

本刊郑重向读者推荐著名海洋地质学家、同济大学教授汪品先院士这篇文章。在年初召开的全国科技大会上,胡锦涛代表党中央、国务院向全国人民发出了建设创新型国家的号召,并再次强调了坚持自主创新对于未来中国发展的重要意义。当此关键时刻,更需要有一种对当下、对未来的清醒认识,需要有全球化的眼光。汪先生的这篇文章虽是基于地球科学的若干基础研究问题,但相信文中的诸多见解、思考,对其他领域的科技工作者,对广大读者都会有所启发。

## 我国的地球系统科学研究向何处去?



汪品先

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融合,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。当此,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。

### 差距是在缩小还在扩大?

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。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。

不过数量的增加,并不等于质量的提高;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



汪品先院士

来风,不妨将国内与国际的地球系统研究现状作一对比:

国际讨论的许多重大问题,不见于国内。以2004年4月欧、美地球物理学会在尼斯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”等等,均属地球系统科学的范畴,却都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,却难以在材料“组装”和理论探讨的核心中发挥作用。

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。

## 立足本国 面向全球

全球视野是地球系统科学的前提。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,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,20年来平均上升200m。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:每年估计有650km<sup>3</sup>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,我国习惯的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”还是“新仙女木事件”,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

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”。

风”系统,从全球系统出发才能更好理解各个子系统。

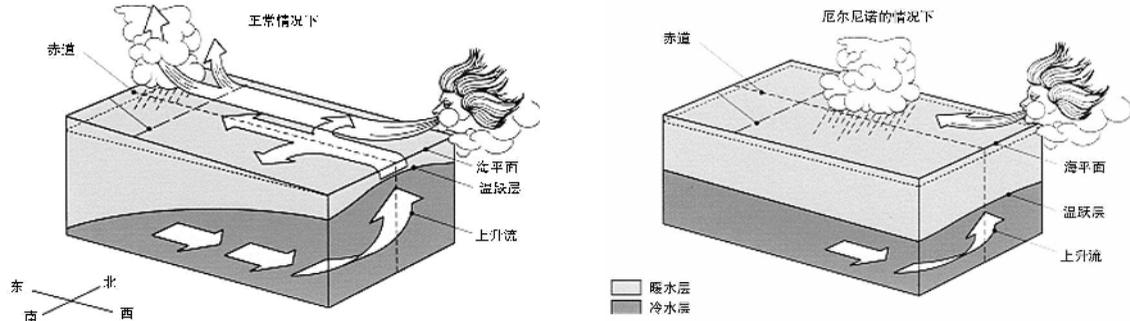
无论从我国地球科学的实力和投入看,或者从我国经济与权益的国际竞争看,都到了走出国门、面向世界的时候。应当重新考虑我国地球科学的定位,不能以“原料输出”为满足。应当从地球系统科学出发,改变我们的研究视角:或者从全球问题出发,用中国材料入手研究;或者从中国问题出发,在全球的高度进行分析。我国地学的成果在国际舞台上的体现低于其实力,原因主要还不在于语言障碍,而在于视角过低,就事论事有余,“上纲上线”不足,难以引起国际兴趣。相反,凡能利用本国特色又能针对全球问题的,便容易走上国际接轨之路,黄土高原的古环境研究便是一例。

## 地球与生命科学交叉的新高度

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,生命科学向更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。

“深部生物圈”的发现,大大拓

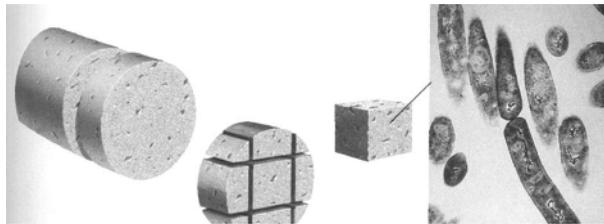
宽了“生物圈”的分布范围,直到极地冰盖、火山热泉和洋底地层,几乎无所不在。生物的分类,也扩展到古菌、细菌与真核生物三大类。地球历史的85%只有前两类组成的原核生物,它们从还原到氧化环境都有分布,在地球系统的时空坐标中占据一大片,而我们熟悉的动、植物只是真核生物中的一部分。

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,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,必须深入到“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。

### 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、采集纪录的方面,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,可以用厄尔尼诺的研究实例



海底热液细菌在温度 100 下生活加以说明。

厄尔尼诺现象早已发现,到60年代认识到这是热带太平洋气相互作用中的重大异常,但是不明白形成的机制。1985年热带大洋与全球大气(TOGA)计划开始,在太平洋赤道两侧投放了将

近70个锚系,对水文、风速、风向等连续观测十几年,追踪大气与上层海水的变化,终于揭示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。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。证据表明热带过程可以影响所有的纬度,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。热带和亚热带通过这种“大洋隧道”和“大气桥梁”相互交换、相互影响,构成了地球气候系统的实际过程。厄尔尼诺的研究,通过现代观察、测试与古代纪

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。

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,内中情趣决不亚于案件的侦探过程。8亿到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?假果真如此,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”?距今7000多年前,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?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”?……地球系统充满了丰富多彩的未解之谜,不仅是科幻作品的绝妙素材,更足以吸引有志之士去贡献自己的聪明才智。

## 地球深部与表层系统的结合

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。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3人在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,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,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。水在岩浆作用中的重要性,已经得到公认,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

4000~5000米深处与熔岩接触,升温到300~400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1~2%的水,深入到俯冲带200公里以下;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。然而正是这少量的水可以影响地幔中岩浆的分馏,可以改变某些层位的物理性质,产生地震震波传速的不连续面。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,就可能相当于现在大洋海水总量的1/4。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



地核发动机模拟图

估计,下地幔中储存的水就相当于全大洋总量的50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!水的分布与赋存状态,看来是认识地球深部的关键所在。

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,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1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。地核是早期地球冷却的产物,推测地磁场在地球形成的早期出现,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 $^{36}\text{Cl}$ 或者深海沉积中的 $^{10}\text{Be}$ 都记录了地球内部的信息。对地球表层环境至

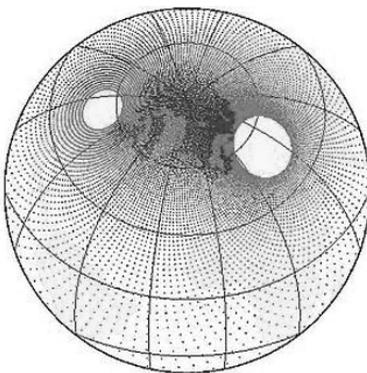
关重要的,是万年至百万年尺度上的磁极倒转和漂移。近来已经证明地磁场在转换期间减弱,如果失去地磁场对宇宙射线的屏蔽,就有可能造成生物的绝灭。但迄今为止无论是磁极转换的原因,还是转换的环境后果,依然属于学术上的“悬案”。地球深部的研究,比表层更为困难。

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。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,人类至今又不能直接探测,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。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视的部分。

### 针对系统科学的系统措施

我们常说,中国对于上两个世纪的地学革命愧无贡献,那是历史的原因;地球系统科学将是新世纪地学革命的突破口,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。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 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”,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,但基础研究决不应当以此为界。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

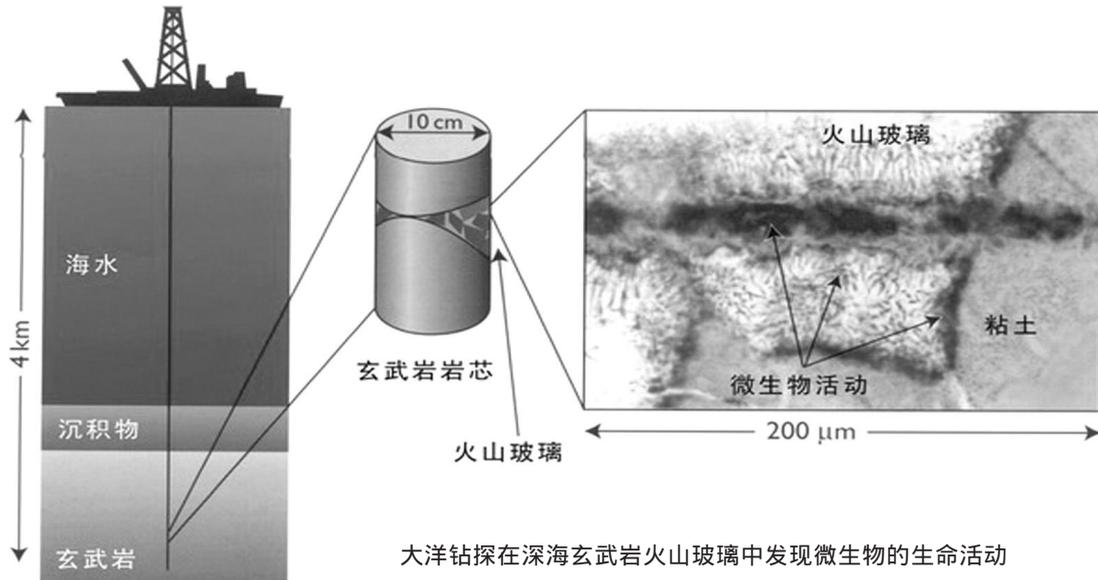
现既有本国特色又与国际接轨的全国和长期性的大型研究计划。一个突出的例子便是“中国宏观自然环境格局及其演变趋势”,可以将青藏高原、季风气候、边缘海盆等一系列环境特色的内在联系、形成机理与演变方向进行系统研究,而不只是分别参与国际合作;一旦实现,必将在基础理论和实际应用两方面取得突破性成果。另一个例子是前新生代的全球变化,国外主要依靠稳定同位素分析推测大气与海水的演化,而我国具有澄江、热河等化石群特殊保存条件的优势,应当通过古生物宝库与地层的地球化学分析相结合,探索古代“冰室期”与“暖时期”转换以及生命演化等重大问题,力争有重大突破。

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。与此同时,建议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,在国际地学研究领域做出新的贡献。

[承蒙孙枢、孙贤沐、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,特此致谢。]



大洋钻探在深海玄武岩火山玻璃中发现微生物的生命活动