

《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  
（下）

03

上海市黄浦区教育信息中心

# 哺乳动物性别分化的调控

曾溢滔

上海市儿童医院

曾溢滔 医学遗传学专家。1939 年 5 月 27 日出生。广东顺德人。1965 年复旦大学遗传研究所研究生毕业。现任上海市儿童医院上海医学遗传研究所所长、研究员。1994 年被选聘为中国工程院院士。主要从事基因工程和基因诊断方面的研究。

## 一、性别决定基因概念的形成

性别的形成取决于两个过程：性别决定和性别分化。性别决定是指选择向雄性或雌性途径分化的过程。50 年代确立了哺乳动物性别决定的两条规则：第一，性腺分化成睾丸或卵巢决定了性别分化的其他方面；第二，Y 染色体携带有决定雄性的遗传信息。第一条规则是在 Jost 及其同事的工作基础上建立起来的。他们在性腺明显发育之前摘除兔胚的生殖嵴（睾丸和卵巢均由生殖嵴发育而来），结果这些胚胎全部分化为雌性。Jost 推测睾丸分泌了某些物质使胚胎产生雄性特征，证明了是睾酮（testosterone）在起作用。还正确地预言了抗缪勒管激素（anti-Mullerian hormone, AMH, 又名 Mullerian inhibiting substance, MIS）也起作用。第二条规则是由于发现了仅有一条 X 染色体而没有 Y 染色体的女性和有多条 X 但只有一条 Y 染色体的男性。

综合这两条规则，人们得出一个概念：Y 染色体上的一个或几个基因为睾丸形成所必需。这一假想的基因在人类命名为睾丸决定因子（testis determining factor, TDF），在小鼠命名为 Y 染色体睾丸决定基因（testis determining Y gene, Tdy）。TDF/Tdy 位于 Y 染色体上，雌性所无，在这个意义上它就是性别决定基因。当然，常染色体和 X 染色体的许多其他基因也对睾丸形成有作用。

1990 年，Sinclair 等克隆到人 Y 染色体性别决定区基因（sex-determining region Y gene, SRY）和小鼠的相应基因 Sry。1991 年转基因小鼠实验证实 Sry 就是小鼠的 Tdy，从而使 SRY 成为人 TDF 的最佳候选基因。这是哺乳动物性别决定研究的重大进展。

现已对圆虫（*Caenorhabditis elegans*）、果蝇（*Drosophila melanogaster*）、哺乳动物以及其他一些模式物种的性别决定作了研究。它们的性别决定机制各不相同。性别决定机制的这种多样性与其他许多基本发育事件不同，令人惊奇。这里，我们仅就哺乳动物性别分化调控的研究进展作一综述。

## 二、SRY 基因

人 SRY 基因位于 Yp11.3，只含有一个外显子，没有内含子，转录单位长约 1.1kb，编码一个 204 氨基酸的蛋白质。由于 SRY 蛋白含有一个典型的 DNA 结合结构域：高泳动类非组蛋白（high mobility group, HMG）盒基序，类似于已知的转录因子，所以推测 SRY 编码一个转录因子。SRY 的 HMG 域以一

种序列特异的方式与 DNA 相结合，在双螺旋结构中引入一个尖锐的转折。有证据显示，性反转病人 HMG 域中的突变可分为两类：影响 DNA 结合和影响 DNA 弯曲的，提示这两种性质对于 SRY 蛋白行使转录调节功能来说都很重要。已发现 HMG 域在体外能以高亲和力与钙调素 (Calmodulin, CaM) 相结合。这一现象的功能意义不明，但提示 SRY 的活性可能受另一个层次的调控。

Sry 在成年小鼠生殖细胞中表达为一环状转录物，似乎不翻译，在发育中的小鼠性腺里则转录为一个长 4.8kb 的 RNA，所用的启动子也与成年鼠不同。Sry 于大约交配后 10.5-11 天 (days postcoitum, dpc) 的生殖嵴中专一开启，正好是两性间出现可观察的形态学差异之前；于 12.5dpc 左右关闭。因此 Sry 的功能是启动睾丸分化而不是维持睾丸存在。Lovell - Badge 认为 Sry 起一种感受态因子的作用。因为有些小鼠虽然有 Sry 的表达，但未能把细胞定型到雄性途径。相反，在完全没有 Sry 的情况下，有时卵巢组织也能逆转成睾丸。

已经在所有哺乳动物包括有袋目动物中发现了 SRY 基因。在不同的物种中，SRY 蛋白的 HMG 域高度保守，但是即使是在有亲缘关系的物种之间，SRY 蛋白的其余部分也并不同源。还不肯定这是否意味着 HMG 域是 SRY 蛋白中唯一功能上重要的区域。

### 三、哺乳动物性别分化的层次调控体系

果蝇和圆虫性别分化的完整的层次调控体系已经建立，但是对哺乳动物性别分化的分子本质还了解得很少。最近鉴定了一些被认为与性别决定有关的基因，但层次调控体系仍未建立。已知的参与哺乳动物性别分化调控的基因见图 1，现将它们分别介绍如下：

#### 1. SRY

小鼠性腺最初的发育是 10dpc。左右原肾或中肾的增厚，12dpc 左右两性间开始出现形态学差异。哺乳动物性腺发育的基本途径是雌性的，但是这一途径在雄性体内被 SRY 的活动所掩盖。SRY 启动睾丸分化，然后由睾丸分泌的睾酮和 AMH 使胚胎完成发育成雄性的其余步骤。AMH 是转化生长因子 (trans-forming growth factor, TGF-) 家族的一个成员。

在小鼠生殖嵴的发育中，已明确与 Sry 活动有关的第一类细胞是足细胞 (Sertoli cells)。它们随后指导睾丸中其他类型细胞的分化。Sry 活动在发育上的时间进程是严格的。通常 Sry 对于决定睾丸是必要和充分的，但是调控产生这种效应的基因还一无所知。在有关人 XY 女性和 XX 男性研究的基础上，McElreavey 等认为 SRY 是睾丸发育负调节的抑制子。

#### 2. SOX-9

常常与 XY 女性性反转相联系的一些侏儒症和 campomelic 发育异常 (一种重型侏儒症) 的基因已被克隆。这一基因所编码的蛋白质具有与 SRY 蛋白相似的 DNA 结合结构域，称为 SOX-9 (SRY box gene-9, SRY 盒基因-9)。病人的症状与 SOX-9 开放阅读框内的失活突变或者其上游 (17q24 - 25) 的易位有关。突变只存在于该基因的一个等位基因中，提示病人的性反转和 campomelic 发育异常可能与 SOX-9 基因产物的剂量有关。SOX-9 在性别分化的哪一个环节上起作用仍然未知。

#### 3. DAX-1

Bardoni 等最近把一个参与性别决定的基因座 DSS (dosage-sensitive sex reversal, 剂量敏感性性反转基因) 定位于 Xp21。DSS 基因座长 160kb, 毗邻先天性肾上腺发育不全 (adrenal hypoplasia congenita, AHC) 基因座。具有一个完整的 SRY 基因并且 Xp21-22 区有一个重复的病人具有女性表型。人们认为 DSS 编码一种女性特异的功能, 在男性中它正常地被 SRY 负调节。当 DSS 以双倍剂量存在于未失活的 X 染色体上时, SRY 的这种抑制作用失败。已经从这一区域中克隆到了一个编码细胞核激素受体超家族成员的基因。由于它与 AHC 有关, 命名为 DAX-1 (DSS-AHC critical region on the X chromosome, gene1, X 染色体 DSS-AHC 决定区基因 1)。DAX-1 在 11.5dpc 的小鼠生殖嵴中表达, 是性别决定的角色之一。但是它在雄性和雌性小鼠中表达水平相当。如果它是雌性特异功能基因的候选者, 在雄性中被负调节, 那么这些负调节应当是转录后的。

#### 4. SF-1

小鼠细胞核激素受体超家族的另一成员甾类生成因子 1 (steroidogenic factor1, SF-1) 基因也与性腺发育有关, 可能还与性别决定有关。SF-1 基因最初鉴定为肾上腺皮质和性腺中调控甾类合成酶系的一个因子。然而敲除 SF-1 基因的小鼠没有性腺和肾上腺, 提示这一基因在 Sry 开启之前作用于这些器官的发育启动。SF-1 与繁殖关系密切。因为缺乏 SF-1 的小鼠不表达促性腺激素轴的许多标记, 并缺乏下丘脑腹中核 (ventromedial hypothalamic nucleus)。下丘脑腹中核是一个与繁殖行为有关的区域。

SF-1 在性腺中的表达具有性别二态性。所有性别的早期小鼠胚胎中均有 SF1 转录, 但到了 12dpc 左右, 即两性间开始出现形态学差异时, 雌性小鼠的 SF-1 表达水平降低。因此 SF-1 可能与性别决定有关。SF-1 蛋白在体外能与 AMH 基因的上游序列相结合, 并且在共转染分析中活跃转录。Amh 是足细胞的标志之一。但由于 SF-1 表达很早, 又在所有性别中均表达, 因此不可能单独对 Amh 在 11.5dpc 的睾丸中的特异性表达负责。一些研究提示 Sry 不直接激活 Amh, 而是通过一个未知的因子起作用。

#### 5. WT-1

Wilms 瘤抑制基因 (Wilms' tumor suppressor gene, WT-1) 编码一个与肾发育有关的转录因子。WT-1 的突变导致 Denys-Drash 综合征。这种病人肾、性腺发育异常, 并常常在儿童期引起肿瘤。敲除 WT-1 基因的小鼠性腺也不发育, 但 WT-1 基因对性腺发育的影响可能属于一个依赖于 SF-1 的途径。

### 四、剂量补偿

剂量补偿是使 X 连锁的基因在两性间的表达水平达到平衡的过程。果蝇、圆虫和哺乳动物的剂量补偿机制各不相同, 真兽亚纲哺乳动物的剂量补偿机制是随机失活雌性动物两条 X 染色体中的一条。X 失活是与性别相关联的一种特殊形式的基因调控。虽然早就发现了 X 失活现象, 但是它的机制至今仍是一个谜。现在认为 X 失活单独由 X 染色体上的一个称为 X 染色体失活中心 (X inactivation center, XIC/Xic) 的顺式作用的开关区域控制。X 失活开始于 XIC, 然后扩展到整个染色体。人 XIC 定位于 Xq13, 小鼠 Xic 定位于 XD。这两个物种间的 XIC 基因座功能一致。最近已将 XIST/Xist [X (inactive) specific transcript, X 染色体 (失活的) 专一转录基因] 分别定位于 XIC/Xic 区。X 失活在胚胎发育的早期把一整条染色体给关闭了,

但是有一些 X 连锁的基因逃避了 X 失活。这些基因在失活和不失活的 X 上都表达，但 XIST/Xist 只在失活的 X 上表达，在不失活的 X 上不表达。这是迄今发现的唯一一个仅仅由失活的 X 表达的基因，因而成为 XIC/Xic 的强烈候选者。

小鼠 Xist 转录本长 15kb，其部分区域与人转录本同源，而且在 X 失活刚刚启动之前表达，因此可能参与 X 失活的启动过程。Brockdorff 等通过基因打靶构建了两条 X 中有一条的 Xist 基因转录起始端缺失 7kb 的 XX 胚胎干（embryonic stem, ES）细胞。XXES 细胞有两条活动的 X 染色体，在发育过程中随机失活一条。被打靶的 ES 细胞含有来自各种不同品系小鼠的 X 染色体，以利用多态性区分缺失和正常 X 染色体的基因的转录本，从而检定 X 染色体是否失活。结果显示被打靶的 ES 细胞随着胚胎发育分化成两群，其中一群选择正常的 X 染色体以失活，它们完成了正常的 X 失活；另一群选择了缺陷的 X 染色体以失活，它们的 X 失活失败提示 Xist 转录本对于失活 X 染色体上的基因来说是必要的，并且起顺式作用。

## 五、性染色体和 SRY 基因的进化

### 1. 性染色体的起源

有关性染色体进化的信息主要来源于对有袋目和单孔目动物的研究。这些动物的 X 染色体和 Y 染色体之间高度同源，支持性染色体由一对同源常染色体进化而来的假说。有袋目动物只失活父源 X 染色体，这可能是真兽亚纲动物随机 X 失活在进化上的一种中间过渡状态。有袋目动物和人 X 染色体的长臂和短臂近端上有保守的基因座位，提示这一区域存在于祖先 X 染色体中。相反，在人 X 染色体短臂包括 X 和 Y 之间可以发生重组的拟常染色体区（又称配对区）中，定位了两个有袋目和单孔目的常染色体基因座簇，提示 X 染色体短臂是由一段常染色体附加到祖先 X 染色体上而形成的。

### 2. SRY 基因的起源

已经在有袋目动物 Y 染色体上发现了一个 SRY 同源序列，但是单孔目动物中迄今仍未发现类似序列。这说明 SRY 基因在进化上起源较晚。真兽亚纲动物的 SRY 基因只在性腺组织中专一表达，而有袋目动物的 SRY 基因则在多种组织中表达，这可能反映了 SRY 祖先基因的表达状况。

SRY 的祖先基因可能是 SOX-3。已经在昆虫、爬行类、鸟类和后兽亚纲哺乳动物中发现了一系列 SRY 样基因，它们含有与 SRY 相似的 HMG 盒基序，命名为 SOX-1, SOX-2 等等。HMG 域的存在提示它们具有调节其他基因表达的功能。与 SRY 相接近的有 SOX-1, SOX-2 和 SOX-3，其中 SOX-3 在核苷酸序列上与 SRY 最接近，并且在有袋目和真兽亚纲哺乳动物中都是 X 连锁的，因而特别引起关注。但由于在生殖嵴中未检出 SOX-3 的表达，并已发现了 X 染色体缺失包含 SOX-3 在内的 5Mb 片段但是具有男性表型的病例，因此 SOX-3 可能并不直接参与性别决定。

# 地球的演变与海平面上升

马在田

同济大学

马在田 地球物理学家。1930 年 10 月 4 日出生，辽宁法库人。1952 年东北工学院（现东北大学）肄业，1957 年毕业于前苏联列宁格勒矿业学院，获工程师学位。现任同济大学教授，曾任上海市科学技术协会副主席。1991 年当选为中国科学院院士（学部委员）。用地震方法探测华北平原地下含油气盆地的先行者，是胜利油田发现者之一。

近年来谈论海平面上升的问题比较多，引起了人们，特别是沿海人民的重视。海平面的变化是全球变化的一部分，因此在讨论海平面变化时也谈谈有关地球的一些知识。在讨论地球的演变时，必然会涉及到太阳乃至宇宙。

## 一、地球的演变

### 1. 宇宙中的地球

地球是宇宙中一颗渺小的行星，它是太阳系中九个行星中的一个中等行星。太阳是银河系中 1000 亿颗恒星中的一个不太大的恒星。银河星系又是宇宙中 10 亿个星系之一。银河星系只不过是一个中等规模的星系，呈圆盘状。圆盘的直径长度达 8 万光年，其中心厚度为 1.5 万光年。一光年的长度约等于 9.7 万亿千米。宇宙是有限而无界的，今天的宇宙半径约 150 亿光年。由此可见，地球在宇宙中的地位。

地球从无到生成，从形成到今天一直在变化着。地球是在宇宙形成和发展的过程中生成和演变的。宇宙是如何形成的？有没有末日？经过几个世纪的争论与探索，今天已基本上取得比较一致的观点，即物质宇宙是由大爆炸产生的。并不像 20 世纪初和此前人们普遍认为那样，宇宙是永恒不变的观点。这首先应当归功于爱因斯坦的广义相对论（1915）和哈勃的星系红移现象的发现（1929）。在大爆炸的最初时刻，温度高达 100 亿 K 以上。此时不可能存在星系、恒星和行星，只有粒子和辐射。经过 70 万年之后温度降至 3000K，基本粒子结合成稳定的原子。再过几十亿年在引力作用下原子逐渐凝聚成原始星云，星云逐渐形成星系。今天的物质宇宙仍在膨胀，今后的走势如何？一种观点认为，宇宙会永远膨胀下去。另一种观点认为，宇宙膨胀到一定程度后，在引力作用下变为收缩，最后坍缩成原来的一点上去。持后一种观点的人较多。无论是宇宙继续膨胀下去，还是坍缩成一个点，总之宇宙是在不停地变化着。既然宇宙在不停地变化着，我们的地球和太阳系也自然地在不断地变化着。今天的太阳已有 50 亿年的历史，它一直发生核聚变，会越来越热，以至变成红巨星，然后逐渐熄灭变成白矮星。从今天算起到它的衰亡预计还有 50 亿年左右。在太阳逐渐变热过程中地球上的温度会逐步达到和超过水的沸点。这时地球已不适合人类生存。那时的科学技术有可能使人迁移到其它有利于人类生存的星球上去。不仅宇宙在膨胀，太阳在燃烧，地球本身也在不停地变化着。海底在扩张，大陆在漂移，地幔在对流，地核在转动（对地幔），这些都是近几十年乃至最近被科学证实的现象。

## 2. 地球的圈层

从地球内部向外按物质性质划分为地核、地幔、地壳、水圈、气圈及处于地壳表层、水圈和气圈中的生物圈等。组成固体地球的内部结构可以用鸡蛋来比喻，地壳（0-30km）似蛋壳，地幔（30-2900km）似蛋白，地核（2900-6371km）似蛋黄。地球的形状和圈层是由各种引力和自转离心力决定的。地球的椭圆扁率为 1/300。固体地球的重量为 66 万亿亿吨，体积为 1.1 万亿立方千米。地球的水圈是由海洋、河流、冰川和地壳表层岩石中的地下水组成。地球表面以上的空间为气圈。它又分为对流层（0-16km），雷雨发生在这层内。它的上面是平流层（16-60km）。60-1000km 为电离层、1000km 以上为磁层。臭氧层处于平流层内。

## 3. 地球的历史

地球经过漫长的演变才形成今天的状态。它也是由基本粒子凝聚而成，自转形成圈层。随着温度的降低，开始出现生命。但是，地球的历史不是平稳变化的。而是经常出现激烈的突变。首先地球的年龄有多大？根据放射性同位素率半衰期年限是固定的规律，测定出地球的最古岩石已存在 40 亿年，而陨石的年龄为 45-47 亿年。因此，推算出地球的年龄不小于 46 亿年。

经过 46 亿年的演变，地球才形成今天这个样子，由各种圈层组成。在这 46 亿年中有 40 亿年地球上是无生命的。这 40 亿年称为隐生宙，又分太古代和远古代。出现生命后的 6 亿年称为显生宙。显生宙又分为古生代（3.75 亿年），中生代（1.55 亿年）和新生代（0.7 亿年）。新生代又分为第三纪（0.68 亿年）和第四纪（167 万年）。人类出现在近 200 万年的历史中，在地球史中是非常短暂的。如果将地球的演变过程 46 亿年当做 2 小时的电影来看的话，则太古代和远古代为 1 小时 48 分钟，古生代为 7.5 分钟，中生代为 3 分钟，新生代为 1 分钟，人类出现不过 2 秒钟，中国历史 5000 年，不过 1/200 秒。可见，人类的历史是非常短的，而人类的文明史则更加短暂。

在 46 亿年中，地球的演变是巨大的。但是，前 40 亿年的演变过程，人类对它知之甚少，因为没有古生物化石可用来研究其变化。从 6 亿年以来地球的变迁也是巨大的。如古生代初期寒武纪的生物大爆发，中生代末爬行动物恐龙的灭绝，地球磁极已发现有 253 次的倒转，多次的冰期和大陆的张裂与漂移等。其中最使人惊奇的是大陆漂移。坚硬的大陆怎么会漂移呢？但是这个在 30 年代被地球物理学家否定的，50 年代又被地球物理学家肯定的由德国气象学家提出的学说今天已被古生物、古地磁、海底地形和海底扩张等一系列现象证实。根据科学研究，2 亿年前地球上的所有大陆都是联结在一起的，称为联合古陆。在 1.8 亿年前，北美和非洲开始裂开，出现北大西洋。1.2 亿年前南美和非洲开始裂开。这时的印度、澳大利亚是和南极在一起的，远离欧亚大陆。以后印度、非洲与南极和澳大利亚分离，形成印度洋。5000 万年以前，印度和澳大利亚先后向北漂移。印度撞在亚洲大陆边缘上，形成喜马拉雅山。从此形成了今天的大陆状态。不过，根据天文和卫星观测，各大陆仍在缓缓移动。至于大陆为什么会漂移，漂移的动力是什么，今天仍然不太清楚。这个问题是正在研究的地球动力学要回答的。

## 二、全球变化与环境

1992 年 6 月联合国在巴西召开了环境与发展大会，会议通过了 21 世纪议程。这次会议是促进全球经济发展和保护环境的里程碑。本世纪以来随着

科技进步和社会生产力的提高加速了社会发展。但与此同时人口剧增，资源过度消耗，环境污染和生态破坏日益突出。因此，保护与改善人类生存环境，协调人与自然关系的综合研究具有战略地位。其研究对象是岩石圈、水圈、气圈和生物圈组成的地球系统及人类活动与影响。

全球变化包括：全球气候变化，全球海平面变化，全球生态与环境的变化，全球自然灾害及减灾，全球人口与资源问题等。以上各个方面是互相关联的。下面就涉及与海平面变化有关的几个地学现象加以介绍。

### 1. 冰期与间冰期

从海底沉积物质分析，从现在上溯 200 万年间出现有 20 次冰期，在冰期内地球的温度比现在低得多，这时欧洲和北美都覆盖着冰盖，冰盖厚度以千米计。冰川在陆地上扩伸与退缩为冰期与间冰期的特征。地球现在处于间冰期，故温度较高。现在地球上只剩下少数冰川在流动。大部分在高山。但是当年冰川活动的痕迹历历在目。当冰川流过加拿大时，它推走了挡着它的土壤。结果遂使加拿大中部的大部分地区变成了嶙峋多石的贫脊地，而美国中西部却获得了双倍巨厚的肥沃土壤。纽约的长岛也是冰川推出来的。北美的五大湖是冰川融化的水形成的。

关于冰期的形成，塞尔维亚物理学家米兰柯维奇于 20 年代做出了解释。他认为，由于地球有公转、自转、进动和章动，地球轨道变动引起温度变化，使地球的气候变化有三种相互重叠的周期，2 万年、4 万年和 10 万年。这 3 种周期在最近 70 多万年中每 10 万年结合起来产生综合影响，导致冰川出现。50 年代有人测定出海洋温度在一个千万年周期中温度变化幅度为华氏  $10^{\circ}\text{F}$ 。

### 2. 厄尔尼诺-南方涛动 (ENSO)

这是一个以 3—7 年为间隔的重复出现的异常的大气与海洋耦合现象。强烈的偏西风使赤道热海水冲向厄瓜多尔和秘鲁的海岸，抑制较冷的深水膨胀。卫星观测发现，它与南方涛动，即中心在印尼、澳大利亚一带东南太平洋的振荡变化的低气压头有关。强大的 ENSO 现象于 1982/83 年和 1990/91 年造成一些地区旱灾，一些地区洪水泛滥。ENSO 影响海洋变化，也影响气候变化，导致全球气象反常。

### 3. 温室效应

自然界中的温室气体，如二氧化碳 ( $\text{CO}_2$ )、甲烷 ( $\text{CH}_4$ )、氧化氮 ( $\text{N}_2\text{O}$ ) 和氯氟碳 (CFC) 的浓度在本世纪以前的几千年中基本保持不变。它们的浓度上升始于全球工业化，特别是最近几十年增加更快。从南极和格陵兰的冰心中提取的二氧化碳和甲烷的含量与当时的温度存在正比关系。温室气体含量增高，气候变暖，生存环境也随之变化。因此，联合国发出警告：人类活动导致全球的气温以一万年以来最快的速度在升高。如果不控制温室气体的排放量后果堪忧。

从上世纪末至今全球气温增加了  $0.3^{\circ}\text{C}$  -  $0.6^{\circ}\text{C}$ ，海平面上升 10-25 厘米。全球变暖对农业的潜在影响是举世关心的。全球变暖对农业有负面作用，也有正面作用。由于目前对全球气候变化的模拟还不够准确。现在还难以预测粮食产量的走势。有人预计到 2060 年世界粮食产量比现在下降 5%，第三世界国家大于这个比例。

## 三、海平面上升问题

海平面变化是全球变化的自然现象之一，已引起各国政府和科学家的广泛关注，特别是当前全球变暖使海洋平面上升加速，将会引起严重的社会经济后果。世界一半以上的人口居住在距海岸 50km 以内的沿海地区。如果海平面再上升一米，将使 500 万平方千米的土地，10 亿人口和 1/3 的耕地受到影响。我国海岸线长达 18000km，沿海地区是我国经济的重心。因此，海平面上升问题特别使人关注。

### 1. 全球海平面变化

全球海平面变化是指全球平均海平面的升降值。引起海平面变化的主要因素有以下四个方面。第一，大洋盆地容积的变化，主要是构造作用引起的。第二，大洋水体积的变化，主要是冰川的推进与收缩作用引起的。第三，大洋物质分布的变化引起的洋面的变化。第四，动力作用，如气象、水文、引力的变化引起的海面变化。5000 万年前由于印度、非洲板块与欧亚板块碰撞，陆地面积减小，洋面扩大，致使海洋平面下降了约 20 米。18000-6000 年前海平面呈持续上升趋势。6000 年以来全球海平面整体稳定，但局部有变化。近 100 年来，有实际的观测值作为全球海平面变化研究的依据。但是由于采用的统计方法不同，结果也不相同。根据联合国教科文组织发表的公告，全球海平面近百年的年平均上升值为 1.0-1.5mm/年。

对于下一世纪全球海平面上升的情况是大家所关心的。各个方面都对下世纪的全球海平面上升值做出了估计。都是在过去 100 年的平均增长率的基础上考虑到下一世纪的全球变暖的趋势。全球变暖将使南极冰盖碎裂速度加快。格陵兰气候较南极为暖，故会逐渐减小冰盖。关于全球气温上升较前 100 年要高的根据主要是人类活动，特别是工业中产生的温室气体，其中 60% 为二氧化碳的排放量造成的。但是研究表明，人们所产生的  $\text{CO}_2$  至少有三分之一被海洋吸收。海洋与大气之间的碳交换过程尚不清楚。有人认为，气温随大气中  $\text{CO}_2$  含量的升高是有一定限度的。过此限度  $\text{CO}_2$  再增加，温度不一定再上升。因此，南极冰盖的碎裂速度不会比现在快很多。同时，在过去 20 次的任何间冰期内南极的冰盖都未曾完全融化。因此，那种认为在未来 100 年内海平面会上升 1 米至几米的说法是不切实际的。下图是政府间气候变化委员会 (IPCC) 于 1992 年对下一世纪全球海平面上升值的估计曲线。其中的最佳值为，2030 年较现在上升 18 厘米 (cm)，2070 年为 44cm，2100 年为 66cm。1990-2030 年的年升率为 4.5mm/年，2031-2070 年为 6.5mm/年，2071-2100 年为 7.3mm/年。

### 2. 中国沿海地区的海平面变化

全球的海平面变化量并不反映世界某一地的实际海平面的升降值。世界某一地点的海平面变化量等于全球海平面的上升 (或下降) 值加上当地陆地上升 (或下降) 值之和，这就是该地区的相对海平面变化。相对海平面变化对人类社会的影响更有实际意义。世界一些大三角洲，包括长江和老黄河三角洲的地面沉降率均在 6-10mm/年，是目前全球海平面上升率的 10 倍以上。因此，研究某地的海平面变化必须包括海面和陆面的整体变化。

由于各种自然的和人为的因素不同，各处的相对海平面变化差异很大。我国的大地构造造成了海岸带的特点是三角洲皆在沉降带内。这些地区的相对海平面变化较大。而在非三角洲地区海平面上升率较小。我国沿海地区的地面沉降主要是由于过量抽取地下水所致，各处的沉降量也不相同。老黄河

三角洲内的天津新港港区，根据 1985 年-1986 年 10 月的实测地面沉降图，全港区 80% 地区的地面沉降量在 20mm 左右。长江三角洲一些地区，1985 - 1990 年沉降量在 12-16mm。这是一些观测点上的沉降值，全区的平均沉降值要小于此数。关于我国几个三角洲过去和未来的相对海平面上升情况用任美铎院士给出的数据作为参考，如表 1 所示。表中 2050 年的全球理论海平面的上升值采用 IPCC 的最佳估计。

在这个表中，现代黄河三角洲和珠江三角洲的地面沉降率主要为构造沉降，故 2050 年的数值与现在相同。老黄河三角洲与长江三角洲的地面沉降率包括了构造沉降、沉积物压实及地下水过量抽用引起的地面沉降。最近上海市和天津市都在努力采取各种措施，限制超采地下水，以减少地面沉降。上海市的目标是近期内把市中心区的地面沉降控制到 3mm/年。天津市的目标是控制到 10mm/年。要想实现这个目标是艰巨的。如上海浦东地区的地面沉降仍在 5—6mm/年以上。

### 3. 上海地区的海平面上升与对策

根据政府间气候委员会 (IPCC) 的最新估计，至 2050 年全球海平面上升 20—30 厘米左右。考虑上海地区的构造下降值为 1-2mm/年，地面沉降为 3-5mm/年。综合起来，估计上海地区到 2050 年海平面相对上升为 50-70 厘米，呈准线性变化。面对这个海平面相对上升的情况应当对它的影响做出估计，并采取相应的对策和措施。

#### A. 海平面上升对上海的影响

##### (1) 风暴潮威胁增加

长江三角洲是风暴潮较重地区之一。上海是我国工业、商业、金融和航运的中心。未来海平面上升使风暴潮增大，对上海的负面影响是不言而喻的。现在的黄浦江外滩的防洪墙高程认为是按千年一遇的标准修建的。如果相对海平面从现在水位上升 0.5 米，则堤防标准只能达到百年一遇的标准。

##### (2) 上海现有港区功能减退

上海老港区标高 5.8 米。海平面上升会造成风暴潮淹没港区的次数增加，吞吐能力会衰退。更难满足浦东开发的要求。海平面上升也将引起长江口河床演变，长江口拦门沙位置也会受到影响，对维护深水通海航道增加难度。

##### (3) 河口的海水入侵范围扩大

上海长江口内，由于海水潮汐的影响，枯水季节崇明岛长期为咸水包围，长达数月之久。海平面上升后，海水入侵范围还会进一步扩大。这对宝钢水库和陈行水库等取水工程增大难度。

##### (4) 城市的排涝、排污出现困难

上海市区地势低洼，近年暴雨季节经常出现街道积水，造成生产、交通和经济社会活动的困难。今后海平面上升，将使城市排涝更为困难，污水会长期回荡，甚至会影响饮用水的水源地。对河网地区的泄洪和排涝会有更大的影响。

#### B. 应采取的对策

##### (1) 统筹规划加强防潮、防洪工程

提高防潮防洪标准，确保上海及周边地区的经济发展带的安全。如在吴淞口建立黄浦江挡潮闸可能是一种有效措施。

## （2）继续控制地区沉降

现在上海地面沉降的速度由于采取措施已经趋缓，但仍在下降。因此，今后仍须继续严格控制地下水开采。

## （3）开展海平面上升及影响和对策的系统研究

海平面上升的机制比较复杂，其变化和走势也会随各种因素而变。因此，应当组织科技力量开展长期系统的综合分析研究，做出准确的长、中、短期预报，提出防灾减灾的对策。

为了对海平面的相对上升进行全面监测，我们必须保护和完善监测网。为研究海平面上升及影响和确定市政工程基础设计提供科学依据。

致谢：本人在准备此科普讲座稿过程中，汪品先院士、王惠中教授、李从先教授提供了有关资料和建议。在此表示感谢。在介绍海平面上升的问题上主要利用了中国科学院院士咨询报告——《海平面上升对中国三角洲地区的影响及对策》一书，许多材料和观点均取自该书，特向作者们表示感谢。

# 地球动力学及其与社会的关系

王 仁

北京大学力学系

王 仁 固体力学与地球动力学家。生于 1921 年 1 月 2 日。浙江吴兴人。1943 年毕业于西南联合大学。1953 年获美国布朗大学应用数学哲学博士。北京大学力学系教授。1986-1991 年任国家自然科学基金委员会副主任。1980 年当选为中国科学院院士(学部委员)。致力于固体力学和地球动力学研究。

## 一、引言：地球的运动及其动力学

地球在不断运动之中，它绕太阳的公转和绕地轴的自转，我们天天都可感知，而火山、地震告诉我们地球内部也在不断运动之中。还有一些缓慢的运动则是不易觉察到的。例如，我们脚下的地面由于日、月引潮力每天也有两次二三十厘米的潮汐起伏，称为固体潮，还有沧海桑田的变化就慢得多了，要经过多少年才能觉察出来。在地震震中邻近区域，地块上时常可以测得微小的变位，需要通过精密的仪器，现在依靠空间技术把它测出来，也就是说，地球像一个活的机体，它的整体、表面和内部是在不断运动之中的，有快有缓。

既然有物质的运动，必然有驱动力源，也必有动力学的关系。找出这些关系以及它们的规律，就能进行预测和减少自然灾害的危害性，得到防治灾害的主动权；也就能恢复先前运动的格局和变迁，对于寻求矿产能源将是很有指导意义的。

动力学就是要研究物体运动和作用力之间的关系，通常来说，地球指包括大气层、生物层、海洋水圈层、固体地球的整体，它们各自都有很复杂的运动及相互间的作用。本文所谓的地球动力学按一般理解是指固体地球部分，包括它内部物质的动力学。我们将暂时不考虑它和其它圈层的相互作用。

## 二、用于分析地球运动的各种力学模型

要进行动力学分析必须对分析对象给予描述，那就是要用一个最为恰当，计算起来最方便的模型来代表它。这要看我们想分析什么情况而定。如果我们要分析地球绕太阳的运行轨道。由于地球的尺寸与到太阳的距离比要小得很多，就可以将地球看成具有一定质量的一个点，可称之为质点模型。

如果要计算地球在月地系统中的角动量转移关系，则可把它考虑成刚体，在忽略太阳作用的情况下有：

$$I_e \omega_e + I_m \omega_m = \text{常数} \quad (1)$$

其中  $I_e$  和  $I_m$  分别是地球和月球的转动惯量， $\omega_e$  和  $\omega_m$  分别是它们的角速度，如果考虑太阳的影响，就成著名的三体问题，但地球仍可采用刚体球模型。

1765 年欧拉在分析地球自转轴在地球本体内部围绕其惯性主轴作自由摆动时也曾采用刚体球模型，得到摆动周期为 305 天。1891 年张德勒(Chandler)分析了 1837—1891 年世界上 17 个天文台的实测结果得出 427

天的周期，两者相差较大。纽康（Newcomb）1896年将这个差别解释为1/4由海洋运动引起，其余部分由地球的弹性变形造成，也就是说这时需要考虑弹性体地球模型。它是一种变形体模型。

一般的弹性体模型指的是物体受力后的变形和作用力成比例（另外还有不按比例的非线性弹性）。当力消失时变形也消失，物体恢复原状。当分析地震波在地球内部的传播时，这种模型和实测结果一致。早期的全球动力分析都采取这种模型，如1872年泊桑对全球的振动分析，1855年艾雷的均衡分析，1883年达尔文关于固体潮，1885年瑞利关于表面波的分析等等都能和实测值有较好的符合。

不过，显然对地球表面的构造形迹不能采用弹性体模型。它们都是一些永久性变形的结果，从这些构造形迹还可以看出岩石在深部条件下是能够进行柔性变形的。1911年冯卡门（vonKarmán）在高围压下进行的岩石实验说明岩石是可以进行塑性变形（有永久变形）的，后来格利格斯等进行的有高温、高围压的实验都说明岩石在地球内部条件下可以进行缓慢的持续变形，如同粘性流体一样，然而它们在快速变形条件下（如地震波传播等）仍表现为弹性，可称为粘弹性体。这些又统称为流变学模型是用来分析地球的构造变形和内部运动的，均属于变形体模型。

### 三、变形体力学的几个基本概念和基本方程

变形体（又称连续介质）力学将物体看成是一个由连续分布（不留空隙）的“质点”组成的。每个质点实际代表它周围一个小微团。质点的性质就是这个微团内各个微粒子，分子，原子的统计平均性质。对于这些微粒子而言，这个微团是很大的，包括了千千万万个微粒子，足以形成一个稳定的统计平均性质。然而对于所要分析的物体而言，这个微团又是很小的，可以看成一点。它不同于几何上的一个点，它具有代表那个微团的物理性质。

一个点和它的相邻点在任何条件下保持相对位置不变的是刚体，而相对位置能发生变化的就是变形体，它可以是由于温度变化引起的，也可以是由于作用力引起的。这些变化包括它和邻点之间距离的变化和与相邻点连线之间的夹角变化。若质点和它的相邻点之间没有这些变化则这个质点在进行刚体运动。

按上面所述，要描述一个质点（注意是代表一个微团）的变形状态就需要知道一点和它所有邻点相对距离的改变以及与相邻点连线角度的变化，需要无穷多个量，幸好连续介质的理论告诉我们，实际上只要有六个量就可以表示所有这些量，它们组成一个应变张量（距离变化以单位长度上的变化来表示）。注意，描述每一点的位移只要三个方向的分量，形成一个矢量（向量），而描述每一点和它邻域各点的相对位置变化则需要由六个分量组成的一个对称二阶张量  $e_{ij}$  表示。矢量与张量在数学运算上有很大的不同，需要注意区分。

另外一个基本概念就是物体内部各点与其邻点间内力的变化。物体内部各点本来是由一定的内力连接在一起的，可以视为处于稳定的平衡状态，使各点之间保持一定的距离。现在由于外界作用，点与点之间的距离发生了变化（处于一个应变状态），它们之间的内（部作用）力将因而发生变化，这个变化量可称为附加内力。

现考虑通过一点做一个面，在这个面的两侧由于这点与其邻点距离发生

了变化，这个面上就产生了附加内力。它在单位面积上的度量叫做这个面上的应力，是一个矢量。然而通过一点有无限多个面，由于它和无限多个邻点发生距离的变化，就引起了无限多个这些应力矢量，它们组成了一点的应力状态，它也可以由一个有六个分量的对称二阶应力张量  $\sigma_{ij}$  来表示，它与一点的应变状态对应。

以上是变形体力学最基本的几个概念，必须区别一点（理解为一个微团）的位移（矢量）和应变状态（表示相对位置变化，是张量）；以及作用在一个面上的内力变化（矢量）和一个点的应力状态（是张量）之间的区别。

在一维问题中，经过任何一点只有一个面，一点的邻点也只有在一个方向上，因此，沿这方向的距离变化可以只用一个量表示，内力变化也只沿这一个方向，也只用一个量表示。这时矢量和张量没有区别，因为一维问题已把方向问题确定了。然而二维问题就不同了，在一个面上的点在面内有无限多方向上的邻点可发生距离变化，可以通过无限个垂直面发生内力变化，这时，一点的位移有两个分量，而它的应变张量有三个分量，面上的附加内力有两个分量，而这点的应力张量也有三个分量。

变形体力学的基本方程可分为三组如下：

#### （1）运动方程

牛顿第二定律说明对变形体中每个质点（代表一个微团）上所受的合力与质点的加速度成比例（严格讲与动量变化率成比例），沿  $i$  方向的运动方程可简写成：

$$\rho \ddot{u}_{i,j} + F_i = \sigma_{ij,j} - \rho u_i, \quad j=1, 2, 3, \quad (2)$$

其中  $\ddot{u}_i$  是  $i$  方向位移，逗号后跟  $j$  表示对  $j$  方向的偏导数，上面一点表示对时间的一次导数， $F_i$  是作用在这质点上的体积力， $\rho$  是质点的（质量）密度。

#### （2）几何方程

它表示质点（代表一个微团）的运动与其邻域诸点运动的关系，要求在几何上保持为一个连续体：

$$e_{ij} = \frac{1}{2}(u_{i,j} + u_{j,i}) + \text{非线性的高阶项} \quad (3)$$

#### （3）本构方程

表示微团的应力状态与应变状态之间的关系，

$$\sigma_{ij} = (\sigma_{ij}, \dot{e}_{ij}, T, q_k) \quad k=1, 2, 3, \dots \quad (4)$$

其中  $\dot{e}_{ij}$  上一点表示它对时间的导数，为应变速率， $T$  为温度， $q_k$  是结构参数，将可随着变形而改变。

上面这三组方程中前二组对所有连续介质都适用，而第三组方程是随介质的特性而异的，有的介质很容易变形，有的则较难；有的性质随应变速率而异（如前所述，地球内部介质在应变速率快的情况下表现为弹性，而应变速率慢的情况下或温度很高的情况下表现为粘性），有的则不受影响。对于气体、流体有更不同的表达式。这一组方程代表介质在这一点变形特性，是由实验确定的。

以上讲的是连续介质情况，它假定介质变形可以无限制进行。实际上物质的变形能力都有一个限度，到了这个限度，就会破坏、断裂，因而与这一组方程相连的还可有一个破坏条件，表示这组方程有效性的限度，可用一个函数表示，它将由实验确定。

$$f(\sigma_{ij}, \epsilon_{ij}) = K \quad (5)$$

另外，若有能量耗散的问题还有热力学方程，这里就不提了。

满足这三组方程的解有无穷多个，对于具体问题还需给定一些条件，才能确定那个问题的解，这些条件是：

(4) 边界条件，表明在物体全部边界上的几何约束，位移或作用着的外力，热源等等。

(5) 初始条件，即问题在施加边界位移，外力或热源以前所处的原始状态。也就是说，方程解出来的是这些施加位移、外力或热源作用下所产生的应变和应力的改变量，而物体所处的真实状态要在它们之上加原始状态。

#### 四、地球动力学问题的建立，正演与反演

地球动力学的问题可用下列图示说明，从图中底部所示的构造、性质、驱动力加上初始条件可求解位移场和应力场，从而提供给顶部所需要的信息，这是正演问题，若知道位移场和应力场，希望求解底部所示的那些信息，那就成为反演问题。

对于地球动力学而言，我们可以在地表测得部分地区的位移场，速度场和应力场，并知道一些构造演化、盆地形成、地质和地震灾害的信息。根据各种地球物理和地质学的手段可以获得地球内部的结构，特别是较浅部的情况可以比较清楚。另外根据地球化学和岩石力学实验的分析，可以获得内部物质的力学、热学性能。若假设初始状态是从零开始，剩下的问题就是假设各种可能的驱动力，如重力、引潮力、公转和自转的离心惯性力、地球内部的热动力以及小行星撞击、电磁场作用等等，求解前述方程。对于构造运动而言，作用力应该在一个相当长的时间内保持方向不变，一般认为引潮力变化的周期太短，作用不大，小行星撞击的影响范围较为局部，电磁场的作用力很微小等等可以先不考虑，而现在认为最主要的力源是地球内部的热动力和重力。离心惯性力的作用使地球形状变成偏椭球。它在长时间内的加速或减速可以成为构造运动的驱动力，在数值上比前者较小。

地球内部特别是上地幔的热运动直接作用在地壳的底部，地幔物质在洋脊带上外溢，推动两侧造成新的地壳，它推动两侧的板块运动，当一个板块碰上另一板块时，发生碰撞或俯冲到它的下边去，这些都推动板块内的构造运动。人们现在认为是这些力连同俯冲部分向下的重力是造成板内构造运动、板缘地震的主要驱动力，可用它们进行计算。然而板内的地震，如在中国，则需算出板内的位移场、应力场，需要找出使板内运动的驱动力。

中国地区主要是受到印度板块的向北（或东北）推动力以及从东边太平洋板块和东南边菲律宾板块的驱动。但这些力是怎样分布的，有多少大小，在地壳底部作用的是驱动力还是阻力等等问题目前也还在继续研究中。这里反演的最大困难还在于对深部地壳和上地幔物质结构、力学性质等了解得不够，需要做更精细的探测。

#### 五、地球动力学的一个重要目标是

##### 寻求构造运动的驱动力

构造运动一般指的是地表上造山运动、断层错动以及造陆运动等。现在还包括整个板块的运动，它们的碰撞、俯冲等。人们现在通过空间技术等可

以较精确地测得地表的运动，而地球动力学的一个重要目标乃是寻求这些运动的驱动力，这是一个典型的反演问题。这些构造都是长期运动的结果，其中许多还在继续进行之中，它们关系到矿产资源的形成，地震、火山等灾害的发生，因而弄清楚它们的驱动力和演化过程是十分有意义的。

反演工作的成败关键在构造模型的选定和用以对反演结果进行检验的实测资料。由于地质构造十分复杂，不论是反演还是正演都要借助于数值计算。在力学计算中最成熟的是有限元方法，它把所要计算的区域划分为许多小块（有限单元），对不同块可以根据地质资料给予不同的力学性质。重点是要区分在反演的时间段内活动和不活动的地带、断层，对于活动的部分，还要从地质资料知道活动的速率，并由此可定出那里的力学性质。对于不活动的部分，则可取成大的弹性单元，从地震波速资料定出其力学性质。

对反演的计算结果做检验，最直接的是地形变测量，近代资料可用大地测量的结果，现在用空间技术可以测得相当高的精度。而过去的构造运动则主要依靠地质考察工作，如从构造形式可以估计出位移的方向、大小，并需设法定出运动的年代等。另一重要资料就是靠地应力测量，可得出不同地点的现代应力状态，不过它们是浅层的，而根据地震机制的分析，可推算出震源深处的应力状态。这些是检验计算结果好坏的重要判据。

从上述介绍可以看出，无论是选取区域的构造模型或是检验结果用的资料，都是建立在实际考察和测量结果的基础上，也就是说反演的好坏，关键在对实际资料的占有和它们的可靠程度。

至于计算方案当然也要发展，这里面有一个数学的问题，那就是在反复试算、检验、修改的过程中，如何选择修改的方向使得收敛得最快；又怎样从各个计算结果中选定何者为最优的结果，它的精度应该怎样确定等问题。

我们从 1983 年以来试用上述计算方案计算过东亚地区的区域应力场和各边界板块驱动力的相对大小和方向，最近对实际资料较多的北美板块也做了类似反演，说明方案可行，拟在掌握更多资料的基础上对东亚地区做进一步的计算。下节我们以计算华北地区 700 年地震序列的反演为例进一步介绍这里所说的应力场反演问题。

## 六、例：地震序列的应力场反演及预测

我们用这个例题说明对华北地区地震应力场的反演。

首先，我们用于检验反演结果好坏的是华北地区从 1303 年赵县 8 级地震到 1976 年唐山 7.8 级地震的一系列地震资料。

其次，根据地震地质专家认定的本地区活动断层并选定足够宽的边界，将地区划分成有限元网格，这些就是计算所用的构造骨架。

然后，根据本地区地震波速的资料，选定各单元介质的弹性模量，根据在东亚应力场计算中得到的在本地区边界上的应力状态作为边界条件，内部的应力分布可作为初始条件，从那里起算。

需要假设地震的破坏模式（相当于（5）式），我们选用了最简单的摩擦模式，即断层是依靠静态干摩擦系数保持断层两侧的联接，当摩擦系数下降到动摩擦系数时，断层发生错动（发震），引起周围应力场变化，断层面上的压力和剪切力会下降，于是断层在错动一个距离后，达到新的平衡位置而停止错动。从周围介质中的应力变化可算出减少了多少能量，可以将它和这次发震的震级进行比较，据此修改参数，使之和实测结果相符。断层错动的

距离也是可供比较的资料。由于发震断层错动而引起全区域内的应力重分布，有的地方增强了，地震危险性增加，有的地方消减了，地震危险性下降。可以要求地震危险性增加的地点与地震记录中的余震震中一致，而且增加得较大的地方，应该就在下一次大地震的震中位置。据此将区域内各断层上的参数进行调整，使得它们尽可能相符。然后在下一个震中的断层处降低摩擦系数，使之发震，重复上述过程。按照这个办法将 700 年来华北地区发生过的 7 级以上大震序列一个一个依次重现出来，直到最近的一次大震（唐山，滦县）以后，从所得的位移场和应力场就可得知此时整个地区地震危险性的分布和下次大震可能发生的一些地点。可以作为地震预报的一个依据。

上述模拟的好坏，关键在骨架的选取和资料、数据的正确性，它的缺点是还没有时间因素，不能报出地震可能发生的时间。要改进这一点，需要将模型改为粘弹性模型，需要调整的变形参数和破坏参数增多了，与实测做对比的因素也增加了，反演原理没有改变而计算则会复杂得多。

### 七、研究地球动力学的学术意义和社会意义

从学术上来讲，地球动力学不但帮助我们弄清楚地球表面构造的形成和演化以及地球内部的结构和运动，还将有助于整个地球以至太阳系的形成和演化过程的认识。

从社会意义来说，如上所说它帮助弄清楚地质构造运动的过程，它们也就是矿产、资源富集、贮存的构造条件。构造运动的驱动力同样也是矿液运行的动力，地下流体运动问题正是地球动力学研究的一个重要方面。

地震是地质构造运动中的一幕，火山是地球内部运动的外部表现，它们都是严重的地质灾害。另外如青藏公路上的大型滑坡，实际上也是地质构造运动的表现。在大型工程建设项目中，如三峡工程的巨型边坡、大型地下厂房的修建都需要考虑那个地区现在作用着的地应力，在挖走原有的岩石以后，这些地应力将起什么作用等乃是工程人员十分关心的问题，把地质构造的动力学过程和正在进行的地质运动的驱动力弄清楚，将从基础上解决这些问题。

以上我们没有考虑固体地球和大气层、生物层、海洋圈层之间的相互作用，它们是环境科学十分关心的问题。地球动力学应该并且可以在这里发挥重要作用。

### 八、有待深入研究的一些问题

如上所述，地球动力学牵涉的面很广，要认真解决需要跨多门学科进行联合研究。以下仅从力学角度提出一些有待深入研究的问题，它们同样是需要和其它学科一起研究才能解决的。

1. 板块运动和构造运动的机制和驱动力。
2. 地球内部地幔运动及其与板块运动的关系。
3. 地壳中水平运动与垂直运动的关系。
4. 地球介质的流变性质、变形的传播及蠕变破坏。
5. 地震机制和地震预报。
6. 地球介质中的流体运行及其与成矿的关系。
7. 非线性反演理论及解的优化。

# 我国环境保护的基本思路 及首批跨世纪绿色工程

刘鸿亮

中国环境科学研究院

刘鸿亮 环境工程专家。1932年6月20日生于辽宁大连。1954年毕业于清华大学。历任清华大学土木与环境工程系副主任、中国环境科学研究院院长等职。现任中国环境科学研究院教授、中国环境科学学会常务理事。1994年被选聘为中国工程院院士。主要从事水环境及水治理等方面的教学与研究。

## 一、我国环境保护的基本思路

1996年7月份召开的第四次全国环境保护会议进一步明确了我国环境保护的基本思路，落实《国民经济和社会发展的“九五”计划和2010年远景目标纲要》（以下简称纲要）提出的环保目标，促进我国经济和社会沿着可持续发展的道路迈向21世纪。

### （一）实行可持续发展战略

“在社会主义现代化建设中，必须把贯彻实施可持续发展战略始终作为一件大事来抓。可持续发展的思想最早源于环境保护，现在已成为世界许多国家指导经济社会发展的战略”。“任何地方经济发展都要注重提高质量和效益，注重优化结构，都要坚持以生态环境的良性循环为基础，这样的发展才是健康和可持续的”。江泽民主席的这段话把发展与环境的关系已说得很清楚了，但是，中国的现实与江主席的要求还相差甚远，我国经济的发展基本上仍然沿用以大量消耗资源和粗放经营为特征的传统发展模式，这种模式不仅造成对环境的极大损害，而且使发展难以持续。“粗放式的增长方式是造成环境污染和生态破坏的根本原因”——李鹏。“那种以盲目扩大投资规模、乱铺摊子为基础的经济增长，增长速度越快，资源浪费就越大，环境污染和生态破坏就越严重，发展的持续能力就越低。这是不可取的”——江泽民。

国家领导对解决中国的环境与发展问题，其基本思路是非常清晰的，它与我国经济改革的基本思路是一致的，经济体制的转变有利于提高经济整体素质和生产要素的配置效率，引导产业结构优化和生产力合理布局，减轻和消除结构性污染和生态破坏；经济增长方式的转变有利于提高结构优化效益、规模经济效益和科技进步效益，提高能源资源利用效益，减少污染物排放量。经济改革中的两个转变，为我国在发展经济中保护好生态环境提供了可靠的保障。坚持可持续发展战略就要在环境保护工作中做到：

1. 坚持经济建设、城乡建设、环境建设同步规划、同步实施、同步发展的三同步方针；

2. 坚持环境与发展综合决策。“在制定重大经济和社会政策、规划重要资源开发和确定重要项目时，必须从促进发展与保护环境相统一的角度审视利弊，并提出相应对策。这样才能从源头上防止环境污染的生态破坏”

——江泽民。在制定区域开发，城市发展、行业发展规划或调整生产力布局、产业产品结构调整等重大决策中，必须充分考虑环境的承载力，加快建立环境与发展综合决策机制，逐步使之规范化和法制化；

### 3. 加强宏观调控增加环保投入

要遏制我国环境状况继续恶化的趋势，归根到底还得增加环保投入：

污染治理投入/国民生产总值=A，我国“八五”期间 A=0.7%。

根据国际实践经验表明：A=1-1.5%可以控制污染；A=2-3%可以逐步改善环境状况。建议 A 值每年增加 0.1 个百分点，1995 年至 2000 年 A 值可达 1 至 1.5%；2000 年至 2010 年可达到 1.5 至 2.5%，我国要经过 20—30 年的努力，才能逐步改善环境面貌，使可持续发展战略得到成效。

### （二）遏制环境恶化趋势

应该看到，认识与现实有相当大的反差，我国国民生产总值，近十多年来以每年 10%左右的速度持续增长，而环境保护的投入徘徊在 0.7%左右，致使全国环境形势日趋严峻。以城市为中心的环境污染正在加剧并向农村蔓延，生态破坏的范围在扩大，程度在加重，局部地区的环境污染和生态破坏已成为制约当地经济发展，影响改革开放和社会稳定，威胁人民健康的重要因素，为了遏制环境恶化的趋势：

1. 国务院通过并发表的《关于环境保护若干问题的决定》要求到 2000 年全国所有的工业产业污染源排放污染物要达到国家和地方规定的标准。

2. 经过人大批准的“纲要”提出的《污染物排放总量控制计划》是确保实现“九五”环保目标的有力举措，“九五”期间先对那些环境危害大，经采取措施可以有效控制的重点污染物进行总量控制，即在达标排放条件下，所增加的污染物排放总量，要在本地企业或本地区等量削减，从而控制住本地区污染负荷的增加。

3. 拓宽环保资金渠道。在“九五”期间各省市要按照国务院《决定》的要求，切实增加环保投入，逐步提高 A 值，并建立相应的考核检查制度。其中基础设施由城市政府组织建设，设施运行费由污染者合理负担；工业污染防治资金按照“污染者付费”原则，主要由企业负担；按照“开发者保护、破坏者恢复”原则，生态破坏的恢复应由开发者和破坏者负担。要继续坚持并完善排污收费制度，切实做到依法、足额、全面征收排污费。要按照“高于污染治理成本”的原则，逐步提高现行排污收费标准。在实行污染物排放总量控制地区，要按照排污总量征收排污费。在部分地区开征二氧化硫排污费和生态环境补偿费。生活污水集中处理城市，向排污者合理收取污水处理费。

### 4. 实行环境质量行政领导负责制

国务院《决定》中的第一条就是实行环境行政领导负责制。要根据污染物排放总量控制和 2000 年工业污染源达标排放等要求制定本辖区切实控制污染、改善环境质量的具体目标和措施，并报上级备案。要将辖区环境质量作为考核政府主要领导人工作的重要内容。

5. 实施《跨世纪绿色工程规划》，在“九五”期间和下世纪初 10 年内分三期实施。第一期工程对 3000 多个项目筛选后确定重点治理“三河”（淮河、辽河、海河）、三湖（滇池、太湖、巢湖）的水污染及酸雨、二氧化硫控制区的大气污染，同时还包括各地区和有关行业确定的污染治理项目。要把上述项目纳入本地区“九五”国民经济和社会发展规划，在资金上优先安排。

## 二、我国环境状况

在“八五”期间中央批准《中国环境与发展十大对策》、国务院发布了《中国 21 世纪议程》，强调实施可持续发展战略，促使环保工作取得了较大进展。工业废水达标率 43%，工业废气消烟除尘率 64%，城市污水处理率 18%，城市垃圾处理率 33%，城市燃气化率 68%，城市绿化覆盖率 23.8%。但是，当前全国环境形势日趋严峻。

1. 大气污染日益加剧，全国 500 多座城市，大气质量达到一级标准的不到 1%，北京、沈阳、西安、上海、广州名列世界十大污染最严重的城市。二氧化硫年排放量约 2300 万吨，超过美国现在的水平（1600 万吨）。酸雨面积急剧扩大，已占国土面积 40%，由西南、华南蔓延至华中、华东、东北。

2. 水域污染问题突出。全国废水年排放量 360 亿吨，其中城市污水 80% 以上未经处理排入江河，城市河段水质超过了 3 类标准的已占 78%，湖泊、水库富营养化日趋严重，50% 以上的城市地下水受到污染，全国有七至八亿人饮用污染超标水。

3. 垃圾围城现象普遍。全国固体废弃物年产生约 6.2 亿吨，累积堆存量 60 亿吨，占地 30 多万亩。有毒、有害废物约占 5%，安全处置率很低，威胁性很大。生活垃圾年产生量 1.46 亿吨，大部分未经处理随意堆积。

4. 噪声污染普遍超标，全国有三分之一城市居民生活在噪声超标的环境中，城市交通大部分超过 70 分贝限值，生活噪声大部分超过 55 分贝限值。

5. 乡镇企业污染泛滥是我国环境继续恶化的一个重要根源。

根据上述污染现状预测到 2010 年我国主要污染物排放量为：

城市生活污水排放量到 2000 年为 420 亿吨，到 2010 年为 560 亿吨；城市垃圾年排放到 2000 年为 2.3 亿吨，到 2010 年为 6 亿吨；烟尘年排放量到 2000 年为 2200 万吨，到 2010 年为 3000 万吨；二氧化硫年排放量到 2000 年为 2700 万吨，2010 年为 3300 万吨。

计划到 2000 年环境目标为：全国所有工业污染源达标排放。工业废水处理率达到 84%，城市污水集中处理率达到 25%（英国为 100%，美国为 89%），二氧化硫控制在 2300 万吨，工业粉尘年排放量控制在 700 万吨，工业废气处理率达到 90%，工业固体废物综合利用率达到 50%，主要有害废物无害化处理率达到 20%，绿化覆盖率达到 27%，森林覆盖率达到 15.5%。

## 三、《跨世纪绿色工程规划》中的首期重要工程

### （一）淮河

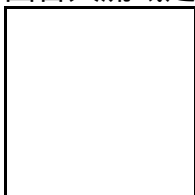
#### 1. 淮河流域概况

淮河流域地跨河南、安徽、江苏、山东及湖北五省，所占面积依次为 87960、66940、50128、1163Km<sup>2</sup>。人口大于 20 万的城市有 24 个（郑州、徐州、淮南、开封、蚌埠、扬州、许昌等）。流域内总人口 1.5 亿人（1993 年）占全国 1/8。人口密度达 561 人/Km<sup>2</sup>，居七大流域之首。近十年来依托于农副产品加工的造纸、酿酒等轻工业发展十分迅速，而且以乡镇、村办企业为主，这些小造纸、小酿酒企业，工艺落后，管理水平低，经济效益差，耗水量大、排污量多，目前这两个行业的年废水量达 8.26 亿吨，约占全流域的 30%，年 COD 排放量达到 66 万吨，占全流域 44%，这种畸形的工业结构是造成淮河流域水污染的重要原因。

根据淮河流域水系特征，行政区划和保护目标，共划分七大控制区，各控制区的保护目标见表 1。

## 2. 污染现状

淮河流域水污染已成为一大公害，由水污染引起的饮水告急，人畜中毒、危害健康、死鱼死鸭、作物枯死、工厂停工等事件逐年增多，沿淮河 1.5 亿人口赖以生存的环境日益脆弱，造成惨重的经济损失和很大的社会不安定，并制约着该流域的经济发展。全流域自 1978 年至 1992 年发生较大的水污染事故有 160 起，造成直接经济损失 1.2 亿元以上，间接损失难以估计，居全国各大流域之首。



1) 淮河流域已有 2/3 河段无使用功能，即超过 V 类标准的水域为丧失使用功能水域。

2) 2000 多万人口的饮用水源遭到污染，河流两岸居民的饮水发生困难，一些地区癌症、肠胃病等发病率不断上升。

3) 跨省界断面水质 70% 属无使用功能，上下游污染十分严重。

4) 水污染对工农业生产造成严重损失，工厂设施腐蚀加速，产品质量下降，甚至迫使工厂停产。农田用河水灌溉农作物污染物含量严重超标，不少地区农作物因水质恶劣而减产，甚至绝收。

淮河流域水污染日趋严重的原因：

1) 乡镇企业发展迅猛，工艺技术设备落后；

2) 工业结构不合理，高污染低产出行业畸形发展；

3) 城市化速度较快，排污量过大；

4) 环境治理资金欠账大；

5) 季节性缺水严重；

6) 流域管理薄弱，跨省界断面难于管理。

## 3. 国家下决心治理淮河流域水污染

1994 年 5 月全国人大和国务院专门组织环保执法队伍到流域上游的河南省进行环保执法检查并在安徽蚌埠召开了会议，专门研究淮河流域水污染防治问题，宋健同志到会明确提出使淮河到 2000 年水质变清。为了实现国家提出的治理目标，拟采取的主要措施有：

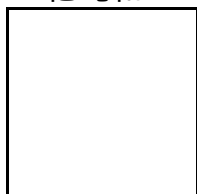
1) 强化淮河流域领导小组，加强流域水环境管理；2) 制定《淮河流域水污染防治暂行条例》，对淮河流域工业污染源 1997 年全部达标排放，否则关停并转；3) 编制淮河流域水污染防治规划，划定功能分区，制定省界断面水质标准，对全流域实行总量控制；4) 要严格控制新上带有化学制浆的小造纸、小化工、小酿造、小制革、小电镀、小印染等五小企业，严格限制其它污染严重项目，对新扩改项目要加强环境评价，做到增产不增污，关闭 5000 吨以下小造纸厂化学制浆工段；5) 通过严格执行产业政策和关停禁改转措施逐步调整现行不合理的经济结构，发展无污染、少污染节水工业；6) 实施清洁生产战略，减少排污量；7) 筛选一批工业污染源，通过限期治理 1997 年前先期达标排放；8) 重点城市和一些中小县城建立污水处理厂；9) 集中力

量通过打井和建立备用水源的办法，解决沿岸人民的饮水问题；10）制定闸坝调控方案，通过闸坝合理调控，防止污水集中下泄，造成污染事故；11）建立完善的环境监测系统，信息传递系统，事故应急反馈系统；12）建立淮河流域地理信息系统。

上述措施的实施，通过估算，需要 275 亿元人民币。

#### 4. 淮河流域 2000 年排污总量控制目标

经 1993 年的大规模实测入淮 593 个排放口的废水量和 COD 排放量分别为 36 亿吨和 150 万吨/年，平均浓度为 415mg/L，见表 2。



到 1997 年实现工业污染源达标排放，初步估算可削减 COD 约 60 万吨，所有新工业污染源均不得新增排污量，全流域允许排污总量为 89 万吨，见表 3。

根据淮河流域水污染防治计划最大允许排放总量分配到四省，由各省将排污指标分解到每一排放口，通过各排放口监测数据，制定污染物排放许可证的发放管理办法，建立检查核定制度。

淮河流域 2000 年排污总量控制以淮河流域水质还清为目标，确定枯水期干、支流不同使用功能下各河段的 COD 水质指标，取 90% 保证率最枯月平均流量为设计流量，计算不同水域的环境容量。根据接纳污水水域的环境容量确定全流域 COD 年最大允许排污总量 36.8 万吨，见表 4。我国现阶段污水处理厂建设费加的排水管网费，约 2500 元/吨水，按此基础测算，淮河流域 1100 吨/日污水全部进行处理，2000 年前需投资 275 亿元，才有可能建成所需要的污水处理厂。由于污染物去除费用随去除率的提高呈指数形式增长，因此，确定最佳削减率和优先项目，以便慎之又慎地使用投资。为此，应安排科技攻关。在建立水质监测系统、事故预警系统、闸坝调控系统的同时，制定淮河流域综合决策模型，总量控制审计技术，水质、水量、气象一体化模拟预测技术，污水团传输、演进模拟预测技术，遥感地理信息系统应用技术。同时，对淮河流域造纸、酿酒、化肥、制革等行业的污染有效处理技术；适合乡镇企业和预处理要求的实用技术；企业联片治理或与城市污水联合处理的各项技术等均需尽快解决。

#### 5. 淮河流域优先控制小区的水污染防治备选项目

淮河水污染防治的优先目标是实现淮河干流枯水期地面水集中饮用水源地安全供水，防止平水期主要来自沙颍河的污水团形成危害，改善洪泽湖、南四湖和苏鲁边界的水质，为此共筛选出 32 个优先控制断面，确定了 32 个重点控制小区，位于这些控制小区的治理项目对解决淮河水污染问题的环境效益最突出，汇集可兴建的水污染防治项目共 114 项，作为优先备选项目，力争早日见效。

##### （二）太湖及滇池

#### 1. 太湖

太湖分属三省一市，其中江苏省占 53%，浙江省占 33.4%，上海市占 13.5%，安徽省占 0.1%。流域内有大中城市 38 座，总人口 3400 万左右，

人口密度 920 人/km<sup>2</sup>，是全国人口最密集地区之一，也是经济最发展地区之一。

太湖的主要环境为富营养化。总氮、总磷等营养物质含量已超过富营养化浓度（0.2mg/L 和 0.02mg/L），在适宜的气候和水动力学等条件下，使得水体中藻类大量繁殖，造成湖泊富营养化。“水华”频繁发生以及藻类疯长事件的发生，都表明太湖富营养化问题已十分严重。太湖富营养化已引起了污染事故，如 1990 年 7 月 5 日至 29 日历时 25 天，在无锡一侧的梅梁湖区大面积蓝藻暴发约 100km<sup>2</sup>，致使无锡市自来水日均减产 5 万吨，116 家工厂相继被迫停产和减产，直接经济损失 1.3 亿元，死鱼 8.9 万斤。太湖富营养化已成为影响区域人民生活和经济发展的主要环境。有关太湖的治理，在国家环保局的统一布署下，三省一市环保机构正在积极筹备中。

## 2. 滇池

滇池流域位于云贵高原中部，地处长江、珠江和红河三大水系分水岭地带，流域面积 2920km<sup>2</sup>，滇池面积 300km<sup>2</sup>。

滇池污染比太湖严重，而滇池中的草海污染更为严重，水体超过五类水质，已失去水体功能。滇池草海的主要环境问题有：1. 有机污染及富营养化严重并仍呈发展趋势；2. 内源污染突出；3. 水葫芦疯长；4. 生物多样性丢失；5. 沼泽化加速；6. 草海是整个滇池生态系统中的脆弱带。

鉴于滇池水系是昆明市地区的唯一水源，草海的严重污染已波及到整个滇池的水质，因此，省市决心治理滇池，重点整治草海。

计划在“九五”期间使滇池治理初见成效，到 2010 年使滇池水质开始变清，总投资约 30 亿元人民币。

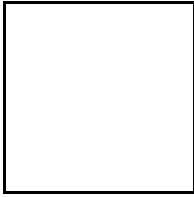
## （三）酸雨问题

酸沉降，更为广泛采用的科学术语酸雨，它的危害是当前世界重大环境问题之一。近 20 年来已成为世界公众、科学工作者和政策决策人关注的焦点。在欧洲、北美和亚洲相继出现了酸雨区。

亚洲是工业发展较快的地区，特别是东亚，由于酸性气体的排放量迅速增加，一些地区出现了酸雨，其中除中国大陆和台湾外，日本、韩国、马来西亚、新加坡、泰国、印尼等相继也出现了程度不同的酸性降水。但亚洲的酸雨主要在中国。我国从“六五”“七五”“八五”的研究证实，酸性物质的沉降已经造成了很大的经济损失，并且证实我国酸雨是世界三大酸雨区中唯一的降水酸度仍在升高，酸雨面积迅速扩大的地区。

### 1. 我国酸雨状况及发展趋势

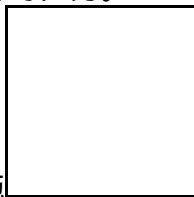
1993 年我国 271 个测站中选出 81 个分布在全国的代表性的测点同步观测得到的降水 pH 和电导率年均值进行分析，其结果是 81 个站中有 49 个站的降水属于酸性降水（pH < 5.6），占 61%，具体分布如表 5。从表 5 可知，pH 年增值小于 4.0 的严重酸性降雨区分布在长江以南，pH = 4.0 - 4.5 酸雨区已开始向长江以北发展，4.5 < pH < 5.6 一般酸雨区则扩展到华东、华北和东北广大地区，pH = 5.6 的等值线覆盖了全国约 40% 的面积，长江以南较重的酸雨区联成一片，西北和内蒙广大地区由于气候干旱，又是碱性土壤，那里的降水总量具有很高的 pH 值。



我国的酸雨面积，可以与欧洲和北美的酸雨区比拟，但欧洲 pH 值最低的只有一个点为 4.1，三个点为 4.2，我国则出现年均值小于 4.0 的一些地区，美国 pH 最低值为 4.2，也高于我国最低值，说明我国降水酸性最强地区的降水酸度高于美国，亚洲降水酸性比较强地区除中国外，还有日本，日本单个站点降水年均 pH 值最低为 4.5，此值比我国最低值高出 0.5 个 pH 单位以上，韩国酸雨的面积和降水酸度，在我国和日本之后，韩国降水 pH 值年均值却大于 5。

为了估计我国酸雨发展趋势，用线性模式初步估算了  $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_x$  与  $\text{NH}_3$  自 1950 年以来历年的排放量（见表 6），从表 6 可知，三种气体的年排放都在逐年增长（1960 年除外），但其增长速度各不相同，大气酸化发生的原因在于  $\text{SO}_2 + \text{NO}_x / \text{NH}_3$  的比值不断增高，此比值代表了我国酸雨发展的趋势。

就全国而言，60 年代以前我国基本不存在酸性降水，最多也只限于极个别的小地区轻度酸性降水，70 年代开始，川、黔、湘等某些地区出现了酸雨，根据 1986 年至 1993 年研究，我国降水  $\text{H}^+$  浓度平均升高 3—10 倍，酸雨面积继续向西、向北扩大，1993 年比 1986 年全国酸雨面积扩大了约 100 万  $\text{km}^2$ ，目前年均降水 pH 值低于 5.6 酸雨临界值的地区已占全国面积的 40% 左右。随着我国未来社会经济发展与能源需求，我国因燃煤排放的  $\text{SO}_2$  量将急剧增加，据统计，1990 年全国煤炭消耗量 10.52 亿吨， $\text{SO}_2$  排放量为 1495 万吨（不含乡镇企业），到 1995 年煤炭消耗量增至 12.8 亿吨， $\text{SO}_2$  排放量已达 2341 万吨（含乡镇企业），超过欧洲和美洲，居世界首位。到 2000 年我国煤炭消耗量增长到 14.5 亿吨， $\text{SO}_2$  年排放量将达 2730 万吨，目前已有 62.3% 重点城市  $\text{SO}_2$  年平均浓度超过国家二级标准，如不采取重大措施，大幅度降低  $\text{SO}_2$  和  $\text{NO}_x$  排放量，我国未来的酸沉降污染将是极为严重的，因此控制酸雨的污染是一项艰难而长期的任务。



## 2. 重大控制措施

为缓解并逐步控制日益严重的酸雨及  $\text{SO}_2$  污染，根据 1995 年通过的《中华人民共和国大气污染防治法》第 27 条规定，对已经产生、可能产生酸雨的地区或者其他二氧化硫污染严重的地区，划定为酸雨控制区或者  $\text{SO}_2$  污染控制区（简称两控区）。在两控区内切实采取严格控制  $\text{SO}_2$  排放的措施，同时规定必要的配套政策。

### 1) 两控区

#### 酸雨控制区

划分的主要原则是：现状监测降水 pH 4.5，且沉降是超过临界负荷的区域，原则上以省为划分单元。

具体的是：上海、江苏、安徽、浙江、福建、江西、湖北、湖南、广东、广西和贵州全境（约 158.6 万  $\text{km}^2$ ），四川省的绵阳、德阳、成都、雅安、宜宾以东地区（约 22 万  $\text{km}^2$ ，占全省面积 56 万  $\text{km}^2$  的 39%）；云南省的楚雄彝族自治州、玉溪地区、红河哈尼族彝族自治州以东地区（大约 12.5 万  $\text{km}^2$ ，占全省面积 38 万  $\text{km}^2$  的 33%）。酸雨控制区面积约占国土面积的 20% 左右，包括 202 个城市，占全国 640 个城市的 31.6%。

#### 二氧化硫污染控制区

划分主要原则是：将“八五”期间  $\text{SO}_2$  年平均浓度超过国家二级标准的城市划为  $\text{SO}_2$  污染控制区，以县级以上城市为基本划分单元，对  $\text{SO}_2$  平均浓度超国家二级标准的地级以上城市数目占全省地级以上城市 70% 以上省份，将全省划分为  $\text{SO}_2$  控制区。

具体的是：辽宁、河北、河南、山西、陕西、山东六省和北京、天津两市境内所有县级以上的城市，内蒙古自治区的呼和浩特市、包头市、赤峰市、乌海市、通辽市、集宁市、东胜市和临河市；吉林省的长春市、吉林市、白山市、延吉市、四平市和通化市；黑龙江省的双鸭市；甘肃省兰州市、白银市、金昌市、平凉市和张掖市；宁夏自治区的银川市和石嘴山市；新疆自治区乌鲁木齐市。

#### 2) 政策与措施

在两控区内实行  $\text{SO}_2$  排放总量控制，对  $\text{SO}_2$  排放的单位实施  $\text{SO}_2$  排放总量核定制度。

按照国函 [1996] 24 号文件规定，将  $\text{SO}_2$  排污收费试点地区由两省九市扩大到两控区。达不到排放要求的按照国发 [1982] 21 号文件规定，加收  $\text{SO}_2$  排污费。

在两控区对  $\text{SO}_2$  排放可实行排污交易政策。

根据污染物排放总量控制要求划定煤炭的硫份、灰份限值。燃用超过限值煤炭的，必须采取有效措施控制  $\text{SO}_2$  排放，并采用高效除尘器。

实施煤炭按所含灰份、硫份和热值定价，优质优价。

两控区内配套脱硫装置的火电厂，其脱硫成本摊入电价。

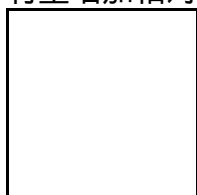
#### （四）汽车排气污染问题

交通带来的污染问题是环境问题之一，任何一个国家的发展过程中，交通运输条件是主要的基础设施，而支持这些基础设施的则是交通工业，尤其是汽车工业的发展。中国正大力发展汽车工业以适应经济社会发展的需要，由此将带来污染及一系列城市环境问题。

##### 1. 汽车污染现状

##### 1) 汽车保有量

自 80 年代以来，中国汽车保有量迅速增长，平均增长率达 13%，截至 1994 年，我国汽车保有量为 945 万辆，摩托车为 1500 万辆，见表 7，汽车保有量增加相对集中在一些大型和特大型城市。



到 1993 年，汽车保有量北京 72 万辆，上海 31 万辆，天津 40 万，广州 46 万辆。目前中国轿车保有量水平很低，平均每 1000 人 1.2 辆，处于世界最低水平，美国 1.5 人 1 辆，西欧平均 2 人 1 辆，日本平均 3.5 人一辆，巴西、墨西哥、韩国、马来西亚等国平均 10—20 人一辆，世界轿车保有量 5 亿辆，平均每 11 人一辆。

## 2) 油品消耗

油品消耗随着汽车保有量的增加也迅速增长，中国目前国产车油耗与国外尚有较大差距，如轻型载货汽车整车百公里油耗，国产车为 10—14 升，国外为 7—12 升，汽油油耗比国外多 23%，中型载货车整车百公里油耗是国外的 1.12—1.3 倍。1993 年我国汽车用汽油 2800 万吨，柴油车用柴油 700 万吨，共计汽车用油料 3500 万吨。

## 3) 污染现状

目前国产轿车的排气污染控制水平仅相当于国外 70 年代末期水平，约比目前日本生产的轿车的排放量高 10 - 20 倍，加之油耗较高，致使汽车污染问题严重。目前汽车 CO 排放量已接近 1000 万吨，NO<sub>x</sub> 年排放量也达 100 万吨以上，由于大量汽车污染物集中在城市排放，以北京为例，CO 有 63% 来自于汽车污染，37% 来自于固定源污染，NO<sub>x</sub> 有 22% 来自于汽车污染，78% 来自固定源污染，HC 有 73% 来自汽车污染，27% 来自固定源污染；广州市机动车的排放 CO 和 NO<sub>x</sub> 分别占大气污染总量的 70% 和 43%。

在许多城市，交通干道和主要路口 CO 浓度超标，NO<sub>x</sub> 浓度在某些城市也长期超标，某些城市还观测到高浓度臭氧，例如北京市 1988 年统计，三环路内 30 条街道中心和人行道大气中的 CO 均 100% 超标，夏季 69 天臭氧小时浓度超标达 530 次，最高浓度值为 394 微克/m<sup>3</sup>，大大超标，潜在着光化学烟雾发生的危险，表 8 中给出了北京市臭氧环境浓度超标历年发展情况，从表可知，1993 年臭氧的平均超标率已经远高于 1986 年和 1987 年。天津市交通干道上 CO 日均值全年超标，长沙市交通干道上中心点 CO 超标 4 倍，年超标率为 40%，深圳市的 NO<sub>x</sub> 已成为首要大气污染物。

## 2. 汽车污染发展趋势

### 1) 汽车保有量

根据预测中国汽车保有量 2000 年约为 1800 - 2100 万辆，2010 年为 4400—5000 万辆，将位于世界前列，摩托车保有量 2000 年和 2010 年分别为 4500 万辆和 1 亿辆。

### 2) 油品消耗

根据估算，2000 年和 2010 年汽车耗油量分别为 5600 万吨和 1.05 亿吨。

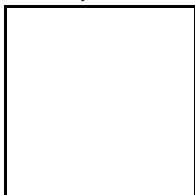
### 3) 汽车污染预测

根据预测，我国 2000 年及 2010 年汽车污染物排放量列于表 9 中，2000 年 NO<sub>x</sub>、CO 排放量分别为 90 万吨和 874 万吨，2010 年分别为 150 万吨和 1140 万吨。



由于汽车保有量增长集中于城市，因此汽车污染物排放量将有更大幅度

增长，例如北京市见表 10。



所以从某些城市来看，随着汽车数量的增长和能源结构的调整，流动源污染将成为城市主要污染方式，如不及时加以控制，其污染增长速度不可遏制，尽管目前汽车保有量不多，但由于单车排放量高、路况差，使机动车总排放量仍保持较高水平。

### 3. 防治对策

- 1) 实施车辆定型、生产、进口、使用的全过程管理；
- 2) 建立实施国家机动车排放标准的装备监测网络，为防治机动车污染提出对策；
- 3) 通过制订严格的车辆排放标准，降低每一辆车的排放量，以控制总污染量的增长；
- 4) 提高油质量，尽快向无铅化、高标准化方向过渡；
- 5) 执行车辆报废制度，加速对旧车的淘汰，以改善环境质量；
- 6) 大力发展交通公路建设，改善城市交通拥挤状况，提高运输效率；
- 7) 完善立法工作，加大执法力度，严格实施环保法规。

## 可持续发展与 广东省的资源环境问题

孙大中

中国科学院广州地球化学研究所

孙大中 地质学家。1932年6月20日出生。山东威海人。1955年毕业于北京地质学院。中国科学院广州地球化学研究所研究员。1991年当选为中国科学院院士（学部委员）。长期从事前寒武纪地质、地球化学等研究。近几年来，结合社会经济发展需要，开展资源、环境的可持续发展方面的研究。

可持续发展是一种新的发展观。二次世界大战后，西方工业化国家经济迅猛发展，矿物资源和能源消耗量比战前增加了30倍，工业生产增长了50倍。这种单纯追求经济增长的发展战略导致了世界人口膨胀，资源日益匮乏、环境污染严重和生态系统失衡等恶果，威胁着人类的生存和发展。可持续发展的思想是80年代初提出来的。1987年《我们共同的未来》一书中将可持续发展概念阐述为：“科学技术向我们提供了更深刻认识自然系统的潜力，人们有能力使人类的事务同自然规律协调并在此过程中走向繁荣昌盛。人们可以期待一个经济发展新时代的到来，这一新时代必须建立在使资源环境条件得以持续和发展的基础上，既满足当代人的需要，又不对后代人满足其需要的能力构成危害”。后来一些文章只引用其最后两句话来概括可持续发展概念是不够全面的。上述概念中，不但表达了可持续发展最本质的创新是改变过去人与自然相对立的关系为协调关系，同时还提出了资源环境的持续发展是可持续发展的基础；科学技术是发挥自然潜力和协调自然、社会、经济之间关系的重要支撑。

可持续发展的含义可以理解为：以保护自然为基础、发展经济为任务和提高人们生活质量的的社会进步为目的。自然、经济和社会可持续发展为三个子系统，三者相互关联协调构成一个巨系统。该系统是开放的、动态的和复杂的，也应该是可调的、增益的和趋于稳定的。在科学研究中常根据人口、资源、环境和发展，或人口、资源、环境、社会和经济等系统，建立一系列的指标体系，使用地理信息系统的手段来对系统进行评估和预测研究，以使可持续发展具有可操作性。

可持续发展的关键是资源的可持续性。资源是当今衡量国家和地区发展可持续性的重要标尺。广义的资源可以划分为自然资源（土地资源、水资源、矿产资源、能源、海洋资源和生物资源等）、经济资源（资金、原材料、机器、设施和交通等）和社会资源（人力、科技、文化、信息、管理、法规、道德等等），它们分别是前述自然、经济和社会可持续发展三个子系统的重要组成部分。考虑到近代的发展研究中强调人力资源的重要性，也有人将人力资源从社会资源中分出。有的国家地大物博、自然资源丰富，其发展的可持续性高（如加拿大、澳大利亚等）；也有的国家自然资源并不丰富，由于对人力资源和经济资源的高效开发和利用，同样也可以获得较好的可持续发展。

展效果（如日本和瑞士）。所以因地制宜地合理利用资源是可持续发展研究中的重要组成部分。此外，近年来人们逐渐认识到自然资源利用不合理是造成环境污染的重要祸根，因此，应当把资源和环境作为一个统一体来研究，逐步改变过去环境治理偏重于末端处理，治标不治本的状况，实现在生产和生活中使用资源从源头到末端的全过程控制，以达到最有效的利用资源和降低废物排放的目的。这实际上也是生产方式和生活方式的改变。从这些意义来讲，可持续发展就是要对资源和环境进行科学的管理，使资源的消耗和对环境的破坏控制在人类生态系统可持续的限度之内，从而使可持续发展的巨系统协调持续发展。

广东省资源环境条件在全国各省份中应该是较好的。但一些重要的资源人均量不足或分布不均、利用不好或人为破坏严重。根据 1993 年和 1994 年的资料，土地资源中耕地面积人均不足 0.6 亩，是全国人均量的 1/2，世界人均量的 1/10，加之水土流失和非农业占用使耕地减少，一定程度上影响了农业的发展。广东水资源占世界人均量的 2/3，且时空分布不均，东西两翼相对缺水，水质性缺水已初露端倪。林地资源人均 2.1 亩，高于全国水平，但成材林少，建设用木材靠外来供应。能源资源中，本省煤炭年产量不足全省能源消耗量的 5%；矿产资源比较丰富，其中黄铁矿、铅、金、银、铀和稀土居全国前列，但资源潜力不够清楚，开采浪费大。就海洋资源来说，广东是大省，海岸线长，港口多，盐业资源、油气资源、水产养殖等潜力大，但目前开发不够。总之，资源现状不够理想，有些资源如海洋资源和矿产资源等潜力还有待研究与开发。

改革开放以来，随着经济的高速增长，环境压力日趋严重。1993 年工业废水的处理率 < 60%，生活废水基本未处理排放，造成江河湖泊有较大范围的污染。全省工业废气排放总量增长，珠江三角洲酸雨频率达 50% 以上，机动车排放废气问题在广州、深圳等市相当严重。固体废弃物方面，仅全省城镇人均日产垃圾就近 1 公斤，且绝大部分未经处理。更为严重的是灾害频发，损失重大，仅 1994 年水、风、旱灾的经济损失就达 264 亿元。环境问题虽然已得到领导、群众和有关部门的关注，对环境污染的治理也有了安排，但任务仍然是相当艰巨的。因此，如何在生产和生活中节能降耗，实施清洁生产，全过程减少废物排放，更应引起高度重视。

应当看到，广东省“八五”期间 GDP 总量以年均 19% 的速度增长，预计今年可实现比改革开放前翻三番的目标。社会和经济的高速发展对实施可持续发展战略提供了十分有利的基本条件。广东省政府在“八五”初期就提出“经济要发展，环境要改善”，并相应制定了一些环境保护方面的法规，基本上避免了随着经济快速增长而出现环境进一步迅速恶化的状况。1995 年工业废水处理率和工业固体废弃物综合利用率也有所提高，城市环境治理取得了显著成绩。根据“九五”规划，到 2000 年环境保护主要指标控制在 90 年代初的水平，环境保护得到了应有的重视。从可持续发展巨系统的动态变化来看，由于广东的工业化和城市化发展迅猛，城市不断扩展，人口日增，人均资源减少，不可再生资源渐减，有的甚至趋于枯竭；可再生资源开发利用不尽合理也造成资源质量下降和资源功能退化。因此资源短缺的趋势应引起警惕，这很可能将是制约广东省社会经济发展的“瓶颈”，是可持续发展巨系统协调发展的难点所在。

解决广东省自然资源问题，除了严格控制人口增长率，适度限制城镇发

展规模等之外，可从以下三方面入手：一是依靠科技进步，挖掘资源潜力和不断开发新资源。重视资源-环境一体化研究，在资源开发利用的全过程注意资源的节约和综合利用，实行清洁生产，降低三废排放，减少环境污染，这实际上就是一种集约化生产；二是按照可持续发展概念转变“资源观”，改变自然资源低价或无价为资源（和环境）有偿使用和占用，以经济法则和有序管理防止资源的滥用及由此造成的环境破坏；三是从广东人口、资源和环境的实际出发，建立生产集约型-资源节约型经济体系，这将是争创发展新优势，促进社会经济持续发展的有效选择，其内容包括：建立节能、节约原材料、重效益的工业体系；建立节地、节水、节能、重效益的农业体系；建立节能、节时、重效益的综合运输体系；在保证人民生活质量的前提下，提倡适度消费、勤俭节约的生活方式和建立相应的服务体系；逐步实行分配合理、注重社会效益的社会保障体系。

总之，依靠科技进步，提高管理水平，发挥经济实力，挖掘资源潜力，运用市场机制、经济手段和改变生产方式及加速资源基础转换等促进资源合理和永续利用，建立生产集约型-资源节约型经济体系有益于广东省可持续发展战略的实施和现代化的早日实现。

# 青藏高原地质构造特点 和隆升机理

李廷栋

地质矿产部科技高咨中心

李廷栋 区域地质学家。1930 年 10 月 7 日生于河北栾城。1953 年毕业于北京地质学院。地质矿产部科学技术高级顾问，长春地质学院名誉院长，全国政协委员，国际岩石圈喜马拉雅协调委员会委员。1993 年当选为中国科学院院士（学部委员）。长期从事区域地质研究和地质编图，与同行一起在大兴安岭北部首次发现前震旦系热河动物群和得尔布干大断裂，建立了地层系统，总结了地质构造演化规律；总结了我国及亚洲地质特征；提出青藏高原“陆内俯冲-地壳分层加厚-重力均衡调整”的隆升模式，证实高原大幅度快速隆升始于第四纪。

青藏高原位于亚洲大陆的中南部，平均海拔高度 4000 米以上，是世界上最高的高原，素有“世界屋脊”之称。青藏高原的崛起是我们人类居住的这颗星球晚近地质历史时期发生的一次重大的地质事件，可以说是这一时期自然界的一次伟大的地质创举。

青藏高原具有巨厚的地壳和复杂而独特的地质结构，记录了地球发展演化的历史和大陆裂解、漂移和拼合的丰富信息，是检验板块构造理论，解决某些全球性构造问题，产生地球科学新理论、新模式的关键地区。青藏高原蕴藏着丰富的矿产资源、水力资源及其他资源，铬、铜、金、铅锌、盐湖矿产、稀有金属、地热及某些非金属矿产尤为丰富，已发现若干大型、超大型矿床；石油、天然气、宝石矿产等亦具备良好的成矿条件；具有优越的找矿前景和资源开发潜力。青藏高原近几百万年以来的强烈隆升，对高原本身及毗邻地区的生态环境、气候及人类活动都产生了深刻的影响，记录了古环境、古气候变迁的丰富信息，是开展全球变化研究的理想地区之一。因此，长期持久地开展青藏高原地质及矿产资源的调查研究，具有重要的科学意义和实际意义。这就是世界许多科学家纷纷要求到青藏高原开展地学研究的重要原因之一。特别是青藏高原的主体在我国境内，是我国地质上的一大特色和一大优势，通过系统、精细的调查研究，不仅可以获得国际领先水平的科学成果，而且可以为我国、特别是西部地区经济、社会的持续发展提供丰富的自然资源和科学技术基础。

## 一、高原地质构造的主要特点

青藏高原的地质调查研究已经有 150 多年的历史，是世界上地质调查起步较早的地区之一。但是由于自然环境与社会条件诸原因，调查研究工作进展十分缓慢，其研究程度远远落后于欧洲的阿尔卑斯山、美洲的阿帕拉契亚山和我国东部地区。19 世纪启蒙阶段的地质调查，主要由西方一些国家和印度等国地球科学家及探险家在高原西、南边缘开展地形测量及路线地质调查，初步进行了地层划分和构造研究，这一阶段的重要贡献是根据喜马拉雅

山的大地测量提出了均衡说。19 世纪末叶到本世纪 40 年代是地质学蓬勃发展时期，学术思想十分活跃，提出了各式各样的大地构造假说，青藏高原的地质研究也进入奠基阶段，除在西、南边缘进行详细调查研究，确定了地层系统，奠定了喜马拉雅山构造格局外，调查研究已深入到喀喇昆仑、藏东、川西、滇西及高原腹地部分地区，我国许多地质学家已开始介入高原的地质调查研究，提出许多颇具建树的学术观点和思想。青藏高原大规模的地质调查始于新中国建立之后。本世纪 50 年代到 70 年代是青藏高原地质调查研究的大发展阶段，调查地区已遍及整个高原，开展了大面积的中、小比例尺地质调查、路线地质调查、地球物理探测、航空磁测、矿产普查勘探、综合考察和地质科学研究。外国一些学者也在高原西部、南部边缘进行了地质、地球物理调查。80 年代以来，随着科学技术的蓬勃发展和我国改革开放政策的实施，青藏高原成为国际上发展地球科学的汇聚点和验证当代一些地球科学理论的试金石，国内外地球科学界研究探讨青藏高原的积极性空前高涨。这一阶段主要以岩石圈结构构造及其动力学以及高原隆升机制研究为主题，开展了高层次、多学科的综合研究，进行了多种形式的国际合作研究与交流，深化了对若干重大科学问题的认识。我们目前对青藏高原地质构造特点的认识可以概括为如下诸点。

#### 1. 青藏高原是个相对独立的构造系统

青藏高原被夹持在土兰、塔里木、中朝、扬子、印度等几个刚性地块之间，不但在地形、地貌上构成一个统一的雄伟高原，而且在岩石圈结构、构造和若干地球物理场特征上也自成体系，形成一个相对独立的构造系统。其地壳厚度普遍较大，中间厚四周薄，腹地地区多为 70-80km，向周边地区逐渐减薄到 50-60km，形成地壳厚度陡变带。岩石圈南薄北厚，与地壳厚度呈同像关系。在重力、磁卫星、航空磁测图像上，青藏高原都表现与地理、地质轮廓相似的封闭异常区。在布格重力异常图、航磁异常图及磁卫星图上，表现为封闭的负异常区，被夹持于周围诸地块下异常区之间；自由空气重力异常则表现为一独立的正异常区；在高原周边均为重磁异常急剧变化的梯度带。

#### 2. 高原岩石圈具有明显的层块结构

从地震波速和视电阻率特征以及其他地质、地球物理资料来看，青藏高原岩石圈具有明显的层块结构，垂向分层，横向分带、分块，显示了高原岩石圈物质组成及结构、构造纵横方向上的不均一性。这种不均一性，在岩石圈介质的波速、密度、磁性、电性及热结构上都得到较明显的显示。

岩石圈的层状结构首先表现在地震的多层速度结构上。从总体看，高原岩石圈可明显划分四个大的结构层：上地壳、中地壳、下地壳和上地幔。上地壳以分层清晰、速度结构复杂和横向变化较大为特点，南厚北薄，一般 25-35km，底部普遍出现一个低速高导层，厚度 3-6km。中地壳以厚度较大、速度较稳定和横向变化较小为特征，南薄北厚，大部地区厚 30-40km，喜马拉雅地区仅 10-20km，在安多以南埋深 50km 处出现第二个低速高导层。下地壳的特点是速度、厚度变化都较大，南厚北薄，中间厚两端薄，下部普遍存在厚度不一的“壳幔混合层”，在南部其底界面即莫霍面多有错断。上地幔厚度变化很大，总的变化趋势是北厚南薄，以唐古拉山、巴颜喀拉山地区最厚，可达 120km。

高原岩石圈的横向分带、分块特征，在多种地球物理场上都不同程度地

有所反映，在航磁异常、重力异常及电性结构方面，表现尤为突出。总体上表现为南北向分带和东西方向分块的特点。

### 3. 青藏高原是一块由多个地体拼合的大陆

地质、地球物理资料表明，青藏高原主体是由众多不同规模的地体和分割这些地体的缝合带或大型断裂带拼接镶嵌起来的一个地体集合体。它们各自具有不同的基底、地质建造组合、古生物群及地球物理场特征，反映了它们曾经分别隶属于不同的古大陆-劳亚古陆和冈瓦纳古陆。

地质建造、古生物区系和古地磁资料综合分析表明，古生代时这些地体均位于南半球中、低纬地带，晚古生代以东西向漂移为主，经三叠纪旋转运动后，自侏罗纪开始转为南北向为主的漂移。地体汇聚、拼合过程反映了欧亚板块不断增生并最终与印度板块拼接的过程。

### 4. 高原岩浆岩具有明显的时空演化规律

青藏高原发育有多条规模不等、性质不同的构造-岩浆岩带。这些构造-岩浆岩带都是在特定构造背景下生成的。根据岩浆岩特征及其形成的构造环境可以划分为俯冲期、碰撞期、走滑期、断块期四种类型的岩浆活动。同时，依据岩浆岩演化序列的差异划分出四个构造-岩浆岩区（带），即南喜马拉雅带、北喜马拉雅带、冈底斯带和青海高原带。南喜马拉雅带和北喜马拉雅带只经历了碰撞期构造-岩浆活动，产生碰撞型岩浆岩；冈底斯带则经历了俯冲期、碰撞期与走滑期三种类型的岩浆活动；青海高原带则在不同地区、不同时代叠加俯冲期、碰撞期、走滑期与断块期四种类型的岩浆作用，形成多期次、多类型叠加的一些岩浆岩带。

碰撞期岩浆活动范围较广，既包括有幔源型（I 型）岩浆活动，又普遍出现壳源型（S 型）岩浆活动。冈底斯火山-岩浆弧的岩浆岩并非都属于俯冲类型，一部分属碰撞型岩浆岩。

### 5. 高原地壳具有不同的变形特征

高原岩石圈变形有其动力学特征，表明高原经历了陆块裂解、地体汇聚、A 型俯冲和伸展-走滑等四种不同性质的构造运动及变形过程。将高原主要断裂划分脆性剪切带、脆-韧性剪切带和韧性剪切带三大类，厘定出北喜马拉雅、康马、雅鲁藏布江、昆仑西大滩等四条韧性推覆剪切带，论述了它们存在的标志、变形特征、形成时代和演化。在高原地壳变形及构造应力场研究基础上，以喜马拉雅碰撞带为例，详细研究了高原伸展构造样式、形成机制及深部构造背景，提出了岩石圈深层热动力扩张的高原隆升的地球动力学模式，提出了喜马拉雅碰撞带的深部热构造作用-回流作用。研究工作表明，高原新生代变形表现为内部伸展、周缘逆冲-推覆，陆壳上部伸展、下部收缩，高原隆升具有在整体隆升基础上，不同地区差异隆升的特点。不同造山带具有不同的隆升机制和深部作用过程，据此将高原造山带划分为喜马拉雅型、冈底斯型、昆仑型等三种类型，分别总结了它们的岩石圈组构特征及其转化过程。

### 6. 组成高原的各地体具有一定的漂移规律

新获 27 个古地磁数据为高原地体划分及其运动规律提供了新的证据。研究结果表明：古生代时期，包括北昆仑地体在内的高原诸地体均位于南半球中-低纬度地区，古生代以后有大幅度纬向迁移；南、北昆仑地体与拉萨体三叠纪时曾发生数十度的顺时针旋转运动，到侏罗纪时又恢复到与古生代时相近的方向，而且拉萨地体与羌塘地体于侏罗纪时有大幅度北向迁移，其中羌

塘地体北迁约  $20^{\circ}$ ；白垩纪时，江孜地体曾发生大幅度北向迁移，从早白垩世的  $29.9^{\circ}\text{S}$  迁移到晚白垩世的  $9.1^{\circ}\text{S}$ ，迁移幅度约  $20^{\circ}$ ，它与拉萨地体之间俯冲缩短的纬向距离约为  $17.3^{\circ}$ ；拉萨地体与羌塘地体的拼合时间在侏罗纪末期，两地体间俯冲缩短的纬向距离约为  $13.7^{\circ}$ 。已获新、老古地磁数据说明，随着地质时代的由老变新，各地体的古纬度由低变高，反映了地体从南向北逐步迁移的总规律。

#### 7. 高原岩石圈热结构具有南北不均一性

总体表现为北低南高。北部的昆仑、巴颜喀拉和羌塘地区地表热流值介于  $40\text{--}47\text{mW/m}^2$ ，为趋于稳定的正常壳幔热结构；拉萨地体热流值位最高，一般  $100\text{--}300\text{mW/m}^2$ ，最高(羊应乡)达  $364\text{mW/m}^2$ ，拉萨北郊最低，为  $66\text{mW/m}^2$ ，为热壳热幔型异常热结构，以传导型和传导型及传导-对流型热流近距离内的交叉分布为特征；南部的江孜地体地表热流值也较高，为  $91\text{--}146\text{mW/m}^2$ ，为传导型热流，属热壳冷幔型特殊热结构。

地体综合构造热演化的动态模拟说明，高原并不是一个巨大的热壳，深部热活动强度并不像想象的那么大。控制地表热流分布的主要因素可能是莫霍面深度、地壳部分熔融、上地壳热源层和近地表水的热对流。壳内低速高导层，在南部可能是由滑脱作用磨擦生热导致地壳局部熔融引起的；北部地区似无热成因背景，可能是沿区域性大型构造滑脱带由于水溶液的贯入而引起的。

#### 8. 高原岩石圈具有纵横方向不均一性

地震波速反映了高原岩石圈在纵、横方向上都呈现出不均一性。横向不均一性，在不同地体、不同构造交结地区和在断裂带两侧表现尤为明显，即不同地体、不同构造带各自具有不同的速度结构，反映了它们各自具有不同的地壳、上地幔结构。总体上看，北昆仑、南昆仑地体为“薄壳薄幔”结构；巴颜喀拉和羌塘地体呈现为“厚壳厚幔”结构；而拉萨及江孜地体则表现为“厚壳薄幔”结构。青藏高原大部分地区地壳平均速度为  $6.2\text{--}6.3\text{km/s}$ ，比一般大陆壳速度偏低；而上地幔顶部速度 ( $8.1\text{--}8.2\text{km/s}$ ) 与正常大陆基本一致。

从纵向来看，上地壳结构复杂，速度变化大，底部普遍存在低速层；中地壳速度比较稳定，横向变化小，厚度较大，分层性差，在南部存在第二个低速层；下地壳波速多呈梯度变化，除喜马拉雅构造带外，都具有较高的速度。各地区具有不同的壳幔边界，喜马拉雅带壳幔边界清晰，莫霍面为一明显的速度界面，但多被错断；在冈底斯带及其以北，壳、幔之间不是一个简单的一级间断面，而表现为速度梯度层，即称之“壳幔混合层”。

#### 9. 高原地壳具有一定的磁场特征

从磁异常图来看，高原总体上是一个磁场偏低和磁性变差很小的区域，主要表现为几个不同磁场背景及特点的大型磁性区块以及分割这些磁性区块的大型线性磁异常带或磁性分界的镶嵌。高原已经鉴别出几条大型线性磁异常带或磁性分界带，金沙江-红河磁性分界带最为醒目，东西两侧磁场特征迥异，标示了两侧壳结构的差异。

亚东-格尔木磁测剖面研究结果表明，以沱沱河-玉树断裂为界，以南磁性变化大，以北相对较平稳，显示了高原南北地壳结构及构造活动性的差异。雅鲁藏布江南北康马及羊八井各出现一片低磁区，可能反映深部存在局部熔融体。地壳磁性层顶界面埋深一般  $7\text{--}9\text{km}$ ，但巴颜喀拉地区深达  $20\text{km}$ ，表明

变质基底埋藏很深。

#### 10. 重力异常所反映的构造特征

在布格重力异常图上，青藏高原显示为一封闭的高负异常区，异常值变化范围一般 200 左右。高原内部异常值高达  $-500 \times 10^{-5} \sim -550 \times 10^{-5} \text{m/s}^2$ ，为重力异常缓变区；在高原周边多为  $-350 \times 10^{-5} \text{m/s}^2$ ，为重力异常高梯度带。重力异常的这种展布格局清楚地显示出青藏高原是一个相对封闭、独立的构造系统，重力异常的起伏反映了高原莫霍面的起伏变化。高原内部的高负布格异常起因于高原巨厚的地壳。

从均衡重力异常图来看，高原内部异常值一般不超过  $\pm 20 \times 10^{-5} \text{m/s}^2$ ，高原周边则出现不同强度的均衡异常，喜马拉雅地区为  $+60 \times 10^{-5} - +100 \times 10^{-5} \text{m/s}^2$ ，最高达  $+120 \times 10^{-5} \text{m/s}^2$ ，昆仑山、阿尔金一带为  $+40 \times 10^{-5} - +70 \times 10^{-5} \text{m/s}^2$ ，柴达木盆地出现  $-64.9 \times 10^{-5} \text{m/s}^2$  的负均衡异常。这些资料表明，高原内部基本上已达到重力均衡状态，高原周边尚不同程度地处于重力均衡补偿不足状态。喜马拉雅地区的高正均衡异常尤其引人瞩目，说明喜马拉雅地区目前仍处于印度板块与欧亚板块强烈挤压之中，来自印度板块的强烈向北挤压，阻碍了该区地壳的均衡调整，使之继续处于隆升之中。

### 二、高原隆升的事实和证据

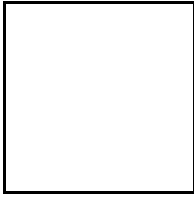
白垩纪晚期到始新世，新特提斯洋逐步关闭，印度板块与欧亚板块碰撞拼合，青藏高原开始了一个地壳缩短、加厚和不断隆升的新阶段。高原地壳的缩短和加厚，是通过印度洋的不断扩张，已经拼合的印度板块与欧亚板块强烈挤压、汇聚、变形而实现的。

青藏高原地壳缩短、加厚和隆升，至少有以下诸方面的事实和证据是值得加以考虑的。

#### 1. 古地磁证据

根据古地磁资料，始新世时，喜马拉雅带定日的古纬度为  $4.6^\circ \text{N}$ ，现今纬度  $28.8^\circ \text{N}$ ，即始新世以来喜马拉雅构造带向北漂移  $24.2^\circ$ ，约 2700km。当时唐古拉构造带南缘东巧的古纬度为  $29.5^\circ \text{N}$ ，与定日之间相距  $24.9^\circ$ ，约 2800km，目前东巧与定日之间南北垂距约 400km。这就是说，始新世以来喜马拉雅构造带与唐古拉构造带之间地壳缩短约 2400km。又如，始新世时拉萨古纬度为  $13.8^\circ \text{N}$ ，与定日之间纬度差为  $9.2^\circ$ ，约相距 1000km，而目前定日与拉萨之间相距仅 120km，即始新世以来喜马拉雅构造带与冈底斯构造带之间地壳缩短约 800 余公里（表 1）。

P.Patriat 根据中印度洋磁条带异常，结合拉达克、西藏及泰国古地磁资料，再造了印度板块新生代时期向北漂移过程的框架。他认为自印度板块与欧亚板块碰撞以来，青藏高原地壳总共缩短  $2600 \pm 900 \text{km}$ ，其中雅鲁藏布缝合带以北的欧亚古大陆缩短  $1900 \pm 850 \text{km}$ ，喜马拉雅地区缩短  $700 \pm 300 \text{km}$ 。他给出的数据与我们计算出的数值基本一致，即自始新世印度板块与欧亚板块碰撞以来，由于印度洋的扩张和印度板块不断向欧亚板块推挤，使青藏高原地壳缩短了约 2500km，其中喜马拉雅构造带约缩短 800km。



## 2. 盆地沉积及建造

新生代时期，青藏高原发育一系列不同时代、不同类型的沉积盆地，它们记录了高原古地理的演化和隆升的过程。

晚白垩世晚期至渐新世，由于印度板块沿雅鲁藏布缝合带向北的俯冲，在仰冲板片前缘出现双磨拉石带：内磨拉石带（ $K^3_2-E_3$ ）展布于冈底斯带南缘，厚 2000-4000m；外磨拉石带（ $E_2-E_3$ ）分布于雅鲁藏布蛇绿岩带南侧，厚约 2000m。这些磨拉石沉积反映当时冈底斯带和雅鲁藏布蛇绿岩分布区已隆升为中低山区。

早第三纪到中新世，除高原北部和东部出现以贡觉盆地为代表的山间盆地型红色碎屑岩建造以外，高原内部大部分为河湖相细碎屑沉积和含煤、含油岩系，代表了温暖潮湿气候条件和比较稳定的沉积环境。地势高差不大，东北部高，山脉最高海拔不过 2000-3000m，西南部低平，山区海拔高度一般 500—1000m，未出现真正的磨拉石建造。

上新世开始，高原内部大部分盆地消失，在高原南北边缘却出现巨厚的上新世一早更新世磨拉石建造，显示了高原的强烈隆升。喜马拉雅山前以锡伐利克群为代表的磨拉石沉积东西延展 2000 余公里，厚度达 6000m；昆仑山前的阿图什组（ $N_2$ ）及西域组（ $Q_1$ ）磨拉石沉积共厚 4600m；祁连山前的疏勒河组（ $N_2$ ）和玉门组（ $Q_1$ ）磨拉石沉积厚 2000 余米。这些巨厚的磨拉石沉积标志了上新世一早更新世时期青藏高原曾经出现大幅度的抬升。

## 3. 动植物群时空分布

高原新生代各时期动、植物群的时空分布，既显示了高原各时期气候的状况，又间接指示着各时期地形高度的变迁。

在高原东部贡觉盆地、热鲁盆地及喜马拉雅地区和冈底斯山南缘的扎达盆地、昂仁盆地、柳区盆地及珠穆朗玛峰一带的始新世—渐新世沉积中，都发现有以棕榈科、榕属为主的植物群；在这些地区以及北部的伦坡拉盆地、布尔汗布达山南缘盆地及柴达木盆地，都发现有栎、松、杉、麻黄为主的孢粉组合和杨、柳、旱梅等温带落叶阔叶植物群化石。这些植物群面貌说明当时的青藏高原大部分地区处于热带—亚热带雨林环境，一些山区生长了温带植物群，推测海拔高度介于 500-1500m，东部山区较高，可能达 2000m 左右。

从已发现的古植物化石和孢粉组合来看，晚第三纪时青藏高原主要生长着常绿型高山栎类植物群，伴有针叶、阔叶植物，部分地区孢粉组合反映为草原—森林型植被面貌。在喜马拉雅北坡扎达盆地、古隆盆地，那曲布龙盆地，柴达木盆地和祁连山南麓，多处发现三趾马动物群。这些动物群显示，晚第三纪时青藏高原已处于温凉山地环境，地壳已有相当程度隆升，东部与北部某些山峰已达相当高度，但大部分地区海拔高度仍不超过 2000—3000m。

## 4. 河湖相沉积高程

喜马拉雅地区上新世—早更新世河湖相沉积顶面海拔高程多在 4200-4600m。希夏邦马北坡野博康加勒群海拔 5700-5900m，卓奥友峰东北部加布拉湖相沉积海拔 5900-6000m。依据有关古生物等证据，推断这些湖相沉积是

早更新世以后抬升到现在的高度的。据陶君容报道，在西藏热久藏布河西岸 5000—5200m 的加布拉林附近中更新世湖相沉积中含曲枝柏 (*Sabinarecurva*) 化石。目前这种植物生长于喜马拉雅北坡 2700-3900m 高度，推测这种植物当时生长高度约 3000m。说明中更新世以来，这个地区抬升约 2000m。又在聂拉木亚里波曲河第一阶地(海拔 4300m) 的全新世石灰华中发现的植物印痕化石主要是生长于 3400 - 3800m 的高山灌木丛，说明聂拉木亚里地区全新世还抬升约 1000m。

### 三、高原隆升幅度和速率探讨

近年来，国内外学者采用热年代学方法以及 GPS、SLR、VLBI 及常规精密水准测量等方法，探测了高原隆升幅度与速率，依据这些数据可粗略概括出高原隆升的某些规律：一个是白垩纪末以来，高原隆升速率有愈来愈快趋势，从 60-40Ma 的 0.016-0.08/a 23-4Ma 的 0.09-0.75mm/a 到 2-0.5Ma 的 1.6-4.5mm/a 以及 0.5Ma 以来 > 4.5mm/a。上新世或中新世末，特别是中更新世以来，隆升速率突然加快。第二是上新世以来，高原隆升速率有自南西北逐渐变慢之势，例如，上新世以来，喜马拉雅区隆升速率可达几到十几毫米/年，而北部的阿尔金山则只有 0.42/a；近几年直接测量数据更为明显：珠穆朗玛峰地区 37mm/a，拉萨-邦达 10mm/a，狮泉河-萨嘎 8.9mm/a，喀喇昆仑山 6-9mm/a，到北部甘肃西部阿克塞地区减到数毫米/年到 5.2mm/a。这种隆升速率在时空上的变化规律，与上述地质、古地磁等所得结果基本一致。

### 四、高原隆升过程

印度板块与欧亚板块碰撞后，青藏高原地壳不断缩短、加厚，经历了一个抬升与侵蚀消长平衡、构造抬升与均衡隆升相互更叠、从缓慢抬升向快速隆升过渡的复杂的隆升过程。根据隆升性质、构造-热事件演化和地质建造特征，可以将高原隆升划分为 3 个阶段。

#### 1. 俯冲碰撞隆升阶段 ( $K_2-E_2$ )

这是高原开始隆升的时期。印度洋洋脊两侧条带异常及德干高原暗色岩古地磁及同位素测年数据都表明，自晚白垩纪末期以来，印度板块向北漂移速率逐渐降低，从开始时的 15-20cm/a 到始新世中期 ( $48Ma \pm$ ) 急剧降低为 < 10cm/a，标志着新特提斯洋的完全封闭和印度板块与欧亚板块的碰撞焊接。

在此期间，由于印度板块的向北俯冲，使冈底斯带隆升并形成岛弧型火山-深成岩带，在其南麓形成下磨拉石带(“冈底斯磨拉石带”)，即尹集祥等所称的内磨拉石带下部。同时，由于陆-陆碰撞及雅鲁藏布蛇绿岩仰冲，形成“印度期-雅鲁藏布希岭”，并于南、北两侧形成上磨拉石带，即尹集祥等所称内磨拉石带上部的恰布林组及外磨拉石带的柳区群。下磨拉石带代表了印度板块与欧亚板块初始碰撞的产物；上磨拉石带则标志着两板块全面碰撞后产生的双磨拉石带。这些事实说明，当时冈底斯已抬升到相当高度。但从所产的以棕榈科、榕属为主的植物群面貌看，其海拔高度不超过 1000-1500m。

老第三纪时，高原北部和东部处于隆起-剥蚀区，由于大规模走滑断裂产生一系列拉分盆地，堆积了巨厚的含膏盐的河湖相红色碎屑岩系，其中沱沱河盆地沉积厚度达 8000m，贡觉盆地红层 2600m，柴达木盆地整体沉降为大陆

湖盆地。根据植物群面貌，当时高原东北部地区海拔高数百米，山地可达2000m左右。

## 2. 汇聚挤压隆升阶段 ( $E_3-N_1$ )

始新世末期，印度板块与欧亚板块完全碰撞拼合，二者的聚敛速率下降为5cm/a左右，已经结合为一体的印度-澳大利亚板块的持续向北推移挤压和北部、东部刚性地块的阻挡，促使高原地区地壳大规模缩短、加厚，高原持续缓慢抬升，构造抬升与剥蚀作用处于动态平衡状态。

在喜马拉雅地区，渐新世时期处于隆开剥蚀期，构造活动相对平静。中新世时构造活动强烈，陆内汇聚作用加剧，形成大规模的冲断、推覆构造及滑脱系，主中央逆冲断裂（MCT）及主边缘逆冲断裂（MBT）相继活动，并产生多期淡色花岗岩侵入作用。由于喜马拉雅地区的快速隆升和剥蚀，在喜马拉雅山南缘形成一系列盆地，堆积了以穆里群和下锡伐利克群为代表的碎屑沉积；在孟加拉湾，深海冲积扇开始形成。当时喜马拉雅地区海拔高度约1000m左右，主峰带可能已达2000—3000m。

在青藏高原，由于强烈的陆内汇聚作用，地壳不断缩短、加厚并持续隆升，裂陷和逆冲-走滑作用产生一系列盆地，堆积了河湖相含煤、含油碎屑岩系及中基性火山岩喷发。在冈底斯带有中-中酸性火山岩喷发，在囊谦、八宿一带出现碱性火山岩，在可可西里出现以碱性为主的火山岩喷发。冈底斯山南木林乌龙组（ $N_1$ ）以高山栎为主的植物群、藏东茫康中新统桦木化石以及其他地区一些植物群的特征，均说明中新世末期青藏高原曾出现一准平原面，海拔高度1000-1500m，一些山地、山峰可达2000—3000m。

## 3. 均衡调整隆升阶段 ( $N_2-Q$ )

经过前一阶段的隆升和夷平作用，自上新世开始，青藏高原进入一个以大幅度整体隆升为主的新阶段，而且抬升速度有越来越快的趋势。上新世-早更新世仍以压应力为主，以构造抬升为主导；中更新世以来，以张应力为主，以整体均衡隆升为主导。

在喜马拉雅地区，由于强烈的褶皱、断裂和地壳隆升，产生区域变质、混合岩化和淡色花岗岩的侵入作用，在喜马拉雅山前形成著名的长达2000余公里的锡伐利克磨拉石带，厚度逾6000m。高山栎、三趾马动物群的出现，说明上新世-早更新世时期，喜马拉雅地区海拔高度约2000-3000m。抬升到目前的高度，是中更新世以来发生的地质事件。

在青藏高原，早期由于沿几条东西向断裂带发生陆内俯冲，导致一系列推覆构造群和地壳隆升，后期则由于均衡调整，产生大幅度快速隆升。在昆仑山前及祁连山北麓，都分布有巨厚的上新世-早更新世磨拉石；高原东部上新世-早更新世含温带针叶、阔叶混交林植物群的沉积，目前大多抬升到4000m以上分水岭垭口或山顶夷平面；在藏北、昆仑山及横断山区，在古夷平面上形成的岩溶、红土层（如革吉县库大溶洞），目前均已抬高到4000m以上的高山之上。此外，诸多河流的袭夺、改道，山麓冰川的发育，柴达木盆地的退缩以及植物群的变迁等，都说明中更新世以来，青藏高原曾出现大幅度快速整体隆升。

喜马拉雅山前、塔里木盆地南缘及祁连山北麓磨拉石沉积的反旋回特征，也标志着青藏高原自上新世以来经历了由缓慢抬升到快速隆升的过程。青藏高原自始新世以来到底隆升了多少？剥蚀了多少？需要进一步调查研

究，取得足够的定量数据予以阐明。但是，从高原周边磨拉石建造规模和厚度以及孟加拉湾深海冲积扇的巨大规模来看，其剥蚀量是相当可观的。

## 五、高原隆升机制

对青藏高原的形成、演化和隆升机制，国内外学者曾经提出过各式各样的模式。按力学机制这些模式可大体分为 3 类：一类是以印度板块挤压力为动力源的俯冲碰撞模式；第二类是以垂向负荷力为动力源的重力作用模式；第三类是以水平挤压和垂向负荷为力源的双挤压模式。我们认为，驱动高原隆升的动力源主要来自印度-澳大利亚板块持续向北的漂移挤压，同时受到亚洲大陆几个刚性地块的阻挡或相对向青藏高原的俯冲和挤压，而深部热动力也起了很大作用。总之，高原地区厚达 20000-30000m 的巨厚沉积层、火山岩层和不同层次侵位的侵入岩及上地幔物质向地壳的贯入，为高原地壳加厚提供了物质基础；组成高原地壳岩层的粘滞系数较低的柔性体块（ $\eta$  值为 10 - 100 帕·秒数量级，比全球平均值低 50% 以上），为高原地壳变形、缩短、加厚提供了内在条件；印度-澳大利亚板块向北推挤及高原周边刚性地块的围限，为高原陆内汇聚、地壳加厚及缩短提供了有利的边界条件。

地质和地球物理资料表明，青藏高原地壳的加厚、缩短，是在压应力作用下通过不同层次物质以不同的运动形式实现的：上地壳主要是通过岩层的褶皱、逆冲、推覆而导致一系列叠瓦状推覆构造使地壳重叠加厚，由于挤压造成不同层次的滑脱、拆离，产生局部熔融而导致岩浆的贯入和喷出，也是上地壳加厚的原因之一；中地壳波速比较稳定，一般为 6.3-6.6km/s，分层性差，反射能量较弱，少见速度界面，说明其物质组成比较均匀，它可能是通过塑性褶皱变形和深位韧性剪切作用使地壳缩短加厚；下地壳除塑性褶皱、韧性剪切作用以外，由于下地壳内部和下地壳与上地幔之间多层次的拆离、虚脱减压，使上地幔部分熔融，流体不断涌入下地壳，形成“壳幔混合层”，这可能也是造成下地壳加厚的重要原因之一。

总之，在印度-澳大利亚板块持续向北漂移推挤条件下，由于高原四周刚性地块的阻挡，产生强烈的陆内汇聚作用：在强烈的压应力作用下，一方面产生沿各构造带之间的古缝合带或断裂带产生陆内俯冲，另一方面产生多层次的拆离、滑脱，上、中下地壳以不同机制分层加厚、缩短，高原缓慢抬升，上地幔大幅度沉降，形成“高原山根”；上新世、特别是中更新世以来，随着高原整体漂移速度的变慢和各地质块体之间漂移速度差的减少，产生应力松弛，挤压作用大为减弱，在山根作用下，产生强烈的均衡调整，使高原大幅度整体快速隆升，形成目前这样高大的高原。我们把这种高原隆升的过程和机制概括为：“陆内汇聚-地壳分层加厚-重力均衡调整”的高原隆升模式。

# 我们只有一个地球

——人类社会的共同选择，走可持续发展之路

欧阳自远

中国科学院地球化学研究所

欧阳自远 天体化学与地球化学家。1935 年 10 月生于江西吉安。1956 年北京地质学院毕业，1960 年中国科学院地质研究所研究生毕业。贵州省科学技术协会主席。中国科学院地球化学研究所研究员，贵州省人大常委会副主任。1991 年当选为中国科学院院士（学部委员）。对我国地下核试验地质进行了综合研究，系统开展各类地外物质（陨石、宇宙尘、月岩）和比较行星学研究。

在现代化建设中必须把可持续发展作为一个重大战略。要把控制人口、节约资源、保护环境放到应有的位置，使人口增长与社会生产力的发展相适应，使经济建设与资源“环境相协调，实现良性循环。

必须切实保护资源和环境，不仅要安排好当前的发展，还要为子孙后代着想，决不能吃祖宗饭，断子孙路，走浪费资源和先污染、后治理的路。

——江泽民

## 一、概述

地球，太阳系的骄子，是现今人类知道的唯一具有生命繁衍和高度文明发展的天体，她始终以生机盎然、端庄秀丽的姿态遨游在浩瀚无际的宇宙中（附图）。

地球是由不同化学组成的星子堆积而成，自她诞生至今已经经历了 45 亿年漫长而复杂的演化历史，地球内部的分异、调整，形成了内核、外核、下地幔、地幔过渡带、上地幔和岩石圈的层圈结构。地球演化的早期，大面积剧烈的火山喷发，强烈的岩浆与构造活动，地球内部的脱气，逐渐形成了地球表面广泛分布的水体和笼罩整个地球的大气层。日地系统的相互作用形成了日地空间的特殊保护层——磁层。大陆漂移、海底扩张、板块运动、碰撞造山、沧海桑田，不断更新着地球表面的形貌与海陆分布。地球内部和表层的成矿过程，为人类提供了极其丰富的矿产资源。煤、石油、天然气等能源资源，既是大量生物残骸的堆积演化而成，也是地球历史中太阳能转化、积累的产物。地球为人类的诞生、进化与发展提供了极其丰富的物质基础和适宜的自然环境。

陨石中蕴藏着氨基酸等多种复杂的有机物，证明在地球形成前的太阳星云中，已经经历过无机的生命元素合成各种复杂有机化合物的前生期化学演化过程。在地球演化的早期，虽然地表的环境极其严酷，但这些构成生命链条的有机化合物终于形成了具有新陈代谢能力的最原始的生命。生命的诞生

是脆弱的，生命的演化是顽强的。古生物学提供了地球上生物进化里程的丰富证据，大气圈、水圈与生物圈的相互作用与相互制约，谱写了近 40 亿年波澜壮阔的生物演化史。地球永远呈现出一派生气勃勃的壮丽图景。

人类的诞生与进化，经历了至少 300 多万年的历史，在地球的历史长河中虽然只是一瞬间，却几经劫难，顽强生存。人类长期受到自然界的奴役和统治，在与自然界的长期斗争中，增强了征服自然的智慧与能力。随着生产力的发展，社会的进步和科学技术的昌盛，特别是工业革命以来，随着人口的增长和社会的发展，人类向自然界无限制地索取，导致自然支撑体系的失衡；资源不合理的开发和利用，某些矿产资源与化石能源的短缺与枯竭；土地的侵蚀与退化，耕地、森林与草场锐减，干旱化与沙漠化的扩大与蔓延；水体的污染与淡水资源的严重短缺；环境污染加剧、健康恶化、酸雨的威胁，灾害频发；大气中温室气体的加速增长，全球增温与海平面上升，臭氧空洞的扩大；生态恶化，生物多样性锐减；人类的生存环境和社会发展受到严重威胁。70 年代以来，人类认识到要协调人与自然的关系，人类社会与自然界必须协调发展，可持续发展是人类的生存与发展的必由之路。

## 二、地球——人类唯一的、美好的共同家园

在广漠无垠的太空里，一颗蔚蓝色的球形天体，表面海陆隐现，上空浓云密布，这是人类赖以生存与发展的家园——地球。地球是太阳系家族中一个独特的成员，是太阳系中唯一有生命发育和人类活动的行星，也是当今所知宇宙中唯一有生物演化和高度文明发展的天体（附图）。

太阳系的各个行星，体积大小不等，密度差异很大，距离太阳远近不同；它们既有自转也共同在黄道面附近绕太阳公转；它们内部都有核幔壳的结构，外部都有浓度不等、成分不同的大气层所笼罩。地球是一颗近球形的椭球形天体，赤道略鼓，两极稍扁，平均直径 6317km，自转周期为 23 小时 56.07 分，绕太阳公转的速度为 29.8km/s，周期为 365.3 天。地球属太阳系的一个普通成员，与其他行星相比，似乎毫无特色。为什么在太阳系中唯有地球得天独厚，成为一颗生气勃勃的行星？

以太阳系中的类地行星（水星、金星、地球、火星）及月球进行比较，地球的特殊性在于：

1. 与太阳的距离较适宜。距太阳最近的水星与金星，表面温度达到 300-430℃，水只能以气态形式存在；距太阳比地球远的火星，夏季和冬季的平均温度分别为 -60℃ 和 -120℃。火星表面几乎不含液态水，一般由于蒸发而成为水蒸气或冻结成冰。地球表面的温度为 -33℃ -47℃，平均温度为 15℃，较广泛适应生物生存的条件。地球表面被大面积的水体覆盖，水的气态、液态与固态常共存于地球表面。

2. 质量大小较适宜。行星的质量大小制约着大气层的浓度与厚度。地球的大气层设定为 1 个大气压，质量最小的类地行星水星的大气层极为稀薄，仅有 0.003 个大气压；质量比水星更小的月球，几乎没有大气层，月表呈现出高真空状态；质量比水星略大的火星，大气层仍很稀薄，为 0.005-0.007 个大气压；质量接近地球的金星，具有极其浓密的、以  $\text{CO}_2$  为主以及  $\text{N}_2\text{O}$ 、 $\text{SO}_2$  等微量气体组成的大气层，约 99 个大气压。金星内部的脱气由于缺乏类似地球的海洋对气体的溶解与沉积作用和生物的吸收转化作用，致使大量的内部脱气残存于大气层中，并形成极强烈的酸雨。

大气层对行星表面气候的调节发挥着重要的作用。月球没有大气层，昼夜温度分别为  $130 \sim 150$  和  $-180 \sim -160$ ，成为一个无风、无水、无声响、冷热剧变、非常干旱、无生命的寂静世界。地球的  $N_2-O_2$  大气层和海洋共同调节地面气候，与其他行星相比较，地球难以发生类似火星的全球性尘暴，也不似金星大气那样窒息和形成强酸雨，地球上显得气候多样、风调雨顺。

3. 自转轴的倾斜角度适宜。地球自转轴与垂直黄道面的夹角为  $23^\circ 27'$ ，使地球南北两半球各自四季分明，气候适宜；金星为  $177^\circ$ ，直立逆行，无春夏秋冬之分；天王星为  $97^\circ 55'$ ，躺着自转逆行，南北两半球的差异极大。

4. 唯有地球表面和深部含有液态水。水是生命之源，水是行星体内的血液，参与大气——海洋——生物界——地壳和地球内部的循环，水是改造地表形貌、促进地球内部运动的内外地质营力的主要介质。

5. 地球表面具有多层保护圈。地球外围的  $N_2-O_2$  大气层、臭氧层、电离层和磁层，各司其职，是保护地表生物演化的多层屏障，也对地球高度文明的发展发挥了重要作用。

地球是太阳系的骄子，是生命的摇篮，是人类生存和发展的美好家园。

### 三、灾难深重的地球

300 多万年来，人类经历了野蛮时期、蒙昧时期之后，大约在 5000 - 6000 年前出现了书写符号，开始进入文明时期。长期受自然界统治和奴役的人类向大自然提出了挑战，他们开始播种和驯养动物，冶炼金属，建立城镇。随着社会的发展、科技的兴盛、工业革命的兴起，掌握了强大生产力的人类向自然界开发资源。这些自然资源似乎是取之不尽，用之不竭的，人类挥霍无度地消费这些自然资源的产品。

20 世纪后半叶，人类社会的进程超越了在此以前的几个世纪，在即将跨入 21 世纪之际，在新的科技革命的浪潮冲击之下，世界正发生着史无前例的变化。以微电子、信息、生物、航天、新能源、新材料等为代表的一大批高技术的蓬勃兴起，迅速改变人类的生产与生活方式，推动着社会生产力的飞速发展。但另一方面，人口的增长、资源的匮乏、生态恶化、环境污染和灾害的频发，产生了一系列人类生存的危机，人类社会与自然界的和谐与协调发展遭到了严重的破坏，人类居住的地球已不堪重负、灾难深重。

#### （一）人口激增

世界人口自 1950 年到 1987 年增长了一倍，达到 50 亿。1996 年 6 月底达到 57.7 亿，预计 1999 年将达到 60 亿，2050 年将超过 82 亿。随着城市化的扩大，居住在城市的人口骤增，1987 年世界城市人口占总人口的 42%，2050 年预计城市人口将占总人口的 60%。现今地球上每分钟增加 170 人，每年增加 9000 万人。占全球 80% 人口的发展中国家的人口继续以较高的速度增长，由于贫困、营养不良和粮食不足，有近 10 亿人挨饿，加之环境污染的加重，每年由于水污染而致死近千万人，人口的激增加剧了资源的消耗与生态环境的恶化。

#### （二）资源趋于枯竭

全球耕地面积锐减，土地退化和水土流失严重，每年地表土壤流失约 200 亿吨；盐碱化土地日益增多；沙漠化逐步扩大，威胁着全球  $1/3$  面积约 4800 万  $km^2$  的土地和 8.5 亿人口的生存；森林面积减少，特别是热带森林减少速

度明显加快，1950 年以来，全球森林覆盖面积减少了一半，1978 年森林覆盖陆地面积的 1/5，估计到 2000 年将减少到 1/6；干旱地区 60%的草地荒漠化，过度放牧使草地日益退化；淡水资源危机已成为最为严重而紧迫的全球性问题，过去的 50 年来全球淡水用量增加近 4 倍。目前占全球陆地面积 60%的 43 个国家和地区缺水，约 20 亿人得不到良好的饮用水；世界化石燃料日趋枯竭，人类每年要燃烧 40 亿吨煤，25 亿吨石油，并以每年 3%的速度增长；多种金属矿产资源趋于匮乏甚至枯竭；世界各主要渔场的捕捞量均已达到或超过极限，太平洋、大西洋、黑海、地中海的所有渔场，鱼产量正在下降，海洋资源呈现明显的危机。

（三）环境污染加剧 全球每年排放进入大气层的气体，二氧化碳(CO<sub>2</sub>)为 57 亿吨，甲烷(CH<sub>4</sub>)约 2 亿吨。排放有害金属铝 200 吨、砷 7.8 万吨、汞 1.1 万吨、镉 5500 吨，超出自然背景值的 20 - 300 倍。SO<sub>2</sub>的排放，诱发酸雨的频度在增加，面积在扩大；空气质量严重下降，全球有 6.25 亿人生活在空气污染的城市中；江河湖海的污染日趋严重，淡水匮乏使 12 亿人口生活在缺水城市，14 亿人口在没有废水处理设施下生活；水质污染引发的疾病死亡率已成为人体健康最主要的危害；城市垃圾、污水、船舶废物、石油和工业污染、放射性废物等大量涌入海洋，每年有 200 亿吨污染物从河流进入海洋，约 500 万吨垃圾抛进海洋，在入海口处数万平方公里的缺氧层正在扩大。

（四）物种加速灭绝

全球确认的野生生物约 140 万种，实际上有 500—5000 万种，由于生物栖息环境的恶化，加上乱捕、滥杀，全球每天约有 100—150 种生物从地球上消失，每年约有 4 万种生物走向灭绝，到 2000 年从地球上灭绝的生物达到 50-100 万种。全球 12%的哺乳动物和 11%的鸟类濒临灭绝。生物多样性的世界正发生着严重的危机。

（五）温室气体的增长与气候变暖

随着经济和社会的发展，人类活动排放的 CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>和 N<sub>2</sub>O 等温室气体逐年增加，温室气体能无阻挡地让太阳的短波辐射射向地球，并部分吸收地球向外发射的长波辐射，使整个地球成为庞大的“温室”，使“温室”的气温上升。

根据 1958 - 1988 年 30 年中大气 CO<sub>2</sub> 的浓度的测定，CO<sub>2</sub> 浓度逐年增长，由 1958 年的 314ppm 增加到 1988 年的 349ppm。根据树轮所测定的近 2000 年来大气中 CO<sub>2</sub> 的浓度变化在工业革命后增长极为迅速。根据冰岩芯的记录，200 多年来 CO<sub>2</sub> 的浓度由工业革命前的 280 ± 10ppm 增加了 70ppm，年增长率为 0.4%，推算 2000 年将达到 380ppm；大气中甲烷的浓度，在工业革命前为 0.7ppm，现今增加到 1.8ppm，预计 2000 年将增加到 3.1ppm；大气中氟氯烃的浓度，在工业革命后浓度的增长极为迅速（表 1）。

--	--

根据近一个多世纪以来的全球陆地和海洋大约 100 多万个观察记录证明，全球平均气温确实变暖了，尤其是本世纪 80 年代以来，变暖的速度很快，全球平均气温增加了 0.5℃。根据表 1 的测算，2000

年全球平均气温将上升 1.53℃,2030 年将上升 2.08℃。由于全球变暖,1880—1980 年观察到的平均海平面上升了 14cm。以 1980 年海平面为基准,2050 年海平面将上升 30—50cm。气候变暖,海平面上升,将对全球的生态环境系统和人类社会的发展带来严重的影响:干旱区更为干旱,多雨区更多洪涝;海平面将以 6cm/10 年的速度上升,海水盐度变小,岛国难以生存,地势低洼的沿海区域将被淹没;海水污染淡水,地下水污染加剧;全球干旱频率增大,中纬度地区更为干旱、酷热,森林失火,湖泊干涸,水资源更为紧张;土壤盐渍化和沙漠化加剧。

#### (六) 氟氯烃排放的增加与臭氧空洞的扩大

大气层中臭氧( $O_3$ )的浓度随高度变化,平流层中距地面 20—25km 间的大气层臭氧浓度最大。工业革命前氟氯烃的浓度为 0,现今为 1ppb。人类活动排放的含氟氯烃的物质和氮氧化物在平流层中通过光化学反应将使臭氧减少。自本世纪 70 年代以来,北半球的臭氧减少了 3%—5.5%,出现臭氧空洞。南极臭氧空洞正以每年相当于一个美国陆地面积的速度增长,不仅在南极上空,最近发现在北极和西藏高原上空也出现了臭氧层减薄,甚至出现臭氧空洞。预计到 2014 年,臭氧将减少 53%以上。臭氧层出现空洞,将使地面紫外线辐射增强,皮肤癌发病率上升,还将引起幼鱼死亡率和家畜瘟疫增加,谷物减产,气候变化等一系列的影响。

### 四、中国的人口、资源、生态、环境与 灾害及生存与发展的双重压力

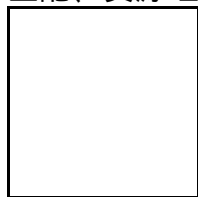
我国人口、资源、环境与灾害的态势令人堪忧。我国人口已超过 12 亿,基数大,增长速度快;国土负荷沉重,耕地减少、土地沙化与荒漠化、水土流失、植被面积缩小、水资源不足的矛盾日益尖锐;不可再生的矿产资源加速消耗与减少;许多资源面临短缺;生态恶化、环境污染总体上日益加剧;各种气候与地质灾害频度加快、范围增大。人口骤增及自然支撑体系的脆弱将长期制约我国经济与社会的发展,严重影响中华民族的生存与腾飞。

#### (一) 人口基数大是制约我国经济与发展的长期因素

我国人口已超过 12 亿,80%为农村人口。每年人口新增长约 1500 万,预计到 2000 年我国的人口总数将超过 13 亿。我国人口地域分布极不均衡,过剩人口多,老龄化速度加快,并开始进入老龄化社会。我国人口基数大,增长速度快,文化素质低,就业压力大。人口众多导致人均资源占有量不断减少,耕地锐减,水源匮乏,粮食不足,污染加剧,生态恶化,灾害频发,人口问题将长期制约我国经济与社会的发

#### (二) 地大而物不博、自然资源有优势也有劣势

我国地域辽阔,陆地面积为 960 万  $km^2$ ,海岸线 1.8 万 km,6500 多个岛屿。我国资源总量大,是世界少有的几个资源大国之一,但资源空间分布不匹配、资源组合错位,人均占有量低于世界平均水平(表 2)。



1. 水资源的短缺与污染将是今后制约我国经济与社会发展最关键的因素

我国地表水及地下水资源总量为 28124.4 亿  $M^3$ ，人均占有量约 2400 $M^3$ /年，为世界人均占有量的 1/4，占世界第 84 位。我国水资源分布极不平衡，南多北少，近海多内陆少，山地多平原少，降雨量 < 500mm 的区域占国土面积的 50%，其中干旱区（< 250mm）占国土面积的 30.8%。长江以南区域，水资源约占全国的 80%，而耕地面积仅占全国耕地面积的 35.4%；长江以北区域，水资源严重匮乏，约占全国的 20%，而耕地面积占全国耕地面积的 64.6%。我国农业用水量每年约 4200 亿  $M^3$ ，全国工业用水约 500 亿  $M^3$ ，但利用率低、浪费严重。全国农业年缺水量约 300 亿  $M^3$ 。每年污水灌溉已使 66 万公顷的耕地受污染，农村近 1 亿人饮水困难。工业废水排放约 300 亿  $M^3$ ，并使 3000 亿  $M^3$  淡水污染。全国 381 个城市中 260 个城市缺水，122 城市严重缺水，城市年缺水量约 58 亿  $M^3$ 。地下水的超采形成大面积漏斗，甚至引起海水倒灌。许多湖泊面积缩小，甚至干涸。我国年平均缺水 500 亿  $M^3$ 。全球气候增暖将使我国缺水的威胁更趋严重。

## 2. 矿产资源利用率低、浪费严重

我国矿产资源总量大，在 162 种矿种中有 20 种的储量居世界前列（如钨、锡、锑、钼、钒、钛、稀土元素等），但人均占有量少；品种齐全，利用率低；分布不均衡、不匹配；乱采滥挖，浪费严重；某些主要矿种（铁、铜）贫矿多、富矿少。我国矿产资源总回收率为 30%—50%，80% 的伴生矿没有回收，金属矿山采选综合回收率为 33%，非金属矿山总回收率为 20%—60%，煤炭矿井回采率为 34%。铝、铅、锌、金、银的再生利用率仅占总产量的 15% 以下，铜为 33%。铜、铝、铬、锰等金属还严重依赖进口。矿山固体废弃物大量堆存，占用大量土地，严重浪费资源。煤矸石、粉煤灰和尾矿渣年排放 5.5 亿吨，累积堆存 70 亿吨，占用土地 3.5 万公顷。

## 3. 土地退化、耕地锐减、植被覆盖率低

我国幅员辽阔，在 960 万  $km^2$  的陆地区域中，52.5% 属于干旱半干旱区，12.1% 沙漠戈壁，高原山地和丘陵占 65%，其中 4.8% 为石质山地，1.6% 为海拔 5000m 的高寒荒漠，0.5% 为冰川和永久积雪。我国土地资源分布不均匀，土地生产力区域差异大。我国东、南部的土地占全国总面积 48%，耕地占 86%，人口占 94%；而西部耕地和人口分别只占 14% 和 6%。

我国现有耕地近 20 亿亩，但有 2/3 为中低产田。由于水土流失、沙化、盐渍化、沼泽地、非农业占地，使耕地面积急剧减少。退化与沙化土地已有 90 万  $km^2$ ，每年以 6700 $km^2$  的速度在扩大。我国沙化土地面积已达 7.5 万  $km^2$ ，沙化速度为 2100 $km^2$ /年，预计 2000 年沙化土地将达到 43.3 万  $km^2$ 。每年自然灾害损毁土地 200 万亩，每年矿山开发占用土地 50—70 万亩，交通和基础设施每年占用土地 100 多万亩。

我国土地的水土流失问题严峻，50 年代为 153 万  $km^2$ ，现在已达到 367 万  $km^2$ ，每年入海泥沙量约 21 亿吨。水土流失表土 50 亿吨，不仅土壤的流失率远远大于形成率，还带走大量磷、氮、钾等养分。

我国森林资源少、覆盖率低（12.9%）、分布不均，人均林地面积不足 2 亩。林地面积和森林蓄积量分别为 11528 万公顷和 102.6 亿  $M^3$ 。林地生产力低，利用率低，残次林多，单位蓄积量少，生长率不高，因而可采的森林蓄积比重少。我国有草地 57 亿亩，但干旱与高寒草地占了一半。草场超载而退化严重，15 亿亩草场已沙化。

## （三）环境质量恶化、自然灾害频发

我国人口基数大，经济增长较快，加之技术与管理水平较低，资源浪费、环境污染与生态破坏相当严重。我国的环境质量局部有所改善，但总体上仍在继续恶化。

我国大气污染主要来源于燃煤，形成了长期的  $\text{SO}_2$  和降尘的煤烟型污染。1995 年工业排放的  $\text{SO}_2$  约 1396 万吨，烟尘与粉尘排放量约 1475 万吨。全国 99% 以上的城市大气质量达不到国家一级标准，36 个代表性城市中，空气中的颗粒物和降尘普遍超标， $\text{SO}_2$  和氮氧化物超标日趋严重。大气中排放的酸物质日益增多，致使酸雨的频度增加，分布地区由西南扩展到东部各省区；华东地区酸雨污染最重，其中心区酸雨平均 pH 值低于 4.0，酸雨频率在 80% 以上；西南地区平均 pH 值低于 5.0，酸雨频率高于 80%；29% 的国土面积受到酸雨的威胁。煤烟型污染还使某些地区产生人群的氟中毒、砷中毒等地方病。

我国水污染日趋严重。我国的七大水系有一半以上的河段水质污染，主要污染指标为氨氮、高锰酸盐指数、挥发酚和生化需氧量，86% 的城市河段水质超标。我国大淡水湖泊总磷、总氮污染面广，富营养化严重。我国近海海域水质恶化日趋明显，重点河口、海湾、港口污染比较严重。全国 1/2 的水体不符合渔业水质，1/4 的水体不符合农灌的水质标准。农用化肥和农药的施用，点多面广的乡镇企业的三废排放，已成为我国农村的主要污染源，使我国 2/3 的河流和 1000 多万公顷的农田受到污染。

1995 年我国排放的污水总量约 400 亿吨，其中工业废水约 222.5 亿吨。我国工业的三废处理率极低，生活污水仅有 5% 经处理，工业废水约 20%—30%，工业废气为 50%—60%。全国工业固体废弃物年产生量为 6.5 亿吨。大量未经处理的工业废渣累积堆存量 66.4 亿吨，占地 5.5 万公顷，每年约有 8000 万吨的城市垃圾未经处理，城市垃圾量每年以 6%—7% 的速度增长，形成了重要的二次污染源。

我国城市环境噪声相当严重。城市道路、交通噪音的等效声级超过 70 分贝的路段占 70%，城区噪声超过 55 分贝的范围达 66%，城市工业噪声也相当严重。

1995 年耕地净减少 38.8 万公顷，历年来我国的耕地不仅面积日益减少，而且污染严重。水土流失危害约 150 万  $\text{km}^2$  的国土面积，影响的耕地占全国总耕地面积的 1/3，耕地总面积的 59% 缺磷、25% 缺钾、14% 磷钾俱缺。污水灌溉使每年受污染的耕地达 66 万公顷。

我国人口众多，气候、地理与地质条件复杂，生态环境脆弱，自然灾害频发，且自然灾害种类多、受害面积大、成灾率高。每年农作物受灾面积达 2000—4000 万公顷，减产粮食 200 多亿公斤，受灾人口 200—300 万。每年各种气象灾害（洪涝、干旱、暴雨、台风、冷冻、风暴等）直接经济损失约 500 亿元，每年海洋灾害与各种地质灾害（地震、泥石流、滑坡、地面沉降等）直接经济损失各达 100 亿元以上，每年病虫害等生物灾害造成直接损失上百亿元。据统计，全国各种自然灾害造成的经济损失，1990 年为 616 亿元，1991 年为 1216 亿元，1992 年为 853 亿元，1993 年为 993 亿元，1994 年为 1876 亿元。全国由各种自然灾害和生态破坏、环境污染所造成的经济损失约 2000 亿元/年。

（四）全球增暖、海平面上升对我国的影响

全球增暖、海平面上升对我国气候、生态、环境与灾害都将产生长期的持续影响。

由于全球增暖，预计我国雨量减少，蒸发量增加；将加重华北、西北的干旱，使土地沙化面积扩大，加速草原退化，加快湖泊干涸、冰川退缩与雪线上升；水土流失加剧，淡水更为短缺。

全球气温增高，我国的小麦、水稻可能增产 10%—15%，玉米、高粱等谷物增产 0—10%，却加重了我国北方、华中和南方农作物的病虫害，小麦锈病南下、稻瘟病北上、蝗灾加重，农田杂草丛生。

全球增暖与海平面上升，将对我国沿海经济带的发展带来一系列的不利因素和严重影响：东南沿海地区台风增多，加重了风灾与暴雨灾害；风暴潮灾害加剧，洪涝威胁加大，港口功能减弱，现有海堤和档潮闸等工程的抗灾能力降低。预计长江三角洲、珠江三角洲、黄河三角洲和天津地区，低地被淹没，洪涝威胁加大；风暴潮灾害加剧，港口功能衰退；城镇污水排放困难、甚至倒灌；河口海水入侵，盐水入侵上溯；淡水污染和海洋污染加重。

## 五、地外物体撞击地球诱发的剧烈灾变和 生物灭绝——保卫地球文明

人类社会的进步与发展，由于不合理的生产和消费方式，即不可持续发展的方式，产生自然支撑系统的失衡，延生出上述一系列的气候变化、生态破坏、环境污染、资源不足和灾害频发。人类社会既要面对自己长期的过失而带来的危机，还要承担起抵御由于地外物体撞击地球诱发的气候环境灾变与生物灭绝、保卫地球现有文明的神圣使命。

太阳系中的小天体（小行星、彗星等）撞击行星与卫星，是自然界一种正常的现象。月球、火卫、木卫、水星、金星与火星的表面密布着千疮百孔的撞击坑，有些直径达到数百公里甚至 1000—2000km。地球曾遭受过频繁的小天体的撞击，形成巨大的撞击坑，诱发全球性的气候、生态、环境、地质灾变与生物灭绝事件。撞击作用也是地球和生物进化的重要营力。地球的表面，沧海桑田，绝大部分撞击坑被剥蚀、夷平或掩埋，但仍然找到了 150 多个证据确凿的撞击坑（坑群），这些坑的年龄范围从几千年到 20 亿年，如南非的伏利德佛坑（直径 140km，撞击年龄为 19.7 亿年）、世界最大的铜镍矿床——加拿大肖德贝里坑（直径 140km，撞击年龄 18.5 亿年）等。

通过对月球、水星和火星表面撞击坑密度、大小和年龄的研究与统计：对地球而言，平均 1 亿年有一次直径为 10—20km 的小天体撞击，形成直径大小 100 公里的撞击坑，诱发全球性剧烈的气候环境灾变与生物灭绝事件，1000 万年和百万年分别有一次 1—5km 和小于 1km 的小天体的撞击，形成全球性或大区域严重的气候环境灾变和生物灭绝事件。

人类历史上最为人熟知的撞击事件是 1994 年的彗木相撞和 1908 年发生的通古斯事件。1908 年 6 月 30 日早晨七点多钟，在西伯利亚上空突然出现了一个比太阳还亮的巨大火球，拖着长长的烟尾巴，发出隆隆的怪啸声。这位“天外来客”在空中猛烈爆炸了。一个巨大的火柱冲天而起，随即变成黑色的蘑菇状云。爆炸产生的冲击波，把方圆 2000km<sup>2</sup> 内的 1000 万棵树推倒，使 1500 头驯鹿死亡，地面出现了 122 个撞击小坑（其中最大的直径为 22m）。北半球上空出现了巨大的臭氧层空洞，一直持续达 4 年之久。观察记录表明，地磁场也发生了扰动。据估计，爆炸能量相当于 1000 万吨 TNT 炸药，约为

1945 年 8 月投在日本广岛原子弹威力的 500 倍。

#### (一) 6500 万年前地球遭受一次大劫难

6500 万年前白垩纪末的恐龙灭绝事件，是一次小行星撞击地球诱发的气候、生态、环境灾变与全球性的生物灭绝事件。

在 6500 万年前的白垩纪末，一颗直径约 10km 的小行星撞击在墨西哥尤卡坦半岛海域。小行星以大于 20km/s 的速度首先闯入地球的大气层，陨星以高速与大气分子相撞击，压缩大气并产生具极高温度与压力的冲击波，释放出相当于近 1000 万亿吨黄色炸药爆炸产生的能量，是通古斯爆炸所释放能量的 1 亿倍，约为投入日本广岛原子弹威力的 500 亿倍。在墨西哥尤卡坦半岛顶端的“魔鬼之尾”发现 6500 年前由小行星撞击形成的直径为 180 公里的撞击坑。

强大的冲击波使撞击体本身气化、熔融、燃烧，它在大气层中爆炸并分裂成无数火球射向地表，强大的冲击波以及无数的火球点燃了地面一切可燃燃烧的物体，熊熊野火，迅速蔓延全球，产生大量烟尘、碳黑和二氧化碳弥散在大气层中。这些粒子所携带的陨石微量元素也将被均匀地分布在地球表面。这部分物质的贡献将使海洋中金属元素的浓度剧增，破坏了海洋中某些微量元素的地球化学平衡，尤其是有毒的金属元素如镍、铜、铅等。根据我们计算，撞击后海洋中镍的浓度增加 330 倍，从常规的 120ng/kg 增加到 40  $\mu\text{g/kg}$ ，远远地超出许多海洋生物所能忍受的浓度极限（2  $\mu\text{g/kg}$ ），部分海洋生物将会选择性地中毒死亡。

强大的冲击波，使地面的岩石气化、熔融，形成大量熔融状液滴，并溅射至大气层中。液滴迅速冷凝并在全球沉降形成玻璃陨石与微玻璃陨石。冲击波挖掘撞击区域内的岩层，将 200 倍于冲击体的物质破碎成粉尘和碎块，抛向平流层与地面几百公里的区域内。高耸入云的大烟柱，直上云霄，弥散于平流层中。

强大的冲击波，使大面积的海水立即蒸发，大量的蒸气进入大气层。海水产生了强烈的震荡，可使许许多多的海洋生物丧失，包括海洋爬行类的鱼龙、蛇颈龙和软体动物（如菊石）。威力无比的海啸，使海水咆哮、海岩破坏，海底沉积物层序扰乱。

强大的冲击波，使坚硬的地壳产生深层断裂，导致地球内部物质运动的紊乱，地球磁场发生倒转。地磁倒转使地球在外层空间失去磁屏蔽，到达地表的宇宙射线通量将剧增，臭氧层的严重耗竭加剧了这一过程，使某些生物机体直接遭受宇宙射线的照射而死亡。地壳的深大断裂还可诱发深部岩浆上升和火山喷发，并产生强烈的大地震。

强大的冲击波使大气层的局部温度突然升高，使大气中的  $\text{N}_2$  形成  $\text{NO}$  和  $\text{NO}_2$  化合物，使动物暴露于氮氧化物气体之中窒息而亡；撞击地区因含有石灰岩（ $\text{CaCO}_3$ ）、白云岩〔（ $\text{CaMg}$ ） $\text{CO}_3$ 〕和石膏（ $\text{CaSO}_4$ ）等地层，在冲击波作用下，将会发生分解作用，释放出  $\text{CO}_2$  和  $\text{SO}_2$  气体，进入大气层。一方面  $\text{NO}_2$  和  $\text{SO}_2$  云破坏了地球生物的保护伞-臭氧层，另一方面，与水蒸气结合，使大气层中含有大量的硫酸与硝酸，强烈的酸沉降使海水酸度增大，溶解海洋透光层中的碳酸钙物质，导致壳体成分为碳酸钙的海洋浮游生物绝灭。

弥散在平流层中浓密的尘埃、 $\text{CO}_2$ 、 $\text{SO}_2$ 、碳黑和水蒸气等屏蔽了太阳辐射，使地面急剧降温 8—20℃，海水降温 2—3℃，漫长的、寒冷的、黑暗的

冬天降临。地面的冰盖增大，海水退缩、盐度升高，导致部分海洋生物灭绝。地面植物的光合作用受到抑制，逐渐枯变成干柴，以植物为食物的动物由于食物链的瓦解而“断粮”。

平流层中的尘埃、气溶胶等颗粒将会缓慢沉降，阳光辐射逐渐得到恢复，但地表并不会因此而显著增温，相反，在“寒冷的冬天”里形成的雪被及冰盖，因高反射率对寒冷气候将产生巨大的正反馈作用，使降温进一步加剧。根据第三纪/白垩纪界线氧同位素突变的地层厚度计算，寒冷的冬天可持续几十万年。生态环境的恶化，气候的突变使大批生物难以躲过灾难，导致白垩纪末 60% - 80% 的生物种属从地球上消失。

近年来，我们在西藏岗巴的白垩纪/第三纪地层剖面中发现上述部分的地质地球化学记录，同时在全球各地 110 个地层剖面中找到了上述证据，表明这次撞击事件的影响是全球性的。

这场宇宙灾变是突发性的、全球性的大浩劫。这次事件结束了爬行动物最后的地质时代，开始进入与我们人类息息相关的哺乳动物时代（在地质学上称之为新生代），并最终导致人类地位的上升。

### （二）新生代以来地球至少遭受到六次撞击灾变

除上述 6500 万年前以恐龙灭绝为代表的地球大劫难以外，根据我们的研究，相继在距今 3400 万年、2400 万年、1500 万年、110 万年前发生过直径为 1—5km 的地外物体撞击地球事件，但其撞击能量明显地小于白垩纪末的撞击。在各次撞击年代相对应的地层柱中找到了撞击作用存在的各种证据如铱异常、玻璃陨石和微玻璃陨石、撞击体残余物、冲击矿物等，同时也发现了各期撞击作用留下的撞击坑。地层的地球化学记录表明在各次撞击作用发生期间，地球表面的气候、生态、环境发生过剧烈灾变，产生了新的冰期与地磁极倒转，出现了不同程度的生物灭绝。距今最近的一次撞击作用发生在 70 万年前，大量的地层记录证明，撞击过程产生了目前分布于澳大利亚与亚洲广大区域内的玻璃陨石，在我国黄土地层和大洋深海钻孔中均发现微玻璃陨石与地磁极倒转。地球化学记录表明全球气温剧降，经历漫长的、黑暗而寒冷的“冬天”与冰期，出现一定程度的生物灭绝。70 万年前的地外物体撞击地球事件至今尚未发现同期形成的撞击坑。科学家推测，这次撞击可能是由一颗彗星瓦解后形成一群彗星碎片，高速冲入大气层，强大的冲击波撞击地面，地面的靶岩可能是较疏松、孔隙度较大并含有水分的黄土层，撞击过程的景象类似于白垩纪末的撞击，形成的撞击坑因直径较小且分散，难以保存。

### （三）人类——地球的保护神

地外物体撞击地球是一种正常的自然过程，地球演化历史中曾发生过难以计数次的撞击作用，今后地球的演化历程中不可避免的仍会发生。较大撞击所释放的能量往往相当于世界核武器库爆炸能量的几万倍，并诱发气候、生物、环境剧烈灾变，对人类将造成极大的威胁。但是，地外物体撞击地球的几率极小。人类自诞生 300 多万年以来，经历过多次全球性的劫难，在对自然界抗衡的过程中已发展起高度的文明，人类已成为地球的保护神。当今科学技术的进步，已有可能抵御、控制和化解这种来自宇宙空间的突发性袭击。

世界的科学家早已关注和开展地外物体撞击地球的预报和应采取的紧急措施的研究，以保护我们地球文明的持续发展。现代科学技术已经能够实现对邻近的行星际空间及近地空间具有公里级甚至更小的小天体进行精细的观

测与预报。1994 年，苏梅克-列维 9 号彗星与木星撞击时间的准确预报是个极好的例证。目前，世界各国相互合作已建立了全球性的观测、监视和预报的自动网络体系，侧重于近地空间小天体的观测与预报，使人类有可能预先准备好应采取的紧急措施，拦截摧毁或使来袭的小天体偏离撞击轨道。现代科学技术已显示出具有化解小天体撞击灾变的能力，随着科学技术突飞猛进的发展，通过国际合作，人类完全能胜任地球保护神的角色，进一步推动地球文明的快速发展。

## 六、人类移居月球与邻近行星的希望

我们居住的地球已经是灾难深重、斑驳陆离、遍体鳞伤。人类始终向往着扩展自己的生存与发展空间，更换一个更为美好的环境，迁居月球和邻近行星一直是人类自古以来的梦想。

60 年代以前，人们只能从地球上用各种工具对月球和行星进行观测，了解它们的形状、大小、运动规律、表面特征与相对年龄，从而编制了某些行星的外貌图和构造图。60 年代以来，基于以下四方面的进展，对行星的认识取得了突飞猛进的发展：1. 随着大气外观测技术的发展和一系列宇宙探测器对月球的观测，使人们对月球的地质和构造、磁场、宇宙辐射和太阳风对月表的影响有个初步了解，在此基础上实施了“阿波罗（Apollo）和“月球”（ ）探测和取样计划，九次登月取样，对月球的主要科学问题有了轮廓性的认识，实现了人类踏上月球，迈向宇宙的伟大创举。2. “水手号”、“金星号”、“先驱者”和“海盗”等一系列行星际空间探测器的发射和软着陆，对行星际空间特别是对类地行星的研究，获得了大量的科学资料。3. 对于地球的研究，特别是一系列地球研究计划的开展和地球资源卫星所取得的丰富信息，对地球的物质组成、内部构造、动力学过程和演化历史的研究，取得了多方面的突破和进展。4. 陨石学的研究，对太阳系不同部位形成的陨石物质的成分、有机组分、同位素组成与变异、年龄、热历史、宇宙成因核素等一系列的研究，为探讨太阳系的物质来源、行星的形成方式与过程、现代行星际空间的状况，提供了丰富的科学资料。进入 90 年代以来，美国、欧洲、日本等国正筹备与实施“重返月球”的宏伟计划。行星的探测正在积累资料，深化认识，下一世纪将是人类踏上行星的重要时期。

### （一）月球表面环境

通过一系列月球探测器的发射，特别是“阿波罗”（Apollo）和“月球”（ ）计划登月取样的实施，对月球的空间环境、表面特征、岩石类型、地层划分、地质构造、内部结构和演化历史有了系统而综合的了解，编制了月球地貌图、地质图、构造图，为“重返月球”、开发利用月球能源与资源、建立半永久、永久性的“地球村”，奠定了重要的基础。

月球是地球唯一的卫星，基本上是一个圆球体，南北极稍扁，赤道处膨胀，形状似地球：平均半径为 1738.09km，极半径约比赤道半径短 500m；北极隆起，而南极地区则下洼约 400m。

月球环绕地球运转的轨道不是正圆，而是一条稍有些扁的椭圆轨道。因此，地-月间距离变化较大，近地点为 363300km，远地点是 405500km，平均距离为 384402km。月球的自转周期恰好等于它绕地球公转的周期，所以我们在地球上总是只能看到月球的同一半面（正面）。然而，由于月球的天平动使我们稍能看到月球的另一半面（背面）的一隅。

月球表面白天、黑夜时间各长达相当于地球的 14 天，昼夜温差变化很大，白天温度高达 130—150℃；而夜间可下降到零下 160—180℃，但表面温度差变化影响深度不超过 1m。月球实际上是一个无风、无水和大气、无风霜雨雪、无生命、无声响、冷热剧变、非常干旱的寂静的天体。

在夜间肉眼看到的月面暗色斑块，称为“月海”，主要是月球内部玄武岩的喷出物。月海实际上是宽广的平原，没有水的“海”。月海大多分布在正面。肉眼所见的月面洁白光莹部分，称为高地，是月球上最古老的月质单元。月球正面的月海约占正面表面积的一半，背面则极少。最大的月海是风暴洋。

整个月球表面地形可分为两大类型：低反照率地区（暗色）为月海，布满圆形和不规则形状的盆地，有些盆地宽数千公里，深达 6km。月海中反照率的差异主要是物质成分不同所致，这些物质是由几种不同化学成分的铁镁质玄武岩组成。高反照率地区（亮的）称为高地。高地地形高出月海约 1000m，在高地上分布着大量的负地形，这些负地形大部分是撞击坑（直径从数百米到数百公里，甚至上千公里）。

高地物质大部分是富含长石（斜长石）的深成岩，主要由斜长岩、辉长岩、斜长苏长岩及富钾、稀土和磷的玄武岩组成。

月壤主要是由于月表岩石受到外来物体或小天体冲击作用，粉碎沉积而成。其次，经几十亿年间月球表面昼夜的巨大温差（温差在 100℃以上）和太阳风、银河宇宙射线的作用，促进了月壤的形成。太阳辐射使矿物强度降低，晶格发生形变，温差变化加速了岩石的碎裂。因此月壤是太阳系中的小天体多次撞击，月表岩石的温差胀缩而破碎的岩石碎屑、粉末、角砾、冲击熔融玻璃组成的“土壤”覆盖在月表，结构松散。月海区月壤一般厚 4—5m。高地的月壤较厚，约 10m。月球周围没有磁场，太阳风直接入射月壤，因而月壤中富集太阳风的组分（H、He 等）。

## （二）重返月球的科学目标

月球将可能成为人类未来的能源基地。月球既无磁场，又无大气，太阳风粒子能很容易地抵达月球表面，渗入月壤颗粒，形成一层约 10 μm 的覆盖层。因月表经过亿万年流星和微粒的轰击，月壤混杂，使表面蕴藏着丰富的氦-3。氦也通过太阳风注入而蕴藏在月壤之中。通过氘和氦-3 聚变反应可获得能源。在地球上，天然气矿床中已知的氦-3 资源只够维持一个 500 兆瓦规模发电厂数月的用量。而月球上，由于太阳风中大量的氦-3 伴随着其它易挥发物质在 40 亿年中不断地进入月球表土中，氦-3 的丰度可达 0.4—15ppb。初步估算，月壤中氦-3 所能产生的电能，相当于 1985 年美国发电量的 4 万倍。考虑到月壤的开采、排气、同位素分离和运回地球的成本，氦-3 的能源偿还比估计可达 250，这个偿还比和铀-225 生产核燃料（偿还比约 20）及地球上煤矿开采（偿还比约 16）相比，是相当有利的。同时从月壤中每提取一吨氦-3，还可以得到约 6300 吨的氢、700 吨的氮和 1600 吨的碳，这些副产品对维持月球永久基地来说，也是必要的。

月球拥有丰富的矿产资源与开发前景。月球上含有丰富的钛铁矿，尤其是月海玄武岩。根据阿波罗着陆点取回的样品分析来看，阿波罗-11 号的样品中 TiO<sub>2</sub> 含量为 9%—12%，阿波罗-17 号的样品含量高达 14.5%，比我国著名的攀枝花钒钛磁铁矿矿床的 TiO<sub>2</sub> 含量（平均 10.56%）还高。钛铁矿是铁、钛的来源，是生产氧的潜在来源；可以通过钛铁矿还原法生产维持生命

和火箭推进器所需的氧，所留下来的钛和铁是重要的金属。氧又可与氢合成获得水，这是人类未来在月球上赖以生存和开发及培植绿色植物的根本条件。

有待开发的太空微重力与高真空资源。月球上的引力只有地球的  $1/6$ ，而在宇宙空间，重力只有地球上的百万分之一，在这种微重力条件下，各种物资能够很好地融合，制造出特殊的材料，利用高真空资源可以在月球上进行高纯度、高质量的冶炼、焊接和培养人工晶体，还可以分离出一些地球上无法分解出的物质。

在月球上建立地球监测站，可更清楚地了解地球上所发生的各种自然现象，特别是自然灾害和环境恶化，将有助于认识地球上人类所面临的环境、资源、灾害等问题；在同这些自然灾害的斗争中，提高预报和防御能力有着极其重要的作用。

月球周围无大气、弱磁场、重力小、高真空等特点，是研究天体物理学、重力波物理学、中微子物理学、空间天文学等一代新学科的理想场所；有利于电磁波宽波段范围的高灵敏度测试和建立深空天文观测站的理想；有利于设备运输和安置探测器，建立多功能月球观测站和深空研究基地。

21 世纪，将是人类为实现在月球上定居和开发利用月球资源进行有效探索的重要时期。

### （三）邻近行星的表面环境

太阳系包括九大行星、三十多个卫星、十多万彗星和无数小行星与陨石物质。根据行星的物理化学性质，与地球相似的行星，称为类地行星，如水星、金星、火星、冥王星（？）。与木星相似的行星，称为类木行星，如土星、天王星、海王星。在太阳系内，太阳的质量约为各行星系总质量的 150 倍，占全系统质量的 99% 以上，但太阳的角动量只占全系统角动量（ $3.155 \times 10^{50}$  克·厘米<sup>2</sup>/秒）的 2%。全部行星的质量总和虽小，而角动量却占全系统的 98% 以上。绝大部分行星绕太阳运行的方向和基自转方向相同，也和太阳自转的方向一致。行星运行的轨道都是偏率不大的椭圆，轨道平面与太阳赤道面很接近。类地行星一般质量小、密度大、体积小，主要含 Si、Mg、Fe 等元素，亲气元素含量少，类地行星的卫星很少；而类木星行星一般质量大、密度小、体积大，主要含 H、He 等亲气元素和 C、N、O 等冰物质，亲石元素与亲铁元素含量少，类木行星的卫星较多。

类地行星的大气层差异极大，唯有地球发育有水圈。水星有极稀薄的大气层，火星的大气层稀薄，而地球和金星具有浓密的大气层。看来行星大气层的厚度与密度主要决定于行星质量的大小。质量大的行星，具有大的逃逸速度，易于捕获内部排出的气体，组成浓密的大气层，反之亦然。

地球和金星质量相近，都具有复杂的大气层。金星由于没有水圈，CO<sub>2</sub> 残留在大气层内，再加上金星表面温度达到 650—750 °K，产生温室效应，致使大气压达到 99。地球通过内部物质的熔融除气过程，大约共排出  $1.7433 \times 10^{24}$  克的挥发分物质，其中 CO<sub>2</sub> 约  $1.218 \times 10^{23}$  克。若地球没有水圈，没有碳酸盐的沉积和植物光合作用，估计现今地球大气层中 CO<sub>2</sub> 的分压将接近 20 大气压。地球内部的物质通过火山作用排出大量的 H<sub>2</sub>，CO<sub>2</sub>，CO，S<sub>2</sub>，Cl<sub>2</sub>，H<sub>2</sub>，N<sub>2</sub>，Ar，O<sub>2</sub>，NH<sub>4</sub> 等，形成初始的强酸性大气层，经过水蒸汽的凝结，逐渐在地面形成了强酸性水圈。海水的 pH 值在 25 亿年前，可能 4；元古代海

水的 pH 值可能为 4—5。因而在元古代的漫长历史中，考虑到  $\text{CO}_2$  分压值较高的影响， $\text{CO}_2$  在海水中的溶解度仍然较低，使大气层中积累了大量的  $\text{CO}_2$ ，地球形成了  $\text{CO}_2$  大气圈。随着海水 pH 值的增加， $\text{CO}_2$  的溶解度的增高，再加上碳酸盐的沉积增多，特别是古生代大量植物的出现，使大气层中的  $\text{CO}_2$  分压迅速降低，使大气层演化为现今的氮-氧大气层。地球大气层是地球的特有条件并经过长期演化所形成的。

水星和火星由于表面气压低，液态水在行星表面要沸腾成气态；加之水星和火星质量小对气体的捕获能力小，因此水星和火星不可能产生水圈，只能形成极稀薄的大气层。总之，行星大气层的厚度、密度和成分受到行星质量、行星表面温度和水圈发育程度的影响。

水星表面很像月球，布满了环形坑，盆地、平原和延伸几百公里的悬崖峭壁。水星表面没有大气和水体的风化侵蚀痕迹。

金星表面被浓密的大气层所覆盖。金星上也分布有环形坑。金星表面的岩石有尖锐的棱角。金星 10 号着陆区布满着冷却的并风化成薄饼状的熔岩（可能是玄武岩）。

火星的大气层稀薄，使火星表面裸露在紫外辐射、宇宙辐射和陨石冲击作用下。火星大气层中的气体运动速度很高，当大尘暴发生时， $\text{CO}_2$  气体在大气层内的运动速度达到 200 公里/小时，将火星表面的大量尘埃物质刮到火星表面几公里的高空，使浓密的尘埃笼罩着火星表面。风的吹扬作用使火星表面形成一些几百公里长甚至几千公里长、几十公里宽的断续的纹理。风的搬运、沉积作用，使火星表面的环形坑或低洼处被砂土所充填，形成分布广泛的沙丘。火星表面广泛分布着撞击环形坑和火山作用形成的地形以及延伸上千公里的大断层。火星土壤经“海盗”-1.2 号取样测定，80% 为富铁粘土并含有少量硫酸镁和碳酸盐，火星表面的岩石富含铁镁，估计没有大量的花岗岩物质。

地球邻近的行星与月球，表面环境极其严酷，远远不适宜人类的居住与生存。在月球上建立永久居住的“地球村”和在邻近行星上建立半永久或永久性的居住区是下一世纪探索的目标，在今后的几个世纪里不可能实现能减轻地球庞大人口压力的大批移民，无法从实质上更换地球是人类共同生活的唯一家园的地位。

我们只有一个地球，一个灾难深重的地球，人类必须自己拯救自己，人类社会发展的唯一选择——走可持续发展之路。

## 七、人类社会的共同选择，走可持续发展之路

### （一）惨痛的教训、深刻的危机、人类的共识

在人与自然界漫长的斗争历程中，历尽劫难，由被自然统治和蹂躏的地位而逐渐成为自然界的主人，人类的聪明才智和辛勤劳动创造了巨大的社会财富，培育和发展了灿烂的文化，积累并掌握了丰富的科学技术知识与技能，推动着社会向更高级的阶段发展。特别是推动人类社会进入现代物质文明生产的工业革命以来，一些发达国家，随着工业的兴盛，科技的进步，经济的发展，肆意地过度消耗自然资源，致使出现了过高的物质享受和财富的高度集中。人类把自然界视为“取之不尽，用之不竭”的天然财富的宝库，肆意掠夺、索取和消耗，生态环境系统受到了严重的破坏，使自然界严重地失去

和谐的平衡，使地球的支撑系统伤痕累累，斑驳陆离。

工业革命以来，人类面临着两大失衡：一是随着经济的增长与文明的发展，生态环境却不断恶化，人口激增、空气污染、淡水短缺、资源不足、土地退化、土壤流失、森林减少、草地荒漠化、沙化蔓延、物种锐减、气候异常、灾害频发，威胁着人类自身的生存与发展；另一是贫富两极分化，少数国家财富不断积累与集中，大多数国家贫困程度加剧。人们认识到形成人类社会的两大失衡愈演愈烈的恶性循环，起因于不可持续发展的生产方式和过度消耗自然资源的不可持续发展的消费方式。因此，不消除贫困和不发达，不摒弃不可持续发展的生产方式与消费方式，不走可持续发展的道路就不能根除人类生存环境的恶化。保护生态环境，促进持续发展，是当今人类面临的同一重大课题的两个方面。

1972年6月在斯德哥尔摩召开了“人类环境大会”。这次会议各国并没有取得实质性的共识，工业革命以来那种不顾地球生态环境的“高消耗、高投入、高污染、少数人高消费”的不可持续的生产方式与消费方式仍得以继续。生态和环境更为恶化，温室气体的大量排放，全球增暖趋势更为明显，臭氧层空洞在扩大，土地退化沙化和物种灭绝的速度在加剧；不发达国家的贫困程度在加深。人们认识到不能孤立地讨论环境保护，环境保护要与经济社会发展相协调。人类的生产、消费和发展要充分考虑资源与环境的支撑，而环境保护又必须建立在众多国家的经济发展和科技进步的基础上。

80年代初，联合国针对当代人类面临的三大热点问题，即南北关系、裁军与安全、环境与发展，发表了《共同的危机》、《共同的安全》和《共同的未来》三个文件，都共同地提出了为克服危机、保障安全和实现未来都必须实施“持续发展战略”。1984年5月召开的“地球的未来”会议号召，经济社会的发展必须同资源和环境的保护相协调，在满足当代人需要的同时，不危及后代人满足其需要的能力。

1989年第44届联大第228号决议，是筹备和召开“联合国环境与发展大会”的政治与法律依据。决议强调环境与发展要结合起来，标志着对可持续发展的共识取得了重大的突破。会议决议强调，“严重关切环境状况继续恶化、全球生命维持系统产生退化，而目前趋势任其继续下去则可能破坏全球生态平衡，危害地球维持生命的特质，导致生态灾难”，“全球环境不断恶化的主要原因是不可持续的生产和消费方式，特别是发达国家的这种生产和消费方式”，“强调贫穷与环境退化息息相关”，“促进人力资源开发，尤其是发展中国家人力资源的开发，以保护和改善环境”；决议要求可持续发展的概念必须变为具体的政策和方案。

1989年5月第15届联合国环境署理事会通过了《关于可持续发展的声明》，对可持续发展作出了全面而权威的论述。《声明》认为：“可持续发展，系指满足当前需要而又不削弱子孙后代满足其需要之能力的发展，而且绝不包含侵犯国家主权的含义。……可持续发展意味着要有一种支援性的国际经济环境，……可持续发展还意味着维护、合理使用并且提高自然资源基础，……在发展计划和政策中纳入对环境的关注与考虑。”

1992年2月在里约热内卢召开了178个成员国参加的“联合国环境与发展大会”，102位国家元首出席了大会的“首脑级会议”。会议通过并签署了《关于环境发展的里约宣言》、《关于森林问题的原则声明》、《气候变化的框架条约》、《生物多样性公约》和《21世纪议程》。《21世纪议程》

由 40 章和 110 多个“项目方案领域”组成，包括了当前全球环境与发展的绝大部分问题，如人口，人类健康，山区农业与农村、居住区的可持续发展，贫困、森林的破坏、沙漠化及干旱的克服，大气层、生物多样性、海域大洋、淡水资源与水质的保护，加强对土地资源、生物技术的管理及有毒化学品、危险废物废料、固体废弃物及污水、放射性废料的环境无害管理等，分别制定了对各项目方案领域的行动依据、目标、活动和执行的手段。

走可持续发展之路，是人类社会的共同选择。经济发展必须与环境保护相协调，经济发展是人类自身生存和进步所必须，也是保护和改善地球环境的物质保证。当前保护生态环境，实现可持续发展，已成为全世界共同的紧迫而艰巨的任务。人类共居在一个地球上，某些环境问题已超越国家和地区的界限，解决全球环境问题是每个国家和地区的共同利益所在。

## （二）中国为实施可持续发展所作的努力

中国是一个发展中国家，正面临着发展经济和控制人口、节约资源、保护生态环境的双重任务。从国情出发，中国在全面推进现代化建设的进程中，把计划生育控制人口和保护环境造福子孙后代作为基本国策，把科教兴国和可持续发展作为重大发展战略，在经济和社会发展中，实现两个具有全局意义的根本性转变——一是从传统的计划经济体制向社会主义市场经济转变；二是经济增长方式从粗放型向集约型转变。改革开放 18 年来，由于中国实行了上述两项基本国策、两大战略和两个根本性转变，国民生产总值以年均 10 % 左右的速度持续增长，而人口得以合理控制，环境质量基本避免了相应的恶化。实践表明，中国实行的人口、资源、生态、环境和经济、社会协调发展的方针是有成效的。

中国现代化建设是在人口基数大，人均资源少，经济发展和科学技术水平都比较落后的条件下进行的。70 年代以来，随着中国人口的增长，经济的发展和人民消费水平的不断提高，使本来就已短缺的资源和脆弱的环境面临越来越大的压力，选择可持续发展的道路，既是当代经济与社会保持快速、稳定、健康发展之必须，也是为子孙后代生存与发展息息相关的重大决策。

中国政府十分重视人口增长和经济发展而出现的环境问题，把环境保护作为提高人民生活水平和生活质量的一个重要方面。为了促进经济、社会与资源、环境的协调发展，中国在 80 年代制定并实施了一系列符合可持续发展战略的方针、政策、法律和措施。

随着经济和社会的发展，防治环境污染和生态破坏以及合理开发利用自然资源，关系到国家的全局利益和长远发展，确立环境保护作为中国的一项基本国策；国家将环境保护纳入国民经济和社会发展规划；提出了制定经济建设、城乡建设和环境建设同步规划、同步实施、同步发展，实现经济效益、社会效益、环境效益相统一的指导方针；提高全民的环境保护和可持续发展的意识，加强可持续发展能力的建设；加速环境科学技术的进步，初步形成了环保科研体系；推进环境保护和可持续发展领域的国际合作，认真履行国际环保公约。

1992 年联合国环境与发展大会把可持续发展作为未来共同发展的战略。中国随即提出了中国环境与发展应采取的十大政策，明确提出可持续发展战略是加速我国经济发展、解决环境问题的正确选择，还对防治工业污染、治理城市“四害”、改善能源结构、加强生物多样性保护、推进环境保护科学技术进步、运用经济手段保护环境、提高全民环境意识、健全环境法制、

强化环境管理和制定我国“21 世纪议程”等提出了相应的政策。

1994 年 3 月，中国政府批准发布了《中国 21 世纪议程——中国 21 世纪人口、环境与发展白皮书》，从我国国情出发，提出了中国可持续发展的总体战略。1996 年 3 月，《中华人民共和国国民经济和社会发展“九五”计划和 2010 年远景目标纲要》得以批准实施，把实施可持续发展作为现代化建设的一项重大战略，紧密结合经济体制和经济增长方式的根本转变，实现可持续发展战略目标，促进经济与社会协调发展。

可持续发展是人类共同的选择和共同的利益所在。

我们只有一个地球，要爱护、珍惜这颗孕育一切生命和人类并为他们生存与发展无私奉献的行星，要把地球建设成为有高度文明发展的、与人类和谐协调、美丽富饶的大家园，让地球永远以她婀娜多姿的风采驰骋在浩瀚无际的宇宙中。