

我国地球系统科学向何处去

作者：汪品先

二十世纪末期起，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”。地球科学又一场新的革命性突破正在来临。正在着手实施中长期科技发展规划纲要，为建设创新型国家而奋斗的我国学术界，将如何迎接这场学术挑战？对此，有必要对国内外地球系统科学的研究作一比较，并在此基础上对学科发展的走向提出一点管窥之见，就正于同行。

与国际学术差距缩小还是扩大了

如果我国学术界只以计算论文数量为满足，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

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。如果几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，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。

不过数量上的增加，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。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做一对比：

国际讨论的许多重大问题，不见于国内。以欧、美地球物理学会联合举行的万人大会为例，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”等等，均属地球系统科学的范畴，却至今仍是我国不熟悉或者不大熟悉的题目。

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中我国曾积极参加，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”。正当我国学术界热衷于计算“SCI论文”数量的时候，国际学术界却在朝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，我们应当引出教训。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”。

立足本国面向全球

应重新考虑我国地球科学的定位，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

全球视野是地球系统科学的前提。技术发展和资料积累，打开了地球科学家的眼界。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”。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CO₂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，上世纪以来每年平均上升1.5—2.0mm；雪线上升，非洲最高峰的雪线近90年升高数百米；连大气圈对流层顶的高度也在上升，二十年来平均上升200m。温室效应不仅改变海平面，还改变着海水的化学：每年估计有650km³的融冰淡水添进大洋，使得海水变淡。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。

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。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。无论“厄尔尼诺（El Nino）”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”系统，从全球系统出发才能更好地理解各个子系统。

现在，无论从我国地球科学的实力和投入看，或者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，原因主要还不在语言障碍，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。

地球与生命科学 交叉形成新高度

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

近十几年“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，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，生命科学向愈益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。

七十年代末“Alvin”号深潜器在东太平洋发现深海热液活动和热液生物群，说明地球上不仅有我们所习惯的“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。甚至数千米深海海下面数百米的深处，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。

“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。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。



我国地球系统科学向何处去

作者：汪品先

从金属矿到水合物，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”了四十亿年，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，令人瞩目的恐龙、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，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。

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。推测生命起源于还原环境下高温的热液口，而生命的出现就必然改变地球上的地球化学作用，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，因而提出了“盖娅”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”。

地球深部与表层系统的结合

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。正是在表层与深部的结合上，酝酿着新的突破。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CO₂；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CO₂，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，但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。

地球深部的水循环，是近年来研究的热点。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，到四五千米深处与熔岩接触，升温到三四百度后重返海底，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。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公里以下。地质历史上带入地幔的水，可能相当于现在大洋海水总量的四分之一。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五十倍之多。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！

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。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；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。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。

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，内核还以每年一毫米的速度

在增大；地核引起的地磁场强度，也不断地发生变化。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。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，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，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。正是在表层与深部的结合上，酝酿着新的突破。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、电离层和中高层大气，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。

针对系统科学的系统措施

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。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

地球科学在19世纪的革命性突破在于进化论，20世纪在于板块理论，中国对于上两个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，地质学界同仁难辞其咎。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，至少可以提出以下三点建议：

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了。

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，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2/5的原油来自国外，已经到十多个国家勘探开发，面临着“全球战略”和建立“全球供应体系”，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”才能更好地搞清“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研究圈，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，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，还应当全力推进地质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“微型生物环”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新前沿的研究。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。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。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，在国际地学研究领域做出新的贡献。

（2006年9月24日《文汇报》）

[1] 2

