥、机场、大坝等建设中应用最大量、最广泛的是混凝土。公元 126 年所建的罗马万神殿至今仍著名于世。1756 年英国西南部港湾中所建埃迪斯頓灯塔使用百余年成为海工混凝土的里程碑，历史悠久的古长城亦为胶凝材料砌筑而成。从 1824 年发明波特兰水泥之后，1850 年之后又出现了钢筋混凝土，1940 年又采用预应力钢筋混凝土，这些突破性技术发展，使得摩天大楼和大跨度桥梁在世界各地蓬勃发展。在近约 100 年内，世界水泥产量增加了几百倍，成为不可取代、应用量最大的建筑材料。

作为建筑材料，水泥混凝土之所以获得广泛应用，是由于在众多方面均优于木材和钢材。下面将从工程性能(Engineering Properties)、节能(Energy saving)、经济(Economical)和生态(Ecological)等四个方面进行具体分析(即英文所谓的四“E”分析)。

1. 工程性能

从北海采油平台的要求出发进行分析，认为预应力钢筋混凝土结构在工程性能上有如下的一些优点：

维修：混凝土不腐蚀，不需要表面处理，随着时间的推移，强度还会增长。因此混凝土结构基本上不需要维修。而在海上环境条件下，钢结构易受严重腐蚀，需要价值昂贵的表面处理和其他保护方法，维护修补量大。

耐火：在海上，火极易使温度达到钢结构永远破坏的温度。这将对人员的安全和投资造成严重威胁。而钢筋混凝土中的钢筋由于混凝土层的保护作用，不致因过热而失效。

抵抗循环载荷：焊接点、腐蚀坑、几何尺寸的突变，如由薄条至厚框架的接点等的局部应力区对钢结构的疲劳强度影响较大，而根据绝大多数的实用规范，混凝土的允许应力值约为其极限强度的 50%，因而混凝土的疲劳强度一般是没有问题的。据报道，1980 年钢结构的采油平台曾因疲劳断裂而发生严重事故。

消振：在生产平台上操作，结构和机器基础振动小而消振效果好对工作人员是十分重要的。钢的平台面由于自重小对振动和动力载荷消振的效果不如混凝土台面。

挠度控制：与同样细长的钢梁相比，预应力混凝土的挠度为前者的 35%。同时根据所施预应力，可使其在自重下呈向上弯曲，而在满载荷时曲度为零。

抗爆裂性：由于预应力混凝土梁中的钢筋有很高的弹性限，其抗爆裂性优于一般钢梁。

抗低温性：在北极的海工建筑，将承受冰冲击的局部高压，可达 11.5MPa，典型的钢结构在加强杆之间缺乏应力分布，而混凝土壳和板，当预应力恰当，并用强钢筋约束能够承受这种冲击剪切。此外一般结构钢低温下将变脆，失去抗冲击性，而预应力钢筋混凝土槽用于储存 -162℃ 的液化天然气仍性能良好。看来低温下预应力混凝土是唯一经济而易得的材料。

2. 能耗对比

混凝土中水泥耗能是以 1300Kwh / t 计。钢的能耗约为 8000Kwh / t，为水泥的 6 倍。由于集料耗能仅 8Kwh / t，故普通混凝土耗能约为钢的 1 / 25 至 1 / 40。钢筋混凝土构件为 800 ~ 3200Kwh / t，预应力钢筋混凝土构件为 700 ~ 1700Kwh / t，这包括预制构件的热处理(耗能 50Kwh / m³)和运输耗能 1000Kwh / m³。当载荷相同时水泥、砖和钢筋的能耗比为 1 : 3.6 : 6。一般钢

钢筋混凝土梁与同载荷的钢梁相比前者耗能约为后者的 $1/4$ 至 $1/6$ 。

3. 生态环境

目前世界各国工业生产固体废渣将以亿万吨计。制造水泥混凝土是处理这些废渣的最好途径。堆放废渣将占用农田耕地或需要投入巨额资金修建专用堆场。无论是堆放或将废渣填坑或用作路基都有一个污染环境的问题。其中微量有毒金属将危害人类的健康。一旦用作水泥的混合材或混凝土的掺和料,这些有毒物质将与水泥水化产物固结从而消除其危害性,形成良好的生态环境。我国目前矿渣利用已达 80% 以上,在水工建筑物中已大量掺用粉煤灰。这一方面保护了环境,另外又节省大量煅烧水泥熟料所需的能耗,而且在一定条件下还能显著改善混凝土的性能。

4. 经济

生产水泥和混凝土的原材料易得。与木材钢材相比价格低廉。代木代钢在我国已取得极良好的经济效益。

由于水泥混凝土在以上各方面均具有突出的优越性,全世界的产量均日益增多。从 1980 年到 1994 年世界水泥产量仅由 10 亿吨增长到 13 亿吨,而我国的水泥产量则由 8000 万吨增长到 4 亿吨。从水泥剧增的这一侧面也反映了我国基本建设规模的突飞猛进发展。这是可以理解的,因为发达国家基本建设已达到或接近饱和状态,而我国正处于建设高潮之中。预期在未来若干年内我国还将有大的发展。高速公路才刚刚起步,修建大坝、港口、铁路及工业民用建筑均将需要大量水泥混凝土。据称在今后 15 年内,基建投资将达 30~50 万亿,以一亿基建投资需水泥 3 万吨计,则年需水泥量将达 6~10 亿吨。混凝土方量将达数十亿吨。这样庞大的规模,即意味着今后我国每年基建中混凝土方量相当于 80 年代世界各国的总和。而问题的另一方面是若不注意提高重大混凝土工程的质量和寿命,则每年用于维修和重建的巨额费用必将制约我国经济的持续发展。为此很有必要从现在起予以高度重视。

二、提高混凝土的耐久性,延长工程寿命

已成为全球关注的重大课题

随着经济建设的持续增长,人民生活水平的提高,人口增长并向城市集中以及现代交通的迅速发展,水泥混凝土在大坝、桥梁、公路、铁路、隧道、海港、码头、机场、地铁、高层建筑、工业及民用建筑等方面均获得日益广泛的应用。但随着时间的推移人们已深刻认识到已建工程并非都是耐久的,远低于设计寿命过早破坏的事例已屡见不鲜。沉重的重建与维修费用已使人提出“混凝土耐久性危机- Crisis of Durability of Concrete”,以便使人们像重视“石油危机- Crisis of Oil”一样来对待它。正处于高速发展的中国更应重视这方面的教训。

与人们预期的不一样,混凝土和钢筋混凝土并不是在任何情况下永远耐久的,寿命不需要担心的。事实恰恰相反,在许多情况下均发生短期内严重破坏的事例。特别值得注意的是,科学技术高速发达的 80~90 年代的有些重大工程,使用寿命反而不如 20~30 年代的。引起混凝土破坏的因素主要有:(1)硫酸盐腐蚀,(2)冰冻破坏,(3)钢筋锈蚀,(4)碱集料反应。此外还有人为因素,如使用不合格材料以及不按规范施工,造成质量低劣的建筑物和制品等。近 20~30 年来,由于使用除冰盐,扩大海工工程,扩大原材料范围,在严酷条件下使用混凝土等,因而更加增添了破坏因素。下面将举

实例和数字予以说明。

美国：近十几年来美国非常重视混凝土工程的耐久性，1980 年和 1984 年分别进行了调查研究，写成“美国水泥和混凝土研究现状”及“混凝土耐久性——节省数十亿美金的机遇”。研究发现问题是严重的，既有技术方面的问题也有制度方面的问题。美国是当今发达的资本主义国家。据统计混凝土基础工程的总价为 6 万亿美元，但今后每年用于维修和重建的费用将高达 3000 亿美元。屈艾特所著“美国在破坏中”一书中估计，包括公路、桥梁、下水道、供水饮水系统和公共交通在内，修理美国的全部费用要高达 3 万亿美元，比当时美国一年的国民生产总值还多得多。仅混凝土桥面就有 25 万座遭受程度不同的损害，其中有的使用还不到 20 年，而且今后每年还将有 35000 座加入被损坏的行列。由于广泛使用除冰盐，造成过早破坏，甚至在 5 年内就明显出现钢筋锈蚀。美国在 1969 年及 1978 年用于修复公路桥面板费用分别达到 26 亿及 63 亿美元。在美国的耐久性调查报告中，在分析短期破坏原因时，不仅提出了科学技术问题，特别还着重分析了社会制度方面存在的问题。如：

1. 承包商不对耐久性负责，承包商在工程完成后只要符合规范就不错了，不可能对之后的耐久性负责，因此他们宁愿花钱研究施工方法而不愿花钱研究耐久性。

2. 建筑物的产权所有者也不愿花钱维护和注意耐久性，因为在若干年内出售反而有利。

3. 对耐久性或工程建筑物的寿命不易作出科学评价。一方面是由于影响因素复杂而难以预测，另一方面要用短期内完成的快速试验预测今后几十年的结果，可靠性如何也难以琢磨。

根据 1988 年资料，英国全部建筑和土木工程维修费为 150 亿英镑，其中混凝土工程维修费为 5 亿英镑，约相当于人民币 60~70 亿。

据我国驻贝鲁特记者报道，许多海湾国家沿海地区大批城市建筑遭受破坏迅速，这包括巴林、阿拉伯联合酋长国、卡塔尔、沙特阿拉伯和科威特等，导致巴林政府大厦和阿联酋的沙加国际机场的部分建筑及迪拜的钟楼等许多建筑物停用或大修。原因是这些地区高温、潮湿、昼夜温差大和海风带来的高含量硫酸盐和氯化钠等，加以这些国家凭借巨额石油收入，急于求成，连续进行了大规模建设，造成建筑质量差，易受侵蚀。

笔者考察加拿大、英国的众多公路、桥梁、大坝，亲眼目睹因碱集料反应和除冰盐而造成的严重破坏。日本阪神高速公路的桥梁和众多港口以及澳大利亚、法国、南非等国的立交桥、大坝、预制构件如轨枕等均有在短期内遭受碱集料反应严重破坏的报道，这既造成重建和维修的巨额损失，对交通路线还将造成影响铁路、公路正常运行的大量间接经济损失。

我国区域辽阔，地跨温热二带，北方为寒冷地区，海岸线长达 18000 多公里，因此各国面临的严酷条件，在我国不同地区均有存在，黑龙江低温建研所对三北地区的调查表明，处于水位突变区或受水浸润的钢筋混凝土结构，在使用 20~70 年内均因反复冻融而导致破坏。严寒地区不少水工建筑物不到十年就需要大修，问题还不能彻底解决。

根据南京水利科学研究院资料，华南、华东海港码头和浙东沿海水闸的钢筋混凝土结构，处于浪浅区的梁板底部，由于钢筋过早锈蚀，发生顺筋开裂、剥落，问题相当严重，相当普遍，而且开裂、剥落后，破坏日益加剧。

1981 年调查了 18 座仅使用 7~25 年海港混凝土码头结构，其中因钢筋腐蚀而破坏或不耐久的占 80%。最近考察表明，宁波北仑港十万吨矿石中转码头是全优工程，水平框架已普遍顺筋锈裂，准备大修，连云港新建庙岭材料码头主梁，不到 3 年已显著顺筋锈裂。这些短期破坏的工程经济损失是巨大的。

近年来我们反复考察鉴定了北京地区的集料、立交桥和混凝土制品，证实北京地区集料具有碱活性，在工程中，北京立交桥和京秦线、兗石线上铁路桥梁以及上海站、贵阳站等轨枕（北京制造的预应力钢筋混凝土构件）均遭受明显破坏，对华北、东北地区机场跑道的考察研究，证实因碱集料反应造成程度不同的破坏，这将使机场提前报废或进行大修。

少数实例已表明重大工程在远低于设计年限以内破坏损失是巨大的，我国正处于蓬勃发展的高速建设之中，吸取西方国家的“前车之鉴”是大有补益的。延长使用寿命是节约资源能源的最佳途径，因每建一个百万吨水泥厂投资需要 10 亿，每吨水泥耗能 0.2 吨标准煤，每吨水泥制成混凝土尚需矿石材料 5~10 吨。对钢筋混凝土制品每 10 万吨水泥约需 1.5~4 万吨钢筋，因此在延长寿命上下功夫是十分值得的。

对于海工工程不同结构的使用寿命根据日本海岸的经验有如下数据：

| | |
|------------|---------|
| 大型致密海岸堤坝 | 75~85 年 |
| 大支墩上的堤坝和载体 | 70~75 年 |
| 巨型堤坝和墩 | 45~50 年 |
| 钢盘混凝土上的支架 | 14~16 年 |

当前不少科学家均主张力求延长混凝土工程寿命，Gexwick 主张主要的桥梁使用寿命应按 100~125 年来设计，水科院洪定海提出根据我国国情海港工程应争取寿命为 100 年。实际上我国已有长寿命的工程实例，若能总结经验，综合采用国内外的先进技术延长工程寿命是完全有可能的。

三、生产水泥混凝土与环境保护

前面谈到水泥混凝土是处理工业固体废渣的最佳途径，这是问题有利的一面。但水泥生产也有其不利的一面，将增加环境的污染。

生产水泥熟料的主要原料是石灰石（ CaCO_3 ），在煅烧过程中： $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$ 将释放大量的 CO_2 ，而且煅烧熟料所用燃料也将放出 CO_2 。经计算每生产一吨水泥熟料，从原料中将放出 0.55 吨 CO_2 。燃烧约放出 0.4 吨，二者相加为 0.95 吨，即每生产一吨水泥大约将产生 1 吨 CO_2 。而产生温室效应的气体中， CO_2 占 55%，甲烷占 15%，含氯氟烃占 14%，因此 CO_2 的量占有很大比例。据计算以 1987 年全世界水泥产量为 10 亿吨计，则将排出 10 亿吨 CO_2 ，约占当年全球 CO_2 排出量的 5%。所占比例是不小的。按预测，2000 年世界人口将达 60 亿，到 2050 年将达到 80 亿，若以每人占有水泥量为 300~500kg 计，则届时全球水泥产量将分别达到 18~30 亿吨和 24~40 亿吨，其放出的 CO_2 也将达到同一数字，其对温室效应的影响将显著增加。此外水泥生产还将排出大量 SO_2 和 NO_x ，这也是十分不利的。

其次水泥生产将消耗大量燃料和能量，以每吨水泥标准煤耗为 0.2 吨计，当我们水泥产量为 4 亿吨时，耗煤 8000 万吨，若产量进一步提高势必更将增加能源的紧张状态。以每吨水泥生产混凝土时消耗 6~10 吨砂石材料计，我国每年将生产砂石材料 24~40 亿吨，全球已面临优质砂石材料短缺的

问题，我国不少城市亦将远距离运送砂石材料。因此提高耐久性对保护环境、节约能源，资源意义是十分显著的。

四、我国对延长混凝土工程寿命应采取的对策和建议

在探讨有效的措施之前，我们将从发展数据对我国水泥混凝土建筑工程有一个估价，从 1950 年到 1994 年全球产量仅增加约 10 倍，而我国产量增加 100 倍之多。其次美国产量一直增加不多。近年来也只是在 7000 ~ 9000 万吨之间徘徊。日、加、德、法也有类似情况。特别是我国改革开放之后，1980 ~ 1990 年十年间，我国水泥产量增长了一亿吨之多，1990 ~ 1994 年增加近 2 亿吨。统计看来 1995 年我国水泥产量约相当于美、日、英、法、意、德、俄、奥之和，约占世界总产量的 $1/3$ 。就以人口平均计，我国已达 338kg / 人 · 年，与美国人均值 341kg / 人 · 年十分接近。广东省计划 2000 年水泥产量达到 8000 万吨，人均 1000kg / 人 · 年。就其总产量而言，已与美、日相近，人均占有量即将成为美国的两倍。以 1994 年我国水泥产量 4 亿吨计，每年混凝土工程量将达 15 亿方。这些数字充分说明我国基本建设中土建工程取得了迅猛的发展，也从一个侧面反映了我国经济建设的大好形势。而且目前仍在高速发展，将使水泥产量再翻一番达到 7.5 亿 ~ 8 亿吨（据《中国建材报》，我国目前生产能力已达 4.5 亿 ~ 5 亿吨）。水泥混凝土在基本建设中的作用是巨大的。

在我们看到水泥混凝土产量急剧增长的可喜局面时，还应冷静思考其负面影响以及当前应注意的一些问题和必须采取的措施。当前经济界人士多次指出，要改变传统的以速度外延为特征的经济增长模式，把着眼点放在提高整个经济增长的质量上来。不能主要依靠扩大投资规模，消耗大量原材料、能源和劳动力等生产要素。来进行数量的扩张。这是高投入、低产出的经济发展模式。我们将按照这一原则来审视水泥混凝土今后的发展战略。

从历史发展的历程来看，美、日、英、法等资本主义国家的基本建设已越过高潮达到相对稳定。而我国正处于基本建设的快速上升阶段，需求猛增是完全可以理解的。从当前情况看来，我国有众多大型混凝土工程刚刚起步仍需大力发展。为大力发展水电能源和水利资源，将建设众多大坝、提灌系统和南水北调等工程。为扩大对外贸易，将加快港口建设。为发展交通运输，正步入建设高速公路时期，机场也将成百增加。因此提高水泥混凝土产量，以满足高速发展的需要是完全应该的，也是必要的。但唯其面广量大，对目前存在的问题和今后可能出现的问题及早提出将具有极大的经济效益和社会意义。

1. 水泥工业要提高高标号水泥的比例

如前所述，以 1994 年的产量计，我国已超过 8 个发达国家的总和。但仔细分析并不意味着我国基本建设的规模，或混凝土工程质量也具有同等价值。原因是我国水泥中 80% 系小水泥厂所产，标号较低。用低标号水泥建设相同标号的混凝土水泥用量要大得多。国外基本上不生产的 325 水泥在我国还占有不少比例，但问题是它们的能源和资源消耗并不低很多。这就是资源、能源的巨大浪费。今后我国在考虑水泥的发展战略时，一方面要力求增加产量，但最重要的是应该使高标号水泥所占比例能有大幅度提高，特别是熟料的标号要有大幅度提高，这样即便生产低标号水泥可以多掺混合材，这是水泥工业节约资源、能源的最佳途径。

2. 水泥生产应着重考虑混凝土工程的耐久性。

近年来全世界混凝土工程界一致认为在设计时不仅要考虑强度指标，更重要的是要考虑工程的耐久性，因此出现了根据耐久性设计混凝土的专家系统（Expert System of Durability of Concrete），这需要全社会的共同配合，譬如，世界许多国家如英国、日本、新西兰等在发现碱集料反应对工程的严重破坏作用之后，很快采取措施，选用低碱原料生产低碱水泥，甚至将高碱水泥厂关闭。而我国华北、西北、东北地区由于原料的限制，碱含量一直偏高。在已经证实北京地区存在碱活性集料的情况下，这将给京津地区带来很大的潜在危害。为此建议今后新建水泥厂，应从优选原料改进工艺流程入手，力求生产低碱水泥。已存在的高碱水泥厂应力争生产混合水泥。

3. 在工程合同中应有耐久性条款

目前我国正处于计划经济向市场经济转轨的过渡时期。若不把经济杠杆作用引入工程耐久性之中是无法激励工程技术人员严格注意耐久性的。当前的现实是快速施工，提前完工，与个人所得经济利益直接有关，而一个工程5~10年出现问题，甚至需要大修或重建，但都无任何单位或个人负经济责任，甚至工程曾被评为全优工程。这一局面不改变，则承包单位是不愿花费精力或经费进行耐久性预防的研究或采取措施的。在这方面我国已有很多实例。铁道轨枕或桥梁原设计为30年寿命，但有的路段甚至在不到10年甚至5年就全部损坏需要大修或重建。若能在设计和施工经费中抽取少量费用进行耐久性的预防研究和长期耐久性的奖励基金，必将获益巨大，望有关部门予以研究。

4. 调查研究

这是“老生常谈”，但做起来很不容易，原始资料不全，历史上的情况很难搞清楚，甚至就像亚运村等近年建成的工程，要想知道原材料的来源，准确的配比，外加剂的掺用等就十分困难，出现问题只能归结于“原因是多方面的，综合的”。但这样的笼统结论对今后的工作是没有任何借鉴作用的。因此要真正搞好调查研究是要花费很大力气的。

首先要做到心中有数。“没有调查研究就没有发言权”。我们应该知道我国基本建设中的投资总量，目前用于重建或维修的费用，今后每年费用的预测，其中因种种原因未达设计寿命需大修或拆毁的占多少？心中无数是下不了决心的。

调查研究必须有重点。对象应是影响大的重大工程，如核电站、采油平台、港工、大坝、桥梁、大型预制构件、机场、隧道、高速公路、立交桥等。为了得出准确结论，各个单位必须相互配合。韩国在汉城大桥破坏之后撰文谈日本经验时谈到：“只强调过去的宏观力学的土木工程技术作用还不够，而必须强调从微观上解释破坏现象的材料工程学。”因此必须设计、施工、管理与实验室研究人员仔细考察研究，以期得出符合实际的科学结论。

对比研究好坏程度不同的工程意义重大。常说混凝土没有不裂的。这样一来就没法分出好坏。从微观而言，在显微镜下、电子显微镜下、甚至放大镜下所有混凝土都是有微裂纹的。但这并不等于会有0.1~1mm甚至1~5mm的裂缝存在。建于1968年的南京长江大桥，大型桥墩和巨型梁至今十分完好，南京中央门立交桥也有相同结果。同样是处于寒冷的北方地区，每年都有冻融对混凝土工程造成危害，但天津1982年所建十一经路立交桥十分完好，但其后所建的八里台、中山门、长江道、京津等立交桥损坏就严重得多。

北京丰台的老铁路桥建于 30 年代至今桥墩和档墙完好,基本上无裂缝,而新建的铁路公路两用的平台新立交桥,档墙已遍布网状裂纹。从观察来看,南京长江大桥和天津十一经路立交桥。甚至 30 年代的丰台老铁路桥很可能在今后 20~30 年内尚无大问题,但是京津的某些立交桥和北京的某些大建筑可能就得考虑大修或若干年后的重建问题。再如处于同样运载负荷下的兗石线上的铁路桥,由四家不同地区(原材料不同)的工厂制造的铁路桥,有的已在修补,有的仍基本完好。进行对比的调查研究,找出优劣的根本原因,是推动向耐久性方向发展的重要途径。在同一环境条件优劣差异悬殊,本身就能排除环境和客观条件破坏的因素。我们在考察机场跑道破坏时,发现有 60 年代初的跑道十分完好,而近年来建成的跑道却出现大面积的损坏,对比研究给我们极有益的启示。

5. 建立重大混凝土工程的数据档案库

我国各建筑工程特别是大型工程可能已有自己的历史档案资料,但均分散保存,信息交流也十分不够,导致教训重演。美国在 1982 年由国家科学基金支持建立了“建筑与工程性能信息中心”(AEPIC, Architecture and Engineering Performance Information Center)已收集 4 万案例。建立这样的中心并使数据档案规范化对我国经济建设的发展将能提供宝贵的信息资料。

6. 大力推广能提高耐久性的先进技术和经验

几十年来在这方面国内外均有一整套的成熟的先进技术和经验。若能被大家所接受和理解并用之于实际,必将获得巨大效益。

(1) 采用高效减水剂,降低水灰比,提高混凝土的致密度。因为混凝土为多孔材料,侵蚀介质无论是水、气或化学物质均将通过孔隙才能进入内部,因此致密化必将成倍提高抗腐蚀性能;

(2) 使用加气剂提高抗冻性。这在严寒地区十分有效,只要在施工现场严格控制含气量,将不致使强度损失过多而抗冻性将显著提高;

(3) 阴极保护是防止钢筋锈蚀十分有效的措施,对已经锈蚀的工程也十分有效;

(4) 使用特种水泥和混合材。对于海工工程,使用掺有矿渣、硅灰、粉煤灰的水泥,强度不仅不降低,在多数情况下强度还有所增加,在这些情况下采用混合水泥比纯硅酸盐水泥好很多。实践证明铁铝酸盐水泥和硫铝酸盐水泥也具有良好的抗蚀性和抗冻性;

(5) 对碱集料反应重点在于预防,采用低碱水泥和混合水泥是十分有利的。

英国提出用于重大工程混凝土的集料的采石场,应有详细的地质勘测资料,并在采石场建立集料碱活性的日常检测,以确保集料无碱活性。这一经验是特别值得重视的。

实际上以上这些技术并非不为人知或做不到。最关键的在市场经济的环境下,工程的耐久性和寿命无经济利益予以支撑,特别是没有与个人经济利益相结合,激发不起重视寿命的积极性。有时一个技术措施虽明知对耐久性不利,但能加速施工,而后者经济效益是能立竿见影的,则宁肯牺牲耐久性而保证快速施工。如明知对活性集料不能掺用含碱外加剂,但后者能保证冬季施工加快施工速度,而耐久性是 5~10 年之后的事,则往往宁可不顾寿命而大量掺加。因此最重要的必须认识到“寿命”是有很大大经济价值的。避

免大修是可以节省巨额资金的，最终是节约了资源和能源。若能在施工合同中注明奖金和评优要在 5~10 年后才能兑现，若 5~10 年后出现严重损坏将予重罚，只有这样才能真正重视耐久性和寿命。

7. 整理修订标准规范

我国大部分标准规范主要是在 50~60 年代沿袭美、苏而来，但时至今日，美国的许多标准世界各国在长期实践中均已提出不少问题，美国标准也已修改和增添了新的内容，在这种情况下，我国各建筑行业均有把标准重新审视的必要，根据国情增添必要的内容或进行修改。而特别重要的是工程人员必需熟悉标准制定的背景及使用中的局限性。否则在工程中将带来极大的浪费。

8. 建立权威性的检测鉴定中心

影响混凝土耐久性的主要因素是：化学腐蚀，冰冻循环，钢筋锈蚀，碱集料反应以及近年来特别感到严重的除冰盐及酸雨等的腐蚀作用。但混凝土确实复杂，而需要作出判断或采取措施的工程，往往涉及到几亿甚至数十亿的投资，今后还会涉及涉外工程，援外工程等。为此必须有先进设备及配套的实验检测手段以及长龄期试验条件。为此需要有较大的投资来满足这些条件。这些年来国内的科研院校已经在某些领域形成特色，若能继续给以扶持即可形成在国内外能产生影响的中心。同时结合工作也可培养跻身国际的跨世纪的人才。

土壤动物与人类的关系

尹文英

中国科学院上海昆虫研究所

尹文英 女，昆虫学家。汉族。1922 年 10 月 18 日生于河北平乡。1947 年毕业于国立中央大学生物系。历任中央研究院动物研究所助理员，中国科学院水生所助理研究员，上海昆虫所副研究员、研究员、副所长。1991 年当选为中国科学院院士（学部委员）。长期从事寄生桡足类，鱼病学和土壤动物学的研究。

今天我要向同学们介绍一门你们目前可能还不熟悉的、但与人类关系十分密切的学科——土壤动物学。

在我们的生活空间里，天上飞的鸟和蝴蝶，地上走的狮子、老虎和大象，水里游的鱼、虾和螃蟹，你们已是很熟悉的，但是当同学们走在田野里或树林中时，会不会想到在你的脚下泥土中生存着千千万万各种微小的动物，它们出生、成长、繁衍后代，忙忙碌碌地生活着。它们之中大部分是对人类有益的，要进行保护和繁殖，一小部分对人类是有害的，要设法控制和防除。

对于土壤动物的研究工作通常认为是从达尔文对蚯蚓生物学的研究开始，在我国直到 80 年代中期才开始系统地进行土壤动物学的研究。

一、什么是土壤动物？

是指动物的一生或生命过程中有一段时间定期在土壤中度过，而且对土壤产生一定影响的动物。

土壤动物涉及的门类很广泛，从单细胞的原生动物，扁形的涡虫，头上生小轮盘的轮虫，像小猪般的熊虫，还有细长的线虫、线蚓，蚯蚓和蚂蟥（蛭），像芝麻粒大小的螨和跳虫是土壤中数量很多的类群，还有大型的蜈蚣、马陆、西瓜虫和甲虫，以及蜘蛛和昆虫等的幼虫。

近 10 年来，通过我国学者们的辛勤工作，迄今已经从土壤中发现 1000 多种不同的土壤动物，其中常见的代表性种类见图 1。

二、为什么要研究土壤动物？

土壤动物是人类生活中不可缺少的助手，亿万年来它们默默无闻地分解着生物残体，改变着土壤的理化性质，促进大自然的生产与物质循环。如果土壤缺少了它们，粮食、蔬菜不能生长，花草、树木枯萎死亡，我们人类也就失去了生存与发展的物质基础！因此，研究土壤动物是为了保护它们，让它们持续地、更好地为人类的美好生活而永不停息地工作下去！

土壤动物的功能主要有以下三个方面：

1. 为人类活化土壤，长期提供免费的肥料，促进植物的生长。

土壤的诞生，众所周知是从大石块风化而成的，开始时是没有活性和肥力的“死土”，只有通过众多土壤动物和微生物，粉碎和分解地表的枯枝落叶和动物尸体，而且由于土壤动物在土壤中不断地上下活动，起到了搅拌与耕耘的作用，把腐植质、动物粪便和泥土混合起来，才形成了有“活性”和

“肥效”的熟化土壤，才能维持各类庄稼、花木的正常生长。

2. 持续进行自然界的物质循环，亿万年来为人类创造吃、穿、用等财富。

自然界中营养物质循环，是土壤肥力调节的最基本过程之一，也就是把植物碎片中来自土壤中的营养物质，经过腐败、分解，又释放出来到土壤中，再被植物根系吸收利用的全过程。在此过程中，至少粉碎和消化、释放和再循环等是由土壤动物的活动来实现的。（见图 2）如果土壤中能够长期保持土壤动物的多样性，也就能使自然界中的物质循环永不休止。我们人类也从而得到粮食、蔬菜、水果、棉花和木材，保证了人类生活的必需品。

3. 帮助人类诊断土壤是否健康的指示生物。

在不同类型的土壤中栖息着不同的土壤动物类群，所以某些土壤动物种类就可以作为土壤类型的一个指标，如蚯蚓通常在中性土壤中较多，而在酸性较强的土壤中就偏少。

从环境保护的目的来看，人类的活动如森林采伐，施放杀虫剂与除草剂，化学肥料，以及重金属、放射性污染等等对于土壤动物都有一定的影响。我们研究清楚土壤动物对各类污染物的反应特点后，就不难找出指示生物。一般说来凡土壤动物多样性丰富的地方，往往也是土壤健康的表现。

更重要的是，近年来还发现土壤动物能够对退化了的土壤起恢复健康的作用，其中尤以蚯蚓的作用最为明显，如在草原地区的无机肥料系统中，利用蚯蚓可以大大加快土壤的熟化，并大量增产牧草。

三、土壤中有多少动物？

通过 10 年来我们在不同地区调查的数据，一般在林区的土壤中，一个平方米（ M^2 ）的面积，约有 5 万个土壤动物（原生动物未计在内）。当我们在森林中行走时，脚下踩到了多少土壤动物？下面我教同学们一个简单的计算方法。（见图 3）

四、怎样采集土壤动物？

在我国林区的土壤中，土壤动物的种类和数量都很丰富，所以采集也不困难。至于烘虫器的设计有各式各样，这里只向同学们介绍一种简易的烘虫器，很容易制作。

动身采集之前要准备几只布袋或塑料袋，带一只小铲子就可以了。到了目的地，选择枯枝落叶丰厚的场所，用手扒除表面大型枝叶，然后把细碎的地表枯枝落叶和土壤（用小铲子挖）装进布袋中，带回学校。

烘虫器的制作，可用金属片、塑料片或硬纸片，做成 1 尺多长的漏斗，漏斗口上装一筛网（可用塑料窗纱和铅丝制作）就成功了。另外找一只纸盒做漏斗的支架（或用方凳翻转当支架）。然后把采集来的土壤和枯枝落叶，放进漏斗上的筛网中（约半寸厚为宜），在漏斗下面接一只饭碗或广口瓶，内装 70% 酒精。这时在漏斗上用 40~60 支光电灯烘烤（灯泡距土壤约 10 厘米）。经过至少 6 小时（最好过一夜）烘烤以后，取出漏斗下的容器，在放大镜或解剖镜下观察，就会看到各种不同的土壤动物混杂在一起，把它们按类别一一分拣开来，保存在 70% 的酒精中，以备进一步制片观察鉴定之用。

今天简单介绍土壤动物学，希望同学们对这门学科感兴趣！

加快农业现代化建设 推动农业持续发展

卢良恕

中国工程院

卢良恕 小麦育种、栽培、农业与科技发展专家。1924年11月3日出生于浙江湖洲。1947年毕业于金陵大学。历任江苏农业科学院院长、研究员、中国农业科学院院长、农业部科学技术委员会副主任、中国农学会会长等职。现任中国工程院副院长、国家食物与营养咨询委员会主任等。1994年被选聘为中国工程院院士。主要从事小麦遗传育种、栽培、农业生产、食物安全科技发展工程及其宏观战略等方面的研究。

我国80%的人口、90%以上的国土在农村。农民、农业和农村问题，是关系国家现代化建设的关键，只有农业实现现代化，才会有国家的现代化。在我国，“九五”~2010年农业要完成计划经济向社会主义市场经济、传统农业向现代农业的历史性转变，农业肩负着十分重要而艰巨的任务。因此，加快农业现代化建设的进程，促进我国农业持续稳定健康发展，是未来一个时期内我国经济发展、社会安定、民族团结、国家强盛的头等大事。

一、农业现代化建设是我国 整个现代化建设中最艰巨的任务

（一）认识国情、认清国力，是农业现代化建设的前提

1. 人口基数大，总量继续增长一时尚不可逆转。到2000年将达13亿人口，按人均400公斤粮食，粮食总需求量将达5亿吨左右，而1995年仅为4.65亿吨，需努力再上一个新台阶。人口增长与粮食生产矛盾将是相当长期、持续的。

2. 随着国民经济发展，工业化、城镇化进程加快，城镇建设用地和工业用地的扩大，人均耕地等资源紧缺状况不可逆转。目前我国人均耕地仅1.18亩，“七五”期间平均每年减少352万亩，“八五”前四年平均虽然降至282万亩，但在一定时间内耕地还会逐年减少。到本世纪末实现粮食总产5亿吨的目标，在播种面积稳定在16.5亿亩的前提下，年均亩产需提高5公斤左右，超过“八五”年平均增长幅度，难度是不小的。可见我国资源短缺与农业发展的矛盾也将是长期、持续的。

3. 随着人民生活逐步向小康的迈进，人们消费水平不断提高，对农产品的需求将由单纯的数量目标转向量、质和多样化的多重目标不可逆转。人民生活水平提高对农产品需求的不断增长与农业发展的矛盾也将是长期、持续的。

综合以上三个不可逆转的国情，今后农业乃至整个国民经济长期发展中的一个首要的基本问题是：满足庞大的人口对农产品数量和质量日益增长的需求。解决这一突出矛盾的根本出路在于紧紧依靠科技进步和提高农业综合生产能力，加速计划经济向市场经济、传统农业向现代农业、粗放经营向集约经营的转变，提高土地生产率、劳动生产率、资源产出率和产品商品率，加快实现农业现代化。

（二）转变观念，积极探索有中国特色的农业现代化建设途径

1. 以大幅度提高农业生产力为主线，牢牢把握实施农业现代化这一总方向，做好总体部署与布局。

从总体上看，我国农业生产力水平还相当低，同先进的发达国家差距明显，按 1994 年的统计数据，我国每公顷谷物产量，每个劳动力负担耕地、生产谷物和肉类分别只相当于法国的 69.5%、1.7%、2.5% 和 2.5%，这既是差距，同时也是发展潜力之所在，实现农业现代化是根本出路。

建国 46 年来，我国农业现代化建设时起时伏，近年来农业界和全社会对实现农业现代化呼声不高，措施不够得力，连原有的农业现代化试点县工作也处于自流和停顿状态，而其他一些非主体农业模式反而受到青睐，因此，必须转变观念，把加速实现农业现代化作为一个总体战略来统帅农业发展的全局，尽快制定我国农业现代化建设的全面长远规划，做出总体部署和布局。同时，考虑到现代农业本身就是高产优质低耗高效农业，因此，要把它纳入农业现代化体系之中，使两者结合起来，有利于现代生产要素的配置和优化，并与国际上接轨。

2. 以农民为主体，建设发达的现代农业基础产业。

——实践证明，农民是现代农业基础产业的主体建设者，实现农业现代化所需资金的主要积累者，推动工业化进程的奉献者，农村经济组织的创新者，也是独立的商品生产者和经营者。因此，振兴中华，必须首先振兴农业；振兴农业和农村经济，必须首先处理好农民问题。要以农民为主体，把农业、农村和农民三者紧密联系起来，克服以往单纯就农业论农业、就粮食论粮食的狭窄做法，并据此制定利农、护农政策，把最大限度调动农民积极性和提高农民收入作为各项政策的出发点。要从调整国民经济布局和工农关系，城乡关系着手，把工农发展速度比调至 2~3:1，把城乡居民收入差距拉大局面扭转过来，并加强工业反哺农业。给农民以有利可图、发展市场经济的有利宏观环境。

——从世界农业发展进程看，农业已经由唯一生存基础的传统产业演变为同发达工业并驾齐驱的强大的现代基础产业，我们要树立两个基本观点：一是现代农业完全有可能由低效产业转变为高效产业；二是仅仅把农业作为国民经济的“基础”已难以适应新形势的要求，而必须用现代产业的新观念，把农业提高到“现代基础产业”的高度上，来重新认识农业、改造传统农业、建设现代农业基础产业，要按现代基础产业要求大力发展农村规模经济，积极推进产业化经营，以支柱产业、“高新技术产业带”和市场体系建设等来带动农民实现产加销和贸工农一体化，把农业建设成科学化农业、工业化农业、集约化农业、市场化农业、社会化农业和现代化农业。

——从农业产业化和现代农业基础产业发展看，必须明确重点。首先要以商品粮基地建设为重点，建设专业化、一体化、现代化的粮食产业体系，确保粮食与食物安全，在此基础上，确立现代食物的新观念，实施“粮食——经济作物——饲料作物”的“种植业三元结构工程”，促进食物供需的基本平衡。其次要以农产品加工业为重点，向农业产后领域拓展和延伸。在产业布局上，逐步将农产品加工业由城市转向农村；在结构上，要大力支持发展现代食品工业、饲料工业等；在政策上，应积极鼓励和引导农村的农产品加工工程的建设；在技术上，应大力开展多层次的技术开发和研究，大力应用当代高新技术；在产品上，要向高质量、高档次、高附加值方向发展。

3. 以乡镇企业为强大支柱，大力发展小城镇，走农村工业化、城镇化带动农业现代化的路子。

80年代以来，我国农村工业化和城镇化迅速发展，农村工业大大超过了农业总产值，成为农村经济和全国工业的重要支柱。小城镇是城乡经济联系的重要桥梁，乡镇企业的有效载体，农村剩余劳动力转移的巨大“蓄水池”，物质文明与精神文明建设的新型社区和中心，推动农业现代化建设的坚实基础，缩小工农差别和城乡差别的必然选择。因此，我们研究农业和农村经济发展问题，必须把农业现代化同农村工业化、农村城镇化紧密联系起来，走三者同步、协调发展的道路。

4. 以保护农业自然资源和环境为重要基础，建立现代农业可持续发展的支撑体系。

从总体上看，特别是80年代以来，我国农业基本上是持续发展的；农业生产条件和生产能力在总体上是改善的，但也存在局部恶化的问题。由于受人口迅速增长压力的影响，一部分持续性因素日益突出，主要表现为农业资源承载量过重，生态环境受到破坏。面对这一情况，我们要把经济、社会、技术发展同农业自然资源与环境保护密切结合起来，确立农业持续发展的战略概念，即在农林牧副渔全面发展，确保食物安全，发展现代农业，促进农村经济不断增长的同时，保持资源的合理利用，建设良好的生态环境，逐步形成一个协调平衡的农业经济、技术、生态系统以及健全发达的社会系统，以保障农业和农村经济的可持续发展。

5. 以改进政府宏观管理为保障，为农业现代化建设和农业持续发展创造有利的宏观经济环境。

要用现代工业装备农业，将农用工业基本建设投资占国家基本建设投资总额的比重尽快恢复到5%；要抓紧制定《国家农业资金投入法》，规范政府投资行为，力争将农业基本建设投资比重在“九五”时期恢复到6%以上的水平，2010年提高到10%；要紧靠依靠科技进步，把农业科技投资占农业总产值的比重由目前的0.2%提高到1%以上；实行让利于农民的政策，让农民尽快富裕起来，逐步成为农业现代化建设的投资主体；加大中、西部农业区域综合开发的力度，积极吸取沿海地区的经验，在云贵川资源“金三角”、甘肃“河西走廊”、新疆“粮棉基地建设”、西南“岩溶扶贫地区”等地建立内陆的综合开发区，以加快改革、开放、开发的步伐，实现东、中、西部协调发展，推动农业现代化建设。

二、科学技术是推动现代农业持续发展的强大动力

科学技术的巨大进步，导致社会生产力的迅速提高，在即将来临的世纪之交，科学技术作为增加综合国力的主导因素，将会直接影响甚至决定一个国家在世界竞争中的地位和作用，即未来世界综合国力的竞争，实质上是科技水平的竞争。

（一）科技进步为我国农业持续发展发挥了重要作用

建国以来，我国农业科学技术的发展，大大促进了农业的发展，为农业增产增收增效发挥了重要推动作用，突出表现在：遗传学理论的深入应用和育种技术的突破，使农业产量大幅度提高；耕作制度的改革、栽培（饲养）技术的改进完善和综合配套，使农产品产出率得到提高；生物措施和工程措施相结合综合防御农业灾害，有效地减少了农产品的损失；生物技术、计算

机技术、核技术等高新技术和传统农业技术的有机结合，促进农业生产力的进一步提高。

据统计，1949年以来，我国科技工作者共培育作物新品种、新组合达5000多个，农作物品种更换了4~5次，每更换一次，增产10%~30%。迄今已推广杂交水稻累计达20多亿亩，增产粮食达2000多亿斤，粮棉等主要作物良种覆盖率已达80%~90%；林木良种自“六五”以来，获得新品种、新无性系2000多个，其材积生长量可提高10%~50%，造林成活率提高了20%。耕作制度的改革，使全国复种指数提高了25个百分点，增加播种面积4亿多亩；粮食单产水平比1949年提高了3倍多；还有橡胶大面积北移、对虾工厂化育苗和养殖、马传贫弱毒疫苗。中国美利奴羊等取得不少新的成果。目前，科技进步在农业增长中的贡献份额已提高到35%左右。人民温饱问题已基本解决，绝大部分食物和农产品原料可在国内生产并满足13亿人口的消费。

（二）我国农业科技发展前景和“九五”科技攻关部署

“九五”是我国农业科技必须打好基础，积累必要的后劲，缩短与世界水平差距，争取在21世纪率先跃居世界先进水平的关键时期，必须确定总体发展战略并实施相应配套的战略措施。

1. 我国农业科技发展前景

从我国目前研究基础及发展趋势看，到2000年，我国主要农业科学技术能够达到80年代中期的先进水平，到2010年有能力达到90年代中期的世界先进水平，并在若干领域继续保持领先地位。科技在农业增产中的作用将进一步增大，2000年将达到50%以上，2010年将达到60%左右，农业高附加值产品的市场占有率，2000年将达50%，2010年将达70%。“九五”~2010年，我国将以现代科学和现代工业为强大支柱，以现代管理为基础，把传统农业转到现代集约持续农业上来，以大幅度提高土地利用率、资源产出率、劳动生产率和产品商品率为目标，建立起现代化的农业科学技术体系。

2. 我国农业科技发展重点

“九五”期间，我国农业科技工作要坚持经济建设必须依靠科技进步，科学技术必须为经济建设服务，努力攀登农业科学技术高峰的方针；坚持基础、应用、推广等科技工作互相衔接、协调发展的方针；坚持继续深化农业科技体制改革，促进农业科技与农村经济密切结合的方针；坚持联合国家和部门的专业技术力量、高等院校的力量、企业研究开发力量和民营科技力量等各方面科技力量，充分发挥各自优势的方针；坚持集中力量联合攻关办大事的方针。近几年，国家科委经费盘子中，农业占22%以上。“九五”期间，国家科委重中之重科技攻关项目共15项，其中农业占5项，与农业相关的有3项，一多半与农业有关。其重点：一是为2000年新增1000亿斤粮食、1000万担棉花、1000万吨肉类和1000万吨水产品提供50%以上份额的贡献。二是为下世纪初农业上新台阶、主要农副产品等有效供给、农民收入提高和改善生态环境继续上新台阶攻克一批关键性技术，提供可靠支撑，为加快高产优质低耗高效农业发展提供技术保障。三是为促进农村经济全面持续发展，为农民奔小康，提高农业综合生产能力，加快实现农业现代化提供科技保证。其主要任务包括：

（1）加速成果转化，综合配套推广成熟的先进适用技术，努力提高普及率、覆盖面和规模效益，提高农业综合生产力。

（2）集中力量、突出重点，攻克一批已有一定基础、近期即可见效的关

键性生产技术。

(3) 大力发展高产、优质、低耗、高效农业，针对农业、农村经济发展中的重大难题和发展战略组织重点科技攻关。

(4) 加强基础性研究，为发展现代农业提供技术储备。

(5) 加强高新技术研究及其应用和加快产业化进程。

(6) 加强农副产品综合加工技术研究，使农产品附加值提高 30% 左右。

(7) 提高乡镇企业的技术和管理水平，提高其经济效益。

(8) 统筹规划、合理布局，在加速农村经济技术进步的同时，为农村第三产业发展提供技术支撑，促进剩余劳动力的转移。

(9) 积极引进消化吸收国外先进农业科学技术，尽快提高我国农业技术水平，增强技术创新能力。

总的思路是突出重点，突出应用，突出技术创新，突出力量集成，突出经济和社会效益，突出发展与改革的结合，分为重中之重、重点和计划内项目三个层次，解决关键性、战略性和综合性技术难题，另安排好应急攻关和调剂项目及有关农业的基础性研究和高新技术的研究。

三、现代集约持续农业是 我国农业现代化建设的必由之路

(一) 可持续农业是世界农业发展主要趋势之一

当今人类社会最为关心、最为迫切需要解决的问题是生存与发展问题，围绕这一主题，许多国家和国际组织从 50 年代开始，尤其是进入 80 年代后，积极努力寻求经济、社会发展与资源、环境相互促进、相互协调发展的道路，持续发展就是在这样的背景下产生的一种比较合适的发展模式。农业的持续发展是人类社会、经济持续发展的基础，没有农业的持续发展，就不可能有人类社会、经济的持续发展。

持续农业的兴起，有利于更好地解决农业发展和环境的双向协调，在发展的同时，注意资源、环境的保护，使资源、环境能永续地支撑农业发展；有利于重新认识农业的地位和作用，使农业的功能不断拓宽，促进农村全面、综合、协调发展，增加农村就业，增加农民收入，缩小城乡差距；有利于各国从本国国情出发，调整农业发展战略和方向，选择适合本国国情的现代农业发展道路。

(二) 我国人多地少，人均资源相对紧缺，地区发展不平衡，经济、技术基础相对薄弱，面临资源、环境和人口等多重压力，发展现代集约持续农业是必然选择。

(三) 我国农业发展中面临农业和农村经济政策的执行、落实力度不够；农业投入不足，增加了农业和农村经济持续稳定增长的难度；主要农产品粮食和棉花生产不够稳定；城乡居民收入差距明显；地区性发展不平衡；农村剩余劳动力日益增加等新情况和新问题，也促使我们选择一条现代化、集约化、持续性的农业发展道路。

(四) 现代集约持续农业的内涵

1. 现代集约持续农业的目标：以现代工业和科学技术为基础，充分利用我国传统农业的有效技术精华，实现持续增长的生产率，持续提高的土壤肥力，持续协调的农村生态环境，持续利用的农业自然资源，实现高产、优质、低耗、高效，逐步建立起一个采用现代工业装备、现代科学技术和现代经营

管理方法的农业综合体系。

2. 现代集约持续农业的概念：在实现社会主义市场经济和农业现代化的过程中，调整结构，优化产业和产品构成；增加投入，提高农业综合生产力；依靠科技，增加资源产出率；防止污染，保持农业生态平衡；增加收入，走向共同富裕；逐步建设成为一个资源节约型、经营集约化、生产商品化的现代农业。

3. 现代集约持续农业所包涵的具体内容：

(1) 在现代食物观念的引导下，确保国家食物安全和人民健康。

(2) 进一步依靠科技进步，以继承和发展我国传统农业技术的精华和吸收现代高新科技相结合。

(3) 目前仍以技术密集和劳力密集相结合为主，逐步发展技术、资金密集型的现代农业生产体系。

(4) 保护资源和大力改善农村生态环境。

(5) 重视提高农民素质和发扬中华民族农业文化的精华相结合。

(6) 切实保证农民收入持续稳定增长。

(7) 发展多种经营方式，多种生产类型、多层次的农业经济结构，注意逐步向新的集体化、集约化和发展农村规模经济。

(8) 从现代农业的要求上看，要在决不放松粮食生产与积极发展多种经营的基础上，从不同层次上优化农业和农村经济结构，促进乡镇企业与农林牧渔、种养加、贸工农相结合，把农业与农村发展联系在一起，从而推进农业向专业化、社会化、商品化发展，逐步实现农业现代化、农村工业化、农村城镇化、农村文明化和城乡一体化的高层次结合。

“现代集约持续农业”是个历史的渐进过程，不可能一蹴而就，需要长期不懈的努力。在实施过程中，需遵循从初级到高级、由局部到全面的循序发展原则；因地制宜、科学合理、多样化地开发利用资源原则；集约经营、持续发展原则；增收增效、共同富裕原则；防止环境污染、保护资源和环境原则。根本目的就是要实现农业的集约性、高效性、持续性和多样性，保证经济效益、社会效益和生态效益兼优，促进农业持续发展、社会安定、国家富强。

(五) 现代集约持续农业的区域发展战略

我国地域辽阔，自然环境多样，经济发展不可能平衡推进，农业生产显示出明显的区域特征。形成了东部、中部和西部三个不同发展水平的经济地带。为此，现代集约持续农业必须实施区域发展战略。

1. 三大经济地带的基本情况比较

东、中、西部地带人口和主要资源的分布比重：占国土面积的比重分别为 14%、29%、57%，农业人口占全国农业人口的比重为 41%、35%、24%，耕地面积占全国的比重为 32%、44%、24%，人均占有耕地面积为 0.95 亩、1.5 亩、1.3 亩。农民人均收入 400 元以下的人口分布为 10%、30%、60%。东中西部地带农民人均收入有扩大的趋势，1985 年东、中、西部的比例为 1.59 1.18 1，到 1993 年扩大为 1.87 1.19 1。

2. 三大经济地带现代集约持续农业的发展战略选择

(1) 东部地带：

——农业要加快向技术和资金集约型转变。在农业劳动力迅速转移的同时，逐步扩大经营规模，提高机械化水平。要加快发展沿海外向型农业，重

点发展高产优质低耗高效农业，以增强国际市场竞争能力，特别应当重视饲料工业和食品工业的发展。

——要加快发展沿海大中城市城郊型“菜篮子”工程，要建立蔬菜生产基地和设施农业。关于畜牧业，要扩大郊区规模化养禽、养猪、养牛事业，在发展郊区奶牛业的同时，相应发展配合饲料产业和青贮饲料及青饲技术。

——建设一个海上东部经济地带。充分利用沿海资源优势，加快发展近海水产养殖，重视保护近海经济鱼类资源，扩大增种养殖资源，合理利用水产资源，逐步推进远洋资源的开发利用。

——建设沿海和江河沿岸及农田防护林体系。充分利用水资源充足的优势，加快发展速生丰产林，相应地发展速生木材加工业，这也是增加农民收入的一条重要途径。

——重点加强对乡镇工业的合理布局和防治工业污染工作。在继续提高乡镇企业竞争能力的同时，重视调整乡镇企业产业结构和技术结构。逐步把企业集中到乡镇发展中心，统一规划，重新建立基础设施，严格治理和保护农村环境。

——在发展种植业和养殖业的同时，提高有机肥利用水平，逐步控制和减少大量使用农业化学物质带来的污染，依靠技术进步，调整农用化学物质的结构，减少和消除有污染的化学物质。

（2）中部地带：

——加快我国主要农产品商品生产基地的现代化建设，特别是商品粮、棉、油、猪、牛和家禽基地建设。要对基地实行有效的保护政策，重视增加农业投入和农业基本建设（特别是防洪、排涝和抗旱、抗灾等工程）以及中低产田的改造，提高农产品商品综合生产能力和有效供给能力。

——在粮食集中产区要加快实施“种植业三元结构工程”。要建设相对独立的产业体系，相应发展养殖业，加快建设华北肉牛带，推进南方亚热带丘陵地区草山草坡畜牧业的发展，推动东北平原商品粮基地饲料粮的就地转化。同时，要相应地发展食品和农产品加工业，逐步实行种养加、贸工农一体化的农业产业化经营体系。

——建设我国最大的淡水水产养殖基地。在这一地带要加快推广小水体精养集约高产技术，尽快提高淡水水产资源生产力。加快池塘养鱼的基础建设，扩大湖泊围栏养殖面积和网箱养殖规模，完善水产品渔工商一体化建设。

——建设我国最大的速生丰产林基地。利用广阔的南方亚热带丘陵地区和华北及东北平原的自然资源和经济资源的优势，加快速生丰产林体系和多种果树业的建设，加强立体农业的建设，实行农林牧综合经营。同时，要提高开发农业建设水平。

——要尽早规划中部地区乡镇企业的合理布局，避免工业“三废”对农业基地的污染。这一地带即将加快发展乡镇企业和增加农业化学物质的投入，要重点预防农村工业化和农业现代化可能带来的生态环境污染和破坏。

（3）西部地带：

——采取有效政策保护和建设西部地带有限的“基本农田”。为控制西南山地高原坡地的过度开垦，必须保护河谷地带宝贵的基本农田和实施“坡改梯”工程，重点加强水利设施建设和提高基本农田的集约生产能力。同时要加强对西北优质棉花和特产、水果以及蔬菜基地的建设，提高灌溉水的利用率，积极推广管道灌溉和喷灌滴灌技术。

——逐步提高牧区牧业集约建设水平。增加投入要重点建设水热资源比较充足的草地，发挥人工草场的生产潜力。对干旱冷凉的草地要控制放牧，严禁超载过牧，保护草场资源的再生能力。

——重点建设人工池塘水产养殖体系。在西南的丘陵河谷地带或山区的水塘水库，都有发展水产养殖的良好资源，稻田养鱼也有相当的潜力。推行小水体精养高产技术，是发挥水域资源的主要途径。

——建设两江上游和西北防护林体系。这个防护林体系不仅关系到西部地带的水土流失，而且严重影响到长江和珠江中下游地带的环境和经济发展。西北防护林体系也是关系到西北水土流失和黄河中下游安全的重大工程，需要国家和地方、上游和中下游的联合共同建设。

——东西部联手综合开发西部资源。为了加快开发西南的磷硫矿藏、水和能源、特种生物资源和南亚热带农业资源，西北的石油、钾矿、光能、风能、特产经济作物资源，需要同东部的资金和技术优势实行互补和结合，以尽快发挥资源的优势，推进农业和农村的持续发展。

从总体上来看，三大经济地带在推进现代农业和农村发展的过程中，应当把生产、技术、经济、生态和社会五大系统有机地结合起来，根据本地带的实际情况的资源环境，加强区域间的协作，逐步实现区域内的现代集约持续农业的稳步协调发展。

（六）现代集约持续农业的重点发展领域

现代集约持续农业是我国处在世纪之交时期农业发展的必然选择。为了推进现代集约持续农业的发展，需要确定一批优先重点发展的领域：

1．建立农业持续发展的科学管理体系，要对已有的重大农业技术政策进行持续性评估，制定管理细则，提高持续发展的管理水平。

2．建立食物安全和预警系统。贯彻实施《90年代食物结构改革和发展纲要》，建立食物安全和预警的信息系统和模拟运行系统，制定配套的食物安全政策，确保我国人民的食物供应。

3．建立实施“种植业三元结构工程”规程。有重点地、分区域地进行试点和示范，制定不同区域的三元结构工程体系，并对资源开发、作物种植制度、养殖体系、加工体系、销售体系进行一体化的规划和建设。

4．建立资源开发利用监测体系。对农业自然资源分类、分区进行评估和核算，纳入国民经济核算体系，制定相应的资源管理政策和法规。

5．建立农业生态工程 and 环境保护体系。对农业生态环境进行分类和分区评估，制定农业生态环境信息系统和模拟运行系统以及动态监测系统。

6．建立持续性农业科学技术的推广体系。对现有农业技术进行持续性评估，制定和推广提高农业投入物质利用效率的技术，如化肥、农药施用规程，以及节水、培养地力和多途径开发利用农村能源的措施等。

7．建立持续性农业知识和技术培训体系。鼓励农民自觉地参与现代集约持续农业的示范推广活动，通过多种途径，提高农民科学技术水平。

四、面向 21 世纪，树立推进 农业现代化建设的八个新观念

到 21 世纪初叶，我国农村经济将全面快速增长，农村产业结构发生新的变化。届时将呈现第一、二、三产业协调发展、相互促进的局面，农业综合生产能力和出口创汇水平将大大提高，在“大农业”结构中，将特别重视农、

林、牧的合理配套，非农产品产值在农村社会总产值的比重将占 2 / 3 以上。总体上将向农业现代化、农村工业化、农村城镇化、农村文明化和城乡一体化的方向发展。

农业要加快实现“两个根本性转变”，实施“科教兴农”和“可持续发展战略”，促进农民生活实现小康进而迈向富裕，是本世纪末和 2010 年前，我国整个现代化建设中最为重要而艰巨的任务。要实现“九五”~ 2010 年我国农业和农村经济发展目标，必须更新思想，开拓思路，牢固树立起八个新观念：

- 1．由粗放经营向集约经营发展的观念。
- 2．由工农、城乡长期隔离的二元经济结构转变为工农协调、城乡结合发展，全盘考虑安排国民经济建设的观念。
- 3．传统农业转变为现代农业的观念。
- 4．传统粮食观念转变为现代食物，广辟食物的观念。
- 5．农业种植业由“二元结构”转向“三元结构”的观念。大力发展饲料作物，促进农牧结合、共同发展的观念。
- 6．种好 15 亿亩耕地的同时面向整个国土资源的观念。科学开发利用非耕地资源，广辟食物来源，增加食物总量的观念。
- 7．大力发展养殖业、饲料工业和食品工业，提高科技含量，增加附加值，提高农业总体效益的观念。
- 8．重视“两个投入”的观念，既要重视资金、物质投入，也要重视智力投入。提高广大农民的文化科学素质，加强农村经营管理。管理是一门科学，管理出水平、出效益。