

《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

（中）

04

上海市黄浦区教育信息中心

金属矿床成因及矿产资源预测

於崇文

中国地质大学

於崇文 地球化学家。1924 年 2 月生于浙江镇海。1950 年毕业于北京大学地质系。现任中国地质大学教授。中国矿物岩石地球化学学会常务理事兼元素地球化学区域地球化学专业委员会主任委员，地质矿产部科学技术委员会委员。1995 年当选为中国科学院院士。长期以来从事地球化学基础理论、理论地球化学、区域地球化学和数学地质研究。

中国目前有 95% 以上的一次性能源、80% 以上的工业原料和大部分农业生产资料均来自矿产资源。截至 1994 年底，我国已发现矿产 168 种，矿床和矿点 20 多万处，其中具有探明储量的矿产达 151 种，矿产地 2.3 万多处。中国已探明的矿产资源总量较大，约占世界的 12%，仅次于美国和俄罗斯。以中国 45 种主要矿产保有储量与世界矿产储量比较，有 11 种占世界第一位，有 12 种占世界第二位。按统一的国际市场可比价格，以 1994 年中国矿产资源保有量潜在价值计算，中国矿产资源潜在总值为 91.66 万亿元，居世界第三位。

从已探明的储量看，煤炭、钨、锡、锑、钼、汞等储量大，开发条件好，在世界上占有优势。一些大宗矿产，如铁、锰、铜、钾盐、金刚石等已探明的储量不足，不能满足当前和 2000 年建设的需要。尽管中国矿产资源总量大，但人均占有量仅为世界人均占有量的 58%。中国矿产资源潜在总值虽位居世界第三，但人均潜在总值仅居世界第 53 位，而且矿产资源还存在着分布不均，一些矿产质量不高等不足。因此从可持续发展战略的高度来看，矿产资源的勘查、开发和利用仍然是我国当前和 21 世纪发展经济、增强国力的一项十分重大的任务。

本文论述金属矿床成因及矿产资源预测，为了联系我国地质实际，先对我国矿产资源赋存的地质构造背景作概略介绍。

一、我国矿产资源赋存的地质构造背景

（一）中国大陆板块的划分

我国的大陆和陆缘海域由晚元古代以来 5 条代表古大洋的板块结合带，分划为 6 个板块，其中以塔里木 - 华北板块，华南板块和藏滇板块为主体，并包括西伯利亚板块、印度板块和菲律宾海板块的一部分（图 1）。

（二）中国大地构造演化和地质构造基本格局

我国的大地构造演化从太古宙开始，经历了四大发展阶段。

中国大陆的地质结构可分为四大构造层次：

1. 太古代陆核和晚太古 - 元古代古陆块构成两大基底构造层次：导致中国大陆地壳的不均一性，构成后期地质构造演化的重要基础。

2. 震旦纪 - 三叠纪，由于古板块活动，至印支运动实现了向统一大陆的转变，形成了以三大陆块（地台）为核心，被不同时代的五个活动带（地槽褶皱系）所围绕的地质构造景观，从而奠定了中国大陆地质构造以昆仑 - 秦

岭造山带为界的“南北分野”格局；

3.燕山构造期以来，现代板块活动，形成了大陆改造型的构造层次，表现为大陆西部压缩造山、东部陆块先压后张，形成了“向洋分带”的新格局。

以上四大构造层次复合演化，特别是显生宙以来的古板块和现代板块活动，形成了古亚洲、特提斯、古华夏和滨太平洋等四大构造域。

古亚洲构造域以塔里木 - 华北陆块为中轴，与西伯利亚、扬子陆块之间反复“开”“合”，并沿着与之平行、垂直或斜交的构造带多期次地裂解与拼接。特提斯构造域，劳亚、冈瓦纳陆块多期近南北向“开”“合”，一系列近东西向的地体，随着特提斯洋的俯冲、消亡，有序地依次向南拼贴增生。古华夏构造域，源于扬子、华夏两大古陆块沿绍兴 - 萍乡 - 北海结合带的多次开裂与压缩和来自南方古太平洋的俯冲。总的看来，晋宁期到印支期，中国大陆构造活动以近南北向的“开”“合”为主导，以指向上扬子陆块的“三向”聚合为特征，主体构造循东西向。滨太平洋构造域，欧亚大陆板块与太平洋板块之间产生复杂的运动学过程。构造活动由板内向板缘有序地发展。中国大陆还受到北侧西伯利亚板块的挤压和西、南侧特提斯洋的影响。印度板块向北嵌入，使大陆东部发生伸展，陆缘向洋凸出。滨太平洋构造域是固结了的中国陆块东部，受到先“压（扭）”后“张（扭）”的两期改造的结果。

（三）中国的地质构造成矿域

依据地质构造的稳定性和活动性 [三大稳定区（华北、塔里木、扬子陆块）等，五大活动带（天山 - 兴安，昆仑 - 秦岭，川滇青藏，华南，台湾）]，地质构造格架，并结合全国地层、岩浆岩、变质岩和矿产的地域分布将全国划分为五大构造 - 地理区（天山 - 兴安地区，塔里木 - 华北地区，昆仑 - 秦岭地区，川滇青藏地区，华南地区）（图 2）。

二、金属矿床成因及矿产资源预测

（一）金属矿床的基本属性

1. 矿床案例

为便于由表及里对矿床成因及矿产资源预测进行讨论和分析，我们先引进一个曾进行过长期系统深入研究的典型矿床案例。为此，我们选择了江西银山铜铅锌金银多金属矿床。通过它可以反映出金属矿床的基本属性，矿床成因的基本问题，由此并可引发我们对于矿产资源预测的思考。

银山矿床位于赣东北乐（华）、德（兴）成矿带中段。该带自乐华至德兴呈北东 60° 方向展布，长 100km，平均宽 13km，面积约 1300km^2 。该带自北东向南西依次分布有德兴斑岩铅矿田、金山金矿田、银山铜铅锌金银矿田、乐华铅锌银矿田和虎家尖银矿田等五个矿田，是一个规模巨大的 Cu - Pb - Zn - Au - Ag 矿化集中区（图 3）。

根据重力及地震等地球物理探测资料，赣东北地区的地壳厚度介于 36 - 40km 之间，其基底壳幔结构位于地幔隆起（幔隆）向地幔凹陷（幔凹）过渡转折的幔坡带，而德兴 - 婺源一线正位于元古宙扬子古陆与南华加里东褶皱带之间的地壳碰撞拼接边界（赣东北深断裂带）。

银山矿床所处的独特大地构造位置具备了形成火山型 - 斑岩体系大型多金属矿床的地质背景（无古宙扬子古陆与南华加里东褶皱带之间的地壳碰撞拼接带）与矿源（双桥山群地层、火山岩与斑岩的多来源矿质）、成矿动力（地质构造运动强烈 - 断裂、褶皱主背斜轴部剪切带等，岩浆频繁活动 - 深部岩浆侵位，浅部火山喷发）及矿质分异富集的有利条件（多期次、长期的岩浆热液活动）。中生代燕山运动早期晚阶段的构造热事件导致陆内断块运动，德兴地体中央形成断陷 - 火山盆地，而其东南侧赣东北深断裂的下盘向北俯插，在有利的构造位置引发了中深 浅成 超浅成的岩浆侵入活动及火山机构与岩浆喷溢并形成与之相应的花岗闪长岩、花岗闪长斑岩、英安斑岩、花岗斑岩与火山岩。随着岩浆由深而浅上升侵位直至地表喷溢，在时间和空间上相继形成以下列不同成矿元素组合为特征、自下而上和由内向外的 Mo、Cu Cu、Mo、Au Cu、Pb、Zn、Au、Ag Ag、Pb、Zn 斑岩型 火山、次火山岩型 火山热液型矿床等矿床类型演变及水平与垂向的矿化 - 蚀变分带（图 4）。

2. 金属矿床的基本属性

从上述案例可见金属矿床是一种地球化学系统。地球化学系统具有以下七种基本属性：

（1）多组成的耦合和相互作用

耗散结构论和协同论的研究发现组分种数或同种组分的含量增加都能使它们之间发生相干和协同，并使系统发生自组织。地球化学系统是一种“多组成耦合的动力学系统”。

（2）开放和耗散

开放系统通过消耗环境中的物质和能量同时又向环境发散物质和能量而维持非平衡定态。“耗”和“散”二者相互依存、互为前提，导致耗散系统的动态演变，使之从无序向有序转化。

（3）非平衡

一个地质区域通常经历过沉积作用、岩浆活动、构造运动、变质过程和成矿作用的复杂历史，因此从全部和整体看来，地质区域内的地体偏离平衡状态。平衡反映为静止，而非平衡则是变化之源。非平衡热力学通向动力学，二者息息相通。

（4）不可逆过程和过程的多重耦合和相互作用

成岩和成矿等作用远非单一过程，而往往是两种或两种以上过程的多重耦合过程，并且它们之间相互作用。这些过程在总体上和长时期内则属不可逆过程。

（5）非线性

地球化学系统中充满各种非线性因素，属于非线性系统。在非线性系统中，控制参量在转变的临界点附近的一个微小变化可能导致突跃。

（6）随机涨落

宏观系统存在很大的自由度，从而使系统中出现涨落。系统中初始的微小涨落当系统趋于临界点时就将因非线性动力学机制而扩大，使系统失稳，并驱动其向新态转变——“通过涨落达到有序”。

(7) 物质结构连续与离散的两重性

任一地质区域内的物质可以视为一种连续介质，并且构成一种地球化学场，可以用宏观的连续介质物理学或场论进行研究。然而物质是由不连续的分子和原子等粒子所组成，同时连续介质和场的宏观性质又决定于其中微观粒子的性质和行为，为此又必须对物质的离散结构进行微观物理学研究。

耗散结构论和协同论的研究指出，非平衡约束和非线性动力学机制同时作用于开放的耗散系统将引发动力学过程，使系统自发地由简单趋于复杂，由无序走向有序。因而它们是导致事物复杂性和自组织的根本原因。

由以上分析可见矿床是一种地球化学动力系统，它具有高度的复杂性和组织性。矿床的形成是“复杂地球化学动力系统的自组织”过程（图5）。这就是金属矿床的基本属性。

(二) 金属矿床成因研究

从1.矿床案例可见矿床成因的基本问题是：“源、流、汇”。所谓“源”（source）是指成矿物质的来源，“流”（flow）是泛指矿质的运移和物理化学转变等动力学过程，而“汇”（sink）则是指矿质的汇聚。矿床成因，或者说它的基本问题“源、流、汇”涉及非常广泛的一系列自然科学领域和异常深刻的基础理论。我们将所涉及的基本领域，它的内在本质以及进行研究所需要的基础理论列成如下的简表（表）：

在方法论上我们要用整体论（holism）（复杂性和自组织理论）与还原论（reductionism）（量子地球化学，广义地球化学动力学）相结合，宏观物理学与微观物理学互补的原则。

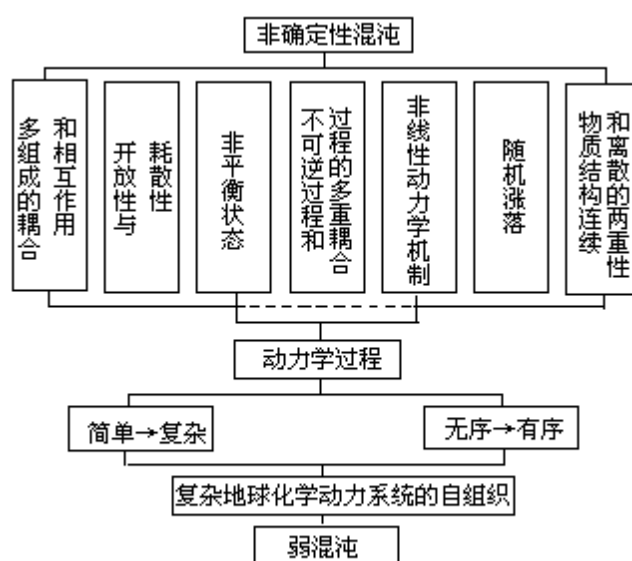


图5 复杂地球化学动力系统的自组织

1. 量子地球化学 (Quantum Geochemistry)

自从本世纪50年代以来，矿物晶体结构分析所取得的成就和物质分子-原子结构中化学键研究的进展促进了晶体化学的迅速发展。嗣后晶体场理论的提出大大促进了过渡金属元素地球化学的发展。六七十年代以来量子化学和固体量子物理学又进一步使晶体化学和晶体场理论向深层次发展，并于70年代在矿物学、晶体化学和量子物理学三者的结合点上又诞生了“量子地球化学”（Quantum Geochemistry）这一新的学科，构成了理论地球化学的一个重要组成部分（其另外两个组成部分分别是“地球化学热力学”和“地球

化学动力学”)。简单说来, “量子地球化学”应用量子力学理论研究地球物质的结构物理(structural physics) [域称“立体物理”(stereophysics)] 与结构化学(structural chemistry) [或称“立体化学”(stereochemistry)]。具体地说, “量子地球化学”应用量子力学理论和谱学实验方法研究矿物的晶体结构及其稳定性, 矿物物理及矿物化学, 化学元素的地球化学分布, 相平衡和化学元素的分配, 熔体与溶液中元素物种的形成及其稳定性, 晶体结构随温度、压力和成分的改变, 矿物能量学, 矿物的谱学性质以及计算机实验。量子地球化学的核心问题是用量子力学理论和各种谱学方法研究矿物中的化学键或电子结构”(图6)。

表 矿床成因研究所涉及的基本领域, 内在本质与基础理论

基本领域	内在本质	基础理论
地球物质结构	物质	量子地球化学
地球化学作用	运动	广义地球化学动力学 复杂性和自组织理论
地球化学过程	时间	
地球化学场	空间	

2. 广义地球化学动力学 (Generalized Geochemical Dynamics)

近一二十年来, 国际上在地球化学研究中, 出现了一种从平衡热力学转向非平衡热力学, 由热力学转向动力学的发展趋势, 表现为在理论地球化学中继地球化学热力学 (Geochemical Thermodynamics) 之后兴起了地球化学动力学 (Geochemical Dynamics) 的新分支学科。促使研究重点从热力学向动力学转移的主要原因是热力学只指出过程自发进行的可能性、方向和限度 (即平衡), 却不讨论过程的现实性和进行的速度。然而动力学的任务恰恰在于研究过程的现实性和进行的速度与机制。因而动力学既能与热力学在现实性和可能性两方面相辅相成, 共同研究系统中物质运动的基本规律, 又能补充热力学之不足, 对物质运动规律作较深层次的进一步探索。

“动力学”一词的原义泛指英文中的 “kinetics” (化学动力学) 和 “dynamics” (动力学)。Kinetics (或 Chemical kinetics) 研究化学反应的速率和历程 (或机制)。所谓 “反应历程” (或 “反应机制”) 就是指反应物分子在变为产物分子的过程中所经历的具体途径与步骤; 而 “dynamics” 则是研究物体在力的作用下宏观运动的速率和机制。

由于目前国内外文献中都将化学动力学和动力学划分为两个学科, 而在地球化学的实验研究和应用中二者兼而有之, 不宜截然分割, 因而有必要拟定一个能广泛适用于 “地球化学动力学” 的 “广义动力学” 的定义。前已述及, 自然过程大多为不可逆过程。在一般的不可逆现象中, 温度梯度 (力) 引起热流, 从而产生热传导; 浓度梯度 (力) 引起物质流, 从而产生扩散; 速度梯度 (力) 引起动量流从而产生粘滞流; 化学反应亲和力 (力) 引起化学反应速率, 从而产生化学反应。可见热传导、扩散、粘滞流和化学反应等各种不可逆过程是在相应的各种 (动) 力的作用下以各种速度自发地进行的。由此我们可以自然地提出广泛适用于 “地球化学动力学” 的广义的动力学定义: “在广义 (动) 力的驱动下各种不可逆过程 (力学, 物理学, 化学, 生物学, 地学的) 进行的速率、机制和全过程。”

金属矿床的基本属性中业已指出，地球化学系统的两个基本属性——非平衡约束和非线性动力学机制同时作用于开放的耗散系统将引发动力学过程，使系统自发地由简单趋于复杂，由无序走向有序。它们是导致事物复杂性和自组织的根本原因，因此认识复杂性的基本途径就在于阐明复杂系统的动力学机制。我们的结论是地球化学动力学研究的最终目的在于探索地球化学系统的复杂性，阐明地球化学自组织的形成与发展规律。

如果将地球化学作用理解为地球物质的运动，则地球化学动力学的研究应涵盖化学运动、力学运动和磁学运动。化学运动之中主要包括了化学反应、热核反应和生命物质与环境之间的相互作用。力学运动之中包括了流体力学、流变学（粘弹性流变学）和固体力学（弹塑性流变学）。流体力学之中包括了物理流体动力学和物理化学流体动力学；而物理流体动力学中包括粘滞流体系统和多孔/裂隙介质，物理化学流体动力学中包括输运 - 化学反应耦合过程动力学，界面现象物理化学流体动力学和输运 - 相变耦合过程动力学。流变学（粘弹性流变学）中包括粘弹性固体的蠕变流动和力学 - 反应 - 输运耦合过程，前者包括地幔对流，而后者则包括埋藏沉积物的化学压实作用、变质作用和沉积盆地的深部区域分割。固体力学（弹塑性流变学）中包括岩石圈构造、大陆岩石圈的热 - 力学演化、造山带构造和构造物理流体动力学。最后，磁学运动主要是指磁流体动力学，其中包括外核内的对流与团结以及核 - 幔相对旋转所产生的地磁场。以上所有各种动力学领域都有不同的地球化学过程与之相对应。地球化学动力学中各种动力学领域的整体构成了地球化学动力学的理论体系，我们称之为“广义地球化学动力学”（图 7）。

3. 地球化学系统的复杂性与自组织

“复杂地球化学动力系统自组织临界性的时 - 空分形动力学”（图 8、9）。

我们在地球化学基础理论研究中的一个重要发现是地球化学场具有时 - 空分形结构。地球化学系统在地球化学作用与时 - 空结构的参考系中呈现自组织临界性，从而我们提出了“复杂地球化学动力系统的自组织临界性”的命题。这一命题的内涵反映了“自组织临界性的时 - 空分形动力学”机制。

（1）地球化学场（温度场、流速场、浓度场、应力场等）的许多场量的时间和空间频率分布具有幂律（power law）更准确地说是“反幂律（inverse power law）”关系。这种经验的幂律相关的发现在物理学和地球科学及其他科学中具有极其重要的意义。因为它指出了地球系统已经而且正在组织成临界状态，并且具有内在的标度不变性的成因机制。

复杂地球化学动力系统自组织临界性的时 - 空分形动力学（框图）

一	二	三
初始 地球物理场与 地球化学场	来自随机介质的、在多重标度上相互作用的基本扰动（涨落）（能量、动量、质量）持续施加于开放的复杂成矿动力系统	触发： 1.多组成耦合系统的相干和协同动力学 2.多重耦合过程的相互作用动力学
四	五	六
1.局部扰动因子系统最近邻之间的非线性相互作用而按比例效应产生增殖过程（反复扩张，持续脉动） 2.通过 domino 效应和连锁反应而传播并遍及全系统（元胞自动机动力学机制）	1.局部地点发生成矿作用 2.地球化学场被摄动 3.系统开始发生弛豫	在能量、动量和质量守恒的条件下，矿产地和能量、动量及质量的分布地点发生改变。
七	八	九
1.在某些新地点，系统的控制参量值超过其阈值 2.在新地点再次发生成矿作用 3.地球化学场再次被摄动 4.系统再次发生弛豫	继续	1.系统进行自我调整以适应随机扰动，增殖与衰减建立动态平衡。 2.在相对稳定的地质环境中，在总体守恒的条件下和充分长的时间内，系统的能量、动量和质量输运达到稳健的非平衡定态。 3.出现复杂成矿动力系统的自组织临界状态。 4.在适当地点发生的长期、多次、多阶段成矿作用形成成矿序列，迈出矿区带或大型矿床。 5.呈现复杂多样的时 - 空分形结构。

图 9 成矿系统自组织
复杂成矿动力系统自组织临界性的时 - 空分形动力学（图解）

（2）自组织临界性的基本原理是高自由度的巨大、相互作用的复杂动力学系统无须对外力进行微调就会自发地通过自组织过程而演变到在混沌边缘的弱混沌（weakly chaotic）的临界状态。这就是所谓的“自组织临界性”（Self-Organized Criticality）。它揭示了自然界中普遍存在的标度律（universal scale laws）与标度不变性（scale invariance）概念及其内在分形动力学（fractal dynamics）机制。

（3）空间上的反幂律频率分布反映空间分形结构，而时间序列上的反幂律功率谱则反映了时间分形结构。它是内在过程的标度不变性或分形属性的展现。反幂律的功率谱揭示了随机时间序列的动力学本质，具有反幂律功率谱的随机时间序列是一种“分形动力学过程（Fractal Dynamic Process）”。

（4）系统一旦达到临界状态，扰动的扩大和传播就可以发生在任何空间和时间标度上（即无特征的或基本的长度和时间标度）。这种标度不变性即

自相似性 (self similarity) 是分形 (fractal) 的基本特征。幂律相关指出, 自组织临界态具有内在标度不变性, 自组织临界过程具分形动力学机制, 其物理场和化学场显示时间和空间分形结构。时、空分形结构是缓慢的自组织临界过程中系统在特定时间和空间构形的定格摄像 (snapshots)。物理时-空是四维的分形连续统 (fractal continuum), 可简称之为“分形时-空” (Fractal - Space - Time), 并可形象化为“变焦时-空” (Zoom Space-Time)。

(5) 自组织临界性的形成是在临界态上进行的非平衡定态 (nonequilibrium steady state) 的自组织过程 (process of self-organization)。它具有如下的时-空分形动力学机制。

自组织临界性的形成具“元胞自动机” (Cellular Automata) 的动力学机制。当来自随机介质的、在多重标度上相互作用的基本扰动 (涨落) (能量, 动量, 质量) 持续施加于开放的复杂地球化学动力学系统时, 它们将引发其中的多组成耦合系统的相干和协同动力学及多重耦合过程的相互作用动力学。微观上则由于子系统 (原子、离子、分子等) 的最近邻之间在三维空间上的高度多重连结 (high multiply-connected topology) 和非线性的相互作用而产生“增殖过程” (multiplication process) 其中包括“反复扩张” (iterated amplification) 和“持续脉动” (sequence of scaled pulses), 并通过“多米诺”效应 (Domino Effects) 和连锁反应 (chain reactions) 而将强化了扰动传播而遍及全系统。然后经过持续的弛豫和衰减 (relaxation and decay) 系统进行自我调整以适应扰动, 直到在总体守恒 (global conservation) 的条件下, 使能量、动量和质量的输运达到稳健 (robust) 的非平衡定态。这就是复杂地球化学动力系统的自组织临界状态, 实际上它是动力学的总体吸引子 (global attractor of dynamics)。我们将上述动力学机制称为“自组织临界性的时-空分形动力学” (Spatio-Temporal Fractal Dynamics of Self-Organized Criticality)。

(6) 临界态的标度不变性是高自由度、巨大系统的整体性质, 它并不依赖于系统的局部性质及其细节。自相似的分形结构意味着系统具有长程相关 (long-range correlation) 的性质。这种长程相关是通过短程 (最近邻) 的高度多重连结和非线性的强相互作用来体现的, 而并非扰动直接传递的结果。因此长程相关可能使远距离的扰动触发和影响近处某一地点系统的动力学行为。

(7) 自组织临界状态的时-空分形结构固然是经验幂律关系所致, 然而其根源则来自“标度相对性理论” (Theory of Scale Relativity), 有其深刻的理论基础。

自然界中存在普遍的标度律, 即从量子物理学的微标度到宇宙学的巨标度都存在某种标度律, 而且物理定律本身也依赖于标度。由此导致了标度不变性的概念。但是这些标度律都属于经验概括, 至今缺乏一种关于标度的基本理论, 借以对标度律作出理论解释。

1993 年 Laurent Nottale 从相对论原理引伸出关于标度的基本理论, 并称之为“标度相对性理论”。广义相对论原理可表述为: “物理学的定律必须能应用于任一状态的坐标系”。坐标系的状态包括原点、轴、单位和分辨率四方面。广义相对论只是将上述原理应用于时-空坐标系的位置 (原点, 轴) 和运动状态, 而并未涉及单位和分辨率状态。因此广义相对论适用于运动定律, 是一种“运动相对性原理”。

标度相对性理论根据自然界中长度和时间标度的相对性,将时-空分辨率 (spatio-temporal resolution) 定义为坐标系的标度状态 (state of scale), 即分辨率状态, 从而由相对论引伸出“标度相对性原理”: “物理学的定律必须能应用于任一标度状态的坐标系”。标度相对性理论论证了自然界中从微观物理学的微标度历经复杂自组织系统的中标度直至宇宙学的巨标度中标度相对性的存在性。

标度相对性原理引伸出的一个重要结果是对时-空结构进行了深刻的修改。在广义相对论中, 时-空是弯曲的, 而在标度相对性原理中, 时-空是分形的, 或称“分形时-空” (Fractal Space-Time), 即时-空具有分形结构。

时-空分形结构的物理根源 (physical origin) 有二: 其一是自然界中标度律的普遍性 (universal scale dependence in Nature), 另一则是自然界的基本不可微分性 (fundamental nondifferentiability of Nature)。二者异途同归。上文已对第一方面进行了论述, 现在再对第二方面作补充分析。

物理学家 R.P.Feynman (1948, 1965) 早已指出, 量子力学中一个微粒的路径可以用一条连续而不可微分的曲线来描述。一个量子微粒运动轨线的不可微分性是量子力学物体的一种普遍性质。在物理学中, 物理物体的普遍性质可以归属于时-空本身的性质。由此推知, 时-空是不可微分的。但不可微分的本质又是什么呢? 我们知道, 当标度愈来愈小时, 不可微分几何无休止地展示出它新的细部。这意味着当分辨率趋于零的极限时, 一个不可微分的分形空间之曲率不断增大, 直至达到无穷大。或者说得更准确一点, 一个分形表面的曲率是无穷大的正、负曲率的分形交替。总之, 不可微分的分形可以由一族可微分曲线的极限来构筑。由此可以得出结论: 不可微分性意味着时-空对标度的显式依赖, 即时-空的标度不变性。因此分形时-空实质上就是时-空的基本不可微分性在结构上的展现。

地球化学系统是地球化学的研究对象, 它具有高度的复杂性, 并且呈现不同程度的自组织。复杂地球化学动力系统自组织临界性的时-空分形动力学集中反映了各种地球化学系统的时-空演化规律, 因此对于它的研究就构成了地球化学学科的基本任务。

(三) 矿产资源预测

在对矿床成因进行理论研究取得一定成果之后, 接着有两项重要的工作必须要做。首先, 研究结果是否符合自然界的客观规律必须用地质事实加以严格的检验。然后更重要的是, 一旦对矿床成因的认识被证明一定程度的正确性之后, 就必须及时用矿床成因的理论认识指导矿产资源的预测、勘查和发展。预测是这三项实践中最重要的第一步。这是因为预测除了必须以矿床成因理论为依据之外, 它本身也具有极其深刻的理论基础、哲学思想和相应的一套方法技术, 用以指导勘查和开发的实践。本节主要是探讨对矿产资源进行预测时可能涉及的一些理论认识问题。

1. 传统与非传统科学思维

最近 West 和 Deering (1995) 曾对 20 世纪以来自然科学界的科学思维进行了分析探讨, 并将被 20 世纪自然科学界广泛接受的所谓“传统真理”和本世纪后期被认识的“非传统真理”进行了对比 (表 3)。

表 3 传统真理与非传统真理

传统真理	非传统真理
1.物理学理论是定量的，而且应该是定量的	1.定性的理论和定量的理论同等重要，有时甚至比定量理论更为重要
2.自然现象一般可以用解析函数表述	2.许多现象具有奇异的性质，不能用解析函数表述（分形）
3.自然现象的演化可以根据运动方程进行预测	3.许多现象的演化尽管可以用动力学议程进行推导，然而未必可以预测（混沌）
4.自然现象具有基本（特征）的标度	4.自然现象未必具有基本（特征）的标度，而可以用标度关系进行描述
5.绝大多数现象符合叠加原理	5.绝大多数现象破坏叠加原理

值得指出的是，本世纪后期科学思维所揭示的“非传统真理”之中，非线性、标度关系和不可预测性这三者之间的相互关系具有普遍意义。

2. 可预测性与不可预测性

可预测性（predictability）和不可预测性（unpredictability）的问题本质上涉及哲学问题，其中包含有序和无序（order and disorder），确定性和不确定性（certainty and uncertainty or determinism and nondeterminism）以及偶然性和必然性（chance and necessity）。在这一个重要的认识论和哲学问题上法国的两位伟大的数学家、物理学家和天文学家持有截然相反的看法。Laplace（1776）相信严格的确定论，他认为确定论意味着完全的可预测性。这就是说我们一旦知道一个系统的现时态就可以绝对确定地预测其以后的状态。在他看来，不确定性是由于不准确的知识所导致的，因此不完全和不完善的观察才需要用到概率理论。Poincare（1903）与之相反，他认为即使一个系统是确定性的，但由于系统的演化对于其初始状态具有灵敏的依赖性，因而不可以进行长期预测，也就是说他揭示了内在的不可预测性（intrinsic unpredictability）。

本世纪后期，自然科学界对于“噪声”（noise）和“混沌”（chaos）开展了广泛而深入的研究。噪声和混沌在人类认识的较深层次上影响着预测问题。二者包含着有序-无序、确定-不确定和偶然-必然之间复杂而深刻的辨证的内涵。简单说来，确定性系统中可能产生混沌和无序（确定性方程中的内在随机性）；反之，噪声和混沌中又隐含着内在确定性（“确定性随机”和“标度不变性”）。

噪声（观测误差除外）和混沌本质上都来源于复杂系统中所发生的过程之内在的非线性动力学性质。此外，系统无论是走向“有序”（包括分形结构）还是“混沌”，通常并不是连续、均匀和平衡地渐进过渡，而是都要经历一系列的突变，可以说都和临界现象有关。这些都是它们所具有的共性。然而噪声和混沌二者的性质有所不同，研究方法也有差异，并且对预测具有不同的影响和意义。

3. 噪声

噪声有时亦称“随机涨落”（random fluctuations）它们广泛出现于自然界和人类社会中。噪声或涨落有的来自测量误差，也可能产生于系统的内部，称为“内部涨落”（internal fluctuations）或者来自系统外部环境的随机扰动，称为“外部涨落”（external fluctuations）。观测误差这里不拟讨论。内部或外部涨落均与动力学过程有关。这一类随机涨落非常重要。

当系统的外部控制参数（如温度、压力、组分浓度等）逐渐发生改变时，系统将趋于临界状态。一旦达到临界点，初始的微小涨落就会突然扩大。临界点附近不同点上的涨落并不互相独立，而是彼此有关联，即使原子或分子间是短程作用力，也可能出现长程的关联（long-range correlation）。实际上，逼近临界点时，这种关联愈来愈大，系统中出现若隐若现、相互嵌套、“你中有我，我中有你”的原子或分子相互连结而成的集团，可以称之为涨落“斑块”。这些涨落“斑块”或连结分子集团的平均长度就是“关联长度”（Correlation length）。重要的是在临界点，系统内的这种关联长度突然发生一定距离的发散。在临界点附近，微小涨落的突然扩大除了引起空间长度上的关联之外，还导致时间上的关联。这时随机时间序列中将出现确定性的局部时间域，其时间区间随着逼近临界点而愈来愈大，其平均长度即为“关联时间”（correlation time）。当达到临界点时，关联时间突然发生一定长度的发散。正是这种关联长度和关联时间的发散使系统发生“自组织”（self-organization），呈现有序的空间结构（spatial structure）、时间结构（temporal structure）或时-空结构（spatio-temporal structure）。因为这种有序结构是系统在临界状态下产生的，因此又将这种临界现象称为“自组织临界性”（self-organized criticality）。我们将上述现象和过程简称之为“通过涨落达到有序”（order through fluctuations）。

现在再来谈谈一种具有特殊性质的噪声，我们将它称为“标度噪声”（scaling noise）。这个名称的由来在下文中自有说是。首先要谈一下“白噪声”（white noise），其所以被称之为“白”，是由于所有的频率对于动力学作出同等的贡献，如同白光中的情形（功率谱中所有频率上的能量为一常量），其所以被称之为“噪声”则是因为各频率上的变量值彼此之间是随机的。此外还有所谓“有色噪声”（colored noise）。这种噪声具有反幂律功率谱（inverse power-law spectrum），即功率谱随着频率的增大按反幂律 $1/f^\alpha$ 而减少： $S(f) = f^{-\alpha}$ ，其中 S 表示功率谱， f 表示频率， α 为正数。具有反幂律 $1/f^\alpha$ ——分布的功率谱的噪声标度不变性（scale invariance）的重要特征，因此特别称之为“标度不变噪声”（scale-invariant noise），有时简称之为“标度噪声”。当 $\alpha=0$ 时为白噪声， $\alpha=1$ 时常称为“ $1/f$ -噪声”， $\alpha=2$ 时为“布朗噪声”（Brownian noise），即布朗运动（图 10）。实际上，在一个变程内连续取值。

具有反幂律 $1/f^\alpha$ -分布的功率谱的噪声，统称为“ $1/f$ -现象”。 $1/f$ 现象既然具有标度不变性，因此这种现象在时间上和空间上都具有分形的特性，即具有时间分形结构和空间分形结构。此外，我们在“地球化学系统的复杂性与自组织”一节中已经指出地球化学场量的反幂律率分布反映地球化学系统的自组织临界性，并具有时-空分形结构。

从以上分析可见，对于噪声，应该一分为二，既要看到它随机、不规则的一面，更重要的是也应看到它能揭示自然过程的内在动力学规律这一面。上文指出的“通过涨落达到有序”和有色噪声的“标度不变性”完全可以在预测工作中起某种指导作用。

4. 混沌

在许多自然现象中，我们常常可以看到一种不规则的涨落，这种不规则性和一般的噪声有所不同，它完全是由于过程的内在非线性动力学性质所产

生的。某些低维的确定非线性动力学方程会给出非周期性（不规则）的解。这种解反映了确定性非线性动力学系统中所蕴涵的内在随机性，可以称之为“确定性随机”（deterministic randomness）。通常所说的“混沌”（chaos）就是指这种确定性随机。它是由宏观系统中的非线性相互作用（nonlinear interactions）所产生的系统的内在性质。

（1）混沌的最突出的特征是对初始条件的敏锐的依赖性。假定我们用 N 维的相空间中的一个点来代表某一系统的状态，则系统的演化就可以用这个点在相空间中移动的轨线来描述。相空间中所有轨线最终被吸引而至的极限点集称为“吸引子”（attractor）。吸引子在相空间中可以有不同的形状和大小，但其共同点是只在其中占据有限的体积。如果相空间的初始体积内的所有各点收敛到一个吸引子，并且任意地靠近在一起的初始点最终按指数规则互相分离，则称此种吸引子为“奇异吸引子”（strange attractor）（图 11）。奇异吸引子表示“混沌”，而邻近的轨线按指数规则分离的性质就称为“对初始条件的敏锐的依赖性”（sensitive dependence on initial conditions），正是这一特性产生了通过奇异吸引子的轨线的非周期行为。

（据 West, Deering, 1995）

图中自上而下表示 Belousov-Zhabotinskii (BZ) 反应中溴离子深度的相空间、离子浓度的时间演化及功率谱密度的对数的频率分布。左列表示规则的动力学，右列表示混沌动力学。

（2）非线性动力学可以使系统处于两种不同的状态，一种是有序和组织，另一种则是无序和混沌。在一个线性的场内，一个能量的脉冲是由集中在某一频率的许多的波的窄谱之线性叠加所构成的。由于场是线性的，而介质具有弥散性，因此当这种脉冲在弥散介质的线性场内传播时就将在空间上拓宽，而其振幅将随 $1/\sqrt{t}$ 而衰减， t 表示传播时间。反之，如果场是非线性的，则在某种条件下，脉冲可以保持经久不衰。那么需要什么样的条件呢？我们知道线性弥散将驱使构成能量脉冲的诸波分离，而非线性相互作用则反之，将使这些波聚扰。如果非线性相互作用达到相当的强度，足以和线性弥散作用达到动力学的平衡则系统就将展现有序和组织状态。

研究证明，当系统的能量超过特定的临界值时，则该系统的内在非线性使运动方程产生非周期解，并使系统表现混沌的行为。在此情况，随机涨落来源于系统的内在非线性，即混沌而并非一般的噪声。

（3）走向混沌的通路。非线性系统呈现混沌是其动力学演变的结果，其间要经历一系列的突变。系统的动力学行为受外部参量的控制。当外部控制参量逐渐增大并依次超过诸临界阈值时，系统将相继经历不动点（非平衡定态）、极限环（振荡）、环面而达到混沌这样一系列由简单到复杂的吸引子（图 12）。在这一演化过程中，系统从简单的周期行为通过周期的无限倍增（infinite periodic-doubling）而走向复杂的非周期行为是系统从有序走向混沌的通路，这也就是产生混沌的动力学机制。

（4）混沌过程具有宽带的、标度的功率谱，这意味着混沌以定常的速率创造信息，因此混沌过程蕴涵着丰富的信息。反之，周期性过程具有窄带的功率谱，并表现为单调、重复的序列，因而缺乏信息内涵。

综上所述，混沌的本质是确定性随机。虽然不规则性是混沌的主要特征，

但是混沌来源于确定性的动力学系统，它对初始条件虽高度敏感然而有章可循，它的经历一系列突变的动力学演变过程，从有序走向混沌的动力学机制（通路）以及丰富的信息内涵，所有这一切给予我们一种启示：面对混沌现象，在处理预测问题时，决不能简单从事，而必须实事求是地对具体情况作系统深入的具体分析。

5. 无序度与复杂性的度量

系统的无序度或复杂性必须用非线性动力学理论和由这种理论发展而来的方法进行研究。传统的研究方法是从理论到实际，就是先建立模型（modelling），即控制系统演化的动力学方程，然后求解方程或进行数值模拟，最后再将所获得结果与经验数据进行比较。非线性动力学方法则是反其道而行之，它从实际到理论。这种方法不必首先建立动力学演化方程，而是直接从经验数据演绎出复杂系统的性质和行为。

（1）复杂性的度量

现在有多种方法被用来度量相空间中吸引子的复杂程度，下面略作介绍：

（a）维数

整数维指示简单的吸引子，而非整数维则指示复杂的吸引子（混沌吸引子）。吸引子的维数不仅可以用来刻画不随时间而变的静态空间结构的复杂程度，而且还可以用来表征随时间而变的时间序列（动力学过程）的动态时间结构的复杂程度。

（b）熵

熵可以被解释为动力学创造信息的平均速率。在规则的吸引子中，当系统演化时相空间的局部体积内的初始轨线彼此靠拢，系统保持初始信息，并且无新信息产生。因此初始信息可以用来预测系统的最终状态。在混沌吸引子中，当系统演化时，强非线性相互作用破坏了初始信息，然而动力学又创造了新信息。因而系统的初始不确定性在整个吸引子中最后完全被抹掉，也就是说最后失去了现在和将来之间的偶然联系，因而完全丧失了预测能力。

（c）Lyapunov 指数

Lyapunov 指数谱被认为可以提供混沌行为的最完善的定性和定量表征。假设有一个初始条件的 d 维球体然后观察此球随时间的演化，则在 Lyapunov 指数为负的某个方向球将收缩，而在 Lyapunov 指数为正的另一方向球将膨胀，从而球变为一个 d 维的椭球。因此一个 d 维的系统可以用 d 个指数来表征，其中第 j 个 Lyapunov 指数定量地表征椭球中第 j 个主轴方向上的膨胀或收缩。Lyapunov 指数之和就表示平均的发散，对于耗散系统，它永远是负的。

以三维的相空间为例，其中的吸引子可以三个 Lyapunov 指数（ $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ ）来表征。这是因为 Lyapunov 指数定量地表征动力学系统的相空间中相邻轨线的平均的指数收敛或发散。我们将具有一个或一个以上正 Lyapunov 指数的系统定义为混沌的。一个系统的局部稳定性是根据其对抗扰动的响应来确定的。沿着某些方向响应可能是稳定的（Lyapunov 指数为负），而沿着其他方向则响应可能是不稳定的（Lyapunov 指数为正）。因此吸引子的定性行为可以仅仅用确定 Lyapunov 指数的正、负号来标定。这就是说我们可以用（ $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ ）的符号来代替（ $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ ）。例如（ $-, -, -$ ）对应于不动点，（ $0, -, -$ ）对应于极限环，（ $0, 0, -$ ）对应于环面，而（ $+, 0, -$ ）

对应于混沌（图 12）。

（d）关联维数（correlation dimension）

有人提出用初始瞬间消逝后吸引子中一个轨线上的时间序列的点与点间的关联来度量吸引子的复杂程度。

（2）吸引子重建技术（Attractor Reconstruction Technique）

复杂系统往往是多变量系统，即该系统的动力学行为依赖于许多自变量。假定对于此类系统难以建立数学模型，而实际条件又只允许实验测定其中一个变量的值，从而获得单一时间序列，比如 $X(t)$ 。根据这样的单一时间序列，是否有可能对复杂系统的动力学行为进行有效的研究呢？从理论上我们知道，如果所研究的系统是强非线性的，则实测的单一时间序列应该包含有关的所有其他未被实测变量的信息。事实上，如果我们有办法适当地处理该时间序列则即可确定有关的其他变量的信息。幸而现在有一个数学定理能显式地表示如何处理数据以获取上述信息。在非线性动力学中已经发展出一种所谓“吸引子重建技术”这样一种方法，利用这种方法就可以根据单变量时间序列重建多维的吸引子。考虑到这种方法涉及较多的专门技术，这里不作具体介绍。

水资源的合理开发利用与社会经济可持续发展

陈梦熊

地质矿产部

陈梦熊 水文地质学家。1917年10月12日生于江苏南京（原籍浙江上虞）。1942年西南联合大学毕业。地质矿产部科技顾问委员会委员、科技高级咨询中心高级顾问。1991年当选为中国科学院院士（学部委员）。长期致力于地下水资源、地下水系统及环境水文地质问题的研究。

一、水是生命之源

水、空气与阳光是生命之源，水与人类生活更是息息相关，是人类赖以生存不可缺少的物质。随着工农业的发展，水又成为发展生产的一项重要原料。没有水，农业就会歉收，工厂的机器就无法运转，城市生活就会陷入瘫痪。过去一般人总认为水是随处可取的，是取之不尽，用之不竭的；但随着人口的增加与工农业的发展，需水量日益增长，因而全世界许多地方，已经感到水源紧张，甚至发生水源恐慌，中国也不例外。因此水资源已成为当今世界各国发展社会经济的制约因素，引起普遍关注。

水资源（淡水）主要包括地表水与地下水两个组成部分，它们都直接受降水的补给。留在地表的水体形成河流、湖泊，还包括高山地区大面积覆盖的冰雪资源；降水渗入地下，成为地下水。地表水与地下水又经常互相转化，所以两者是很难截然分割的统一体。地表水肉眼可以直接看到，容易引人注意；而地下水一般不能直接看到，往往就不能引起重视，甚至有些地方，至今还没有利用地下水的习惯。

我国水资源的总量究竟有多少呢？根据有关部门的统计，我国的总水资源（淡水）共计年平均为2.8万亿立方米，其中地表水为2.7万亿立方米，地下水为0.8万亿立方米（包括一部分与地表水的重复量），居世界的第六位。我国人口众多，耕地总面积比较大，人均水量每年只有2710立方米，约为世界人均水量的1/4；亩均水量仅1770立方米，约为世界亩均水量的3/4。可见我国水资源并不富裕，必须十分珍惜，十分爱护，合理开发利用，充分发挥水资源的作用。

我国水资源的一个重要特点，是地区分布很不均匀，与人口和耕地的地区分布不相适应。一般来说，如果以秦岭为界，南方水多地少，北方地多水少；造成南方水有余，北方水紧张的局面。南方水资源总量约占全国的80%，人口占全国的55%，耕地只占全国的36%；而北方（包括西北）耕地面积却占全国的64%，人口占全国的45%，而水资源总量却不到全国的20%。

如果按人均、亩均水量进行比较，北方人均水量为 $938\text{m}^3/\text{人}$ ，亩均水量为 $454\text{m}^3/\text{亩}$ ，其中海滦河流域只有 $251\text{m}^3/\text{亩}$ ，人均 $430\text{m}^3/\text{人}$ 。而南方亩均水量达 $4134\text{m}^3/\text{亩}$ ，人均水量 $4170\text{m}^3/\text{人}$ ，南、北方相差悬殊，特别是西南地区高达 $38431\text{m}^3/\text{人}$ 。西北干旱地区，如甘肃河西走廊或新疆，由于得到了高山地带降水与冰雪资源的补给，人均与亩均水量分别达到 $6290\text{m}^3/\text{人}$ 与 $1470\text{m}^3/\text{亩}$ ，远远超过华北地区。根据有关资料，全球人均用水量为 $744\text{m}^3/\text{人}$ （70年

代），除美国等少数国家超过 $1000\text{m}^3/\text{人}$ 以上外，多数国家（包括欧洲发达国家）均介于 $400\text{--}800\text{m}^3/\text{人}$ 之间（中国 $453\text{m}^3/\text{人}$ ）。由此可见，我国南方的水资源，不论按人均或亩均计算，均远远超出实际需要。我国北方人均水量接近 $1000\text{m}^3/\text{人}$ ，按国际标准，人均占有水量少于 $1000\text{m}^3/\text{人}$ 的才属于缺水地区；因此在北方主要只是海滦河流域以及黄河中游地区，人均约在 $400\text{m}^3/\text{人}$ 以下，是相对严重缺水地区。

我国水资源的另一特点，是雨量和河流径流量的季度变化和年际变化都很大。少水年和多水年，南方可相差 2 至 4 倍，北方是 3 至 6 倍，这是造成水旱灾害频繁，影响农业生产不能保持稳定的主要原因。据统计自 1950 至 1983 年的 33 年中，全国平均每年的水旱灾害面积约 4 亿亩，占耕地面积的 26%。水灾受灾面积超过 2 亿亩的有 4 次，主要在南方；旱灾受灾面积超过 4 亿亩的有 8 次，主要在北方；平均 3 年发生一次重灾。可见旱灾对中国农业生产的威胁最大，尤以黄淮海平原最为严重，受旱面积占全国受旱面积的一半以上。目前全国还有半数以上的耕地缺乏灌溉设施，每年仍有 2-3 亿亩耕地经常受到干旱的威胁。因此防治水旱灾害，将是一项长期的艰巨任务。

二、农业用水是水的最大用户

建国以来，水利事业突飞猛进，国家水利投资达 1000 多亿元，兴建了大量水利工程，取得了巨大成绩。计建成大中小水库 8.6 万座，总库容 4400 亿 m^3 ，机电井 241 万眼；全国灌溉面积发展到 7 亿多亩，生产着约占 2/3 的粮食和经济作物。据 1980 年的统计，全国总供水量约 4440 亿 m^3 ，其中农业灌溉与工业用水分别为 3580 亿 m^3 与 457 亿 m^3 。全国地下水的开采量为 619 亿 m^3 ，其中北方地区（包括东北、西北）约为 438 亿 m^3 ，占全国地下水开采量的 71%。

据调查分析，全国农业、工业，以及城市生活等用水，分别占总用水量的 88.2%、10.3% 和 1.5%，可见农业用水是水的各类用途中的最大用户。南方水田面积大，灌溉用水平均定额在 $541\text{--}886\text{m}^3/\text{亩}$ 之间。北方井灌面积占较大比重，大部分地区每亩平均用水量约在 $361\text{--}540\text{m}^3$ 之间；西北和东北部分地区，每亩用水量偏高，一般约在 $600\text{--}1000\text{m}^3/\text{亩}$ 之间。我国现在灌溉面积占世界第一位（7.3 亿亩），超过美国（3.68 亿亩）和印度（5.90 亿亩），灌溉面积占耕地的比重也最高。但按人口计，人均灌溉面积仅 0.74 亩，按农业人口计也仅人均 0.87 亩，约占世界农业人口平均数（1.52 亩）的 57%，低于世界上许多国家。

由于北方地多水少，水资源仅占全国的 1/5，所以北方在农田灌溉用水方面，供需矛盾也最为突出。但北方的一个重要优势，是在广大平原地区，普遍蕴藏着比较丰富的地下水；据估算，北方平原区地下水资源共约 1500 亿 $\text{m}^3/\text{年}$ ，占全国平原地区地下水资源的 78%，地下水的年开采量已达到 438 亿 m^3 。其中农业用水约为 330 亿 $\text{m}^3/\text{年}$ ，全国 7 亿亩灌溉农田有近 2 亿亩利用地下水。

解放前华北由于经常受到旱灾威胁，粮食产量很低，需要依靠南方调剂。自 60 年代以来，华北各省大力发展井灌，开发利用地下水，年开采量达到 256 亿立方米，井灌面积约占灌溉面积的 60%，大部分地区基本实现机井化

或井渠双保险，粮食连年丰收，达到自给有余，从而扭转了长期以来“南粮北调”的被动局面。

北方虽然水利化程度有较大提高，但有些地方缺水仍较严重，特别遇到连续干旱年，仍然常常发生严重灾害。因此如何开源节流，解决农田灌溉问题，仍然是一个重要课题。河南商丘地区，采取合理调控地下水位的措施，一方面可以夺取潜水蒸发损失，一方面通过人工调蓄，以丰补歉，使水资源量增加 1/3 以上，既扩大了灌溉面积，又起到治盐防涝的作用。

华北平原的地下水，有一部分咸水或微咸水，约占平原面积的 17%，还未能充分加以利用。近年来不少地方对改造利用咸水已经取得成功经验。据统计，华北平原咸水区每年的降水入渗补给量，可达到 90 亿 m^3 。如果能设法改造利用咸水，抽咸化淡，合理开发，为蓄存淡水创造条件，那么，不仅可以扩大水源，而且对旱、涝、盐、碱等自然灾害的治理，也具有十分重要的意义。

尽管北方水资源不足，但灌溉用水的浪费现象仍很严重。例如华北一般的灌溉定额为 400 m^3 /亩左右，而水多的地区每亩灌溉水量往往超过 500 至 600 m^3 以上。华北地区通过科学实验，根据雨量的变化与土壤墒情，合理灌溉，科学用水，表明每亩耕地的灌溉用水，只要 150 至 200 m^3 左右，就能基本满足需要。西北地区灌溉用水的浪费更为严重，据粗略估计，河西走廊如果实行限额灌溉、储水灌溉、推广高效节水技术，如喷灌、微灌、覆盖等新技术，就能在全区节水 13.34 亿 m^3 ，相当新扩保灌面积 40 万亩。因此在开源、节流方面，应把树立节水意识，建立节水型农业，作为缓解水资源供需矛盾的主要措施。由此可见，农业上只要依靠科技进步，那么节水的潜力还很大。

三、水资源的开发利用与防止生态环境恶化

中央一再指出，国民经济发展必须与资源、环境相协调，形成良性循环；防止由于资源开发，导致生态环境恶化。我国北方地区生态环境十分脆弱，往往由于水资源的开发利用，对生态环境造成不利影响。例如不合理的灌溉，造成的大面积的土壤次生盐碱化，使大片耕地减产或荒废；特别是西北广大地区，由于人为作用，沙漠化、荒漠化现象十分严重，生态环境受到严重破坏，已引起社会的普遍关注。

盐碱土是我国北方及西北地区干旱气候条件下的特有产物。一般是在地下水位埋藏较浅、径流条件迟缓、水质较差的情况下，由于强烈的蒸发作用，盐分在土壤层内积聚而形成的。但不少地区土壤盐碱化主要由于人为作用造成的，特别是在不适宜引灌的地区，进行大水漫灌，使地下水位大幅度上升，导致土壤次生盐碱化与沼泽化的普遍发展，造成严重危害。1958 年-1961 年期间，华北部分地区不适当的大规模引黄灌溉，修建平原水库，有蓄无排，使盐碱地由 2800 多万亩，增到 6000 万亩，就是一个惨痛教训。目前内蒙古河套平原及宁夏银川平原，都是著名的引黄灌区，大部分耕地主要引黄河的水进行灌溉。但由于不爱惜用水，实行大水漫灌，每亩灌溉用水高达 700 至 1000 m^3 以上，不仅严重浪费水资源，而且造成地下水位上升，导致土壤次生盐渍化。例如后套灌区 662 万亩耕地，却有 300 多万亩变为盐碱地，亩产仅 100 斤左右。甚至有的耕地，因不能继续耕种而报废。如果根据地表水、地下水综合利用，井渠相结合的原则，不仅能互相调剂，节省水源，而且井灌

地区又能起到井灌井排、降低水位，防止土壤盐碱化的作用。对咸水、微咸水分布地区，井渠结合，还能起到抽咸补淡，改良水质的作用，一举多得。近年来华北平原土壤盐渍化有所改善，主要就是实行了井灌井排，加上海河治理取得成效，打通了排水出路，才减轻了盐碱化的威胁。据调查内蒙后套平原总需水量约为 37.53 亿 m^3 /年，如果其中部分灌区以发展井灌为主，可减少引黄灌溉量 16.92 亿 m^3 ，因此实际上只需引黄 20 亿 m^3 。这样既节省了黄河的输水量，又防止了土壤盐碱化，是解决这一地区农业生产的正确途径。

西北内陆盆地，土壤盐碱化的问题也十分严重。据统计次生盐碱化土壤的面积共达 1700 万亩，其中河西走廊为 143 万亩，约占其耕地面积的 1/8；民勤地区从 50 年代以来，盐碱土的面积由 26 万亩扩大到 40 万亩，占现有耕地的 64%。新疆耕地面积 4729 万亩，其中 1/3 以上不同程度的发生盐碱化。新疆开垦的土地，由于盐碱化而弃耕的达 1000-1500 万亩。有些地区多年来开垦的面积与弃耕面积竟大致相等，造成巨大的经济损失。

土地沙漠化是干旱地区生态环境恶化的另一种表现。近 40 多年来，土地沙漠化在我国的发展十分严重，且有进一步扩大的趋势。据统计从 50 年代到 70 年代，我国沙漠化土地以年均 1560 km^2 的速度扩大；进入 80 年代，沙漠化平均每年扩大 2100 km^2 。预测今后 10 年，平均每年沦为沙漠化的土地面积将达 2370 km^2 ，直接危害到人类的经济活动与生活环境。全国每年因风沙造成的直接经济损失，高达 45 亿元。

造成沙漠化的原因很多，例如森林、植被的人为破坏，无科学依据的大规模垦殖、拓荒，以及草场过度放牧，等等。但很多地区土地沙漠化，主要是由于水资源开发不合理造成的。河西走廊的石羊河流域是最突出的一个实例。石羊河年均径流量约 11-12 亿 m^3 ，主要流经武威与民勤两个盆地。建国以来在上游地区修建了许多水库，山区河川径流量基本上全部被拦截，导致山前平原地下水补给逐年减少，溢出带泉流量严重衰减，地下水位急剧下降。随着武威地区耗水量的迅速扩大，下游民勤盆地的来水量，由 50 年代的 5.47 亿 m^3 ，到 90 年代急剧下降到 1.7 亿 m^3 ，导致下游河流断流，湖泊干涸，地下水位持续下降，水质恶化，土壤盐渍化面积不断扩大，大片灌木林、沙棘林衰败死亡，草场退化，大片耕地撂荒，绿洲退缩，并被沙漠所替代。因而沙漠面积不断扩大，沙漠化日益严重，生态环境急剧恶化。

在黑河流域也出现类似的情况，上、下游之间由于水资源分配不均所造成的矛盾更为严重。黑河上游主要在甘肃张掖境内，而下游弱水则属内蒙的额济纳旗，弱水最终流入居延海。黑河年均径流量约 12 亿 m^3 ，过去流入额济纳旗约 8 亿 m^3 ；但自 80 年代以来，由于张掖地区国民经济的迅速发展，黑河下泄水量大幅度减少，特别是近 5 年下降到 2 亿 m^3 左右，使下游河流断流，历史上著名的东、西居延海均在地面上消失，成为戈壁、盐漠。地下水位急剧下降，大批浅井干涸报废。约近 600 万亩的天然乔、灌木次生林枯萎消亡，沙化、盐碱化的土地面积扩大到 527 万亩，约占全旗可利用土地面积的 54%。沙漠化、荒漠化现象急剧蔓延扩张，额济纳绿洲濒于消亡。

新疆许多内陆河流，也遭到类似的命运。由于中、上游各类水工建筑大量消耗水资源，造成下游流量严重衰减，生态环境急剧恶化。例如塔里木盆地的孔雀河，原流入罗布泊湖，1943 年湖面面积为 1900 km^2 ，1962 年缩小为 530 km^2 ，现已全部枯竭，成为一片荒漠。准噶尔盆地玛纳斯河终端的玛纳斯湖，

1968 年湖面面积尚有 550km^2 ，现已全部消失。艾比湖已由 1958 年的 1070km^2 缩小为 570km^2 。以上干涸的湖泊，已大部分为沙漠所取代。新疆最大的塔里木河，年径流量达 49.8 亿 m^3 ；近年来由于上游大量引灌，到中游仅余 9.5 亿 m^3 ，减少 81%，使下游河流断流，地下水位下降 8 米，含盐量大幅度升高，使大面积的胡杨林、红柳林相继大片死亡。10 余万亩农田弃耕，30 多万亩草场复灭，随之而来的是沙漠入侵，使原来长达 300km 的“绿色长廊”大部分沦为荒漠。据统计近 30 年来全疆沙漠面积扩大了 3.4 万 km^2 ，使 5100 万亩的土地和草原被沙漠所吞没。

四、为什么大多数城市出现水资源紧张

除农业用水问题外，当前水资源供需矛盾的焦点，主要集中在城市和工业用水方面。随着工业的发展与城市人口的迅速增长，水的需求量日益增加。从 50 年代到 80 年代，我国城市人口已由 0.6 亿增加到 2.2 亿，城市年用水量由 6.3 亿 m^3 增加到 120 亿 m^3 。据预测，到 2000 年我国城市将由目前的 381 个增加到 640 个，城市人口将由 2.2 亿增加到 3.0-3.5 亿人。城市生活用水将由目前的每年 120 亿 m^3 增加到 170 亿 m^3 ，工业用水将由每年 450 亿 m^3 增加到 700 亿 m^3 。因此水资源如何满足今后人口增长与工业发展的需要，是摆在我们面前的一个严峻问题。

城市水资源供需矛盾的日益尖锐化，虽然存在许多复杂因素，但其主要原因之一，是工业用水的迅速增长。据 1987 年的统计，全年供水量，工业用水占 72%，生活及市政用水仅占 28%。所以城市水资源的供需失调，主要是工业的增长与水资源不相适应造成的。

我国北方大多数重要城市，均属工业城市，工业用水一般约占城市用水的 60-80% 以上，而且大多数以地下水作为主要供水水源。由于城市工业过度集中，需水量不断增长和地下水的开采强度超出了允许，造成许多城市地下水过量开采，出现水资源日趋衰竭的严重局面。上海、天津等沿海城市，由于过量开采地下水导致地面沉降或海水入侵，形成公害。

关于地下水超量开采，北京就是一个突出的实例。城区工业占全市工业的 80%，人口占 60% 以上，而 7 个主要供水水源地都集中在城区近郊的四周，造成补采失调，地下水位逐年持续下降，水资源严重亏损。近 10 年来，由于开辟了位处潮白河冲积扇的水源八厂与利用地表水的水源九厂，扩大了供水来源，取得了明显效果；城区附近的地下水位有所恢复，城市用水的紧张局面也有所缓解。

由此可见，城市人口的增长，工业发展规模，工业结构及工业布局等，都要根据水资源情况，全面规划，合理布局。同时要解决大城市的供水问题，还必须从较大范围内，建立分散型的供水系统，避免水源地过度密集；凡有地表水可利用的地区，就应建立与地下水相联合的开发系统，加强水资源的管理与保护。因此全面查清水资源情况，是水资源合理规划与合理开发利用的基本条件。

当前在城市供水十分紧张的情况下，水质污染与水质恶化的情况，仍然有不断发展的趋势。这既造成水资源的破坏，更加剧了城市供水的紧张局面。过去南方城市主要依靠地表水作为供水水源，近年来由于地表水遭到严重污

染，许多城市已改用地下水作为供水水源。但目前地下水的污染也日趋严重，有的水源地被迫停产。造成水质污染的主要根源，是城市污水与工业废水的处理率低。据统计，全国城市污水的日排放量已达 6822 万 m^3 ，而其中大约 80% 未经处理就排入河流或湖泊，对水资源造成严重危害。

为克服城市水资源的紧张局面，必须采取各种有效措施，开源节流，以缓解水资源的供需矛盾。例如天津市采取了跨流域调水方案，实现了引滦工程，基本上解决了天津市长期以来供水不足的困难局面。不少城市还开辟了新的地下水水源地，例如乌鲁木齐市不久前建立了米泉化肥厂的大型水源地，最近又正在开发柴窝铺水源地和西山水源地，以满足日益增长的供水需要。

五、关于改善农村人畜饮用水与扶贫

建国以来，人民生活水平普遍有较大提高，但广大农村仍有不少贫困地区，生活十分疾苦；而这些贫困地区，绝大部分也都是严重缺水地区。例如西北黄土高原、西南的岩溶石山地区，农民生活贫困，很大程度上都是与缺水分不开的。如果农村人畜饮用水得到解决，就能改善人民生活，达到扶贫、治贫的目的。

黄土高原由于自然条件的限制，缺水比较严重，但河谷地区、黄土源区，以及局部地形、地质有利地段，都分布有地下水；陇东、陕北部分地区，还分布深层承压水，都有较好的开发前景。有关部门正在规划研究把洮河的水引到黄土高原来，如果能够实现，那么黄土高原的缺水问题，就能基本得到解决。西南所谓的石山地区，广泛分布石灰岩，由于溶蚀作用强烈，岩石裂隙发育；降水或地表河流，大部分渗入地下，形成地下暗河，而地表却十分干涸。据调查广西中部约 15 万 km^2 的面积内，就分布暗河 353 条，枯季流量 158 m^3/s ；黔北约 8 万 km^2 面积内，分布暗河 607 条，枯季流量达 186 m^3/s 。说明地下暗河资源十分丰富，目前尚未充分利用。

广大农村不仅存在缺水问题，不少地方还存在水质不良，并分布多种与水质有关的地方病，尤其在北方更为普遍，严重影响人民健康。例如最常见的有高氟病、克山病、大骨节病、地甲病，以及地方性砷中毒或地方性癌症等，据调查都与当地饮用水的水质有关。仅据 15 个较严重的省（市、区）的统计，各类病人人数总计就达 3846 万人以上。例如黑龙江省 80 多个县中，就有 70 多个县不同程度的分布各种地方病。国家十分重视地方病的防治工作，例如已采取改良水质、改换水源等各种措施，减低发病率，并正取得显著成效。

我国北方、特别是西北广大的牧区，还存在大面积的缺水草场，迫切需要解决牧区人畜用水。例如内蒙古高原是我国主要牧业基地之一，天然牧场的面积达 12 亿亩；但其中缺水草场占 2 亿亩，供水不足的草场 3.5 亿亩，还有近 3 亿亩的荒草原。近年来牧业打井队打了大量机电井，扩大了草地的利用率，牧区供水情况有较大改善；但从全国来看，仍有不少严重缺水草场，人畜用水问题亟待解决。

南方广大农村，大部分利用沟渠或堰塘作为生活饮用水源。近一二十年来，由于田间大量使用农药化肥，使堰塘、沟渠水质受到严重污染；又因缺乏卫生管理，有害细菌含量远远超标，极易传染疾病。近年来江、浙等省，

大力有计划地改用井水或简易自来水，代替堰塘作为饮用水源，大大改进了农村饮用水的卫生条件。但从全国广大农村来说，要全面改善农村的饮用水，仍然是一项长期的、繁重而艰巨的任务。

六、关于远距离跨流域调水

由于水资源分布的不平衡，特别是南、北之间的巨大差异，如何进行合理调剂，缓和北方地区，特别是华北地区水资源供需之间的矛盾，已成为众所关注的议论问题。当前正在规划、研究的重大引水方案，有从长江调水的南水北调工程，有从松花江调水的东北北水南调工程，有从黄河引水的引黄济晋、引黄济冀京津等工程，以及新疆额尔齐斯河的北水南调工程等。不久前所完成的天津引滦工程，兰州附近的引大（大通河）济秦工程等，都已取得成功。此外，淮河下游每年已引用长江水 100 亿 m^3 左右，淮河及海河两流域，每年沿黄河引水约 80 亿 m^3 ，也收到较好效果。

但值得令人担忧的是，由于缺乏全面规划与整体改虑，无限制的大量引水，也造成一些严重后患，黄河就是一个突出例子。黄河中上游由于沿河各省的大量引水、调水，已使黄河下游发生断流之虞。事实上 1995 年从 3 月 4 日至 7 月 13 日，黄河下游已断流 110 天，断流河道上延至河南封丘县，长约 600 公里。1996 年的情况可能更为严重。据统计 1995 年由于断流所造成的经济损失就达 60 亿元。如果上述各项引黄工程一一实现，那么黄河势将蜕变成一条内陆河，其后果不堪设想。类似的情况也发生在青海的大通河（黄河二级支流），该流域除已完成上述“引大入秦”的工程外，近年来甘、青两省又分别提出“引大济黑（黑河）”、“引大济西（西大河）”、“引大济湟（湟水）”、“引大济青（青海湖）”等调水方案，计划调出的总水量达 25-28 亿 m^3 /年，相当于大通河年均总径流量。如果上述各调水方案实现，那么大通河就将从地图上消失，而且将严重影响黄河兰州以上的来水量。

在上述各调水方案中，尤以引用长江的南水北调工程规模最大，调水距离也最远。该工程包括东线、中线和西线三个方案，除东线方案已部分施工外，中线及西线方案工程十分艰巨，而且存在许多复杂的工程技术问题，尚需进行深入的可行性论证。远距离调水成本很高，需要国家投入巨大的投资，而且非短时期内可完成。因此对于重大的调水工程，必须采取积极慎重的方针，认真做好可行性论证与规划、设计等前期工作，使宏观决策有充分可靠的依据，工程技术方案有牢固的科学基础，经济上合理可行。国民经济建设必须首先与资源、环境和国家的经济实力相适应，使经济发展走向良性循环。就当前而言，工农业建设仍应立足于充分开发利用本地区的水资源，加强节水意识，提高水的利用效率，防止生态环境恶化，依靠科技进步，建立节水型社会体系，才是缓解水资源供需矛盾的正确途径。

除此以外，还要在节约用水和提高水资源的利用效率方面下功夫。例如我国生活用水的浪费现象还很普遍，工业用水的利用率还很低。国外先进国家工业用水早已采取循环用水的措施，重复利用率达到 70-90% 左右，而我国多数城市，还停留在 20-50% 的水平上，所以还有很大潜力。近年来我国不少利用地下水的工厂企业，实行冷却用水回灌再利用；在水价政策上，对回灌用水采取不收或少收水费的鼓励措施，取得良好效果。

由于工艺技术落后，在工业用水定额方面，与国外先进水平比较，也存

在较大差距。例如国外一吨钢，耗水量为 $4 - 10\text{m}^3$ ，而国内则高达 $30 - 80\text{m}^3$ ，相差近 10 倍。国外火电厂每度电为 3 升水，而国内为 10 升水，也相差 3 倍之多。因此如果狠抓技术进步，改进流程工艺，实际耗水量必然大大降低。

七、结束语

综上所述，根据我国水资源分布不均和季节变化、年际变化大的特点，必须按照水资源的不同条件与不同用途，因地制宜地合理开发利用。在农业方面，实行科学用水，合理灌溉。根据北方水资源不足，而地下水比较丰富的特点，要重点开发利用地下水，并与地表水互相调剂，综合利用。推广商丘合理调控水位、对地下水进行人工调蓄，实行以丰补歉、扩大水资源的经验。地下水的开发利用，还必须与旱、涝、盐等自然灾害的综合治理相结合；改造利用咸水微咸水资源，严格防止由于大水漫灌，造成土壤次生盐渍化。西北干旱地区山区河流的径流量，基本代表全流域的总水资源。因此要统筹安排，上下游合理分配；充分利用地表水、地下水的相互转化的特点，在不同地段进行重复利用；防止因片面追求提高地表水的利用率，而破坏当地的生态平衡。

在城市和工业用水方面，要实行科学管理，全面规划。举凡地表水与地下水、局部地区与相邻地区、上游与下游，以及城市用水与工农业用水等，都要作为一个整体全面考虑，合理调配。城市规划与工业布局，必须充分考虑水资源条件，即城市人口的增长与工业发展，应与水资源条件相适应。华北平原地下水资源，对城市用水及工业用水具有特别重要地位，要合理控制开采量。大城市应在查明水资源的基础上，选择在较大范围内建立分散性供水系统，防止水源地过度集中。加强水资源的保护，防止水质污染；充分挖掘水资源潜力，提高水资源的利用效率，包括采取各种技术措施，提高重复利用率，降低工业用水定额，实行废水净化再利用；节约生活用水，防止浪费，逐步建立科学的节水型社会生产体系。

化学定时炸弹与可持续发展

谢学锦

地矿部地球物理地球化学勘查研究所

谢学锦 勘查地球化学家。1923年5月生，上海人。1947年毕业于重庆大学化学系。1980年当选为中国科学院院士（学部委员）。地质矿产部地球物理地球化学勘查研究所研究员、名誉所长。50年代对矿床原生晕进行了开拓性研究。60年代开始研究地球化学填图的理论与方法。长期致力于全球大陆环境地球化学监控的研究。

自从青铜时代，人类就开始向自然界投放各种化学物质。但剧烈的大规模的投放量是从工业化时代开始的。采矿、冶炼、各种大工业、农业及城市生活都向自然界投放大量污染物。尽管科学家在科学论文中不断发出警告，但要等待“寂静的春天”（The Silent Spring）出版之后，公众社会才逐渐认识到人类对自然界的污染已严重影响动植物及人类的生活环境。在一些发达国家，如北美与西欧的国家，已采取有力措施，大大降低人类活动向自然界投入的污染物数量，使空气和水的清洁度有了显著的改善。在很长一段时期，公众社会和科学界都认为这种作法继续下去就可以完全解决环境污染问题，其实不然。因为北美与西欧经过200余年剧烈的工业化及农业活动，在广大面积的土壤中已累积了大量有害物质，有很多地区，利用现在的技术与财力已无法使之再清洁。另外，由于一般认为土壤是藏垢纳污的无底洞，从而在努力减少有害物质向空气及水中排放的同时，正更大规模地将有害物质投入土壤，而没有认识到土壤不是藏垢纳污的无底洞，它对有害物质只有一定的承受能力。在承受能力限度之内可以将有害物质固定使之无害，超过这个限度，它会大量把承受的有害物质“呕吐”出来，造成巨大的无可挽救的危害。

1978年荷兰Ir.F.A.M.De Hann提出“化学定时炸弹”这一术语以描述荷兰施肥过度的砂质土中磷酸盐过度聚集给未来造成的危害。

1988年奥地利的W.M.Stagliani重新使用这个有点“危言耸听”的术语，以促使公众社会警觉，并给它以明确的定义：

“化学定时炸弹（Chemical Time Bomb 简称CTB）的概念涉及一连串事件，导致在土壤及沉积物中储存的化学物质由于环境的缓慢改变而活动化，从而发生延缓而突发的有害效应”。

化学定时炸弹包括两个发展阶段：（1）有害物质的累积或“引爆”阶段。对于有一定承受能力的土壤，这一阶段往往会经历数十年甚至数百年，这既取决于土壤的承受能力，也取决于有害物质持续的投入量；（2）爆炸阶段。往往在数年之内造成突发性灾难，而且再难以挽救。

化学物质的累积与延缓效应大致可以分为两种类型。一种类型是在化学物质投入土壤的早期，大部分化学物质将被土壤吸附、吸收与固定化，只有一小部分被释放在土壤溶液中。而当土壤中化学物质接近饱和之际，只要再增加少量投入，也会导致大量有害化学物质的释放。第二种类型是土壤承受能力受外界影响发生了变化，例如气候的改变，更重要的是对土地利用方式的改变，使承受能力降低，这就导致化学定时炸弹提前引爆。

因而化学定时炸弹的“爆炸”取决于三个因素：土壤的脆弱度或承受能力；化学物质在土壤中的投入量以及土地利用政策与实施。

由此可见这一新概念是处于环境科学与政策制定的界面上。它是人类当前努力使人与自然协调的可持续发展中最后才被认识到的，但是决不容忽视的重要环节。

化学定时炸弹按其规模可分为局部的，如大规模废矿渣、垃圾及其它工业废物堆放处，景观的，如草场、农田、森林及流域，国家性的、洲的或全球性的。

人们发现化学定时炸弹的危害是从比较小规模的化学定时炸弹爆发开始的。如果不采取有力措施任其发展至国家、洲甚至全球性规模，则整个人类生存将受到威胁。

例如美国纽约州的 Big Moose 湖，它位于美国西部高度工业化地区的下风方向。燃煤放出的 SO_2 ，从 1880 年开始上升至 1920 年达到高峰。以后一直维持平稳，没有再升高。而湖水中的 pH 值从 1760 年至 1950 年一直无变化。即在大规模工业化开始后 70 年内，在 SO_2 释放量达于高峰中 30 年一直无变化。但到 1950 年 pH 值开始急剧下降，首先是湖中鲈鱼及白鱼的消灭，然后是鲤鱼，最后是鱒鱼的完全消灭。这说明 Big Moose 湖四周的土壤在 70 年内一直承受 SO_2 的投入。而当土壤承受能力达于极限之时，土壤 pH 值就急剧下降，导致 Big Moose 湖水中 pH 值在不到 10 年之内由 pH5.6-5.7 降至 5.0 以下，因而产生突发的鱼类完全死亡的效应。

这只是涉及一个较局部流域的例子。80 年代早期，波兰、捷克及东德边界森林的大面积死亡是这种类型化学定时炸弹更大规模爆发的实例。由于 200 年工业化，酸性物质在土壤中大量累积，尽管这里土壤有很强的承受能力，但经过 200 年已达于极限，致使土壤 pH 值突然降至 4.2 以下，土壤中大量 A1 活动化，导致了这场突发性灾难。

过去多年农药及工业污染使瑞典的大片森林土壤中 Hg 及更毒性的甲基汞含量甚高。由于采取有力措施，1970 年以后进入土壤中的 Hg 量已大大减少。而原已储存在土壤中的甲基汞绝大部分被森林土中富含的有机物质所固定，只有 0.2% - 2% 进入瑞典的约 1 万个湖中。但如果今后瑞典的气候变暖，加速有机物的降解，则大量甲基汞将有可能进入湖中，造成比日本熊本县更加严重的水俣病事件。这是第二种类型的潜在的有可能由于环境变化提前引爆的化学定时炸弹的实例。

西欧大规模工业化的结果，已使大面积土地的农作物减产，并使农作物中所含化学物质超过世界卫生组织标准。1991 年欧共体的 McSharry 计划准备到 2020 年共废弃 850 万亩耕地进行植树造林（占欧共体耕地总面积的 15%）。但这种土地利用政策的改变将导致这些原耕地土壤的迅速酸化。如果原耕地中已积累了大量重金属、农药及肥料，在土壤原 pH 较高的情况下还可以被留住，则当土地利用政策改变，pH 急剧下降的情况下，就会提前大量释放。这是由于土地利用政策改变可能引发化学定时炸弹提前爆发的例子。有了化学定时炸弹的概念，McSharry 计划的实施将会更加谨慎，并采取相应措施，以避免这类事件的发生。

欧洲及北美这些发达国家直到 90 年代才开始逐渐认识到经过 200 余年剧烈的工业化与农业活动，已形成大量污染地点，它们的面积如此之大，利用

现有技术与财力已无法使之再清洁，因而正在进行大量研究工作。试图建立长期的监测系统以便对化学定时炸弹的发展进行预测，并且设法使大片已累积大量化学物质的土地保持现状，不使之因环境及土地利用之改变使情况提前恶化，另一方面则在发展地球化学与生物地球化学工程方法，在不影响生态的情况下，使土壤缓慢地得到改善。

地球化学工程（Geochemical engineering）一词是 Salomons 与 Forstner 1988 年提出的。它的要点是模拟自然界的各种地球化学过程，特别是自然界的各种自洁净过程就地取材以改善人类生存环境。看来它有着广阔的发展前景。因为面对已被工业化严重污染的地球，要用人类社会能够承受的代价进行治理，它也许是最为可行的一条途径，尽管它很不成熟，还处于发展的初期。

以 McSharry 计划为例。如果莱茵河两岸许多农田都转变为森林，并停止加入石灰，也许在一二十年内土壤 pH 将从 6.0 降至 4.0，这样土壤中多年累积的有害物质，例如 Cd，将大量释放入地下水中严重影响饮用水的质量。表 1 列出了在莱茵河流域土壤中 40% Cd 被释放出来在不同 pH 条件下所需的时间。

莱茵河流域土壤中 Cd 被释放出来在不同 pH 条件下所需的时间

土壤 pH	每年淋出速率	40 % Cd 被释放所需时间（年）
6.0	0.14 %	365
5.5	0.3 %	170
5.0	0.6 %	85
4.5	1.4 %	36
4.0	2.9 %	17

如果在耕地转化为森林过程中仍旧向土壤中加入块状石灰，使土壤 pH 维持在 5.0 左右，则释放入地下水中的 Cd 的量不致影响饮水的质量，而且经过 85 年，土壤中有害物质 40% 被移除，质量可得到很大改善。由此可见地球化学工程可以有意识地调节自然界土壤自洁净过程，而又不致对生态产生严重影响。

再举一些地球化学工程的实例：

工厂排出的硫酸废液，如用石灰中和将会产生大量石膏堆积，难以处理。一个办法是将硫酸废液注入地下的灰岩层中。由于石膏体积是灰岩的两倍，故这种作法还可以抬高低地，防止水淹。向地下灰岩层注入硫酸废液，生成的石膏有时会堵塞钻孔。可以先注入盐酸与灰岩生成 CaCl_2 的卤水。再注入废硫酸，排出的盐酸将向前沿扩展，再去溶解灰岩。有了这种地球化学工程的思路，在选择工厂厂址时就要考虑地下地质情况。

在克里米亚，有生产 TiO_2 的大工厂，每年向一个 42km^2 的人造湖中倾入 110万 m^3 的污水。由于气候干燥，蒸发强烈，排出的污水进入湖内已成稀酸，湖水越来越酸，污染物浓度越来越高，经过 28 年操作，湖水中 pH 已降至 0.9。但在周围 300 余个水井中未发现任何污染现象。这是因为湖底有厚层富含碳酸盐的粘土，形成非常有效的“地球化学障”。大量的 V、As 及 Cr 等有害金属皆被截留。这又是说明地球化学工程的很好实例，但它是一种巧合，因为

当初设计者并无这种思想。

港湾淤泥中含高量重金属，但在还原环境中是以不活动的硫化物形式存在。为了疏浚港湾，挖出的淤泥堆在岸上，进入氧化环境，其中重金属硫化物将因氧化而活动化，形成潜在的化学定时炸弹。因而像荷兰与德国已在海底还原环境内建造堆积淤泥的工程。这些工程耗资巨大且容量有限，但自然界却有理想的堆积淤泥的场所，例如黑海，它的底部是最富含硫化物的还原性水体，有着大量细粒硫化物浮悬物。如果将淤泥泵入黑海 200m 以下的深水中，就可使之在若干万年甚至更长的地质时间内处于还原状态，形成人工成因的富含金属的黑色页岩。

地球化学工程利用自然界进行的中和、浓集、稀释、分离、固定化许多过程，避免大量使用工业品，往往就地取材，充分利用自然界各种地球化学障，并根据生态需要，调节过程进行的速度，或使之放慢，或使之加速。它是劳动集约型的工程，成本较需要使用高技术及复杂设备的许多环境工程方法要低得多，对发展中国家特别适用，需加强这方面的研究。

我国属发展中国家，工业化程度和规模远不如北美与欧洲，但我国每年向空气与水中排放的污染量已居世界之冠。用原始的、极落后的工艺进行生产的遍地开花的乡镇企业使地表水的“热点”污染连成一片，甚至蔓延至整个流域，由于气候的周期性变化，而周期性的爆发巨大的灾难。像淮河流域 1994 年发生的那样的大灾难，是西方国家工业化历史上少见的。淮河的灾难已威胁到活着的人的生存，因而已给国家和社会敲响了警钟。如果能真正痛下决心，用关、停、并、转的措施切断那些严重的、易觉察的污染源，并随着时间的推移和自然界的自洁净作用，创伤是可以医治，淮河也可以清洁起来。但是中国还是要发展、要建设，因而不可避免的还要不断向自然界投放化学物质，不能认为使水及空气适当的清洁，环境污染问题就可以解决。由于资金短缺、技术落后，人民对污染的承受能力又远远高于西方国家，中国向自然界投放的化学物质的量不可能在短期内迅速减少，这些污染物最后大部分进入土壤。故中国（亚洲各国也有类似的情况）在工业化过程中在土壤中累积有害物质的速度肯定会远远超过西欧与北美。如果对化学定时炸弹的概念及其对未来构成的潜在危险缺乏认识，听任有害物质在土壤中逐步大面积大量累积，总有一天中国很大一部分耕地将不适于耕种，中华民族将失去赖以生存的空间，这种灾难当然只可能发生在许多年之后，不会发生在现在活着的一代，更不会发生在现在当政决策者在任期间，但如果现在不提高警觉，持续地采取有预见的措施，则这种灾难将无可挽救。我们应为中华民族及子孙后代着想。

这里第一个应采取的措施是对中国大陆化学物质在土壤中的累积进行全面监控。1992 年在巴西里约热内卢的全球高峰会议上已明确指出为了人类可持续发展，地球系统的所有组成部分（包括大气、海洋、陆地、永冻圈、水圈及生物圈）都必须以全球规模进行监控。已有许多国际组织对全球大气及海洋进行了长期监控工作，但对陆地环境污染变化的监控与预测并未很好的进行。在这方面中国是走在全世界的前面。1992 - 1995 年地矿部地球物理地球化学勘查研究所完成了“中国环境地球化学监控网络”的研究项目，在全国布置了 500 余个采样点，采集泛滥平原沉积物，并分析其中 51 种元素的含量。根据这些结果制作出的地球化学图与地矿部已进行了 18 年的区域化探全国扫面计划，根据数以百万计的水系沉积物样品分析结果所制作的地球化学

图在宏观上惊人的相似。这一研究项目在每一采样点上采集一个地表 5 - 25 公分，一个 80 - 100 公分深处的样品，以比较现在与中国大规模工业化前土壤中各种金属累积变化的情况。

中国东部 S 含量在地表比代表工业化前的深部样品已显著增高。中国每年烧煤 12 亿吨，每年由于烧煤及其它原因进入空气的 SO_2 达到 2000 万吨以上。这是造成东部地表 S 增高的主要原因。从 1982 到 1992 年 10 年内酸雨的范围扩大了 100 万 km^2 而土壤 pH 值为 5.0 的范围仅是酸雨 pH 为 5.6 范围的 1/3。说明土壤有着一定承受能力以阻止酸化。不容乐观的是从广东到福建沿海是酸雨最严重，而又是 CaO 含量最低， Al_2O_3 含量最高的脆弱带。故从地球化学监控图上可预示今后有可能发生 Al_2O_3 及其它有害金属大规模活动化的灾难，必须继续密切监控，加强研究，寻觅对策。目前我正与中国科学院生态环境研究中心徐晓白院士合作，准备利用这些样品再分析一些金属的各种活动态及 DDT、666 的含量。整个这项工作包括采样与分析，如果每 10 年重复一次，便可获得中国全境环境变化的连续记录，能对大规模化学定时炸弹的发生不断作出预警，供决策者制定相应的对策。

总之，如果忽视化学定时炸弹问题，可持续发展几乎是不可能的。我国应以欧洲及北美为借鉴，不要再走他们先发展再治理的老路。人口众多，相对贫穷的中国也走不起这样的老路，如果从现在起就制定出有长远眼光的政策，花费相对来说较少的经费，对我国陆地进行持续的监控，对中国的化学定时炸弹各方面的问题进行深入研究，并发展地球化学工程方法，以避免未来出现无可挽救的灾难，则中国幸甚，子孙幸甚。

我国油气资源及石油地质和油气勘探的几问题

翟光明

中国石油天然气总公司

翟光明 石油地质勘探专家。1926年10月1日生于湖北宜昌。1950年毕业于北京大学。历任甘肃玉门石油管理局地质室主任、总地质师，石油工业部地质勘探司主任地质师、总地质师、石油勘探司司长兼总地质师，石油天然气总公司石油勘探开发科学研究所所长。先后任中国石油地质学会主任，环太平洋矿产和能源理事会常务理事，世界石油大会中国组委会秘书长。1995年当选为中国工程院院士。主要从事石油地质勘探工作。

我国是一个油气资源非常丰富的国家，共有大小沉积盆地500多个，沉积岩面积670多万 KM^2 。其中面积大于200 KM^2 、沉积岩厚度大于1000M的中、新生代盆地共有424个，面积约527万 KM^2 。根据二次资源评价结果，在150个盆地、618个区带、7792个圈闭中，共有石油资源量940亿，其中陆上694亿T，海域246亿T；天然气资源量38万亿 M^3 （包括煤成气16万亿 M^3 ），其中陆上近30万亿 M^3 ，海域8万亿 M^3 。

从50年代以来的40多年勘探中，开展勘探的盆地有82个，范围达320万 KM^2 。截至1995年底，共完成二维地震剖面265.4万 KM^2 ，三维地震面积5.84万 KM^2 ，重磁力工作54万 KM^2 ，共打探井33076口，探井总进尺6982万M。

目前总的勘探形势很好，东部持续发展，西部不断取得实际突破。

下面将重点讲我国石油地质及油气勘探的几个问题。

一、油气资源分布特点

我国油气资源在时空分布上具有几个明显的特点，表现在下列几方面。

1. 资源量主要集中在沉积面积大的盆地内，资源量与面积成正相关关系。在150个盆地中面积大于1万 KM^2 的盆地有59个，它们占石油总资源的91%，天然气资源的96%。

2. 油气资源主要集中在华北、西北和东北等地区。它们分别占油和气的总资源量的74%和80%。

3. 石油资源量主要分布在中、新生界地层，约760亿T，占总资源量的80%以上，天然气资源量主要分布在古生界地层，约20亿 M^3 ，约占总资源量的一半以上。

4. 油气资源量主要分布在埋深小于3500M的范围。约450亿T，占总资源量的70%，但是深于3500M的资源量尚有205亿T，仍有较大的潜力。

5. 目前油气资源量的探明程度很低，在老区的渤海湾盆地，资源量188亿T，仅找出72亿T，松辽盆地129亿T只探明55亿T，而新区则仅仅是个开始。

二、油气田具有地质背景复杂的特殊条件，必须树立长期勘探的信念

尽管我国油气资源丰富，具有很大的勘探潜力，但地质条件较为复杂。在东部地区，除大庆油田外，其它多为断陷盆地，由它们共同形成各种各样的复式油气区。针对这些复杂的地质条件，经过 30 多年的探索和勘探经验，逐步找到了一些规律，取得了很大的成果。在渤海湾盆地先后发现了大港、冀东、胜利、华北、中原和辽河油气田，形成了继大庆油田后的又一个规模很大的油气区，这不仅体现在该区年产油量达到 6000 万 T，而且在地质上也取得在断陷盆地找油的新突破，丰富了石油地质理论。认识和总结这些规律，可以为今后油气勘探提供宝贵的经验。

1. 我国具有广阔的油气勘探领域

近年来的油气勘探成果表明，我国具有广阔的油气勘探新领域，这从新区、新领域和新层系的研究和勘探成果中已经提供了证据。不同地区有不同的油气特点，也就对应有不同的勘探措施。无论在新区，还是老区，只要开阔思路，从各含油气盆地的实际出发，采用新技术、新方法，就一定能取得勘探上的重大突破。这些领域表现在以下几个方面：

(1) 东部已开发层系的深层是广阔的勘探领域，渤海湾盆地的深层下第三系沙河街组三段和四段既是生油层又是储油层，不缺乏盖层条件，特别是在沙四段顶部有一厚层膏盐层和泥岩互层 200 - 400M，是油气聚集的有利圈闭，被认为是非常有利的含油层位，具有很大的勘探潜力。

(2) 西北侏罗系是我国含油气区内第三系、白垩系含油气层外最有潜力的目的层。从贺兰山 - 六盘山以西横跨五省区境内，大于 1000KM² 的沉积盆地共有 65 个，沉积岩总面积 134 万 KM²，自吐哈盆地第一口科学探索井在中侏罗系三间房组和七克台组获得工业性油流后，准噶尔盆地、塔里木盆地以及新钻的三塘湖盆地等都相继发现了工业性油气流。根据第二次资源评价，侏罗系的资源量油为 110 亿 T，天然气为 2 万亿 M³，具有坚实的资源基础。可以按生储、构造等条件，通过分类排队，有计划有步骤地展开勘探工作，一定会取得很好的成果。

(3) 开展前陆盆地的勘探和研究，力求有新的突破。

我国的前陆盆地很多，受勘探手段的限制，以往对其认识不够，而实际上前陆盆地是一种很重要的油气场所，具有很大的勘探潜力。如库车、昆仑山前缘、天山南北前缘、博格达山前缘、贺兰山 - 六盘山前缘等都是非常有希望、有前景的有利地区。

(4) 煤和煤系地层生油气的理论将会进一步扩展我国的含油气领域。

自 1989 年吐哈盆地的台参 1 井、鄂尔多斯盆地的陕参 1 井相继在侏罗系和奥陶系地层喷出工业性油气流后，煤和煤系地层生成油气的可能性已在我国得到充分的研究。我国煤的资源量非常丰富，从现有资料和研究成果表明，镜质组反射率 R_0 为 0.4 - 0.8，即褐煤 - 肥煤阶，平均每吨煤生成石油 150KG，焦煤 - 瘦煤阶， R_0 为 1.6 - 2.0，平均每吨煤生成石油 70KG。同样，生成天然气的数量也很可观。我国西部诸盆地、鄂尔多斯盆地、大华北盆地、四川盆地以及东北盆地 40 多个中生代沉积盆地，不仅有侏罗系，而且有第三系煤系地层，具有广阔的找油前景。

(5) 低熟油的新认识出现后，为我国在东部浅层找油提供了新领域。

自渤海湾地区、苏北、东北以至新疆地区发现 R_0 值小于 0.5 以下的油气

资源后，低熟油的研究在我国广泛展开，取得勘探上的新突破，特别是我国东部浅层，构造大，幅度小，储层物性好，过去除在潜山顶浅层披复构造上获得很好的成果外，大面积的勘探工作并不多，因此，会有较好的勘探前景。

(6) 含油气层井段长，多套生储油层的组合是我国含油气区的一个重要特点。

我国无论在东部，还是西部地区，都有由于多套生储油层，形成含油气层井段长的情况，比如，渤海湾盆地，不同地区都有 2 - 3 套生油层组合，加上断层的活动，使油气重新运移和聚集的条件增多，含油气井段长达 2000M，有时甚至长达 3000M；西部塔里木盆地则具有多生油、多储油层、多期构造，这种类型的含油气区，决不能仅有单一的目的层，也不能限于一种油气藏圈闭，而应从综合分析入手。

(7) 海相碳酸盐岩原生油气藏是我国长远的勘探战略目标。

自中晚古生代以来，我国大部分为海相沉积，由于受多次构造运动的影响，各地区活动强烈程度不一，但总的看来，北部的海相沉积条件较好，从目前已有的条件分析，应集中在塔里木地区、华北地区和中下扬子地区为主要研究和勘探对象，当然突破海相沉积找油不很容易，但我认为只要有信心，坚持开展工作，就一定能够找到原生油藏。

2. 建立正确的勘探原则，始终不懈地在老油区或新盆地展开工作

30 多年在渤海湾地区的勘探实践充分表明，我国东部地区地质条件相当复杂，对它的客观认识，要经过长期性的多次反复。如果将渤海湾地区与大庆油田对比，30 多年来，在该区投入的勘探工作远远多于大庆。但是，其原油年产量仅比大庆多 410 万 T，这也是从一个侧面反映了渤海湾地区地质条件的复杂性。那么，西部地区的地质条件如何呢？由于近几年加速了对西部地区的油气勘探步伐，也取得了较好的结果，如塔里木盆地找到了塔中和塔北两个新的含油气区，展开了在我国最大沉积盆地的勘探序幕，至 1995 年底共发现油田 10 个，油气田 8 个，累计探明石油地质储量 2.5 亿 T，探明天然气储量 1350 亿 M^3 ，同时还有 20 个构造获工业油气流；准噶尔盆地除继续在克拉玛依油田上有新的发现外，在盆地中东部也发现了有利的含油气区，勘探前景很好；吐哈盆地自台参 1 井突破侏罗系地层出油后，勘探开发形势很好，这不仅提高了对吐哈盆地本身的评价，而且对我国贺兰山 - 六盘山以西 200 多万 KM^2 沉积盆地内的侏罗系地层也有了一个正确的评价和认识。此外，还在三塘湖等盆地侏罗系地层中得到了工业性油气田，西部各盆地的勘探工作正在顺利进行。但从这些年来的勘探情况看，西部地质条件也较为复杂。对每个含油气盆地或油气田的认识也要经过长期的探索。比如在塔里木盆地还没有找到同盆地规模相称的，人们所期望的大油田；而准噶尔盆地，克拉玛依油田是 50 年代在我国西部发现的最大油田，后来由于勘探工作一直集中在盆地西北缘进行，对盆地东部和腹部研究较少，加上地形和地质条件的复杂性，长期没能取得较大突破，近年来，随着勘探技术和油气理论水平的提高，应用新理论、新技术，使得在东部和腹部的油气勘探有了重大进展，发现了彩南、石西、呼图壁等重要油气田。塔里木盆地的油气勘探也说明了该盆地地质条件的复杂性，要准确认识其客观实际，必须经过一定时期的勘探实践。这就要求我们从战略上树立勘探信心，战术上寻求更为符合实际的有效措施。

前已述及，我国具有相当丰富的油气资源，在全国 940 亿 T 石油总资源

中，目前已探明、控制和预测的石油储量 200 亿 T，约占总资源量的 20%，找到的天然气储量仅为总资源量的 3%。经过多种方法的综合评价和分析，还有很大的潜在资源。许多新区、新领域、新层系有待于开展工作。因此，无论老区还是新盆地都是大有可为的。在具体实施过程中，必须遵循下列几方面原则。

(1) 一个盆地区，通过先期的初步工作，认为它具备油气聚集所必须的生储盖层的基本地质条件，就应进一步加强综合研究和分析，在此基础上进行实际勘探，这时则要严格按勘探程序坚持下去，不能因为某些地区或某一口井的失败而丧失信心。特别是对于复杂含油气盆地来说，一次或某一个局部地区的失败并不能代表全区的情况，必须在科学研究的基础上开展工作，才会取得良好效果。

(2) 石油勘探工作应遵循“从最好处设想，从最坏处准备”的原则，比如，在一个地区，根据勘探初期的设想，应找到高产油田或大油田，但通过具体实施后，开始只抓到中小油田或一些油气苗，这时就不能轻易放过，经过进一步的综合分析后便可能追踪到大油气田，这在我国勘探史上不乏其例。

(3) 对于复杂地质条件的油气田来说，即使在地面上应用多种先进的勘探手段也不能搞得很清楚，甚至出现相反情况，比如原设想某一层为主要勘探目的层，而在该层恰恰没有得手，而在另外的层次却获得工业性油流；原设想在浅层就能找到，实际结果是在很深的层位才获得；原设想是构造圈闭，而实际是地层或构造岩性圈闭。还有像油田规模、工程地质条件等都会与设想的有很大出入，这些情况在勘探某一地区时可能会经常遇到，因此，应该立足于多种设想，在勘探过程中有足够的思想准备，加强分析和研究，不漏过任何有工业价值的油气层。

三、注意盆地或含油气区的区域地质和区域构造条件的整体研究

由世界范围和我国油气地质勘探的实践普遍表明，任何一个含油气盆地或油气田的形成或保存都不是孤立的，而是受区域地质和区域构造条件的控制，从油气生成、运移到富集成藏无不与周围地质背景和构造演化有关，包括周边构造条件、沉积条件等，其中有些影响是直接的，有些影响是间接的。因此，无论在油气田研究，还是实际勘探过程中，区域地质背景和构造演化都是首先应该考虑的。也只有这样，才能随时站在全局的高度，去分析、去研究某些局部地带的油气形成条件，得出较为符合实际的正确结论。

1. 区域地质背景是油气藏形成的重要基础

从盆地整体出发，有效开展油气勘探，取得重大突破的实例在国内外都有。比如中东油田，这是世界上油气资源最丰富的地区，伊朗的扎格罗斯山前陆盆地向西经科威特、伊拉克、沙特阿拉伯等阿拉伯地台区，再向西经沙特阿拉伯地台区至阿拉伯地盾，总面积约有 360 万 KM^2 ，这是一个统一的完整的大含油气区，从地质构造上来看它是由东向西从前陆盆地的洼陷区到陆台边缘过渡区，到稳定陆台区直到向西抬起的阿拉伯地盾的前震旦系地层，从油气赋存的地质时代来看，是新生代-中生代-晚古生代-早古生代；从储层条件来看，是砂岩-白云岩-砂岩。而过去的勘探首先是从前陆盆进行，这是由于地面露头构造成排成带的分布，并有油气苗出现，从 19 世纪 80 年

代开始石油勘探一直未获成功，因为上下构造不符合，在地面露头为构造高点，而在地下却常打到向斜部位，由于当时的技术手段不可能把地下构造搞清楚，直到 20 世纪初期有了地震工作，加上重力勘探和钻探工作才逐步搞清。随后每搞一个构造就获得一个高产油田，从而掀开中东地区大规模的油气勘探，先是在伊朗前陆盆地第三系找到高产大油田，进而在伊拉克、科威特发现白垩系大油田，特别是在科威特发现了布尔干-玛格瓦世界第二号大油田，这个大油田就有 100 亿 T 的可采储量。紧接着沙特阿拉伯在侏罗系地层中发现世界第一号格瓦尔大油田，这个油田的可采储量竟达到 200 多亿 T，近十几年来沙特阿拉伯的油气勘探向西延伸，在三迭系、志留系、奥陶系以及寒武系相继发现有工业价值的油气流，这一发现开阔了地质家的眼界，说明中东油区不是一个孤立油田的出现，而是有着内在的地质规律值得研究和探讨，特别是和全盆地的地质构造、沉积条件、烃演化史有着密切的联系。当然这种规律的认识是在进行大量勘探工作之后，不可能在中东油区发现以前就知道。但是，反过来我们也可以认识到任何一个沉积盆地和油区都会按照各自构造和沉积背景有着各自的油气分布规律，而且可以借鉴不同的沉积盆地形成的油气藏模式来研究未知地区，这样有助于一个地区的勘探进展，尽快地在新地区发现油气田，这是避免少走弯路的有效方法。

再如我国东部渤海地区东营凹陷的情况。东营凹陷虽然是一个断陷，而且是一个单断型的凹陷，但构造格局和油气分布有密切的关系，北部凹陷有油田 3 个，但有储量 5.37 亿 T，累计产油 1.5 亿 T，南斜坡有油田 15 个，其储量与北部相近，但产油量只有 0.56 亿 T。由此看出，单断型的凹陷有一个普遍的规律，就是深凹陷的一侧是油气生成和聚集的有利地区，随着构造格局和沉积条件的不同，油气分布也具有一定的规律性，这不仅在东营凹陷如此，渤海湾盆地几十个次一级凹陷都有一定的规律可寻。

上述两个实例可以看出，任何一个油气田的出现，都不是一个孤立的事件，都有其内在的控制因素以及各种地质条件相依存的关系，反之，可根据不同类型沉积盆地，综合分析其构造格局、沉积条件和烃源岩的相互关系，形成几种可能的油气藏模式，按照这些和成熟勘探的经验，选择相对有利的地区进行整体布置，有序地进行勘探是会见到成效的。

比如在我国南方，可以从整体出发进行分析。从江南古陆雪峰隆起向北，西至鄂西复式背斜带和向斜带，经过川东高陡构造背斜带，至川中地区，一直到龙门山前前陆盆地，这个范围约 50 万 KM^2 ，孕育着自早古生代、晚古生代、中生代至新生代地层，是一套完整的沉积序列，油气显示也是自东向西，自老而新有规律的分布，震旦系到三迭系地层是一套海相沉积，侏罗系到第三系地层是陆相沉积，都有着各自独特的油气分布特点。做整体布置，避免从单个地区和局部构造入手，将会比较快地揭开海相沉积的勘探序幕。

2. 构造演化对油气藏形成具有重要的控制作用

油气从生成、聚集、保存、破坏再聚集等一系列过程无不处于构造运动之中，而其根源就是构造演化，它伴随着油气藏形成的自始至终。要研究一个地区的油气聚集规律，必须深入研究该区的构造发展史及其对油气的控制关系。一方面，只有搞清盆地的性质和构造发展史，才能掌握油气藏形成的地质基础，了解油气藏的发生和发展过程；另一方面，从盆地整体出发，可以认识不同地区、不同时代地层整个盆地中所处的位置及其与周边条件的制约关系，以免长期局限于某一个局部油藏，推迟大油气田的发现时间。比如，

塔里木地台盆地区（塔中隆起）的地质发展史上有两个重要的地质事件，一是在晚加里东末期，造成志留纪以前的地层抬升和褶皱，奥陶纪地层形成大面积微弱隆起，这不仅在塔中地区，同时与轮南隆起遥遥相对；二是海西期，在塔中地区形成一个很大的构造，它并不是一个凸起，石炭系地层广泛覆盖其上，实质上是一个大封存箱。其中孕育着很丰富的地质构造现象，如多期的不整合、超复、地层的上倾尖灭等，这都可能为后期形成油气藏的有利场所。塔中地区寒武系-奥陶系的大隆起，同轮南隆起之间在地质构造历史上恰似一个翘翘板，这对油气的运移和聚集十分有利。塔中地区这两大地质事件，同鄂尔多斯盆地很相似。鄂尔多斯盆地也是在加里东运动末期有微弱隆起，它和其东部的广大斜坡带也形成一个翘翘板，而现今的构造实际上是一个大鼻状构造，东部有盐层遮挡。成为中国最大的气田。

塔里木盆地塔中地区海西期以后一直在抬升，是一个继承性大构造，在上面形成了很多圈闭类型，在塔中 4 构造周围形成了多种油气藏类型，除构造油气藏之外，还有不整合、地层超覆、地层圈闭、生物灰岩、侵蚀面、底水等油气藏，形成一个复式油气区，所以，不是一个单一的油气藏模式，而是各种油气藏类型的组合。在石炭系下面，地质情况丰富多彩，要寻找大油气田，塔中隆起区就是大油气田存在的地方，寻找各种类型的圈闭，把这个地区作为一个复式油气区整体分析和认识，进行整体勘探更为现实。塔参 1 井就是基于上述观点布置的。

在着手盆地整体研究时，应充分利用一些全局性资料进行宏观分析，如控制全盆地的区域性大剖面、重磁资料、参数井资料等；也可以从局部油气藏的深入解剖入手，反过来推断全盆地的油气赋存格局和演化史。对于一个盆地，通过先期的整体性研究，确定出一些重点目标作为初期勘探区，在这些区内经过一定时期的勘探开发工作、积累大量资料后，再对它们进行精细的综合研究，反过来重新认识全盆地的油气地质条件。这样，也就有希望在盆地其它地区找到更大的油田，这种情况在我国更为常见，如准噶尔盆地。

四、开展以生油为中心的含油气系统的综合研究工作

形成一个油气藏受许多因素控制，特别是生、储、盖、圈、保以及它们之间的匹配关系是缺一不可的，彼此相互联系形成一个含油气系统。因此，在任何时候都必须全面分析、逐一研究，才能获得成功；否则，就会失败；其中最重要的因素则是生油能力，这是能否找到油气的关键。

一个盆地内有时为一个油气系统，更多的情况下有几个油气系统，这种多系统的叠加，常常造成纵向上的油层多，横向上的油藏类型多，形成丰富多彩的复式油气聚集区。在研究过程中，首先应该采用系统的观点，充分借助多学科综合分析、综合研究，确保每个勘探项目、每口探井都有充分的科学依据。而另一方面，将勘探工作建立在扎扎实实科学研究基础上的同时，还要敢于冒风险。即就是通过对石油地质生、储、盖、圈、保、演化配套等每一个条件作深入细致的综合研究后，坚信其结论的正确性，这时，就应果断地布置勘探措施；否则就会错过良好机会。其中切记不能单纯以某一个条件的好坏去下结论。比如前已述及的塔中地区，早古生代有巨厚的寒武系、奥陶系海相灰岩，它们具有很强的生油潜力，由于受多次构造运动作用的影响，中奥陶系灰岩中产生了许多不规则的裂缝或溶蚀孔洞，在奥陶系顶面受

到风化侵蚀，具有一定的储油气能力，奥陶系内幕灰岩本身又具有许多致密的泥灰夹层可以形成良好的盖层，海西运动使得该区下古生界地层表现为一个规模巨大的构造隆起，当然与此同时也产生一系列较大规模的断裂构造，在其之后，又普遍沉积了一套石炭系砂泥岩地层，接着又接受了以后的历次构造运动，使石炭系中的构造成为人们进行油气勘探的主要目标。但是，从上述分析可以看出，如果从含油气系统的角度来说，下古生界地层更应成为有利的勘探对象，但长期以来没有受到应有的重视。实际上，塔里木盆地经过近 10 年来的勘探会战，至今还没有取得令人非常满意的成果，一方面，与其勘探时间较短、投入工作量不够有关，比如，目前塔里木投入的勘探工作量与渤海湾盆地相比是很小的，至 1995 年底，渤海湾盆地已完成二维地震测线 63 万 km，而塔里木盆地只完成了 18 万 km，渤海湾盆地累计完成探井 11500 口，钻井进尺 3087 多万 m，而塔里木盆地总共只打了 391 口探井，探井进尺只有 158 多万 m。从资源量来看，两个盆地油气资源总量相似。但是，从另外一方面来说，由于塔里木盆地具有多期构造运动、多套油气源层、多期成烃排烃、多期成藏、多期运移再分配等“五多”特点，它同中东地区的一次成藏的地质特点很不相同，中东地区的地质情况比较简单，比如扎格罗斯山山前，就不像塔里木盆地这样复杂，目前对塔里木盆地含油气的特殊性还没有认识清楚，因此，必须加强综合研究、充分利用现有资料综合分析，以达到有效指导勘探的目的。

五、采用多手段协同勘探，在重点探区、重点探井实施油气勘探的系统工程

我国油气地质条件较为复杂，靠某一种勘探手段往往只能提供某一方面信息，只有同时通过多手段、多方法协同勘探，才能全面准确反映地下地质条件；另一方面，受勘探手段和科学技术水平的限制，油气勘探具有阶段性。在某一时期，无论怎样研究、综合勘探，对油气地质条件的认识总是具有局限性；随着技术水平的提高，勘探手段精度、先进程度不断改进，用旧的勘探手段没能解决的问题，或者原勘探成果没有发现的情况，可以重新用新的地震、测井等手段处理、解释，一般就会有新的发现。因此，应特别重视应用新技术进行“三查”工作。包括三个重新评价。第一，对一些老区应该用新理论、新思路重新评价。在全国范围内，有不少地区由于种种原因，有的因为当时技术手段的不足和落后，半途停止，或从地质上给予否定，其中有些地区是值得重新认识和研究。比如，西部几个大盆地，过去在山前做了一些工作，现在基本上停止了，有些地区因此尚未开展工作，实际上有些是前陆盆地的性质，对油气生成和运移聚集成藏很有利，需要重新开展工作，如库车、喀什等，还有冷湖等。第二，对一些老井要用新技术、新方法重新解释和评价。我国西部含油区多是经历过多期生油，多次聚油，而东部渤海湾盆地由于继承性的断层作用，使得这两大油区都存在油层层数多、油层井段长的特点，受过去技术水平的限制，很容易漏掉油层，因此，很有必要对这些老井进行复查，进行重新解释和评价。第三，对一些油区形成的油藏模式进行重新评价。我国的含油区多为多种油藏类型的叠加，在发现构造油藏时常伴生地层型油气藏、断块油气藏、岩性油气藏等，应该从地震解释中找出存在的各种圈闭类型，加以分析和评价。

对于重点探区或重点探井来说，还应提出实施油气勘探的系统工程。油气勘探过程中一个很重要的问题，就是要把从勘探前期到试油的全过程作为一个系统工程，形成统一的工作组，完成好从地震、地质、钻井、测井、试油和措施等 6 项工作 25 种内容。并确保每个环节的相互联系，这在油气勘探中更为重要。作为一个勘探家，必须以地质为主体，既懂地质又要懂钻井、测井、试油和一些措施，每个地质家都要求自己做到这个程度。作为工作组来说，就是要把各个学科都能组织在一起，搞地质的不懂钻井，搞测井、试油的不懂地质，这就给我们的工作带来很大的困难。另外，作为一个勘探家来说，要具备必要的技术素质，有了准确的资料，就要进行综合分析、判断，要反复实践、反复认识，对资料能够进行反复处理和解释。在测井资料的解释上，要提倡乐观解释，即就是在可能是油气层，也可能是水层的情况下，都要如实甚至提高一步的解释，其目的是避免漏掉油气层。

六、关于复合型人才培养

培养石油工业的后备人才是石油高校的宗旨，而培养什么样的人才，如何培养则是关键。根据上述石油地质与勘探工作的需要，这里要特别强调专业复合人才的培养。

培养一般意义上的复合型人才，是指既具有良好的专业基础，又具有出色的管理素质，也就是说不仅能成为接班人，而且也可以成为当班人。而培养专业型复合人才则是指培养“一专综合”型的人，“一专”就是要对自己的主要业务方向做到精通或熟练，“综合”就是要对相关专业的了解和掌握，并能够有效地综合各方面资料，达到解决问题的目的。目前最需要的就是这种人才。

材料产业可持续发展与环境保护

左铁镛

北京工业大学

左铁镛 金属材料与塑性加工专家。1936 年 9 月 3 日出生于北京。1958 年毕业于东北大学。历任中南工业大学副校长，国家教育委员会科技司司长。现为中国科学技术协会副主席，北京工业大学校长、教授。兼任中国材料研究会副理事长等职。1995 年当选为中国工程院院士。主要从事我国富有资源钨、钼稀土材料和金属塑性加工等方面的教学和研究。

一、材料产业发展的大前提——中国的资源与环境状况

本世纪以来，地球上发生了三种影响深远的变化：一是社会生产力的极大提高和经济规模的空前扩大，经济大幅度增长创造了前所未有的物质财富，大大推进了人类文明的进程；二是人口的爆炸性增长，本世纪世界人口翻了两番，达到 57 亿，并且以每年约 8000 万以上的速度继续增长；三是由于自然资源的过度开发与消耗和污染物的大量排放，导致全球性的资源短缺、环境污染和生态破坏。这些问题的不断积累，加剧了人类与自然的矛盾，对社会经济的持续发展和人类自身的生存构成了新的威胁。也就是说，人口膨胀、资源短缺、环境恶化是当今社会持续发展面临的三大问题。正处于经济快速发展的中国其环境与发展面临的问题更加尖锐、更加复杂。

1. 庞大的人口。中国人口已超过 12 亿，每年净增人口 1500 万。新增国民收入的 1/4，被新增人口所消费。即使严格推行人口政策，在未来 50 年内仍要增加 4.5 亿人。人口膨胀对资源和环境造成的影响，已成为我国实现环境与经济协调发展的首要问题。人口增长一直是我国发展和限制人均消费水平增长的硬约束。

2. 资源相对短缺。我国拥有广阔的国土和丰富的自然资源，但在庞大的人口基数面前，就显得相对不足了，人均占有量远低于世界平均水平。关系到人类基本生存的淡水、耕地、森林和草地四类资源，人均占有量只有世界平均水平的 28.0%、32.0%、14.0%和 32.0%（表 1），矿产资源的人均占有量也不到世界平均水平的一半。资源的不合理开采和浪费，更加剧了资源的短缺。

表 1 1989 年我国人均占有自然资源量与世界平均的比较

土地面积	m ² /人	2.56	0.85	33.2 世界平均的比较
耕地面积	hm ² /人	0.26	0.084	32.0 世界平均的比较
森林面积	hm ² /人	0.77	0.11	14.00 世界平均的比较
草原面积	hm ² /人	0.62	0.20	32.00 世界平均的比较
淡水面积	m ² /人	8843.5	2484.4	28.0 平均的比较

3. 生态变化趋势令人担忧。人口膨胀、自然资源的不合理利用，造成生态环境恶化和自然生态的失衡。据统计，我国大约有 4600 种高等植物和 400

种野生动物处于濒危或受威胁的状态。各种自然灾害频繁，削弱了自然生态环境的承载能力。

4. 环境污染不断加剧。废气、废水、固体废弃物的排放量急剧增加，造成严重的环境污染。

在全国 600 多座城市中，大气质量符合国家一级标准的不足 1%，酸雨的程度和范围日益扩大，已由华南、西南地区向华中、华东、华北等地蔓延。全国每年排放污水 360 亿吨，除 70% 工业废水和不到 10% 的生活污水外，其余污水未经任何处理直接排入江河湖海，致使水质严重恶化。全国七大城市中，近一半河段遭到不同程度的污染，流经城市的河段有 86% 水质超标。城市垃圾和工业固体废弃物日增，每年达 1.8 亿吨，积累达 60 亿吨。占地达 5 万多公顷。大部分未经妥善处理，造成对土壤、地下水的二次污染，垃圾围城的现象仍在发展中。

面对这种严峻的形势，人类不得不认真回顾自己的发展历程，重新审视自己的社会经济行为，探索新的发展战略。因此，联合国于 1992 年 6 月召开了“环境与发展”的世界首脑会议，通过了《里约宣言》和《21 世纪议程》等重要文件，并一致承诺把走可持续发展的道路，作为未来的长期共同的发展战略。经历了一百多年贫穷、落后和受尽凌辱的中国，正以前所未有的气概实现强国之梦，经济发展正处于工业化高速发展时期，面对人民强烈的发展需求和发展所带来的严重问题，出路在哪里？既不能停止发展，也不能走先发展后治理的道路，因此，走可持续发展的道路是中国唯一的必然选择。环境保护是中国的基本国策之一，也就是说，在社会主义现代化的建设过程中，寻求一条使人口、经济、社会、环境和资源相互协调、兼顾当代人和子孙后代利益的发展道路，这就是可持续发展。

为了实现可持续发展战略，我国编制了《中国 21 世纪议程》，将中国可持续发展战略目标确定为“建立可持续发展的经济体系、社会体系和保持与之相适应的可持续利用的资源 and 环境基础。”

要解决发展与环境的矛盾，要利用有限的资源满足人类日益增长的需求，必须实现两个根本转变：观念或意识的转变和发展模式的转变。

· 观念或意识的转变——

从与自然对立斗争转变为尊重自然与自然和谐相处；

从一味向自然索取转变为珍惜资源，保护环境；

从只顾自身利益转变为关心地球、关心人类；

从只考虑眼前利益转变为考虑长远持续发展。

这个转变反映了人类的“自然观”或“世界观”的主要部分的历史演变——从“天命论”、“征服论”到“和谐论”，反映了自然科学与社会科学的发展与社会的进步。

· 经济发展模式的转变——

从资源消耗型转变为资源节约型；

从损害环境转变为环境协调型；

从技术落后转变为技术先进型；

从经营粗放型转变为科学管理型。

这个转变反映了当今以科学技术高速发展为基础的现代经济发展战略，抛弃了那种以高投入、高消耗、高污染为代价的传统发展模式，代以节约资源、能源和环境协调的高效益的集约型的可持续发展模式。

“人类只有一个地球赖以生存”——这是全球的呼声！

让我们从全球的角度，从中国可持续发展的大前提，认真回顾材料发展的历程，重新审视我们在材料发展中的行为，探讨材料产业可持续发展的战略。

二、材料产业可持续发展战略的探讨

1. 材料产业与资源和环境

材料是国民经济和社会发展的基础和先导，是现代化高新科技发展的三大支柱之一。材料产业历来被列为国民经济的基础性、关键性的支柱产业之一，受到重视，得到大力发展。

中国的材料产业，包括钢铁、有色金属、化工、建材等主要行业，建国以来得到迅速发展，成为支持国民经济工业化和国防现代化的基础，成为发展高新技术的关键。

据统计，中国主要材料的产量已居世界前列或重要地位。如表 2 所示，从产量上看，中国已是当今世界的材料生产大国，但是从生产技术水平、品种、质量，特别是经济效益上看，和先进水平还有相当大的差距。这不是本文要讨论的问题，本文着重讨论的是，材料产业发展与资源和环境的关系。

表 2 我国有关材料的 1994 年产量

材料种类	材料产量/万吨	世界排序
生铁	9741	
钢	9261	
有色金属	395	
水泥	42118	
塑料	401.40	
橡胶	44.35	
化纤	280.33	
平板玻璃	11925/万箱	
铁合金	336.11	

从资源和环境角度分析，材料的提取、制备、生产、使用和废弃过程是一个资源消耗和环境污染的过程，也就是说，一方面材料推动着人类社会的物质文明，而另一方面又消耗大量的资源和能源，并在生产、使用和废弃过程中排放大量的废气、废水和工业固体废弃物，污染环境，恶化人类赖以生存的空间。

统计表明，材料产业不仅是矿产资源的主要消耗者，而且是能源的主要消耗者和污染环境的主要责任者之一。如表 3、表 4 所列。

表 3 1994 年主要材料能源消耗

材料种类	能耗（万吨标准煤）	占工业能耗比重/%
黑色金属矿采选业	282.63	0.3217
有色金属矿采选业	487.33	0.5547
非金属矿采选业	553.61	0.6302
其它矿采选业	252.24	0.2871
化学纤维制造业	993.13	1.130
橡胶制造业	630.43	0.7176
塑料制造业	541.16	0.6160
非金属矿物制造业	12556.14	14.29
黑色金属冶炼	15338.62	17.46
有色金属冶炼	2555.12	2.908
金属制品业	926.86	1.055
合计	35117.27	39.97
工业能耗总量（万吨标准煤）	87853.40	

以钢铁冶金生产为例，9000 万吨钢铁的能耗占工业能耗的 11%，排行能耗大户之首，排放废水、废气占工业排放量的 13-14%，为仅次于化工的第二污染大户。有色金属工业是以品位很低的矿产资源为对象进行提取、生产的，生产 400 万吨产品造成的以尾矿和废渣为主的工业固体物每年达 6000 万吨，尾矿库总库容达 10 亿 m^3 ，生产过程中排放的二氧化硫、氟化氢、砷等废气，是有毒废气的主要源头之一。

表 4 1994 年材料制造业污染物排放情况

材料种类	工业废水/万吨	工业废气/亿标立方米	固体废物产生量/万吨
矿业	140448	3287	26377
化学纤维工业	52040	2219	256
橡胶制品	15389	567	102
塑料制品	6659	205	38
建筑材料及非金属矿物制品	61010	14067	1078
水泥制造业	27045	10186	285
黑色金属冶炼	304645	15141	10812
有色金属冶炼	50742	4524	2124
金属制品	9795	305	69
合计	667773	50501	41141
占工业排放总量/%	31	44.5	66.7

注：全国废水排放总量：3，652，546 万吨，其中工业废水排放总量：215511 万吨；废气排放总量：113，630 亿标立方米；工业固体废物生产总量：61，704 万吨，其中排放量：1932 万吨。

与城镇建设高速发展相适应的我国建筑材料工业在 1979 - 1994 年期间有惊人的大发展，据统计，以水泥、玻璃、陶瓷、粘土砖为主，传统建材的产量均居世界首位，其中水泥年产量达 4.2 亿吨，占世界总产量的 31%。全

国水泥工业平均粉尘、烟尘排放量达 23.2 公斤/吨，年排放量达 98 万吨是造成城镇严重污染的大户。

上述数据分析，应当使我们清醒的认识到，一方面材料产业和材料工作者，为国民经济发展、国防建设和人民生活水平提高作出了巨大的贡献，但另一方面，材料产业又是资源、能源的主要消耗者和环境污染的主要责任者之一。面对有限自然资源（包括资源型能源）的过度开发和贫化、枯竭的威胁和带给环境的日益严重污染，作为材料工作者应当冷静的思考，积极探索既保证材料性能、数量需求，又节约资源、能源和与环境协调的材料生产技术，制定材料可持续发展的战略。

这是时代赋予我们的义不容辞的历史责任。

2. 材料可持续发展的对策

作为人类社会和经济发展物质基础的材料将来应该以怎样的模式发展下去？材料工作者都在认真思考、探索。

（1）转变观念，树立正确的资源意识和环境意识

如前所述，在中国可持续发展战略的大前提下，材料科技与材料产业的发展也面临一个根本性的转变，即从过度消费资源、能源和损害环境，转变为珍惜资源、节约能源、保护环境，走与资源和环境协调的道路。

要实现这种转变关键是观念的转变，即材料科技工作者和管理工作者关于资源、环境意识的观念转变。这就是：

——树立正确的资源意识：认识自然资源的有限性，制止过分消耗，加强资源保护和提高资源利用的效率；

——树立正确的环境意识：认识生态环境的承载能力的有限性，控制环境污染，加强环境保护；

——资源消耗既和环境污染互为正比消长，又因资源利用的多样化而使环境污染和治理复杂化。

国际材料界在审视材料发展与资源和环境关系时发现：过去的材料科学与工程是以追求最大限度发挥材料的性能和功能为出发点，而对资源、环境问题没有足够重视，这反映在 1979 年美国材料科学与工程调查委员会给“材料科学与工程”所下的定义：“材料科学与工程是关于材料成分、结构、工艺和它们性能与用途之间的有关知识的开发和应用的科学”。

在 20 年后的今天，我们认为在理解上述定义的内涵时应予拓宽乃至修订补充，应该更明确的要求材料科学与工程工作者认识到：在尽可能满足用户对材料性能的要求的同时，必须考虑尽可能节约资源和能源，尽可能减少对环境的污染，要改变片面追求性能的观点；在研究、设计、制备材料以及使用、废弃材料产品时，一定要把材料及其产品整个寿命周期中，对环境的协调性作为重要评价指标，改变只管制备、生产而不顾使用和废弃后资源再生利用及环境污染的观点；这个定义的拓展将涉及多学科的交叉，不仅是理工交叉，而且是自然科学和社会科学的交叉，要求材料科学与工作者，只有更宽的知识基础和更强的实践性，不仅讲科学技术效益、经济效益，还要讲社会效益，把材料科技与产业的具体发展目标和全球、中国可持续发展的大目标结合起来。

环境材料正是在这样的背景下提出来的。

90 年代初期日本学者山本良一等人首先提出环境材料的概念，很快在世界各国得到响应并达成共识，兴起了全球性的环境材料的研究、开发和实施

热潮，这是 90 年代国际上材料科学与工程发展的最新趋势之一。

（2）环境材料的提出及发展情况

环境材料是指同时具有优良的使用性能和最佳环境协调性的一大类材料。这类材料对资源和能源消耗少、对生态与环境污染少、再生利用率高或可降解可循环利用，而且要求从材料制造、使用、废弃直到再生利用的整个寿命周期中，都需具有与环境的协调共存性。因此，所谓环境材料，实质上是赋予传统结构材料、功能材料以特别优异的环境协调性的材料，它是材料工作者在环境意识指导下，或开发新型材料，或改进、改造传统材料。我们之所以强调它并非仅特指新开发的新型材料，是因为实际上任何一种材料只要经过改造达到节约资源并与环境协调共存的要求，它就应视为环境材料。这种定义、概念有助于调动更广大的材料工作者的积极性，鼓励和支持他们结合本职工作，对量大面广的材料产品进行生产技术改革，实现节能、降耗和治理污染的目的。同时，要大力提倡和积极支持开发新型的环境材料，取代那些资源、能源消耗高，污染严重的传统材料。还应该指出，从发展的观点来看，环境材料是可持续发展的，应贯穿于人类开发、制造和使用材料的整个历史过程。随着社会发展和科技进步，以新产品取代旧产品是个不断进步的过程。

国际上的材料科学技术工作者对环境材料研究高度重视。近两三年来，围绕环境材料这一主题，国际上开展了广泛的研究。1993 年 3 月，国际毒理学会与化学学会（SETAC）在葡萄牙组织了来自 13 个国家和地区的 50 多位专家学者参加的研讨会，制订并随后出版了《环境协调性评估（LCA, Life-Cycle Assess - ment）准则——实践码》，取得了国际标准化组织（ISO）和欧洲标准化委员会（CEN）的共识，为环境材料的研究和材料生态循环评估的规范化提供了重要的依据。1993 年 8 月，国际材料联合会（IUMRS）在日本东京召开了 1993 年先进材料国际会议，在该会上第一次专门组织了环境材料研讨会，其主题是地球环境问题与材料，涉及了与环境问题相关的材料技术，与环境协调性相关的材料制备与处理技术，环境材料的设计与表征技术。1994 年 10 月，在日本筑波召开了共 15 个国家的 260 名专家学者参加的环境平衡国际会议，会议就环境材料及与之相关的评估体系进行了交流。日本和欧洲一些国家相继成立了环境材料研究会，频繁的组织国际性研讨会，推动环境材料研究与开发。世界许多国家的政府和产业界人士亦对此表示了极大的兴趣，1994 年 7 月 15 日，由克林顿会同戈尔签发的题为“面向可持续发展的未来的技术”的白宫报告中明确提出“环境技术的市场正在急速增长，并将在今后继续增长。这些技术给美国提供了同时实现经济目标、环境目标和能源目标的一个令人兴奋的机会”，并希望环境技术产业能够为国民经济做出更大的贡献。

环境材料及与之相关的材料环境协调性评估系统（LCA）及环境协调性产品（ECP）已为许多国家政府官员、科学家和生产厂家所共识，并大力促进研究和产业的发展。

国际上环境材料的研究，已不只局限于理论上的研究，众多的材料科学工作者在研究具有净化环境、防止污染、替代有害物质、减少废弃物、利用自然能、材料的资源化等方面，作了大量的工作，并已取得了重要进展。许多国家还制定了有关的立法，来推动本国环境材料的发展，以求能够推动本国经济的持续发展。英国、法国、荷兰的一些公司，分别开发了 LCA 评估计

算机和相关的数据库，国际上的一些著名的公司也开始实施相应的研究发展计划，如 IBM 公司的“环境设计计划”，道化公司的“减少废弃计划”，Chevront 公司的“节约资金，减少毒气计划”等等。

我国正处在一个经济高速增长时期，其能源、资源消耗急剧增加，大多数的工业产品的获得是牺牲了其环保价值而发展起来的。特别需要指出的是上面介绍的环境问题，已经渗透到国际政治、经济、贸易和文化各个领域，是当今国际竞争的重要方面。发达国家强烈要求发展中国家提高环境标准，甚至提出将环境保护作为贸易的条件。我国已确定“在发展中解决保护，在保护环境的基础上实现持续发展”的原则，签署了有关国际重要公约，并通过了国家有关环境保护的法律、法规。制定了“三废”治理标准和管理实施办法，这就形成了对材料工作者执行环境保护责任的法律约束。为此，材料工作者要认真研究制定材料可持续发展的行动计划，并在政府的支持与指导下实施。

（3）关于环境材料研究开发计划的基本框架建议

鉴于国际上关于环境材料及其相关技术的研究也刚刚起步，我国的国民经济正处于一个高速发展时期，抓住机遇，迎头赶上，借鉴国外的先进经验，结合我国国情，把环境材料的研究与发展推向前进。从理论和实践上解决长期以来只重视自身的需求的材料研究开发，而忽视资源和生态环境对人类活动影响的这一根本性问题，开展环境材料研究开发，推动材料科学与工程和资源与环境协调发展的进程，并逐步建立适应可持续发展的环境材料及相应的材料产业。

环境材料研究开发计划的基本框架包括：环境材料及环境材料学的基本概念、内涵及其范围的基础研究；材料对资源、环境影响的评价方法和标准研究；协助并参与主管部门及企业开发有重大应用推广价值的环境材料及其相关技术；推动环境材料教育计划的制定与实施；加强环境材料的国际合作与交流等。

· 关于环境材料及环境材料学科的基本问题研究

环境材料不仅是个具体材料研究与开发的问题，也是一个材料科学与工程领域的问题，它的研究与开发涉及自然科学与社会科学问题，涉及多学科知识基础问题，涉及一代一代材料工作者资源与环境观念与意识的教育与培养问题……因此，要求对这一新概念、新领域开展深入的基础研究，使其成为指导环境材料研究开发及发展相关技术的基础。

关于材料对环境的影响的评价方法和标准的研究

开展对材料、产品及其生产、制备、使用直到废弃全寿命周期或某个环节的环境协调性评估研究，是改造乃至淘汰该材料、产品或生产工艺的基础性工作，是世界各国研究的热点。但是国际上关于 LCA 方法及应用尚有许多局限性，关于 LCA 数学物理方法，关于材料的环境负荷的表征及量化指标，关于 LCA 的评价范围及生态循环的编目分析，关于材料生产和使用过程的环境损害评估、环境改善评价等还有许多基础性研究工作要做。同时，根据 ISO14000 标准中第五部分关于 LCA 的讨论稿，开展生态循环评估的示范性研究，选择有代表性的一些材料，从其生产、制备工艺（包括原材料的采集、提取，材料的制备、制品的生产、运输）进行资料收集、分析、跟踪。获取材料性能、工艺网络、材料流向，能源消耗，废弃物的产生，种类，数量和去向等基本数据。研究其环境负荷的表征及评价方法，给出各工艺和使用环

节对环境的影响和人类活动造成的废弃物，以及再生的资源核算体系。对加强环境材料的基础理论研究，开发新的环境材料具有重要指导意义。

通过对 LCA 方法学和示范性研究，形成材料开发、应用、再生过程与生态环境间的相互制约理论，揭示人类对材料的需求活动引起的生态环境变化，以及生态环境变化对人类生存所需材料的质量和数量的影响规律。为制定材料的环境评估标准提供基本数据和范例。另外，研究材料的生态循环评价材料，推动 ISO14000 标准化的进程，也是中国材料科学工作者正在努力的目标。

· 要积极地向国家、行业、企业建议设立环境材料的研究与开发项目及推动相关技术的实施

关于新的环境材料的开发，在材料成分设计时就考虑与环境的相容性，特别是可再生循环使用。通过 LCA 评价，对其加工制备和使用过程都最大限度地降低环境负担性。使整个材料系统无论是加工制备还是使用过程对环境都无害，减少污染，保护环境。真正使材料科学成为可持续发展的产业。

提高材料的环境性能所采取的技术主要集中在以下四个方面：1) 避害技术：即避免生产对环境有害的物质，或通过改变人们的生活方式以减少对环境的破坏。其通常要求产品替代或重新设计生产工艺流程，而不仅仅是采用新设备。2) 监测评估技术：即指对污染物和其它在自然过程和人工过程中产生的有害物质的释放对环境影响的评价。3) 控制技术：在有害物质进入环境前，将其转化为无害物质的技术。4) 补救修复技术：指将进入环境的有害物质转化为无害物质，恢复改善由于自然和人工原因而失衡的生态系统。

· 制定与实施环境材料的教育计划

作为一门学科，环境材料既是一个研究的问题，同时又是一个教育的问题，要积极制定和实施环境材料科学的教育计划。在专门教育方面，从大学本科材料专业的课程教育开始，并在一些有条件的大学试办环境材料学科点。为材料专业开设“环境材料”选修课，设立环境材料学科的学士学位。把环境意识引入材料科学与工程，把环境材料学融入国家的环境教育体系。同时，逐步建立和健全专业化的研究生学位教育，开始培养博士、硕士研究生，为发展新的环境材料，培养适应 21 世纪可持续发展的材料科学工作者创造条件。同时，结合国际和国内关于环境材料科学的研究内容和研究，编写“环境材料学”教材。

除正规教育外，在已有基础教育、成人职业教育的环境教育的教学内容中，适当增加普及型“环境材料学”内容。广泛利用传播媒介宣传普及、提高现有材料工作者和全体人民的环境意识，加强环境材料和绿色产品的宣传的教育。建立一个完整的环境材料教育体系，为中国的持续发展奠定良好的基础。

· 推进环境材料研究与开发的国际合作与交流

环境材料是一个全球性问题。在我们共有一个地球的口号下，中国在采取一系列措施解决环境问题的同时，积极务实参与环境保护领域的各项国际合作。在推动环境材料方面，中国的材料学工作，从一开始就积极参与环境材料研究与发展的各项国际活动。发表了一系列关于环境材料科学的基础性研究成果。并于 1995 年在中国西安成功地组织了第二届国际环境材料研讨会。同时，与日本、欧洲等国家的同仁们建立了一些具体的合作，开展环境材料科学的基础研究及应用开发，以及其他各种对口专业活动。

为促进环境材料学的发展，我们在以下领域优先开展国际合作：1) 关于环境材料学本身的基础性研究。建立完整的环境材料学的理论和概念，确定环境材料学研究的内容和范围。使其作为一门学科，要不断完善、丰富和发展。2) 在 LCA 的标准及其应用方面建立广泛的合作。要结合国际上的发展水平，借鉴已有的先进成果，建立适合中国的生产过程、工艺、产品的评价技术及标准，使产品走向国际市场。逐步建立完整的评价体系。配合政府制定相应的标准和方式，建立评价数据库及进行各项数据采集，准确性评价等。这些都要求国际间的合作，互通有无，最后形成国际化的评价标准和方法。3) 针对我国污染较典型的材料产业，开展广泛的国际合作。如前所述，治理典型的材料产业的污染源，为减少污染，保护生态环境，促进中国材料产业的持续发展，开发新的环境材料提供有益的经验。

三、结束语

本文着重从环境保护这个侧面，探讨了材料与资源、环境的关系，介绍了一些情况，阐述一些观点并提出一些建议。其目的是为了引起有关部门和领导的重视及材料科学与工程界同仁的关注，共同思考与探讨材料可持续发展的战略，希望起到抛砖引玉的作用。

有色金属工业的科技进步

李东英 汪旭光

中国有色金属工业总公司 北京矿冶研究总院

李东英 稀有金属冶金与材料专家。1920 年 12 月 14 日出生于北京。1948 年毕业于北京辅仁大学理学院获理学士学位。历任北京有色金属研究总院副院长、总工程师、中国有色金属工业总公司常务董事、科技部主任，现为国家计委稀土专家组首席专家。曾任中国有色金属学会及中国稀土学会副理事长。1995 年当选为中国工程院院士。主要从事稀有金属资源的开发、应用和推广等方面的研究。

汪旭光 工业炸药与爆破技术专家。1939 年 12 月 31 日出生于安徽枞阳。1963 年毕业于安徽大学。现任北京矿冶研究总院副院长、高级工程师、兼职教授。兼任中国工程爆破学会常务副理事长。1995 年当选为中国工程院院士。主要从事 EL 系列工业乳化炸药的研究和研制。

有色金属与人类社会的进步和发展有着不解之缘。人类最初学会使用的工具是木头和石块，就是历史上所谓的石器时代；之后，学会了开采、冶炼铜矿石（伴生有少量的锡、铅、锌）制取金属铜，并用于制作生产工具和兵器，进入了对促进人类社会文明有重要作用的“铜器时代”或称“青铜器时代”。至今仍是重要的 10 种常用有色金属之一。

所谓有色金属是相对于铁、铬、锰几种黑色金属之外的多种金属的统称，在自然界 103 种（加上实验室条件下人工诱导产生的两种，也有人统计为 105 种）元素中，有色金属占了一半以上，达 64 种，是自然界最庞大的元素家族。我国是当前世界上有条件并能全部提炼 64 种有色金属的少数国家之一。

一、国民经济现代化建设的基础产业

有色金属是伴随人类社会产生和科学技术的进步而不断发展前进的，在当代社会它扮演了十分重要的角色，举凡能源、交通、信息、航空航天、国防军工、化工、农业、医疗、卫生、文化等领域所用的各种设备、装置、器件，乃至多种药品和试剂，有色金属均是不可缺少的重要原料之一。因此，有色金属工业是国民经济的重要组成，是经济建设的基础产业。

众所周知，煤、石油、天然气、水力是工业社会的传统能源，而开发利用它们的钻头、油井管、平台、大直径油管、油轮、燃气轮机等多种工具、设备，都是由钢铁和有色金属（主要有镍、钴、钨、钼、铌、钒等）组成的特种合金或钢材制成；电力输配送更离不开铜、铝、锌、硒、硅；石油精炼用催化剂，稀土则是重要的触媒材料。可以说，没有有色金属就没有工业社会大规模的能源工业生产。核能、太阳能等已是继传统能源之后的重要能源。80 年代以来，许多国家相继制定了大力开发太阳能（包括太阳能发电、光电池、燃料电池发电技术、新型电池电力贮存系统等洁净能源）和核能的战略计划。前不久联合国教科文组织的顾问、能源问题专家马登吉特·辛格先生指出，10 年后太阳能将成为 20 亿缺电地区人民的主要能源，其价格（指转换为电能）与固体燃料接近。但是，太阳能的大规模开发利用，必须由有色

金属工业提供大量的硅、锗、碲、铜、铝、镍、锂、稀土金属、砷化镓、ITO（铟锡氧化物）等支撑材料，否则将很难如愿。关于核能利用，近年发展十分迅速，截至 1995 年底止，全球已有 438 座核反应堆在运转，其发电量已占世界总发电量的 20% 以上。法国是核能发电占比例最多的国家，目前拥有核电站 56 座，发电量占全国总电量的 76%；日本现有 51 座核电站，核电力占其总发电量的 28%；美国是当前拥有核电站最多的，达 109 座，核电力占全国电力的 22.5%；乌克兰计划 2010 年的核电力占全国电力需求的 40%；印度现有核电站 9 座，在建 4 座；我国现有秦山、大亚湾两座核电站运行，仅每年换料就需锆合金 14.3t。“九五”期间还将兴建秦山二期及重水堆、广东二核及辽宁核电站，容量总计达 660 万 kW，需一次性投入锆材近 100t，同时需大量钨基高比重合金做屏蔽材料；核电站的核压力容器、核蒸汽发生器传热管等需消耗大量的镍铁基（含 Ni32%±）或镍基合金（含 Ni60%±），合金中还有少量的钛。我国能源发展的远景规划是，2050 年核电装机容量要达 12000-24000 万 kW，若没有相应的有色金属产业做后盾，这种宏伟的核电计划很难兑现。

受控核聚变是更诱人的高一级的核能利用，目前欧美和我国都取得了很大的进展。美国尤为突出，其实验堆已投入运行，发电功率为 620kW；根据 UW-MAK 型受控核聚变电站的设计，100 万 kW 装置需稀有金属钷、钷、钆、铈、铈、钆、钆、钆各 2-3t、50-60t、58-70t、90t、580t、600-700t、570-1150t 和超导材料近 2000t。

汽车、飞机、火车、轮船是现代交通运输工具中的主角，它们的发展也和有色金属密切相关。仅以汽车为例，轻量化、安全舒适、洁净能源，是当前及未来汽车发展考虑的主要因素，而有色金属则是能满足这几个因素的重要原材料。为节约能源并获得满意的车速，减轻自重是关键。为此，美国计划 21 世纪初将汽车的 CAFE（Corporate Average Fuel Economy）标准由目前的 27.5mpg（英里/加仑）提高至 31 - 33mpg，一般，每提高 1mpg 须减轻车重 80-110kg，欲实现 31mpg 的目标，须减轻车重 310kg。由于铝、镁的密度低，Al 为 2.7g/cm³ 左右，Mg 只有 1.74g/cm³，不到铁的 1/3，用它们的合金压铸件或合金制成的汽车零部件比钢制品轻 60%；同时铝合金、镁合金具有优良的抗蚀性和高的比强度，因此世界汽车生产大国近年来不断扩大了铝、镁制品零部件的使用。1991 年每辆汽车平均用铝为 87kg，比 1981 年的 59kg 增加 47%；美国第二大汽车公司福特汽车公司每辆用铝 100kg，通用汽车公司每辆 90kg，该公司生产的凯迪拉克用铝最多，每辆达 375 磅，约 160kg，而且拟建的小型凯迪拉克生产线，还将进一步增加铝的用量。福特公司对铝镁等能减轻车重的轻型材料越来越重视，在今年初的北美国际汽车展览会上，该公司推出的一台样车，使用了铝制 V-12 引擎，碳纤维-铝蜂窝结构底盘，前后悬置系统采用高强度铬钼管，车重 1045kg，只有相同外形尺寸道奇车重的一半多（后者为 1979kg）。德国奥迪于 1994 年推出了全铝制豪华轿车。日本计划将每辆客车的用铝量从目前的 70kg 提高至 130kg。镁更是受到汽车设计师的青睐，1983 年美国生产的小轿车，平均每辆的镁制品零件为 5 个，1993 年上升到 53 个。1985-1995 的 10 年中，美国轿车工业用镁量的年平均增长率达 18% 以上，克莱斯勒汽车公司甚至认为，若未来镁的价格合理的话，在轿车生产中的年增长率可达 30% 左右。1989 年日本每辆客车的用镁量平均为 1kg，去年增至 5kg，年均增长率达 60% 以上。我国的小轿车生产

中，目前只有桑塔纳使用铸造镁合金，每辆达 8 - 12kg。不断提升汽车的铝、镁化程度，减轻现有车重的 30% - 40%，已成为当代汽车设计的发展趋势。目前全球的汽车年产量已达 4000 万辆，预计本世纪末仅汽车用铝、镁就会突破 1000 万 t 和 100 万 t。

此外，铜、铝、锌、锡、镍、铌、钽及铂、钯、铽、钇及稀土等，也是当代汽车工业不可缺少的原料。美国平均每辆车消费铜及其合金约 230kg，美国汽车工业的用铜量已由 80 年代初的 8.7% 增至 90 年代初的 10%；我国汽车、机械行业 1994 年消费铜及铜材 50.7 万 t；未来的各种电动汽车用铜量将比现有汽车多 1 倍左右。铅主要用于汽车照明、启动用蓄电池。镀锌薄钢板是汽车耗锌的主要形式，到 2000 年，我国各类汽车的生产能力将达 250-300 万辆，其中中型 40-50 万辆、轻型 80-90 万辆、轿车 130 - 160 万辆，据此需铝型材、水箱铜带、镀锌板耗锌、铅酸蓄电池用铅将分别达 3 万 t、4 万 t、3-3.5 万 t、18 万 t。镍是不锈钢的重要合金元素，近二三十年来，汽车的不锈钢用量平均已由每辆 10kg 增至 32kg；高强度铌钢已成为受欢迎的汽车材料，近年汽车工业用铌开始超过石油业。全球对汽车尾气净化的严格要求，导致了对铂、钯、铽、钇和稀土的消耗，仅触媒用氧化锌，到本世纪末全世界就需近 2000t。随着汽车电子化、轻量化的迅速发展，对永磁体的消费也急剧增多，以前一辆汽车只几处而现代汽车约有 70 余处需用永磁体。当前，钕铁硼是汽车用的重要永磁体，以减速器为例，3kg 钕铁硼可替代 20kg 的电磁铁；有专家预计，到 2000 年全球汽车用永磁材料将达 5 万余吨，其中 60% 左右是钕铁硼。一辆高级皇冠轿车用的钽电容器就有近 300 个。甚至专供汽车用的高速公路也离不开有色金属，高速公路护栏需热镀锌结构体；路面锯缝用的锯片，开路用的钎头、钻具等，都是以钨、钼、镍、钴为主元素的硬质合金；加工汽车主要零部件更需要高效高精密的硬质合金工具。因此，我们可以在相当程度上说，没有有色金属就没有现代化的汽车工业。

至于航空航天、军工国防，与有色金属更是荣辱与共，息息相关。无论是运输机、客机、战斗机、轰炸机、直升机，还是探索太空的航天飞机，它们的关键材料均是以有色金属为原料，如 Al-Ti，Al-Li，Al-Mg 合金板是飞机各主要部件的结构材料，波音飞机的铝合金占机体重的 81%，协和占 71%，F-15 为 36%；卫星、运载火箭箭身、燃料导管、导弹燃料箱都是由铝合金制成，铝合金量占导弹重的 1/20-1/2；飞机、舰艇、导弹、卫星用的惯性导航仪为铍制陀螺，气象卫星及高速摄像机用铍摆镜，直升机用铍制天线瞄准器，原子弹、氢弹、核反应堆用铍砖；卫星天线用高密度钨合金、铌合金；锗、砷化镓作卫星太阳能电池衬底；返回式卫星的钼合金蒙皮；由钨、钴、镍、钼粉制成的高密度硬质合金穿甲弹；燃烧弹、信号弹、穿甲弹、照明弹离不开铝粉、镁粉及 Al-Mg 粉；锌粉、铝粉是导弹、火箭的推进剂；美国新型装甲车 M113 重 8.3t，用铝及铝合金 5.2t，占整车重的 62%；英国推出了全铝合金坦克，车重仅 7.9t；铝合金还是气垫船的理想材料；锂是氢弹的主要原料（氘化锂）；核潜艇须用铝合金管，潜艇空气再生须氢氧化锂、氧化锂；导弹液压伺服机构的特种过滚器为多孔钨，导弹弹头传感敏感元件为钨毛细管；固体燃料火箭发动机须高强钛合金，发动机喉衬材料为钨渗铜、渗银或渗铜银合金；雷达发射管的阴极屏蔽材料用铈钨棒；现代高科技战争的特点是全天候、不论白天黑夜和远近都能准确、有效地摧毁敌方的军事力量，侦察、警戒、识别与目标选择、跟踪及制导攻击（如海湾战争中“爱国

者”跟踪打击或空中拦截“飞毛腿”导弹的战例)就成了最重要的战斗手段,红外透镜、夜视仪、热成像仪、热探测器、激光测距仪等就是这种手段最有效的工具,而它们却离不开锗、钨、钼和砷化镓等;ITO 是飞机、飞船舷窗,潜望镜、坦克激光测距仪窗口所用的透光性优异导电膜;反应堆超热中子能谱测量用铟、镓、镧、钨多元合金探测片;运载火箭控制系统的微型继电器由银、镁、钨制成。林林总总,举不胜举。显然,有色金属与国防军工、航空航天,可谓你中有我,我中有你,彼此息息相关。

十多年前还是少数专家学者谈论的信息社会,目前正伴随着全球兴起的信息高速公路热而到来。所谓信息社会,就是以计算机现代通信(光纤化、网络化)、多媒体为基础,大大改变并方便了人们的生产经营活动和生活方式的社会。电子工业特别是微电子产业则是信息社会的基石,而正是有色金属材料工业的进步与发展,生产出多晶硅、单晶硅、锗单晶、锗化合物、掺铒光纤放大器、各种贵金属及稀有金属电子浆料作支撑材料,才有集成电路(或称 IC 工业)的问世和计算机的革命性进步,使计算机、多媒体、通信微电子化与网络化,从而覆盖全球,进入千家万户,形成当今世界第一大产业。全球国民生产总值的 65%与信息产业有关。我国近十年来,以电子业为基础的信息产业也取得了巨大的发展,保持了 20%的年增长率,并被“九五”计划和 2010 年的远景规划列为国民经济支柱产业之一。同时确定了以 IC 和新型元器件、计算机及软件、通信设备为发展重点。为此,必须确保相应的电子材料的同步发展。因为大直径单晶硅、砷化镓、键合金丝、引线框架、覆铜板等材料是实现大规模集成电路和电子元器件换代升级的重要保证。从“八五”、“九五”IC 关键材料及主要微组装电子材料对相关有色金属材料的市场需求,即可反映出电子信息产业与有色金属工业的量化关系(表 1、表 2)。

因此,在一定意义上讲,没有先进的有色金属材料工业就没有当今的信息社会。

表 1 IC 所需关键有色金属材料

	多晶硅	单晶硅	砷化镓 (kg)	覆铜板	铜箔	引线框架	专用铜带及 薄形复合金属	金丝 (kg)
1993	77	70	70	3×10^4	1800	1000	5	40
1995	120	100	150	5×10^4	3000	2000	15	50
2000	300	200	500	$(12 - 15) \times 10^4$	2×10^4	4000	200	300-400

表 2 微组装电子材料用有色金属

	纸基铜板	玻璃布基铜板	铝箔	电子浆料
1993	1.6×10^4	1.2×10^4	2200	3
1995	2.3×10^4	1.8×10^4	3500	5
2000	$(7-9) \times 10^4$	$(3-5) \times 10^4$	6000	20

以上所述清楚地表明,有色金属工业是国民经济的重要组成部分,是我国主要的基础产业之一。

二、我国有色金属工业现状

中华人民共和国成立前，我国几乎没有像样的有色金属工业，只有几处落后工厂生产锡、锑、汞、铅、锌、铜、金、银等少数几种金属，1949年全国共计只有1.3万t产量。由于基础差，底子薄，技术起点低，专业人才缺乏，有色金属工业虽然也取得了迅速的发展和辉煌成就，但始终不能满足国家经济建设的需要，特别是1965年以后，每年均需进口大量的铜、铝、铅、锌、镍等有色金属。1978-1982年就进口167.17万t，同期仅出口37.22万t，净进口约130万t。用了约30年时间，即到1978年，实现了10种金属100万t的年产量（实为99.63万t）。

改革开放以来，特别是中国有色金属工业总公司成立后的10多年来，我国有色金属工业取得了前所未有的持续、稳定、快速的发展：10种有色金属产量突破200万t、300万t和400万t，只分别用了10年、4年和3年；利税总额1982年为20.4亿元，1988年即实现了翻番，达49.01亿元，1995年为59.2亿元；结束了大量进口有色金属的历史。目前，除铜尚须较多的进口外，铝、镍能基本满足需求，铝、锌、锡、锑、钨和多种稀有、稀土金属有大量出口，仅铜、铝、铅、锌、锡，1994年我国出口总量为64.43万t，进出口量为26.14万t，做到了进出口用汇大体平衡；而且锌产量居世界第一位，出口量占世界第二位，铅及铅合金占全球精铅出口量的1/5，居世界第一；生产工艺技术与装备，生产效率与管理水平，资源综合利用及主要技术经济指标，科研成果、发明创造与论文著作等，较之1978年均有明显的进步和发展，大大缩小了我国有色金属工业与世界先进水平的差距。

我国有色金属工业的迅速发展和巨大进步是举世瞩目的，按产量在世界的排名，已由“六五”期间的第七名跃升至目前的第二名（1995年实产480万t以上），但还是只能说我们是有色金属大国，而并非有色金属强国。这主要表现在是靠投资、上项目、着重扩大产量的外延发展粗放经营模式起主要作用，出现了全民搞有色金属，但规模却很小（我们上5万t规模的炼铜厂只有4个，超过10万t的就1个，发达国家的铜厂小于6万t规模的极少；世界电解铝厂的平均规模约为11.3万t/y，我国仅为2.33万t/y，且小于1.5万t/y的小铝厂多达42个，全球年产能力小于1万t的26个铝厂全在中国）。除少数大型企业外，工艺技术与装备都很落后，消耗高，资源浪费严重，初级产品多，品种规格少，经营管理水平差，集约化程度低，有色金属工业整体水平比发达国家落后15-20年。有色金属资源种类及数量虽然很丰富，但按人均拥有量计，仍是资源相对不足的国家，而且铜、钴、铂族等部分重要资源更是不足。铝资源条件不好，大都是难处理、耗能高的一水硬铝石。几乎所有有色金属的矿山生产能力远低于冶炼能力；按人均产量世界前60名的排名，我国排名第50，按铜、铝、铅、锌、锡、镍6种金属的消费量排名，则位居第47，人均只有2.6kg，而韩国人均达34kg，巴西为5.7kg；经济增长还没有真正转移到依靠科技进步和提高劳动者素质上来，致使消耗高，成本高，生产效率和经济效益差，难以参与国际市场竞争，依然大量存在大宗出口初级产品，再用高价买回别人深加工品的不利局面。

为保证国家“九五”计划和2010年远景规划目标的实现，满足国民经济现代化建设的要求并做到“两个转变”，有色金属工业依然面临着机遇和挑

战。

三、加速有色金属工业的科技进步

自 80 年代以来，世界经济发展出现了两大重要变化。一是科技革命的全面扩展，知识和科学技术已成为推动经济和社会发展的关键因素。因此邓小平同志 1992 年初南方视察讲话重申了科学技术是生产力，而且又强调了“是第一生产力”的论述；江泽民同志在强调科技的重要性时也指出“国际间的竞争，说到底还是综合国力的竞争，关键是科学技术的竞争，在科学技术上落后就会被动挨打”。

另一个重大变化是，世界经济结构正发生深刻而广泛的调整，经济增长正由传统产业转向高新技术产业，由总量增长型转向高质、高效和更加规模化、集约化的质量效益型；由全球大多数国家开始实施的国民经济信息化结构（NII），亦即通常说的“信息高速公路”跨世纪工程，把世界推进至当今的“信息社会”，使经济管理、生产经营、军事战争、生活娱乐都呈现出网络化、自动化、智能化的发展趋势。

在自然界，有色金属几乎都是以各种化合物的形态存在于组成复杂的矿石中，而且品位（金属百分含量）很低。如我国的铜矿，平均品位只有 0.82%；提炼黄金的岩金矿平均一吨矿石里只有几克或十几克；许多贵金属、稀有金属在矿石中的含量就更是稀少了，品位一般只有万分之几。因此，要把矿石中的某种有色金属提炼出来，须经复杂工艺流程“千锤百炼”地分离提纯，宛若大海捞针。从矿石开采、选别、熔炼、精炼、提纯到加工成材，每一个作业，每一个工序都要消耗大量的煤、焦炭、燃油和电力等能源。以我国的铜、铝、镍、铅、锌工业而言，从开采到冶炼成金属，每吨金属的综合能耗折算为标煤，即 1kg 发热值为 7000 大卡或 2.9×10^7 焦耳的煤炭分别约为 6t、11t、17t、1.8t、3.5t。1994 年我国 10 种有色金属的总产量是 394 万 t，消耗煤 897 万 t、焦炭 124.4 万 t、电力 387.4 亿 kw·h、重油 47.51 万 t、汽油 9.52 万 t、柴油 11.74 万 t、天然气 3586 万 m³ 以及其他能源，总计合标煤 2542.4 万 t，相当于全国煤产量 3%±，位居全国耗能大户的前 10 名。

我国有色金属工业能源利用率较低，能耗普遍高于国外，仍以铜、铝、镍、铅、锌为例，国外每吨的综合能耗分别为 3.5、7、4.8、0.9、2.2t 标煤，即我国的能耗平均比国外高出近 1 倍，较之于发达国家，差距则更大。因此，节能是加速有色金属工业科技进步的重要使命之一。

本世纪 70 年代以来，全球频频闪烁着能源危机的红灯，引起日美等经济发达国家的高度重视和警醒。1996 年 6 月中旬召开的联合国第二次人类居住大会强调，能源是人类居住区可持续发展的基石，在即将迈入下个世纪时，必须重新强调问题的重要性。与会专家指出，目前全世界有约 20 亿农村居民没有电，还有上亿人受燃料、电力短缺之苦；与此同时是长期不加控制的能源消耗和能源效率不高，以及能源浪费带来了诸如温室效应等一系列环境问题。除了尽可能地使用可再生能源并加强对洁净能源的研究开发外，节能是解决能源问题最经济可行的办法。

实际上，我国现时的和潜在的能源危机更为严峻和突出。我们是世界的人口超级大国，人均拥有的不可再生能源只有世界平均值的一半。根据国家

经济建设的远景发展规划，到 2010 年需石油 10 亿 t，而目前我们的石油年产量仅 1.4 亿 t，即使有资源，石油工业也不能获得以平均年增长率近 60% 的速度发展，大量依赖进口更非国力所能承受。同样，煤、天然气和电力都远远满足不了经济发展的需求，能源问题已成为我国经济发展的“瓶颈”。另一方面，我国又是能源利用率很低的国家，80 年代的统计表明，每 100 万美元 GNP 的能耗，我们是美日的 8-10 倍，是前苏联和印度的 3.8 倍与 2.2 倍。除被迫放低经济发展速度外，积极有效的对策就是节约和开发。为此，我国政府制定了“开发与节约并重，近期把节能放在优先地位”的方针。

如上所述，有色金属工业是耗能大户，且能源利用率低，大有节能潜力可挖。根据国家经济建设的要求，中国有色金属工业总公司科技发展“九五”计划和 2010 年规划纲要的总体目标共计 7 项，节能降耗被列为第 2 项。有色金属工业的技术政策也强调，企业改造和建设，采选冶均要把节能降耗作为目标，冶炼更是节能重点。

有色金属工业的节能途径虽多，但最有效的有三条，即依靠科技进步，革新工艺技术，重视余热利用；发展新材料，节约有色金属消耗；加强管理，减少跑滑滴漏。节能的重点在冶炼，大幅度节能降耗的根本出路在于依靠科学技术，用高新技术改造传统冶金落后工艺流程。

由于资源条件的局限，生产和集约化规模化程度低，用于技术改造和科技发展的资金投入多年来严重不足（我国的 R & D 经费占 GNP 的比例仅为 0.7% ±，大大低于日本的 3%、美国的 2.8% 和韩国的 1.8%；技术改造，企业投入不足销售总额的 0.2%，而美日分别达 1.4% 和 2.4%），使我国有色金属工业的整体水平落后，吨金属能源消耗高出国外 1 倍就是这种差距的量化体现之一。就铜冶金而言，冰铜熔炼工艺是决定粗铜生产能耗高低的关键。目前，我国的冰铜生产工艺有闪速炉、密闭鼓风炉、电炉和反射炉等几种熔炼方法，后三种是耗能高的工艺，其吨粗铜的平均综合能耗为 1.28t 标煤，高出发达国家（0.4t 左右）3 倍。若将密闭鼓风炉、反射炉改为较先进的诺兰达炼铜法（大冶有色金属公司的反射炉和沈阳冶炼厂的密闭鼓风均拟改为此法），能耗可减少一半以上；进一步完善浸出-萃取-电积处理低品位或难选的含铜物料湿法工艺，加速实现并扩大其生产规模，铜生产工艺能耗将进一步大幅度降低。70 年代末 80 年代初以来，抓紧并实施了对金川资源（我国镍生产基地）综合利用的科技攻关与技术改造，促进了采选冶工艺的不断进步，吨镍标煤耗能由 70 年代的近 30t 降至 80 年代末期的 17.9t；采用闪速富氧熔炼后，可进一步减少能耗近 30%。国外吨 Al_2O_3 能耗为 0.7t 标煤，我国是 1.8t，高出 2 - 3 倍，主要原因在于我们的生产流程不尽合理，如主要生产工艺之一的混联法耗能高的烧结过程多，未普遍采用高压溶浸新技术，近 60% 以上的电解铝是由耗能高、环保差的小型自熔槽生产的，等等。有关专家认为，若改混联法为串联法，采用高效溶浸技术，开发大型预焙智能化控制电解槽，恶号“电老虎”的我国铝工业将减少 20-25% 的能源消耗。

全球有色金属资源的总趋势是日趋贫化、急剧减少和更难开发利用。平均生产 1t 有色金属开采的矿石量已由 50 年代的不足 100t 增加到目前的近 130t，仅仅由于矿石处理量的加大就会在相当程度上抵消千辛万苦研究开发出来的节能技术。因此，有色工业节能的另一个重要途径是开发新材料，寻求代用品减少消耗，重视废旧金属的回收利用。大规模的光纤应用始于 80 年代，目前全球已铺设光缆近 3000 万 km，预计 15-20 年后，通信传输的铜

缆将完全被光缆所取代。因为 45kg 光纤就相当于 1000kg 铜线传输的信息量，而生产 45kg 光纤的能耗只有 1t 铜线的 5%。80 年代每只易拉罐重约 21g，至 1992 年每只已至 15.5g，去年全球生产易拉罐近 3000 亿只，按每只减轻 6g 计，与 80 年代相较，3000 亿只节省优质铝板就是 180 万 t，相当于减少 2000 万 t 标煤的消耗。因此积极开发材料生产的工艺技术，化粗厚重为精薄轻，亦是节能的重要途径。重视废旧金属回收并使之再生利用，可收到节约金属资源和能源的双重效果。以再生铝为例，生产 100 万 t 再生铝可节省铝土矿 610 万 t、碳素材料 60 万 t，而 1t 再生铝的能耗仅为原生铝的 5-6%。多年来，我们往往用极大的热情去开发新矿山，建设新工厂，探索采选冶新工艺，但对污染小、节能降耗十分显著的废旧金属的回收利用却关注不够。我们不重视废旧金属回收利用的研究开发，有关投入也少，再生的工艺技术与装备落后，也没有专门回收的机构和分门别类的科学管理。

实际上，节约有色金属消耗，对废旧金属的回收再生有合适的处理工艺，减少能源消耗，也是有色金属工业科技进步的体现。