

文章编号:1001-8166(2003)06-0837-15

# 我国的地球系统科学研究向何处去<sup>\*</sup>

汪品先

(同济大学海洋地质实验室,上海 200092)

**摘 要:**近 15 年来,全球变化与地球系统科学研究在中国广泛开展,我国科学家越来越积极地参加各项国际计划。当前,一些重大的国际计划正在进入其新阶段(如 IGBP-II, IODP),恰好我国也正在制定科技发展中长期规划,迫切需要回顾我国地球系统科学的现状并探讨其今后方向。尽管中国作者的国际论文数量在增长,我国地球系统科学落后于国际的差距仍有拉大的趋势:国际前沿的许多热点问题,在中国尚未提上日程;中国学者在国际计划中早期多有贡献,但在项目总结中却很少有份。为此,提出 3 点建议:(1)中国地球科学家应当扩大视野、立足本国、面向全球;(2)应当注意国际前沿动向,促进地学与生命科学在分子水平上的结合;(3)中国的地球科学,应当从以描述为主向探索机理的方向发展。我们不应满足于向国际学术界输出“原料”,而要积极参加地球系统科学中关键问题的理论探讨。

**关 键 词:**地球系统科学;地球圈层相互作用;地学与生命科学的结合

**中图分类号:**P      **文献标识码:**A

从 20 世纪末期起,国际学术界正在经历着一场质的变化:原来分头描述地球上各种现象的学科,正在系统科学的高度相互结合,成为揭示机理、服务预测的“地球系统科学”。人们发现:吹向大洋的风尘长期增多能够造成大气降温,因为会增强海洋生产力,减少大气 CO<sub>2</sub>;智利岸外鱼类的大批死亡和印尼岛屿上的森林火灾同出一源,因为都属于厄尔尼诺的效应。地球真是一个整体,牵一发足以动全身。地球科学又一场新的革命性突破,正在来临。我国在世纪之交的地球科学战略部署中,已经十分明确地将地球系统科学定为基础研究的总方向<sup>[1,2]</sup>。现在,在讨论制定国家科技发展中长期规划的时候,有必要对国内外地球系统科学的研究作一次比较,在“低头拉车”的同时也来个“抬头看路”,对学科发展的走向提出一点管窥之见,就正于同行。

## 1 差距在缩小还是在扩大?

近年来,“全球变化”、“地球系统科学”已经广泛

列入各种有关的科学研究发展计划,并且广泛开展,成绩卓著;有关地球系统科学的专著论文以及教材,也已经有相当数量。可喜的是这些研究成果,不仅为我国社会的可持续发展做出贡献,而且有一部分研究已经进入国际前沿。如果 5 年前我们曾经为我国地球科学国内论文数量失控、国际论文停滞不前而忧虑<sup>[3]</sup>,那么现在真应当刮目相看,我国地学的国际论文数迅速增长,国际刊物上中国作者的姓名处处可见。

同时这世纪之交,也正值地球系统国际研究计划的新老交替。2003 年更是个交接年:成功地开展了“全球变化”研究 15 年的“国际地圈生物圈计划”(IGBP),2003 年转入二期(IGBP-II),并且与世界气候研究计划(World Climate Research Programme, WCRP),全球环境变化的人类因素计划(International Human Dimensions Programme of Global Environment, IHDP),生物多样性计划(Biological Diversity Programme, DIVERSITA)一起,组成四大计

\* 收稿日期:2003-10-09;修回日期:2003-10-30.

作者简介:汪品先(1936-),男,江苏苏州人,中国科学院院士,教授,主要从事海洋地质、微体古生物学研究.

E-mail: pxwang@online.sh.cn

划联手的“地球系统科学联合 (Earth System Science Partnership, 简称 ESSP)<sup>[4]</sup>; 引导国际地学潮流 35 年的国际深海/大洋钻探计划 (DSDP/ODP), 也已于 2003 年 10 月 1 日转入“综合大洋钻探”(IODP) 的新阶段, 按照“地球、大洋与生命”的科学纲领, 以 3 倍的投入向地球系统科学进军<sup>[5]</sup>。

当前国际地球系统科学进入新阶段, 指向新高点的时候, 又欣逢我国制定科技中长期规划的良机。如果能够对学科的发展放眼未来、洞悉现状、抓紧时机、把握方向, 必将使中国地球科学长期受益, 并且腾飞有日。不过同时也存在着另一种可能。数量上的增加, 本身并不等于质量上的提高; 以“地球系统科学”为名称的项目与论文, 也不一定意味着进入了新的层次, 摆脱了原有的局限性。

地球系统科学带来的种种新概念、新名词, 并不等于科学家接受新思路、悟得新境界。历经运动的中国人对于适应新名词并没有困难, 困难在于如何摆脱“顺大溜”、“赶潮流”的积习, 真的“创新”起来。为了说明以上担忧并非空穴来风, 不妨将国内与国际的地球系统研究现状作一对比:

(1) 国际讨论的许多重大问题, 不见于国内。以 2003 年 4 月欧、美地球物理学会在法国尼斯 (Nice) 联合举行万人大会为例, 讨论的热点如“显生宙的大气历史”, “地球与类地行星的岩浆发生与演化”, “大气圈与生物圈的交换: 从源到汇的全面探讨”, “地幔构造与成分: 地球物理与地球化学模型的协调”等<sup>[6]</sup>, 均属地球系统科学的范畴, 却都是我国不熟悉或者不太熟悉的题目。

(2) 重大国际计划的学术总结, 往往不见我国参与。一些国际合作计划, 在实际观测和数据采集我国曾积极参加, 大力投入; 到这几年进行学术总结时, 我国学者的参与却大幅度下降。我们可以在研究计划的外圈为产生数据出力, 却进入不了核心, 在材料“组装”和理论探讨中发挥作用。

与传统的地球科学相比, 地球系统科学从原始数据到科学解释之间的工序增多, “原料”的加工变深。和国际市场经济相似, 学术界也正发生着两极分化: 许多国家只能输出“原料”, 只有另一些国家才能够进行原料的“深加工”。在经济上这是穷国与富国的分野, 而且有穷者更穷、富国更富的趋势; 同样的趋势也在学术界出现。穷国为原料能够出口而高兴, 科学家也为其数据能为国际所用而庆幸; 何况无论数据或者理论, 发表出来都是文章。不过科学进步并不是以文章的数量, 而是以科学问题的解决来

衡量的。正当我国学术界热衷于计算“SCI”论文数量的时候, 国际学术界却在向地球系统科学的核心问题发起攻势。如果安于现状, 只以文章数量为满足, 若干年后将会发现, 我国尽管成为更大的数据输出国, 而在学术水平上的国际差距却拉得更大。

对于国际合作, 我们的习惯是“重在参与”, 往往以“跻身”为目标, 至于合作研究最后究竟要解决什么问题, 其实并不清楚, 似乎也不大在乎。结果是开始投入很大, 最后总结无份; 对于这种先例, 我们应当引以为戒。在大型的长期国际合作研究中, 播种者不等于收成者。关键在于我们自己能不能抓住关键环节, 瞄准核心问题, 避免“为人作嫁”或者“种瓜得豆”。

## 2 立足本国, 面向全球

技术发展和资料积累, 打开了地球科学家的眼界。研究碳循环提出“从源到汇”, 研究季风提出“全球季风系统”, 研究海洋提出“大洋传送带”, 研究地层提出“层序地层学”, 都是从不同角度推进到宏观的新视野。尤其形象的是航天技术, 使得人类能够从太空看地球, 因此有人把地球系统科学比喻为“第二次哥白尼革命”。500 年前哥白尼从地球向外看, 提出科学的“日心说”替代宗教的“地心说”; 如今是科学家们用与显微镜 (microscope) 相反的“显宏镜” (macroscope) 观察地球, 方才认识到整个的地球系统<sup>[7]</sup>。两次科学上的革命方向相反: 前者的观察朝外, 后者的观察向内, 但都是认识上的飞跃。这种“显宏镜”就是全球视野和系统研究, 如果说原来地球科学中的每一门学科, 都尽可能贴近研究对象去认识地球中的某一部分, 那么新兴的地球系统科学, 却要求离开研究对象, 保持适当的距离, 从宏观的视角认识地球。当然, 宏观与微观“两极相通”, 正像通过基本粒子研究宇宙问题一样, 地球系统过程又恰恰是通过微观手段来研究的, 同位素地球化学和微生物就是适例。

可见, 全球视野是地球系统科学的前提, 遥测遥感、地理信息系统和计算技术, 是其“显宏镜”的重要部件。十几年来“全球变化”的研究令人信服地表明: 当今世界的自然条件都在变化, 而这种种变化之间, 又有着意想不到的相互联系。温室气体排放的后果, 不仅使大气的 CO<sub>2</sub> 增多、全球变暖, 而且造成地球表面一系列界面的抬升: 海平面抬升, 20 世纪以来每年平均上升 1.5 ~ 2.0 mm<sup>[8]</sup>; 雪线上升, 非洲最高峰的雪线近 90 年升高数百米<sup>[9]</sup>; 连大气圈对

流层顶的高度也在上升,20年来平均上升200 m<sup>[10]</sup>。温室效应使对流层增温,臭氧洞使平流层减温,结果使得对流层顶升高。温室效应不仅改变海平面,还改变着海水的化学成分:每年估计有650 km<sup>3</sup>的融冰淡水添进大洋,使得海水变淡<sup>[9]</sup>,比如南极的罗斯海40年来盐度下降0.1‰<sup>[11]</sup>;大气CO<sub>2</sub>增多,降低海水碳酸盐饱和度,100年来热带表层海水文石饱和度(-arag)从4.6降到4.0,到了珊瑚礁生长的下限<sup>[12]</sup>,减弱了造礁珊瑚建造骨骼的能力和浮游生物“超微化石”的钙化程度<sup>[13]</sup>,全球的珊瑚礁到2000年已经减少27%<sup>[14]</sup>。温室效应甚至还可以间接地改变地球重力场:冰消期以来冰盖消融、地壳反弹,地球扁率长期下降;而近期的冰雪消融使海水质量由南大洋北移,1997年起地球的动态扁率停止下降,转为上升<sup>[15]</sup>。这一串连锁反应,虽在意料之外,却在情理之中。

温室效应引起的变化涉及所有圈层,全球范围内无所不在;同时也只有从全球着眼,观察到的局部变化才可理解。赤道非洲的深水大湖坦噶尼喀湖,浮游生物量25年来下降1/3,原来是全球变暖造成上层湖水增温,水柱分层加剧,营养物不能上返,缺氧层也从百年前的300 m扩展上升到现在的180 m<sup>[16]</sup>。如果不从全球出发,找不到变化的原因。相反,就地找到的解释,其实并不见得就是真正的原因。第四纪以来海洋沉积速率加快,我国习惯地归因为青藏高原的隆升;但是这种加快现象遍及全球,其实是第四纪冰期大幅度的海面升降,使沿海平原与陆架大量沉积搬运入海的结果<sup>[17]</sup>。在地球科学中,许多现象往往先从某个地点发现,先用局部原因解释,等到更多地点、甚至到处都有发现,才意识到是全球现象。无论“厄尔尼诺”(El Niño)还是“新仙女木事件”(Younger Dryas),起先都认为是局部事件,现在才明白只有在全球系统内方能理解。季风是一种区域现象,但是亚、非、澳三大洲的季风有着内在联系,加上美洲季风,构成“全球季风”<sup>[18]</sup>系统,从全球系统出发才能更好理解各个子系统。

然而这并不符合中国地学界的习惯。我们习惯于就地取材、为我所用,从应用层面看,这本来无可非议;至于基础研究,全球问题似乎向来是发达国家的事,我们从中国的实际出发,所得的结果能为其所用,便算成功。而这正是今天我们要大声疾呼,呼吁尽快改变的旧习惯。无论从我国地球科学的实力和投入看,还是从我国经济与权益的国际竞争看,都到了走出国门、面向世界的时候。应当重新考虑我国

地球科学的定位,不能以“原料输出”为满足。应当从地球系统科学出发,改变我们的研究视角:或者从全球问题出发,用中国材料入手研究;或者从中国问题出发,在全球的高度进行分析。我国地学的成果在国际舞台上的体现低于其实力,原因主要不在语言障碍,而在于视角过低,就事论事有余,“上纲上线”不足,难于引起国际兴趣。相反,凡能利用本国特色又能针对全球问题的,便容易走上国际接轨之路,黄土高原的古环境研究便是一例。

以上所述,都是环境变化研究的全球性,其实在资源领域里情况也相类似。在一切靠“自力更生”的社会里,资源势必属于局部问题;而对于进入全球大循环的市场经济,资源自然具有全球性。目前我国至少在能源方面已经提出“建立全球供应体系”的问题<sup>[19]</sup>,油气勘探也早就“冲出亚洲,走向世界”;随着1994年《联合国海洋法公约》生效,国际海域的资源之争也已日趋尖锐。当前面向全球的问题,在海洋科学战略上格外突出。尽管我国的地学界已经活跃在深海与两极,但当年那种“家门口还没搞清楚,走出去干什么”的思想,还往往挥之不去,总觉得近岸浅海才是我们该去的地方。殊不知不走出去,家门口就永远搞不清楚。水深超过2000 m的深海,占地球表面60%,舍去深海“地球系统”便无从谈起;三四十年来地球科学的许多突破都来自深海,更加证明其重要性。当然,这决不是说可以放松近岸浅海的研究。其实在应用层面上,海岸带和陆架无疑更有直接意义;在基础研究上,也会有更多的力量投放在近海。我们说走出国门、走向深海,决不是说多数的人力物力舍近就远。以中国地球科学队伍之大,只要一小部分力量走出去,直接进入国际竞争,就可以在国内产生辐射效应,促使整个地球科学界扩大眼界、面向全球。

### 3 地球与生命科学交叉的新高度

近10几年“全球变化”和“大洋钻探”研究中最大进展之一,在于地圈与生物圈相互关系认识的突破,结果是将地学与生命科学的交叉,提高到一个空前的新高度。国际学术计划将这种交叉定为新世纪前沿的首选<sup>[5]</sup>,而在我国似乎还没有提上日程。

地学与生命科学的结合,并不是个新命题。地质学创立伊始,就与生物学结下不解之缘:地质年代便是以生命演化为序的。但传统的生物地层学是建立在化石形态的肉眼鉴定基础之上,难免其片面性和表面性。世纪之交,地球科学向地球深处和地球

以外发展,生命科学向更加深入的微观世界进军,正是在这里产生了两者交叉的新层次:地下深处微生物的发现,在分子生物学与生物地球化学的层面上,开拓了全新的研究领域。原来所说的许多地学过程,其实是生物活动的结果;原来探索的生命演化,其实是地学环境变化的产物;原来分头研究无从理解的一些现象,地学与生命科学的结合提供了全新的答案。

70 年代末“Alvin”号深潜器在东太平洋发现深海热液活动和热液生物群,说明地球上不仅有所谓的“有光食物链”,还存在着“黑暗食物链”。前者依靠外源能量即太阳能,在常温和有光的环境下,通过光合作用生产有机质;后者依靠地球内源能量即地热支持,在深海黑暗和高温的环境下,通过化合作用(chemosynthesis)生产有机质。现在各大洋发现这类热液生物群的地点已经数以百计,最近的在冲绳海槽<sup>[20]</sup>。黑暗食物链的基础,是在还原条件下进行化合作用制造有机质的原核生物(Prokaryotes),包括细菌与古菌(Archaea),推测与生命起源时的生物群相近。近年来发现,在数千米深海海底下面数百米的深处,还有微生物在地层的极端条件下生存,这种“深部生物圈”虽然都由微小的原核生物组成,却有极大的数量,据估计其生物量相当于全球地表生物总量的 1/10<sup>[21]</sup>。与热液口“自养”的微生物不同,深部生物圈的原核生物依靠地层里的有机物实行“异养”,从地中海底第四纪的腐泥层<sup>[22]</sup>,到美国白垩纪的有机质页岩里<sup>[23]</sup>都有发现,它们的新陈代谢极其缓慢,但“寿命”极长。它们也可以在洋中脊的玄武岩里生长,依靠玄武岩的蚀变为生<sup>[24]</sup>;甚至海底火山爆发也发现有超高温细菌,引起国际学术界极大的注意。对于深部生物圈,大洋钻探早在 90 年代就在十几个站位进行探测<sup>[25]</sup>,最近又组织了专题航次,而在新的“综合大洋钻探”学术计划里,已经上升到科学目标的首项<sup>[5]</sup>。

“深部生物圈”的发现,大大拓宽了“生物圈”的分布范围,直到极地冰盖、火山热泉和洋底地层,几乎无所不在。生物的分类,也扩展到古菌、细菌与真核生物三大类<sup>[26]</sup>。地球历史的 85% 只有前两类组成的原核生物,它们从还原到氧化环境都有分布,在地球系统的时空坐标中占据一大片,而我们熟悉的动、植物只是真核生物中的一部分(图 1)<sup>[27]</sup>。生物圈概念的变化,带来了地学和生命科学关系的变化。真核生物的多样性在于结构形态和行为特征;原核生物的多样性却在于新陈代谢的类型。真核生物只

能以“燃烧”氧作为能源,原核生物却能“燃烧”不同成分(SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>; NO<sub>3</sub><sup>-</sup>; NO<sub>2</sub><sup>-</sup> 等)获得能量,因而新陈代谢类型不同<sup>[28]</sup>,产生的生物地球化学效果也就多种多样。结果在地学和生命科学之间,出现了新的交叉层面:在分子生物学和生物地球化学层面上的交叉。

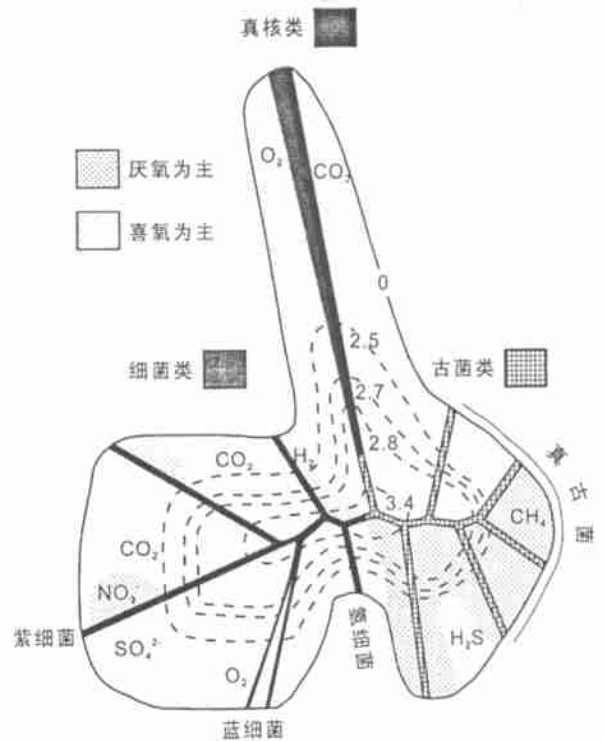


图 1 生命演化示意图,表示按基因分类的生物在地质年代和环境里的分布(据文献[27]简化)

Fig. 1 Evolution of life: A diagram showing the genetically based tree of life in a temporal and environmental framework(simplified from [27])

同心线表示年龄,单位 10 亿年,外圈为现代;

化学符号及图案表示生存环境

Dotted lines indicate age in billion years, periphery is the present; chemical symbols and patterns denote environments

传统地质学与生物学的关系主要在于古生物学、生物地层学和古生态学,主要靠的是具有不同形态因而得以鉴定的真核生物化石。原核生物不靠形态鉴别,现生的原核生物也是靠生物化学、DNA 序列和基因组的研究方法加以识别,它们通过生物地球化学的途径影响地圈,改造深部和地表的沉积与岩石。对原核生物而言,要在分子水平上、而不是生物体的水平上研究地圈与生物圈的结合,于是“地质微生物学”(geomicrobiology)作为新兴学科应运而生<sup>[29, 30]</sup>,并在近年来迅速发展。微生物在沉积物中的生物地球化学作用,既是微生物的生态学,又是沉积地质过程的动力学,回答着沉积物及沉积矿产

研究中许多为什么的问题。从金属矿到天然气水合物,从火山口到岩溶洞,无处不有微生物的活动,许多原来以为“无机”的地质过程,其实都是生命活动的结果。传统地质学里生物的“主角”是大化石,其实改造地球的首先是原核生物,它们的生态过程影响着化学元素周期表里几乎所有的元素,默默地“耕耘”了40亿年,直到今天才有可能得到重新评价。生命演化史的研究很像社会历史,引人瞩目的恐龙、鳞木固然重要,但真的要揭示机理,还非要深入到原核生物不可。全面看来,地球生态系统的根本基础在于原核生物<sup>[31]</sup>,它们才是“真正的英雄”;而我们熟悉的大型生物其实是生态系的顶层,相当于社会史里的“帝王将相”。寻找地球和生命系统演变的规律,必须深入“基层”,深入到分子生物学和生物地球化学的水平,才能理解地球系统的运作;恰如研究社会历史要深入到生产方式与社会结构,才能成为科学一样。

需要为微小生物“翻案”的不仅是海底和地下,也包括海水的表层。新技术的应用,发现了用普通显微镜看不见的微型浮游生物(pico-plankton, 粒径 $< 2 \mu\text{m}$ ),其中包括能够进行光合作用的细菌,它们在贫养的开放性大洋中可以构成初始生产力的主体<sup>[32]</sup>。比如粒径才 $0.4 \sim 0.8 \mu\text{m}$ 的原绿球菌(Prochlorococcus)在热带、亚热带寡营养海域可占总生产量的90%以上。而且浮游异养细菌能够吸收海水中的溶解有机碳(DOC)形成颗粒有机碳(POC),构成“微型生物环”(microbial loop)<sup>[33]</sup>,增加了海洋“生物泵”的复杂性<sup>[34]</sup>。然而正是这些微型生物通过碳循环和氮循环,在很大程度上决定着海洋在气候变化中的作用<sup>[35]</sup>。

众所周知,陆地植被与海洋生物的光合作用,调控着大气的 $\text{CO}_2$ 。陆地植被生物量大,含碳总量比海洋浮游生物高百倍,但后者的生命周期短,结果两者对现代大气 $\text{CO}_2$ 的影响基本持平,海洋中这些肉眼看不见的浮游生物和陆地森林一样调节着气候变化。假如海洋的浮游植物全部死去,不出几百年就可以使大气 $\text{CO}_2$ 增多将近一半<sup>[36]</sup>。因此以碳循环为代表的海—陆生物地球化学(biogeochemical)过程,是“全球变化”国际地圈生物圈计划”的核心,也是学术界注意的重点。当然生物地球化学作用不限于碳循环和温室效应,比如海洋浮游生物产生的二甲基硫(DMS)<sup>[37]</sup>和陆地植物释放的非甲烷烃类都会形成气溶胶,直接影响反照率与云量,影响大气辐射和大气化学<sup>[38]</sup>。与此对应的是生物圈的物理作

用,生物地球物理(biogeophysical)过程在地球表层系统水循环中的重要性,也是地球系统科学的新课题。陆地植物不仅通过蒸腾作用参与水循环,而且可以直接影响大气圈的动力和热力结构以及云状况。举例来说,大气边界层的高度与森林类型相关,干旱的北方森林覆盖比较稀,感热通量比较强,大气边界层高达 $2 \sim 3 \text{ km}$ ;潮湿的温带森林水汽的作用活跃,辐射量主要用于蒸发,大气边界层不过千米<sup>[39]</sup>。亚马孙河流域世界上最大的热带雨林近年来遭受破坏,25年中仅巴西一国便减少 $50 \text{万 km}^2$ ;森林的破坏使得蒸发量减少,大气边界层增高 $700 \text{ m}$ <sup>[40]</sup>,同时又影响大气中云凝结核(CCN)的浓度,导致云量减少、雨量下降<sup>[41]</sup>。

如果放眼历史,从分子和化学的高度,来考察生命演化及其与地圈的关系,“柳暗花明”的感觉更加鲜明。分子生物学推进了基因组学的迅速发展,一方面将让我们理清生物的和非生物的生物地球化学作用,揭示地球化学循环的演变过程;另一方面也为研究生命演化提供了全新的途径<sup>[27]</sup>,基于现代生物的分子生物学、形态学与化石记录三结合的演化“生命之树”正在出现和完善<sup>[42]</sup>。推测生命起源于还原环境下高温的热液口<sup>[43]</sup>,而生命的出现就必然改变地球上的生物地球化学作用,开始了生物圈与地圈协同演化的历程。生物圈改造着大气成分,而改变了的大气又要求生物做出响应,因此光合作用演化和固氮作用演化,都是地球系统研究的重要内容。生物先从热液的化合作用发展到厌氧环境下的光合作用,后来才是我们所熟悉的氧化环境下的光合作用<sup>[43,44]</sup>。4亿年前泥盆纪时陆生植物的迅速发展导致了大气圈 $\text{CO}_2$ 减少和含 $\text{O}_2$ 量上升<sup>[45]</sup>;但是头35亿年的地球生命史,主角还是微生物,大气的改造首先应当归功于它们。纵观时空,生物圈在还原环境下由原核生物组成,可以有多种多样的光合作用途径<sup>[29]</sup>;而真核生物则要求氧化环境,光合作用的途径也相应减少。由于光合作用演化发生时大气 $\text{CO}_2$ 丰富,催化光合作用的酶Rubisco适应于 $\text{CO}_2$ 高浓度的环境<sup>[46]</sup>。到了新生代,随着大气 $\text{CO}_2$ 的减少,Rubisco仍然十分保守,致使光合作用效率低下,必需另辟蹊径。采用新的光合作用途径的 $\text{C}_4$ 植物在800 Ma前大为兴盛,就是适应性演化的一例<sup>[47]</sup>。至于固氮作用,在大气中富含 $\text{NH}_3$ 的太古代早期还提不上日程<sup>[48]</sup>,而现代海洋里固氮作用的盛衰成为制约生产力的关键因素<sup>[49]</sup>,固氮作用的强弱也成为海洋生物泵和环境演变的重要内容<sup>[50]</sup>。生物圈与

地圈协同演化如此密切的关系,令学术界惊叹不已,因而 James Lovelock<sup>[51]</sup>提出了“盖娅”(Gaia,希腊神话里的地神)假说,认为地球犹如有机体能够自我调节,提倡研究“地球生理学”。

反过来看,生物学的演化过程,也往往有“地圈”事件的背景。人类演化的冰期背景早已提出,而石炭纪出现巨型昆虫,据推测是大气 O<sub>2</sub> 浓度高达 35% 的后果<sup>[52]</sup>。这类假说海洋里比陆地更多。早已发现,随着洋中脊扩张速率和海水 Mg/Ca 比值的变化,大洋经历了“方解石海”与“文石海”的轮回,后来也得到了岩盐包裹体分析<sup>[53]</sup>和海胆化石元素分析<sup>[54]</sup>的证明。科学家们提出,正是这种轮回决定了不同类型造礁生物的更替(图 2),以及第三纪超微化石盘星类方解石骨骼的退化<sup>[55]</sup>。许多海洋浮游生物的演化产生,也都带着海水化学的背景。比如浮游有孔虫在侏罗纪的出现,有可能是天然气水合物分解造成海底缺氧事件,驱使底栖有孔虫转向水层生活的结果<sup>[56]</sup>。人们也在探讨“寒武纪大爆发”与新元古代“雪球式地球”的关系,古新世末底栖生物大灭绝与天然气水合物事件的关系<sup>[57]</sup>等。与前述分子层面的学科交叉不同,我国在生物演化的古海洋学背景方面,有着极好的化石基础和研究的实力,应该是在较短期间便能发展和取得成绩的重要方向。

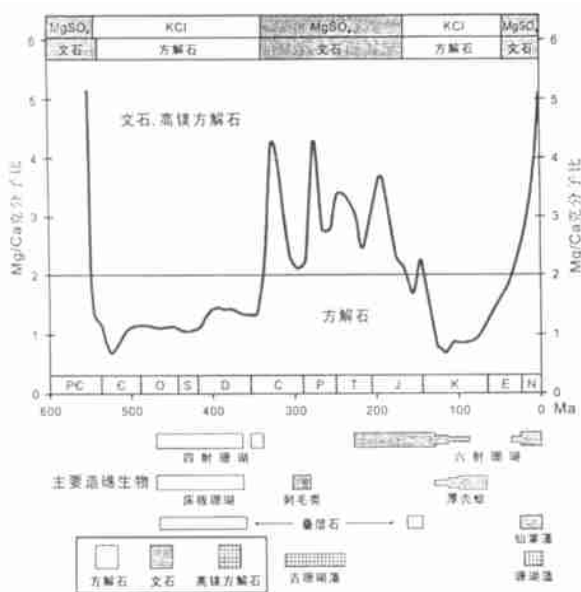


图 2 大洋海水成分与造礁生物演化关系示意图 (据文献[53~55]改画)

Fig. 2 Comparison of ocean water chemistry with major reef builders in temporal distribution (modified from [53~55])

#### 4 要记录更要过程,要现象更要机理

地球系统研究中,既有现象描述、采集记录的方面,又有追踪过程、探索机理的方面。前者是基础,后者是目标,地球系统科学作为一门科学的基础理论,就寓于这机理之中。地球系统过于复杂,不大可能用牛顿定律或者门德列也夫周期表这样简明的基础理论加以概括,但是必然会有地球系统运行、演变的自身规律,这就需要通过现象的记录去探索机理。这种探索,可以用厄尔尼诺和“铁肥试验”两个近年来的研究实例加以说明。

厄尔尼诺现象早已发现,到 60 年代认识到这是热带太平洋海气相互作用中的重大异常,但是不清楚形成的机制。1985 年热带大洋与全球大气计划(TOGA)开始,在太平洋赤道两侧投放了将近 70 个锚系,对水文、风速、风向等连续观测 10 几年,追踪大气与上层海水的变化,终于揭出西太平洋暖池次表层水温度与东太平洋上升流的关系,为预测一年或半年后厄尔尼诺的发生提供了一种依据和初始资料<sup>[58]</sup>。随后的研究又发现,厄尔尼诺的强弱变化多端,而且热带太平洋与大气之间这种不稳定的相互关系也见于年代际的变化<sup>[59, 60]</sup>和更长的时间尺度,同时还发现厄尔尼诺影响着全球的气候系统,并且通过对生产力的调控,成为在年际尺度上影响全球碳循环最强的天然因素<sup>[61]</sup>。证据表明,热带太平洋的厄尔尼诺影响着北大西洋涛动(NAO)<sup>[62]</sup>,南极偶极子(Antarctic dipole)<sup>[63]</sup>等,说明热带过程可以影响所有的纬度<sup>[64]</sup>;相反,中高纬区也影响着热带过程,如亚热带水下沉到热带温跃层上涌,使得厄尔尼诺本身受到热带/亚热带海水交换的调控<sup>[65]</sup>。热带和外热带通过这种“大洋隧道”和“大气桥梁”相互交换、相互影响<sup>[66]</sup>,构成了地球气候系统的实际过程。进入到地质时间的长尺度,珊瑚记录表明厄尔尼诺的频率与强度有 20 ka 的周期,反映出岁差驱动<sup>[67]</sup>;数值模拟同样得出有千年等级与轨道周期的变化,当岁差驱动微弱时,厄尔尼诺可能停息几百年<sup>[68, 69]</sup>。厄尔尼诺的研究,通过现代观察、测试与古代记录的分析,揭示出热带过程影响全球气候系统的重要途径,是地球系统科学的成功之举。

机理探索的另一实例是“铁肥试验”,是指在大洋里添加二价铁提高初始生产力的现场试验。全球变化研究的直接推动力来自 CO<sub>2</sub> 的追踪:人类活动排放的 CO<sub>2</sub> 远超过大气中的增量,而在追踪“丢失了的 CO<sub>2</sub>”时大洋“生物泵”首当其冲。确实,海洋中

细微的浮游植物,承担着今天地球上光合作用的一半任务,调控着大气  $\text{CO}_2$  的浓度变化。针对赤道东太平洋、南大洋等海区“高养低能”(HNLC,指营养盐高而生产力低)的怪现象,80年代美国 John Martin<sup>[70]</sup>提出了“铁假说”,认为海水中铁元素的缺乏,限制了浮游植物的生长,因为海洋浮游植物的生长必须有微量的铁,而铁在现代氧化环境下的海水中极难溶解。冰期时风尘大作,为大洋带来铁元素、提高生产力,从而降低大气  $\text{CO}_2$ <sup>[71]</sup>,正好解释了极地冰芯中温室气体( $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ )的浓度、大气降尘的浓度与冰盖体积一起变化的记录<sup>[72]</sup>。为了检验“铁假说”,近年来在东太平洋<sup>[73]</sup>和南大洋<sup>[74]</sup>先后进行了“铁肥试验”,从船上将二价铁倾入海中,果然诱发出藻类勃发,生产力增加高达数十倍,证明了铁的确是海洋生产力的限制因素,而且风尘增加可能是冰期中大气  $\text{CO}_2$  减少的原因,也证明了陆地—海洋—生物—大气之间环环相扣的因果关系。但是,此类海区的沉积记录并没有展现冰期生产力的增加。而风尘带给大洋的不仅有 Fe,也还有 Si 等其他元素, Si 却是硅藻繁盛的前提。现代大洋  $\text{CO}_2$ “生物泵”的效率与浮游生物的组成关系密切:硅藻的骨骼是蛋白石( $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ ),只会吸收碳向海底输送;颗石藻的骨骼是方解石( $\text{CaCO}_3$ ),除了吸收碳(形成有机质)之外还会放出碳(形成碳酸钙)<sup>[75]</sup>,因而硅藻/颗石藻的比例影响着浮游生物将大气  $\text{CO}_2$  送入海底的能力,也就是大洋生物泵的效率。而硅藻/颗石藻的比例很大程度上取决于 Si 的供应,冰期时风尘搬运加强,带给大洋的 Si 增多,助长了硅藻的勃发和硅藻/颗石藻比例增高,使得沉降带海底的有机碳/无机碳比例升高,使表层海水 pH 的和碱度上升,导致大气  $\text{CO}_2$  含量下降。这便是所谓“硅质碱度泵”假说<sup>[76,77]</sup>,它并不要求冰期时生产力增高,只要求浮游植物的种类变化,可能更加符合地质记录。目前虽然冰期旋回中大气  $\text{CO}_2$  浓度变化的原因远未查明,但是 Fe、Si 通过海陆物质交换,通过生物圈与地圈的相互作用影响冰期旋回中地球系统的变化<sup>[78]</sup>,已经十分明显。

以上两例,都是从现象出发,通过穿越不同圈层的“顺藤摸瓜”,追索机理;都是通过现代过程,寻找地质记录中历史变化的原因。前者说的是热带过程在全球气候系统演变中的作用,后者说的是陆源元素对海洋生产力、从而对碳循环的影响,都是涉及地球表层系统演变中的核心问题:“冰”与“碳”的问题<sup>[79]</sup>;两者的研究很可能将会展示:热带风化作用

通过对海洋 Si 的输送和硅藻/颗石藻比例的控制,是调控冰期旋回周期性的重要因素<sup>[80]</sup>。这一类的探索,是地球系统理论研究的重点所在。2003年“全球变化”研究转入二期(IGBP-II)的时候<sup>[4]</sup>,十分明显地展示出向两极的分化:一方面更加贴近应用,朝着决策和管理的需要靠拢;另一方面则更加深入基础理论的探讨,探求地球系统运作的基本原理。和其他基础理论的学科一样,地球系统科学也是由众多的机理与规律和整体“组装”的总规律构成。地球系统变化的整体性规律,就是不同时间尺度上的地球系统运行模态(mode),及模态转换的条件和形式。科学是通过比较认识事物的,但是地球只有一个,比较的途径只能是与其它星球、尤其是类地行星系统的横向比较,或者与地球的过去作纵向比较。由于类地行星至少目前还不知道有生物,只能和地球演化的早期相比,因此对现代地球系统来说,最有效的还是纵向的历史比较。

纵观历史,地球系统在不同时间尺度里经历了不同的模态,而且追溯的时间愈长,变化的幅度愈大,而这正是揭示地球系统变化机理、获得预测能力的研究途径。人类习惯于当前的处境,总以为今天才是地球系统的标准状态。殊不知恰恰相反:地球历史的 85%是在还原性大洋里记录的,属于陆上没有生物的荒凉世界;剩下的 15%,也大都处在两极无大冰盖的“暖室期”,是环流迟缓、变化较弱的平静世界;近 30 Ma 前出现南极冰盖、进入了“冰室期”,但 3 Ma 前方才出现北极冰盖,所以今天这样两极都是冰盖的时期只占 1/10;再说这 3 Ma 中,北半球高纬区被冰川覆盖的“冰期”占多数,今天这种“间冰期”又属少数。这一方面警告我们决不能一叶障目,误以为今天就是地球系统的标准<sup>[81]</sup>,另一方面也在时间里展现了地球系统的多样性。地球的历史留下了丰富多样的模式供我们参考对比,恰如社会历史是政治家学习的宝库一样。

地球系统的历史,无非是旋回与事件的叠加。地球各个子系统的变化速率并不相同,质量越轻的圈层变化越快,而由各大圈层共同决定的气候系统,便反映出从年际变化到百万年以上各种各样的时间周期、准周期以及振荡。从气候系统内部造成的如 3~7 年的 El Nino 与 La Niña 事件,天文因素驱动的 11~900 年的各种太阳周期,大约 10 ka 的“半岁差周期”,20 ka 的岁差周期,40 ka 的斜率周期,100 ka 和 400 ka 的偏心率周期,以及原因不完全明白的,如 1~2 ka 的 Dansgaard/Oeschger (即 D/O) 周

期<sup>[82,83]</sup>(图 3),以至百万年以上的长周期,都在地球系统的历史上相互叠加、相互干扰,增添了记录解读的难度。周期变化与振荡带来了气候系统的不同格局,短的如 El Niño 与 La Niña 的两种气候格局,长的如冰期与间冰期的交替。周期短的差别小,周

期长的差别大。这些格局、模态的区别至关重要,因为在不同格局下地球系统内的能流与物流各不相同,人类生存环境也有不同的边界条件;然而对于地球系统科学说来,更为重要的是研究不同模态之间的转变。

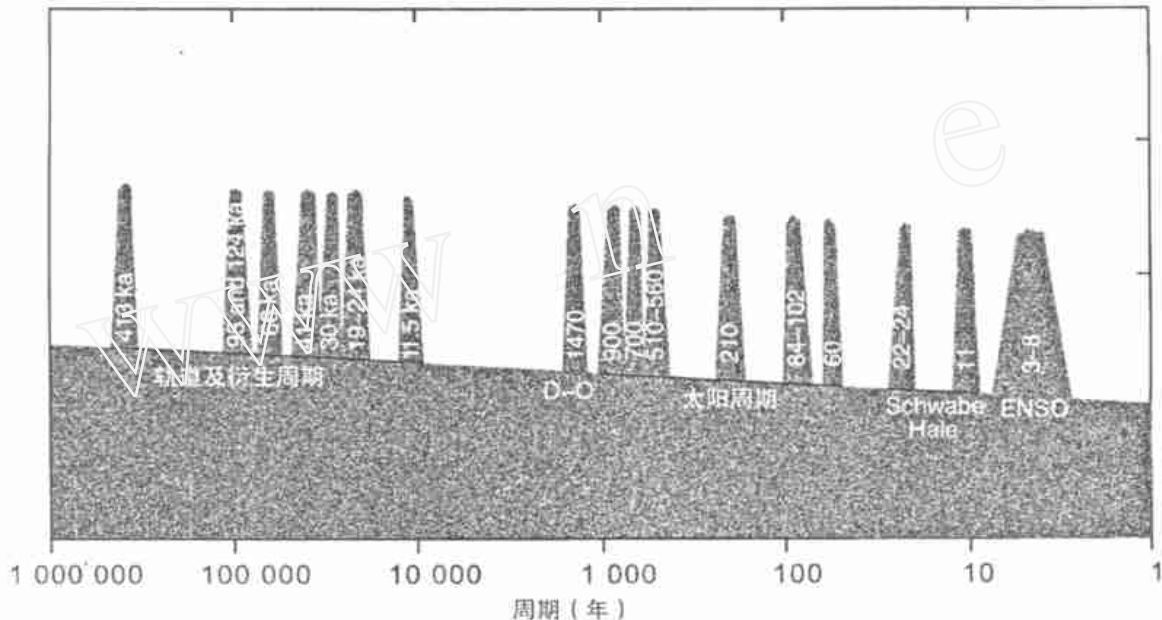


图 3 地球系统多种时间尺度的变化周期 (只示出百万年以内的周期)

Fig. 3 A spectrum of time scales of cyclic variations in the Earth System (only those below 1 Ma are shown)

古环境研究早就发现:地球系统存在着不同的稳定状态。今天的间冰期是一种,20 ka 前的冰期是另一种,从大气、大洋的环流,到碳、氮循环的格局都不相同。两种模态之间的过渡期,变率最大,往往呈现为灾变。距今 15~8 ka 的“冰消期”间,北美与北欧的冰盖消融,海面上升,海岸线从冲绳海槽一直退到如今的华北平原,平均每天后退 0.4 m,实际有些时段还要快得多,具有明显的灾变性质。地球系统近 2~3 Ma 经历了许多次冰期,但是冰期与冰期并不相同,起初北半球的冰盖增长幅度不大,一次冰期 40 ka 便告融化,到后来增幅加大,一次冰期的冰盖要到 100 ka 才化,这种从 4 ka 转到 100 ka 周期的“转型”便是地球系统演变的关键,“转型”机理也就是地球系统科学研究的重点。

地球系统不同模式的转换,不一定要到万年尺度,事实上眼前就在发生。在格陵兰和北欧之间的表层海水由于变冷而下沉,所形成的北大西洋深层水(NADW)被认为是全球“大洋传送带”温盐流的源头,NADW 生产的停止可能会导致全球变冷<sup>[84]</sup>。冰期的记录表明,北大西洋北部的融冰事件可以导

致表层水变淡以至 NADW 停产,当前人为因素引起的全球变暖,确实可以造成表层海水变淡,减少 NADW 生产的势头<sup>[85]</sup>。科学家们分析,如果 NADW 的生产减少到一定程度,就可能使“大洋传送带”停运,甚至引起部分洋流的逆转,使地球系统跳跃到另一种模态,引起全球性灾变。这里重要的便是把握这种模态跳跃的临界值。地球是一个高度非线性的系统,只在一定变化范围内才呈线性关系,超过一定“阈值”后就会发生突变,转换到另一种模态。在长时间尺度上看,地球系统“运作”的不同模态,以及不同模态转换的动力与机制,正是地球系统科学的核心理论问题。一旦掌握了模态转换的控制因素和转换机理,地球的历史就不再是现象的堆砌,而是环环相扣因果关系的体现。人类生存环境变化趋势的预测,也就不再是科幻式的猜谜,而是通过数值计算的逻辑推理。

一旦进入到探索机理、追溯过程的新层次,地球科学就成为引人入胜、动人心弦的事情,内中情趣决不下于侦探案件。8~6 亿年前的地球,是不是真的成了太空中的“雪球”,冰盖扩展到了赤道区?假如



真是如此,是什么力量扭转乾坤,不仅全球解冻,还引来了“寒武纪大爆发”<sup>[86,87]</sup>?距今超过7 ka前,上涨的地中海水突然从百米高处灌进当时低凹的黑海湖盆,这是不是就是圣经里诺亚方舟大洪水的原型<sup>[88,89]</sup>?地球在20亿年前大气圈就出现自由氧气,为什么要到将近10亿年前才出现多细胞生物?这中间是不是也和人类文明史一样,经历了一个大洋表层之下充塞硫化氢,以致生物演化停滞、生产力低迷的“中世纪”<sup>[90,91]</sup>?地球系统充满了丰富多彩的待破案件和未解之谜,它们不仅是科幻作品的绝妙素材,更足以吸引科学界的有志之士去贡献自己的聪明才智。

总括起来,无论是圈层之间的相互作用,或者是地球系统的模态转换,都要求透过记录看到过程,通过描述追索机理。在进行观察测量、采集数据资料的基础上,提出工作假说,进行理论探讨。一方面针对假说,有目的地开展现代过程的观测与试验,另一方面通过数学模拟,检验和发展理论假说。前述“铁实验”,就是针对大洋生产力变化的“铁假说”设计的;针对“碱度假说”,也正在进行颗石藻勃发的人工试验<sup>[92]</sup>。至于数值模拟,更是地球系统研究的基本手段。只有通过定量计算和模拟,才能把定性的概念模型变为定量模型。这在国际学术界已经广泛展开,不少简单的观测通过模拟而成为重大成果。但是在国内目前只引起一部分学科的注意,另一些学科依然满足于原来的定性研究。值得指出的是整个地球系统的统一模拟,由于过分复杂,目前或者用日本、美国那样特大规模的“地球模拟器”,或者像欧洲那样联网<sup>[93]</sup>,或者采用“中等复杂程度”的模拟方法<sup>[94]</sup>。我国由于对机理追索不够重视,数值模拟在这方面的应用很少提上日程,但这是发展地球系统科学的必由之路,应当十分注意。换句话说,从现象到机理、从记录到过程的追索,既要研究思路的改变,也要研究方法的更新,只有借助新的方法,才能取得理论上的进步。

## 5 地球深部与表层系统的结合

以上所述,全是地球系统的表层。人类生活在地球表层,首先关心和比较了解的都只是表层。但是“由表及里”是认识的规律,近年来越来越多的证据表明地球表层看到的现象,根子在深部;缺了深部,地球系统就无法理解,越是大范围、长尺度,越是如此。

水循环和碳循环是贯穿地球表层系统的“红

线”,其实两者都深入到地球内部。只是在地球深部循环的速度比在表层系统中慢得多,往往不被注意;而在百万年以上的长时间尺度里,地球系统碳循环的主角就是地幔和地壳。造山作用使岩石圈抬升并遭受剥蚀,岩石圈主要成分硅酸盐的化学风化相应加剧,消耗大气中的CO<sub>2</sub>;岩石圈随板块俯冲到地幔深处,在高温高压下发生变质作用放出CO<sub>2</sub>,通过火山活动又回到大气。这种岩石圈和大气间的碳循环周期,长达千万年以上<sup>[95]</sup>。由深部排出的CO<sub>2</sub>通量,与洋中脊扩张、大洋壳生成的速率成正比。据此,Berner等<sup>[96]</sup>在20年前首次计算了1亿年来的碳酸盐/硅酸盐地球化学循环,提出了著名的BLAG模型,探讨碳循环和大气CO<sub>2</sub>浓度的演变。地球深部向表层输出CO<sub>2</sub>,一方面由地幔物质在洋中脊排气<sup>[97]</sup>,另一方面又由俯冲到深处的碳酸盐岩变质脱碳,产生CO<sub>2</sub>从火山口排出<sup>[98]</sup>,这类深部成因的温室气体可以对地球表层系统产生重大的气候效应。距今50 Ma前后的始新世,是新生代以来气温最高的时段,据分析当时大气CO<sub>2</sub>浓度是现在的数倍,源自变质作用的排放。至于排放CO<sub>2</sub>的源区,先是认为是喜马拉雅山脉和喀喇昆仑山脉区<sup>[99]</sup>,后又改称是北美西部克迪勒拉造山带<sup>[100]</sup>,地区虽然各异,原理并无二致。此类研究尽管还在假说阶段,却和晚新生代高原隆升加剧风化作用导致全球变冷的假说<sup>[101]</sup>一样,揭示的都是表层变化的深部根源。

地球深部的水循环,是近年来研究的热点。水在岩浆作用中的重要性,已经得到公认<sup>[102]</sup>,然而这类认识仅仅处在起步阶段。最直观的是大洋中脊的热液系统:海水沿着海底的裂隙下渗,到4~5 km深处与熔岩接触,升温到300~400 °C后重返海底,将深部物质与能量带到表层,造成特殊的成矿作用和生命系统<sup>[103]</sup>。在俯冲带,大洋板块带着水下沉到地幔深处。实验表明,玄武岩和安山岩的大洋壳可以含1%~2%的水,深入到俯冲带200 km以下<sup>[104]</sup>;而最近的研究提出,整体上97%的水在俯冲过程中脱失,参加到岛弧的岩浆作用中去,只有很少的一部分进入下地幔<sup>[105]</sup>。然而正是这少量的水可以影响地幔中岩浆的分馏<sup>[100]</sup>,可以改变某些层位的物理性质,产生地震震波传速不连续面<sup>[106]</sup>。大洋壳和大洋沉积物的俯冲,一方面产生大陆壳并排放气体,另一方面又为地幔带来表层物质,比如地质历史上带入地幔的水,就可能相当现在大洋海水总量的1/4。鉴于俯冲带这种重大的“加工”作用,获得了“俯冲工厂”(subduction factory)之称<sup>[107]</sup>。然

而这些还都不是主体。纵观地球史,最早形成地球的物质中有 2% 的重量是水,而今天表层系统中的水只占地球重量的 0.02%,除去逸失者外,其余应当留在地球的深部。据估计,下地幔中储存的水就相当于全大洋总量的 50 倍之多<sup>[108]</sup>。如此说不谬,我们对整个地球“水圈”的认识,还差一两个数量级!水的分布与赋存状态,看来是认识地球深部的关键所在。长期以来,地球化学界认为地下 660 km 上下的地幔物质性质不同,地幔对流只能分层进行;地球物理界根据地震资料,认为地幔是整体对流,反对分层模式<sup>[109]</sup>。最近提出的假设认为,地球化学上的分层可能是全地幔对流中,由脱水导致局部熔融,产生过滤作用的结果,其中水就是解决矛盾的关键<sup>[110,111]</sup>。

占地球半径一半以上的地幔,是地球本身最大的圈层。三维空间里的地幔环流,虽然速度缓慢,却是在长时间尺度上地球系统变化的决定因素。板块“飘移”,无非是地幔环流的表层现象;板块俯冲,也只是环流中的一段<sup>[112]</sup>。由于地幔环流的缓慢性质,对表层系统的影响动辄会有数百、数千万年的迟到效应,比如俯冲下去的板块并不迅速消失,还会在长时期里影响地面的构造运动。冈瓦纳大陆早已瓦解消散,而当年冈瓦纳—太平洋边缘俯冲下去的板块,白垩纪时处于澳大利亚的下方,造成当时澳洲大陆的升降与全球趋势相反<sup>[113]</sup>;而早年处于冈瓦纳大陆中心的南非一带,至今还处在隆升状态<sup>[114]</sup>。已经从地球表面消失的板块“阴魂不散”,通过重力场仍然影响着现代升降运动,这是应用高分辨率地震层析成像技术后的发现,也是大陆动力学研究的重点之一。深部过程对表层系统影响最具戏剧性的,莫过于地幔柱造成巨型玄武岩省的事件。百万年间突然有大量地幔物质涌出地面,形成溢流玄武岩(flood basalt),极大地改变了地球表层的环境<sup>[115]</sup>。最突出的一例是白垩纪的西太平洋翁通—爪哇海台(Ontong-Java Plateau)<sup>[5]</sup>,总共溢出的玄武岩体积多达 3 600 万 km<sup>3</sup>,如堆在中国大陆上可达 4 km 厚;大体同一时期形成的还有南大洋凯尔盖朗(Kerguelen)海台,溢出的岩浆体积与之相近<sup>[116]</sup>。当时产生的全球环境后果不堪设想,推测白垩纪中期的极端“暖室”环境和磁宁静期均应与之相关。在陆地上,规模最大的当推古生代末的西伯利亚玄武岩,总面积可达 390 万 km<sup>2</sup><sup>[115]</sup>,值得注意的是我国的峨眉玄武岩年龄是否与之相近,以及古生代末的生物大灭绝是否与之相关。上述种种,不仅解释了

从地球表层本身无法理解的现象,而且展示了地球深部对表层环境影响的规模与程度。

即便是离我们最远的地核,也通过地磁场影响着地球表层。现在的地核分固态的内核与液态的外核两部分,外核内的对流正是产生地磁场的原因,即所谓“地核发电机”(Geodynamo)。迄今为止,人类只能通过地球物理的手段结合试验模拟来认识地核,知道无论外核内部,或是核幔界面和内外核界面,都存在着物质对流,内核还以每年 1 mm 的速度在增大;地核引起的地磁场强度,也不断地发生变化<sup>[117]</sup>。由于地磁场是太阳风和低频宇宙射线的屏障,因而地核的变化对于空间气候有着重要影响<sup>[118]</sup>。地核是早期物质分异的产物,推测地磁场在地球形成的早期出现<sup>[117]</sup>,此前的地球暴露在各种宇宙射线的作用下,不利于生物圈的发展。直到现在,地磁场的强弱决定着地面宇宙核素的产量,因此冰芯中的<sup>36</sup>Cl<sup>[119]</sup>或者深海沉积中的<sup>10</sup>Be<sup>[120]</sup>都记录了地球内部的信息。对地球表层环境至关重要的,是万年至百万年尺度上的磁极倒转和漂移。近来已经证明地磁场在转换期间减弱<sup>[121]</sup>,如果失去地磁场对宇宙射线的屏蔽,就有可能造成生物的绝灭。但是迄今为止无论是磁极转换的原因<sup>[122]</sup>,还是转换的环境后果,依然属于学术上的“悬案”。地球深部的研究,比表层更为困难。

总之,地球系统科学决不能局限于表层系统,在长时间尺度上尤其如此。地球深部的地核、地幔,和表层系统中的地壳、水圈、大气圈和生物圈一样,都是地球系统中的基本环节,只不过变化速度一般比较低,人类又至今不能直接探测,因此不如表层系统那样受人注意罢了。其实,正是在表层与深部的结合上,酝酿着新的突破。我国现行的学科分界过于严谨,研究深部的必要手段又十分缺乏,尤其缺乏高温高压等模拟手段,不利于地球系统的深入探索。除深部之外,地球低层大气之外的日地空间也有类似的情况。原先不在视域之内的磁层、电离层和高层大气,随着人类社会空间与通信技术的发展都变得与我们休戚相关,已经成为地球系统中不容忽略的部分<sup>[1,2]</sup>。这里说的是学科发展的努力方向,人类真正理解从地核到日地空间的整个地球系统,恐怕只能是未来的长远目标。

## 6 针对系统科学的系统措施

综上所述,80 年代晚期以来地球系统科学成绩辉煌,其中最大的努力是去揭示地球系统中的碳循

环。然而3年前学术界对现代和近40万年来碳循环的认识进行总结时,仍然不得不承认“我们的知识还不足以说明地球系统中各个成分间的关系,说明碳循环与其他生物地球化学和气候过程间的关系”<sup>[123]</sup>。可见地球系统科学尽管前程辉煌,但是摆在面前的路程还很长。我们常说,中国对于19~20世纪的地质革命愧无贡献,那是由于历史的原因;地球系统科学将是新世纪地质革命的突破口,如果中国还无贡献,那就只能是我们主观的原因,地质界同仁难辞其咎。

进入新世纪的中国,正处在经济与社会大发展,数百年不遇的大好时机。地球科学作为社会可持续发展的理论基础,在国家需求上具有充分的驱动力。除去各门学科共性的问题如体制、投入、政策等外,地球科学的发展很大程度上还取决于学术指导思想和研究方向。现在,以地球系统科学作为方向已经取得共识;而作为一门系统科学的发展,还要求有系统的措施。根据上面的讨论,至少可以提出以下3点建议:

首先,随着经济的发展和进入国际大循环,要求我们立足本国、面向全球,重新考虑我国地球科学的国际定位。无论从地球系统科学的性质,或者从我国的国际竞争的需求出发,我国地球科学研究都应当改变只限于国内的习惯;而从当前我国地球科学的实力和投入看,也已经是走向全球的时候。国际学术界早已在探讨中国经济发展对全球环境系统的影响,比如美国学者提出,中国汽车的普及将会导致大气中臭氧的增加和太平洋初级生产率的上升<sup>[124]</sup>,我国学术界反而无动于衷,是没有理由的。不仅宏观环境的研究必须面向全球,连资源和能源也已经走向国际。以石油为例,我国已经有1/3的原油来自国外,已经到15个国家勘探开发,面临着“全球战略”和建立“全球供应体系”<sup>[19]</sup>,闭关自守式的地球科学已经不再适应。地球系统本来不以国土为界,虽然应用科学有明确的国土界限,海洋的应用也以近岸浅海更为直接,但基础研究决不应以此为界。我们既要搞清“家门口”,也要“走出去”,“走出去”才能更好搞清“家门口”。建议有一小部分精干力量“冲出亚洲,走向世界”,直接进入国际竞争;同时通过国内的辐射效应,推动整个地球科学扩大眼界、面向全球。以期在国内研究项目中有全球意识,在参加国际合作时也有自己的本国目标。

中国要进入地球系统科学的核心理论研究,而不只是追随国外走向,就必须分析我国独特的自然

条件,根据实际的研究力量和科学积累,选择有突破前景的重大课题,通过记录、模型与观测三结合,实现既有本国特色又与国际接轨的全国和长期性的大型研究计划。一个突出的例子便是“中国宏观自然环境格局及其演变趋势”,可以将青藏高原、季风气候、边缘海盆等一系列环境特色的内在联系、形成机理与演变方向,进行系统研究,而不只是分别参与国际合作;一旦实现,必将在基础理论和实际应用两方面取得突破性成果。另一个例子是前新生代的全球变化,国外主要依靠稳定同位素分析推测大气与海水的演化<sup>[125]</sup>,而我国具有澄江、热河等化石群特殊保存条件的优势,应当通过古生物宝库与地层的地球化学分析相结合,探索古代“冰室期”与“暖室期”转换以及生命演化等重大问题,力争有重大突破。

同时,还应当全力推进地学和生命科学在分子水平上的结合。“深部生物圈”、“黑暗食物链”和“微型生物圈”等一系列发现,大幅度扩展了地球上“生物圈”的范围;分子生物学、微生物生态学和生物地球化学的进展,创造了地球与生命科学在分子水平和化学层面上结合的新方向。我国应采取强有力的措施,组织微生物学、有机地球化学等方面的力量,在地微生物学、演化基因组学等方面参加国际前沿的研究。鉴于目前该交叉领域在国际尚属起步阶段,我国应当不失时机、及早部署,建议一方面促进两大学科的联合交流、讨论,另一方面建立相应的新型实验室和研究机构,并及早招募力量、着手筹建。总而言之,要瞄准地球系统科学的核心问题,开展追踪过程、探索机理的研究。上面说过,我国的地球科学长期以现象和记录为对象,难以进入国际合作研究的核心问题。只有在取得高质量记录的同时,有目的地开展现代过程观测与试验,积极推进理论模型的数值模拟工作,才能从现象描述推进到机理探索,切实开展理论研究。与此同时,建议组织中国的“地球系统科学大会”系列,出版反映科学前沿的综述文集或专辑,举办地球系统科学讲座,在国际学术界的高度推动国内的学科交叉。相信在地球系统科学的征途上,中国的学术界将在国内迎来新的春天,在国际做出新的贡献。

致谢:承蒙孙枢、孙贤、丁一汇、魏国彦、林海、肖佐、杨洪、李前裕、郑洪波、孙湘君等各位对文稿提出宝贵意见,徐建协助作图,特此致谢。

## 参考文献(References):

- [1] 中国科学院地学部“中国地球科学发展战略”研究组. 地球科学: 世纪之交的回顾与展望[M]. 青岛: 山东教育出版社, 2002. 65.
- [2] 中华人民共和国科学技术部、国家自然科学基金委员会. 中国基础学科发展报告(2001-2005) [R]. 2001, 367.
- [3] 汪品先. 从出版物看中国的地球科学[A]. 见: 中国地球科学发展战略的若干问题[C]. 北京: 科学出版社, 1998. 64-77.
- [4] Brasseur G, Moore III B. The new and evolving IGBP[J]. Global Change Newsletter, 2002, 50: 1-3.
- [5] IPSC. Earth, Oceans and Life: Integrated Ocean Drilling Program, Initial Science Plan, 2003-2013 [M]. Washington DC: IWG Supporting Office, 2001. 110. [译地球、海洋与生命 IODP 初始科学计划[M]. 上海: 同济大学出版社, 2003. 96.]
- [6] EGS-AGU-EGU. Scientific Programme, EGS-AGU-EGU Joint Assembly, Nice, France, 06-11 April 2003.
- [7] Schellnhuber H J. “Earth system” analysis and the second Copernican revolution[J]. Nature, 1999, 402: C19-C22.
- [8] Munk W. Ocean freshening, sea level rising[J]. Science, 2003, 300: 2041-2043.
- [9] Thompson L, Mosley-Thompson E, Davis M E, et al. Kilimanjaro ice core records: Evidence of Holocene climate change in tropical Africa[J]. Science, 2002, 298: 589-593.
- [10] Hoskins B J. Climate change at cruising altitude? [J]. Science, 2003, 301: 469-470.
- [11] Jacobs S S, Giulivi C F, Mele P A. Freshening of the Ross Sea during the late 20th century[J]. Science, 2002, 297: 386-389.
- [12] Kleypas J A, Buddemeier R W, Archer D, et al. Geochemical consequences of increased atmospheric carbon dioxide on coral reefs[J]. Science, 1999, 284: 118-120.
- [13] Gattuso J P, Buddemeier R W. Calcification and CO<sub>2</sub>[J]. Nature, 2000, 407: 311-313.
- [14] Pockley P. Global warming identified as main threat to coral reefs[J]. Nature, 2000, 407: 932.
- [15] Dickey J O, Marcus S L, de Viron O, et al. Recent Earth oblateness variations: Unraveling climate and postglacial rebound effects[J]. Science, 2001, 298: 1975-1977.
- [16] Verburg P, Hecky R E, Kling H. Ecological consequences of a century of warming in Lake Tanganyika[J]. Science, 2003, 301: 505-507.
- [17] Zhang P, Molnar P, Downs W R. Increased sedimentation rates and grain sizes 2 ~ 4 Myr ago due to the influence of climate change on erosion rates[J]. Nature, 2001, 410: 891-897.
- [18] Trenberth K E, Stepaniak D P, Caron J M. The global monsoon as seen through the divergent atmospheric circulation[J]. Journal of Climate, 2000, 13: 3969-3993.
- [19] Zhu Xun. To implement global energy strategies, to establish a global supply system[J]. Science & Technology Review, 2003, 203(7): 3-8 [朱训. 实行全球能源战略, 建立全球供应体系[J]. 科技导报, 2003, 7: 3-8.]
- [20] Kojima S. Deep-sea chemoautotrophic communities in the Northwestern Pacific[J]. Journal of Oceanography, 2002, 58: 343-363.
- [21] Parker R J, Cragg B A, Bale S J, et al. Deep bacterial biosphere in Pacific Ocean sediments[J]. Nature, 1994, 371: 410-413.
- [22] Coolen M J, Cypionka H, Sass A M, et al. Ongoing modification of Mediterranean Pleistocene sapropels mediated by prokaryotes[J]. Science, 2002, 296: 2407-2410.
- [23] Krumholz L R. Microbial communities in the deep subsurface[J]. Hydrology Journal, 2000, 8: 4-10.
- [24] Thorseth I H, Torsvik T, Torsvik V, et al. Diversity of life in ocean floor basalt[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2001, 194: 31-37.
- [25] Ingebritsen S E, Sanford W E, Toth J. Recent studies on bacterial populations and processes in seafloor sediments: A review[J]. Hydrology Journal, 2000, 8: 11-28.
- [26] Huang Li. Archaea: The third form of life[J]. Science, 2000, (3): 47-49. [黄力. 古菌: 生命的第三种形式[J]. 科学, 2000, (3): 47-49.]
- [27] Banfield J E, Marshall C R. Genomics and the geosciences[J]. Science, 2000, 287: 605-606.
- [28] Nealson K H. Sediment bacteria: Who's there, what are they doing, and what's new? [J]. Annual of Review Earth Planetary Science, 1997, 27: 403-434.
- [29] Newman D, Banfield J F. Geomicrobiology: How molecular-scale interactions underpin biogeochemical system[J]. Science, 2002, 296: 1071-1077.
- [30] Macalady J, Banfield J F. Molecular geomicrobiology: Genes and geochemical cycling[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2003, 209: 1-17.
- [31] Knoll A H. Life on a Young Planet: The First Three Billion Years of Evolution on Earth [M]. BJ: Princeton University Press, 2003.
- [32] Ning Xiuren. Marine nanoplankton and picoplankton[J]. Donghai Marine Science, 1997, 15(3): 60-64. [宁修仁. 海洋微型和超微型浮游生物[J]. 东海海洋, 1997, 15(3): 60-64.]
- [33] Xiao Tian. The study on marine bacterioplankton ecology [J]. Advance in Earth Sciences, 2001, 16(1): 60-64. [肖天. 海洋浮游细菌的生态学研究 [J]. 地球科学进展, 2001, 16(1): 60-64.]
- [34] Kolber Z S, Plumley F G, Lang A S, et al. Contribution of aerobic photoheterotrophic bacteria to the carbon cycle in the ocean[J]. Science, 2001, 292: 2492-2495.
- [35] Copley J. All at sea[J]. Nature, 2002, 415: 572-574.
- [36] Falkowski P G. The ocean's visible forest[J]. Scientific American, August 2002, 38-45. [Falkowski P G. 海洋中的隐形森林[J]. 科学, 2002, (12): 32-39.]
- [37] Liss P. Take the shuttle-From marine algae to atmospheric chemistry[J]. Science, 1999, 285: 1217-1218.
- [38] Andreae M O, Crutzen P J. Atmospheric aerosols: Biogeochemical sources and role in atmospheric chemistry [J]. Science, 1997, 276: 1052-1058.
- [39] Kabat P, Hoff H, Hutjes R, et al. Terrestrial biosphere, climate and the water cycle[J]. Global Change Newsletter, 2001, 46: 31-34.
- [40] Pitman A, Pielke Sr R, Avissar R, et al. The role of the land surface in weather and climate: Does the land surface matter?

- [J]. *Global Change Newsletter*, 1999, 39: 4-11.
- [41] Silva Dias M A, Nobre C A, Marengo J A. The interaction of cloud and rain with the biosphere[J]. *Global Change Newsletter*, 2001, 45: 8-11.
- [42] Pennisi E. Modernizing the tree of life[J]. *Science*, 2003, 300: 1 692-1 697.
- [43] Nisbet E G, Sleep N H. The habitat and nature of early life[J]. *Nature*, 2001, 409: 1 083-1 091.
- [44] Des Marais D J. When did photosynthesis emerge on Earth? [J]. *Science*, 2000, 289: 1 703-1 705.
- [45] Berner R A. The rise of plants and their effect on weathering and atmospheric CO<sub>2</sub>[J]. *Science*, 1997, 276: 544-546.
- [46] Badger M R, Andrews T J, Whitney S M, *et al.* The diversity and coevolution of Rubisco, plastids, pyrenoids, and chloroplast-based CO<sub>2</sub>-concentrating mechanisms in algae [J]. *Canadian Journal of Botany*, 1998, 76: 1 052-1 071.
- [47] Cerling T E. Paleorecords of C<sub>4</sub> plants and ecosystems[A]. In: Sage R F, Monson R K, eds. *C<sub>4</sub> Plant Biology*[C]. Academic Press, 1999. 445-469.
- [48] Line M A. The enigma of the origin of life and its timing[J]. *Microbiology*, 2002, 148: 21-27.
- [49] Karl D, Leteller R, Tupas L, *et al.* The role of nitrogen fixation in biogeochemical cycling in the subtropical North Pacific Ocean [J]. *Nature*, 1997, 388: 533-538.
- [50] Ganeshram R S, Pedersen T F, Calvert S E, *et al.* Reduced nitrogen fixation in the glacial ocean inferred from changes in marine nitrogen and phosphorus inventories [J]. *Nature*, 2002, 415: 156-159.
- [51] Lovelock J E. Geophysiology—The science of Gaia [A]. In: Schneider S H, Boston P J, eds. *Scientists on Gaia*[C]. MIT Press, 1991. 3-10.
- [52] Dudley R. Atmospheric oxygen and the evolution of insect gigantism [J]. *Geophysical Research Abstracts*, EGU, 2003, 5: 06986.
- [53] Lowenstein T K, Timofeeff M N, Brennan S T, *et al.* Oscillations in Phanerozoic seawater chemistry: Evidence from fluid inclusions[J]. *Science*, 2001, 294: 1 086-1 088.
- [54] Dickson J A. Fossil echinoderms as monitor of the Mg/ Ca ratio of Phanerozoic oceans[J]. *Science*, 2002, 298: 1 222-1 223.
- [55] Stanley S M, Hardie L A. Secular oscillations in the carbonate mineralogy of reef-building and sediment-producing organisms driven by tectonically forced shifts in seawater chemistry [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 1998, 144: 3-19.
- [56] Hart M B, Hylton M D, Oxford M J, *et al.* The search for the origin of the planktic foraminifera[J]. *Journal of the Geological Society, London*, 2003, 160: 341-343.
- [57] Bains S, Norris R D, Corfield R M, *et al.* Termination of global warmth at the Palaeocene/ Eocene boundary through productivity feedback[J]. *Nature*, 2000, 407: 171-174.
- [58] Field J G, Hempel G, Summerhayes C P. Oceans 2020: Science, Trends, and the Challenge of Sustainability [M]. Island Press, 2002.
- [59] Fedorov A V, Philander S G. Is El Niño changing? [J]. *Science*, 2000, 288: 1 997-2 002.
- [60] McPhaden M J, Zhang D. Slowdown of the meridional overturning circulation in the upper Pacific Ocean [J]. *Nature*, 2002, 415: 603-608.
- [61] Turk D, McPhaden M J, Busalacchi A J, *et al.* Remotely sensed biological production in the Equatorial Pacific [J]. *Science*, 2001, 293: 471-474.
- [62] Hoerling M P, Hurrell J W, Xu T. Tropical origins for recent North Atlantic climate change[J]. *Science*, 2001, 292: 90-92.
- [63] Yuan X, Martinson D G. The Antarctic Dipole and its predictability[J]. *Geophysical Research Letters*, 2001, 28: 3 609-3 612.
- [64] Cane M A, Evans M. Do the tropics rule? [J]. *Science*, 2000, 290: 1 107-1 008.
- [65] Johnson G C, McPhaden M J. Interior pycnocline flow from the subtropical to the equatorial Pacific Ocean [J]. *Journal of Oceanography*, 1999, 29: 3 073-3 089.
- [66] Liu Z, Yang H. Extratropical control of tropical climates, the atmospheric bridge and ocean tunnel[J]. *Geophysical Research Letters*, 2003, 30: 1 230-1 233.
- [67] Tulhope A W, Chilcott C P, McCulloch M T, *et al.* Variability in the El Niño-Southern Oscillation through a glacial-interglacial cycle[J]. *Science*, 2001, 291: 1 511-1 517.
- [68] Clement A C, Seager R, Cane M A. Orbital controls on the El Niño / Southern Oscillation and the tropical climate[J]. *Paleoceanography*, 1999, 14: 441-456.
- [69] Clement A C, Cane M A, Seager R. An orbitally driven tropical source for abrupt climate change[J]. *Journal of Climate*, 2001, 14: 2 369-2 375.
- [70] Martin J H. Iron deficiency limits phytoplankton growth in northeast Pacific subarctic[J]. *Nature*, 1988, 331: 242-243.
- [71] Martin J H. Glacial-interglacial CO<sub>2</sub> change: The iron hypothesis [J]. *Paleoceanography*, 1990, 5: 1-13.
- [72] Petit J R, Jouzel J, Raynaud D, *et al.* Climate and atmospheric history of the past 420 000 years from the Vostok ice core, Antarctica[J]. *Nature*, 1999, 399: 429-436.
- [73] Martin J, *et al.* Testing the iron hypothesis in ecosystems of the equatorial Pacific Ocean[J]. *Nature*, 1994, 371: 123-129.
- [74] Boyd P W, Watson A J, Law C S, *et al.* A mesoscale phytoplankton bloom in the polar Southern Ocean stimulated by iron fertilization[J]. *Nature*, 2000, 407: 695-702.
- [75] Archer D, Winguth A, Lea D, *et al.* What caused the glacial / interglacial atmospheric pCO<sub>2</sub> cycles? [J]. *Reviews of Geophysics*, 2000, 38: 159-189.
- [76] Harrison K. Role of increased marine silica input on paleo-pCO<sub>2</sub> levels[J]. *Paleoceanography*, 2000, 15: 292-298.
- [77] Nozaki Y, Yamamoto Y. Radium 228 based nitrate fluxes in the eastern Indian Ocean and the South China Sea and a silicon-induced "alkalinity pump" hypothesis[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2001, 15: 555-567.
- [78] Treguer P, Pondaven P. Silica control of carbon dioxide[J]. *Nature*, 2000, 406: 358-359.
- [79] Wang Pinxian. Ice and carbon in climate evolution[J]. *Earth Science Frontiers*, 2002, 9(1): 85-93. [汪品先. 气候演变中的冰与碳[J]. *地学前缘*, 2002, 9(1): 85-93.]
- [80] Wang Pinxian, Tian J, Cheng X, *et al.* Carbon reservoir change

- preceded major ice-sheet expansion at the Mid-Brunhes event [J]. *Geology*, 2002, 31: 239-242.
- [81] Hay W W. Pleistocene-Holocene fluxes are not the Earth's norm [A]. In: *Material Flux on the Surface of the Earth*[C]. Washington DC: National Academy Press, 1994. 15-27.
- [82] Sarnthein M, Kennett J P, Allen J R M, *et al.* Decadal-to-millennial-scale climate variability-chronology and mechanisms: summary and recommendations [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2002, 21: 1121-1128.
- [83] Labeyrie L, Cole J, Alvenson K, *et al.* The history of climate dynamics in the Late Quaternary [A]. In: Alvenson K, Bradley R S, Pedersen T F, eds. *Paleoclimate, Global Change and the Future*[C]. Springer, 2003. 33-61.
- [84] Broecker W S. Paleocean circulation during the last deglaciation: A bipolar seesaw? [J]. *Paleoceanography*, 1998, 13: 119-121.
- [85] Stocker T F. Past and future reorganizations in the climate system [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2000, 19: 301-319.
- [86] Hyde W T, Crowley T J, Baum S K, *et al.* Neoproterozoic 'snowball Earth' simulations with a coupled climate/ice-sheet model [J]. *Nature*, 2000, 405: 425-429.
- [87] Hoffman P F, Schrag D P. Snowball Earth [M]. *Scientific American*, 2000. 68-75.
- [88] Ryan W, Pitman W, Shimkus K, *et al.* An abrupt drowning of the Black Sea shelf [J]. *Marine Geology*, 1997, 138: 119-126.
- [89] Ryan W, Major C O, Lericolais G, *et al.* Catastrophic flooding of the Black Sea [J]. *Annual Review Earth Planetary Science*, 2003, 31, 525-554.
- [90] Anbar A D, Knoll A H. Proterozoic ocean chemistry and evolution: A bioinorganic bridge? [J]. *Science*, 2002, 297: 1137-1142.
- [91] Kerr R A. Could poor nutrient have held life back? [J]. *Science*, 2002, 297: 1104-1105.
- [92] Riebesell U, Zondervan I, Rost B, *et al.* Effects of increasing atmospheric CO<sub>2</sub> on phytoplankton communities and the biological carbon pump [J]. *Global Change Newsletter*, 2001, 47: 12-15.
- [93] Brasseur G, Budich R, Komen G. European network for Earth system modeling [J]. *Geophysical Research Abstracts*, 2003, 5: 06708.
- [94] Canopolski A, Rahmstorf S, Petoukhov V, *et al.* Simulation of modern and glacial climates with a coupled global model of intermediate complexity [J]. *Nature*, 1998, 391: 351-356.
- [95] Kasting J F, Toon O B, Pallock J B. How climate evolved on the terrestrial planets [J]. *Scientific American*, 1998, (2): 46-55.
- [96] Berner R A, Lassaaga A C, Garrels R M. The carbonate-silicate geochemical cycle and its effect on atmospheric carbon dioxide over the past 100 million years [J]. *American Journal of Science*, 1983, 283: 641-683.
- [97] Des Marais D J. Carbon exchange between the mantle and the crust, and its effect upon the atmosphere: Today compared to Archean time [A]. In: Sandquist E T, Broecker W S, eds. *The Carbon Cycle and Atmospheric CO<sub>2</sub>: Natural Variations Archean to Present*[C]. *Geophysical Monograph*, 1985, 32: 602-611.
- [98] Kerrick D M, McKibben M A, Seward T M, *et al.* Convective hydrothermal CO<sub>2</sub> emission from high heat flow regions [J]. *Chemical Geology*, 1995, 121: 285-293.
- [99] Kerrick D M, Caldeira K. Paleatmospheric consequences of CO<sub>2</sub> released during early Cenozoic regional metamorphism in the Tethyan orogen [J]. *Chemical Geology*, 1993, 108: 201-230.
- [100] Kerrick D M, Caldeira K. Metamorphic degassing from orogenic belts [J]. *Chemical Geology*, 1998, 145: 213-232.
- [101] Raymo M E, Ruddiman W F. Tectonic forcing of the late Cenozoic climate [J]. *Nature*, 1992, 359: 117-122.
- [102] Wyllie P J. Magma genesis, tectonics, and chemical differentiation of the Earth [J]. *Reviews of Geophysics*, 1988, 26: 370-404.
- [102] Kelley D S, Baross J A, Delaney J R. Volcanoes, fluids, and life at mid-ocean ridge spreading centers [J]. *Annual Review of Earth Planetary Science*, 2002, 30: 385-491.
- [103] Poli S, Schmidt M W. H<sub>2</sub>O transport and release in subduction zones: Experimental constraints on basaltic and andesitic systems [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1995, 100: 22299-22314.
- [104] Dixon J E, Leist L, Langmuir C, *et al.* Recycled dehydrated lithosphere observed in plume-influenced mid-ocean ridge basalt [J]. *Nature*, 2002, 420: 385-389.
- [105] Danyushevsky L V. The effect of small amounts of H<sub>2</sub>O on crystallization of mid-ocean ridge and backarc basin magmas [J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 2001, 110: 265-280.
- [106] van der Meijde M, Marone F, Gardini D, *et al.* Seismic evidence for water deep in Earth's upper mantle [J]. *Science*, 2003, 300: 1556-1558.
- [107] Tatsumi Y, Kogiso T. The subduction factory: Its role in the evolution of the Earth's mantle [A]. In: *Frontier Research on Earth Evolution (vol. 1)* [C]. Tokyo: IFREE, JAMSTEC, 2003. 59-62.
- [108] Murakami M, Hirose K, Yurimoto H, *et al.* Water in Earth's lower mantle [J]. *Science*, 2002, 295: 1885-1887.
- [109] Van Keken P E, Hauri E H, Ballentine C J. Mantle mixing: The generation, preservation, and destruction of chemical heterogeneity [J]. *Annual Review of Earth Planetary Science*, 2002, 30: 493-525.
- [110] Bercovici D, Karato S I. Whole-mantle convection and the transition-zone water filter [J]. *Nature*, 2003, 425: 39-44.
- [111] Hofmann A W. Just add water [J]. *Nature*, 2003, 425: 24-25.
- [112] Tackley P J. Mantle convection and plate tectonics: Toward an integrated physical and chemical theory [J]. *Science*, 2000, 288: 2002-2007.
- [113] Gurnis M, Muller R D, Moresi L. Cretaceous vertical motion of Australia and the Australian-Antarctic discordance [J]. *Science*, 1998, 279: 1499-1504.
- [114] Gurnis M. Sculpting the Earth from inside out [M]. *Scientific American*, 2001 (March): 40-47.
- [115] Renne P. Flood basalts - bigger and badder [J]. *Science*, 2002, 296: 1812-1813.
- [116] Frey F A, Coffin M F, Wallace P J, *et al.* Leg 183 synthesis: Kerguelen Plateau-Broken Ridge—A large igneous province [A]. In: Frey F A, Coffin M F, Wallace P J, *et al.*, eds. *Proceeding of ODP, Science Results*[C] 2003, 183: 1-48.
- [117] Buffett B A. Earth's core and the geodynamo [J]. *Science*,

- 2000 ,288 : 2 007-2 012.
- [118] Lyon J. G. The solar wind-magnetosphere-ionosphere system [J]. *Science*, 2000 ,288 : 1 987-1 991.
- [119] Baumgartner S, Beer J, Masarik J, *et al.* Geomagnetic modulation of the  $^{36}\text{Cl}$  flux in the GRIP ice core, Greenland[J]. *Science*, 1998 ,279 : 1 330-1 332.
- [120] Frank M, Schwarz B, Baumann S, *et al.* A 200 ka record of cosmogenic radionuclide production rate and geomagnetic field intensity from  $^{10}\text{Be}$  in globally stacked deep-sea sediments[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1997 ,149 : 121-129.
- [121] Guyodo Y, Valet J P. Global changes in intensity of the Earth's magnetic field during the past 800 kyr[J]. *Nature*, 1999 ,399 : 249-252.
- [122] Zhu Rixiang. Morphology of the magnetic field during polarity transition[A]. In: Chen Shupeng ed. *Earth System Science* [C]. Beijing: China Science and Technology Press, 1998. 559-560. [朱日祥. 极性转换期间地球磁场形态学[A]见: 陈述彭主编. 地球系统科学[C]. 北京: 中国科学技术出版社, 1998. 559-560.]
- [123] Falkowski P, Scholes R J, Boyle E, *et al.* Global carbon cycle: A test of our knowledge of Earth as a system[J]. *Science*, 2000 ,290 : 291-296.
- [124] Elliot S, Blake D R, Duce R A, *et al.* Motorization of China implies changes in Pacific air chemistry and primary production [J]. *Geophysical Research Letters*, 1997 ,24 : 2 671-2 674.
- [125] Veizer J, Ala D, Azmy K, *et al.*  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ,  $^{13}\text{C}$  and  $^{18}\text{O}$  evolution of Phanerozoic seawater[J]. *Chemical Geology*, 1999 ,161 : 59-88.

## EARTH SYSTEM SCIENCE IN CHINA QUO VADIS ?

WANG Pin-xian

(Laboratory of Marine Geology, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract :** During the past 15 years, the global change and Earth system sciences have been extensively developed in China, with increasingly active participation of Chinese scientists in various international programs. Currently, the major international programs are entering their new phases (*e. g.* IGBP-II, IODP), and China is outlining its National Middle-to-Long Term Plan for Science and Technology Development, providing a need to review the status of the Earth system science in China and to reconsider its future direction. Regardless of the growing number of international publications by Chinese scientists, a trend of increasing lag of the Chinese behind international Earth system sciences studies appears to remain: Many "hot-spot" issues on the international frontiers have not yet been raised in China, and Chinese scientists are rarely involved in synthetic studies of international programs despite of their early-stage contributions. Consequently, the paper presents three suggestions as follows: (1) The time is ripe for Chinese Earth scientists to broaden their geographical scope and to attack scientific problems of global scale. The majority of Earth science studies in China may still focus on domestic issues, but a global view is needed when interpreting regional or local phenomena. Small groups should be encouraged to directly enter into global competition, working on oceanic or planetary issues. (2) To follow the international frontiers, China has to promote incorporation between Earth and life sciences at a molecular level. As the results of recent discovery of the "Deep Biosphere" under sea floor and of geochemical role of underground microbes, some core geoscience and bioscience concepts are being fundamentally revised. And the evolution of life is to be approached from an integration of paleontology, molecular biology, and geochemistry. (3) Chinese Earth science is to be promoted to shift from basically descriptive work to mechanism searching. We should not be satisfied with providing "raw material" export to the global science, but should be active in theoretical studies directed to key questions in the Earth system science. For this purpose, we need well-designed problem-oriented field and laboratory experiments, and hypothesis-testing numerical modeling, in addition to high-quality records of observations and analyses.

**Key words :** Earth system science; Interactions between Earth sub-systems; Incorporation between Earth and life sciences.