

中国地球系统科学的十年展望

汪品先^{1*}, 郭正堂², 焦念志³, 金之钧⁴, 王成善⁵

1. 同济大学海洋与地球科学学院, 上海 200092;
2. 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029;
3. 厦门大学碳中和创新研究中心, 厦门 361002;
4. 北京大学能源研究院, 北京 100871;
5. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083

* 联系人, E-mail: pxwang@tongji.edu.cn

最近, 国家自然科学基金委员会和中国科学院联合出版了“中国地球系统科学2035发展战略”报告^[1], 展望了今后十年中国地球系统科学的发展重点. 报告指出当今地球系统研究存在两大方向, 在分析中国自然条件特色和地球科学现状与基础上, 提出了可能成为中国地球系统科学研究的三个突破口.

1 两大研究方向

地球系统科学自从提出以来就有两种发展方向: 一种以人类时间尺度为主, 探索地球表层系统的过程; 一种将时间扩大到地球演化的长尺度, 从地球内外的驱动因素探索其演化过程. 两者的服务重点各不相同: 前者试图直接回答当前全球变暖、温室效应的科学问题, 寻求社会可持续发展的途径, 具有明确的应用价值, 因而设有政府支持的大型计划, 也是当前世界上的主流^[2].

然而地球系统的自然过程远远超出了人类的时空尺度, 因此几十年来全球变化在理论层面的争论, 至今难以平息^[3]. 当然, 理解地球系统的演变是个长期任务, 不可能等到理论问题解决以后再行动, 但是从地球系统本身的时空尺度研究其演变机制, 是揭示自然规律的唯一途径, 这就是上述的后一种研究方向.

进入21世纪以来, 超越人类尺度探索地球系统的研究渐趋火爆, 国际学术交流^[4]和新型课程^[5]陆续出现. 在中国, 通过圈层相互作用全面探索地球系统的精神, 已经渗透到国家科研机构的各种立项指南中, 相应的研究项目、学术大会和高校课程纷纷涌现, 标志着中国地球科学正在进入系统科学的新阶段.

拓宽研究视野, 开展系统研究, 是中国科学院学部地学部长期提倡的方向. 早在1950年代就提出了“上天入地下海”的口号^[6]; 2002年又进一步提出要“加强交叉学科和多学科研究, 朝着地球系统科学的方向前进”^[7]. 在世纪之交的展望中, 地学部提出要“从地学大国走向地学强国”, 提倡“地球各圈层



汪品先 同济大学教授, 中国科学院院士. 长期致力于推进中国深海科技的发展, 并立足深海推动整个地球科学的系统研究. 曾主持中国海首次大洋钻探, 和国家自然科学基金“南海深海过程演变”重大研究计划.

相互作用的研究”, 以“形成整体性的地球系统科学”^[8]. 国家自然科学基金委员会在“全球变化及其区域响应”十年研究成果的总结中, 提出要“从地球系统科学的高度、在更大的时空范围内研究变化机理, 力争在基础理论上有所突破”^[3].

在这样的大背景下, 地球系统科学十余年来在中国迅速发展, 不少研究机构 and 高校纷纷成立地球系统研究单位, 设置地球系统课程, 出版地球系统专著和教材. 从2010年起, 在上海每隔一年举办的地球系统科学大会, 参会者从每次约500人猛增到近3000人, 地球系统研究已经出现燎原之势. 现在中国地学界已经取得共识, 地球系统科学不应当理解为各门地球科学的叠加, 而是探索其圈层相互作用, 整合其各种学科, 将地球作为一个完整系统来研究的学问, 在时间上正在从当前的全球变化向地球演化的早期推进, 空间上正在将地球表层与地球内部过程连接起来研究^[9], 而这也就是“未来地球科学的脉络”^[10].

2 地球科学转型

地球系统很可能就是21世纪地学革命的方向. 由于历史的原因, 中国错过了19世纪进化论和20世纪活动论的革命战役, 我们的科学家对此愧无贡献. 新世纪的地学革命正值中国改革开放、华夏振兴的黄金时期, 中国地学界理应当有所

作为,挑起历史性的重担。

中国拥有世界上最大的地球科学家队伍,论文数量已经位居世界前列,当前的任务是将量变转为质变,使中国的地球科学从主要提供资料数据的“原料输出型”转为找机理、出理论的“深度加工型”,而这正是地球系统科学的要求。想要成为创新型国家,就应该在国际学术界有自己的特色,有自己的学派,有自己的题目,这就需要转型。在地球科学里实现转型,就应当抓住国际机会,将地球科学提升到系统科学的高度。至今已有的科学积累和中国特有的自然条件,都起着重要的作用,而这两方面的条件应该说都是有利的。

东亚和西太平洋之间,有着地球系统里最活跃的交接带,而这就是中国地球科学的“窝”。从珠穆朗玛峰到菲律宾海沟,4000 km²的水平距离居然有20000 m的落差,是地球表面最大的陡坡。这里不仅是当今世界最大的大陆和最大的大洋的交界,更是正在形成的新生超级大陆和古老超级大洋几亿年俯冲带的接口,因而也是全面理解板块运动的切入点。

以28°C等温线为界的西太平洋暖池,是地球上表层海水温度最高的海域。暖湿的空气从这里上升,形成3个大气环流调控着季风和厄尔尼诺,因而是地球表面能量流的中心。由于地形和降水的原因,亚洲的东部和南部为世界大洋提供着70%的陆源悬移沉积物,因而是地球表面物质流的中心。亚洲东南的“东印度三角”是生物地理学“华莱士线”的所在,无论陆地还是海洋生物的多样性都在全球称冠,是生物圈辐射演化的基因流中心。面对这能量流、物质流和基因流的三大中心,中国地学界拥有研究地球系统理想的自然条件^[11]。

3 选择学术突破口

2019年起,国家自然科学基金委员会和中国科学院联合开展“中国学科及前沿领域发展战略研究(2021~2035)”,最近出版的地球系统科学卷是其成果之一,提供了2035年前该前沿领域发展的十年展望^[1]。地球系统的范围极其广泛,圈层相互作用又无所不在,因此地球科学的任何主题几乎都可以贴上地球系统的标签。作为战略研究的任务,就是要在众多的题材中,找出少数几个特定的方向,作为中国地球系统研究可能的突破口。选择的标准有三:国际层面的重大意义,优越的自然条件,和已有的科学积累。

为此,“地球系统科学战略组”成立伊始就集中进行选题讨论,结果决定聚焦在三大方向:(1)重新认识海洋碳泵,(2)水循环及其轨道驱动,和(3)东亚-西太的海陆衔接。碳循环是地球系统研究的一个焦点,海水上接大气、下联岩石圈,正是碳循环的关键所在。海洋界的重大发现是海洋生物量90%以上属于微型生物,海水有机碳90%以上属于溶解有机碳,其中>90%还具有惰性,保持几千年不参加碳循环。这项新发现刷新了海洋碳循环的传统认识,突破了碳循环的原有认识^[12]。不仅如此,在现代海洋中惰性DOC可能具有储碳的价值,在地质时期里也为重新认识海洋碳循环开辟了途径,从

而揭示碳循环和生命演化的相互关系。

气候过程的能量主要来自太阳辐射,而载体主要在于水循环,其中的关键是水的三相转换。“米兰科维奇学说”发现地球轨道周期引起冰期旋回,成为地球历史定量研究的突破口,但是误以为北半球高纬区的冰盖过程决定着全球的气候变化,近年来这种主流观点遇到了挑战。尤其是中国石笋和深海新资料的发现,与这种主流观点发生了矛盾,推动中国学术界由此提出了气候变化受“低纬驱动”的新假说^[13],而且南北半球的差异也不容忽视^[14]。科技进步使得气候的定量研究可以上溯到前寒武纪,证明气候系统是在高、低纬和南、北半球的相互作用下,发生长期演变和周期循环,因此需要在新认识的基础上重建气候演变的学说。

“东亚-西太的海陆衔接”的目标是俯冲带造成的构造演变。从大洋看,板块学说产生的基地在大西洋,重心在于大陆板块的破裂和大洋板块的扩张,而西太平洋的特色则在于大洋板块的隐没和大陆岩石圈的增生;从大陆看,当今的诸大陆主要是联合大陆崩解的产物,唯独亚洲是拼贴而成,是未来超级大陆的雏形。如此看来,板块理论研究分为上下两集,现在大西洋主演的上集逐渐告一段落,东亚-西太主演的下集正在粉墨登场,中国地学界可千万不要错过这历史的良机。

4 研究方向专题研讨

“中国地球系统科学发展”战略研究组,由本文5位作者担任组长,从一开始就确定:战略研究的方式本身,就应当体现学科转型的新意,需要组织别开生面的学术研讨。为此,将三大方向分解成10个专题(表1),分头组织专题研讨。在一年多的时间里,展开了多种形式的研讨,仅中小型的专题研讨会就举行了14次,先后参加研讨的专家超过500人次。研讨会一反报告人逐个宣读论文的惯用套路,采用短报告、长讨论的活跃形式,因为会议的性质并不寻常:一是与会的成员来自不同学科,往往是初次相识,讨论的共同点与研究需要磨合;二是研讨的题目比较新颖,比如“真核生物产生前,海洋有机碳能不能沉降?”、“白垩纪的暖室期,地下水位是不是高得多?”,或者“还没有边缘海时的西太平洋,如何辨识俯冲带的位置?”.这里所指的“跨学科”不是并列,而是相互渗入,探讨从未涉及的问题。不少与会者反映,从来没有想过这些“怪”问题,因为研讨会开启了新的视角。

2021年的第六届地球系统科学大会直接将上述三大方向研讨的中期小结,作为闭幕式的主要内容进行汇报。这一系列的研讨会采用新颖的科学视角,使不同领域的研究者聚首一堂,讨论着穿越时空、横跨圈层的问题,光是研讨本身就产生了丰富的成果,以专辑或者综述的形式发表。比如第3和第6两个专题,先后在《科学通报》发表了“生物泵演化与重大地质事件”^[15]和“水循环的深时地质演变”^[16]两个专辑,第5专题则发表了“从40万年长偏心率周期看米兰科维奇理论”的综述^[17]。

表 1 地球系统研究的三大方向和10个专题^{a)}**Table 1** Three major directions and ten special topics in Earth system research

专题名	召集人
方向一、重新认识海洋碳泵, 负责人(焦念志)	
1. 溶解有机碳与冰期旋回	翦知潜
2. 有机碳与矿物-从海水到岩层	董海良
3. 生物泵的地质演变	谢树成
方向二、水循环及其轨道驱动, 负责人(郭正堂)	
4. 高低纬、南北极的相互作用	郭正堂
5. 40万年偏心率长周期的破坏	田军
6. 水循环的地质演变	朱茂炎
方向三、东亚-西太的海陆衔接, 负责人(金之钧)	
7. 太平洋俯冲带的演变	黄奇瑜、孟庆任
8. 岩浆作用的海陆对比	徐义刚
9. 东亚海陆古地理变迁	刘传联
10. 中新世盆地流体活动及资源环境效应	金之钧
a) 最终战略报告中专题有所调整, 专题9并入专题10	

两年来的战略研讨活动, 在一定范围内掀起了地球系统科学的热潮, 至今方兴未艾。同时也不难看出, 触动最大的是固体地球科学, 尤其是深时地质的有关学科, 可惜有的学科尚未能够深度卷入。这次战略研究只是个引子, 期望今后有更多学科, 特别是现代气候学和生物学更多同仁的积极参与。

5 执行举措的建议

科学发展的战略研究种类很多, 所起的作用也各不相同。“地球系统科学”的发展涉及学科转型的成败, 不允许误入歧途, 应当为研究选题提供参考, 通过管理系统和研究人员的努力, 贯彻实现。对于如何贯彻“地球系统科学”战略研究报告的内容, 我们提出以下建议。

(1) 瞄准重大科学问题, 推行大型研究计划。三大方向的实质, 是要从地球科学的根本问题上挑战传统观点: 气候系统是如何运转和演化的? 海洋和大陆是如何形成和破坏的? 所提出的三大方向, 都孕育着重大的突破, 而其实现则要求很长时间的持续努力。大科学要求大动作, 我们建议: 发挥中国“集中力量办大事”的优势, 打破现有的科研立项规格, 组织大规模的科学研究计划, 加速科学突破的到来。

(2) 促进大幅度的学科交叉, 实现新型的合作研究。跨圈层界限、穿时间尺度的研究, 既要求学科间的交叉, 也要求科学和技术的合作。不少重大的科学进展, 是依靠新技术的结果, 这里提出的三大方向就有这种需求。比如在水循环的研究中, 要求对水的三相转换, 尤其是气态和液态的转换做进一步的观测分析; 在东亚-西太的研究中, 急需对深部过程作更加深入的探索。这就要求打破现有的合作模式, 学习国际先进经验, 创立学术驱动而不是利益驱动的合作途径。

(3) 立足本国面向全球, 处理好以我为主和国际合作的关系。摆脱仿效照搬的习气, 促进中国学派的建立, 绝不意味着削弱国际科技合作的力度。关键是要增强源头创新能力, 在成熟的条件下形成以我为主、探索前沿问题的国际合作。同时, 积极争取将中国的新观点, 及时反映在现有的国际计划和国际刊物中。这里还要充分重视国际华人科学家的作用, 积极推进汉语平台的国际交流。

(4) 关心人才培养, 将地球系统科学的新观念渗透到教学中去。既然地球系统科学是学科的转型, 其精神应当贯彻在地球科学各个领域, 反映在地学教学的各门课程, 使传统的课程都能面向系统科学的新高度, 引进系统科学的新思想。为此, 需要推进各种形式的教师研讨班和培训班, 将“地球系统科学进课堂”提上教学研究的日程。

展望10年的“中国地球系统科学2035发展战略”已经出版, 但这远不是我们战略研究的终点。地球系统科学必将进一步扩大视野, 与天文科学、地球深部和生地结合的飞跃进展相结合, 实现地球科学的升级换代, 未来的岁月必将见证中国对世界地球科学与时俱增的贡献。

致谢 感谢中国科学院学部学科发展战略研究项目(XK2019DXC002)和国家自然科学基金(L1924025)资助。

推荐阅读文献

- 1 The Project Team of “Research on the Development Strategy of China’s Disciplines and Frontier Fields (2021–2035)”. Earth System Science in China: The Development Strategy for 2035 (in Chinese). Beijing: Science Press, 2024. 257 [“中国学科及前沿领域发展战略研究(2021~2035)”项目组. 中国地球系统科学2035发展战略. 北京: 科学出版社, 2024. 257]
- 2 Steffen W, Richardson K, Rockström J, et al. The emergence and evolution of Earth System Science. *Nat Rev Earth Environ*, 2020, 1: 54–63
- 3 Scientific Steering Group of the Major Project “Global Change and Regional Response”. Exploring the mechanism of global change—Research strategy of major projects of the National Natural Science Foundation of China (in Chinese). *Sci Sin-Terrae*, 2012, 42: 795–804 [《全球变化及其区域响应》科学指导与评估专家组. 深入探索全球变化机制——国家自然科学基金委重大研究计划的战略研究. 中国科学: 地球科学, 2012, 42: 795–804]

- 4 Morton O. Major shifts in climate and life may rest on feats of clay. *Science*, 2005, 309: 1320–1321
- 5 Langmuir C H, Broecker W. *How to Build a Habitable Planet: The Story of Earth from the Big Bang to Humankind*. New Jersey: Princeton University Press, 2012
- 6 Yin Z X. Dive into the sea, delve into the Earth, ascend to the sky (in Chinese). In: Li S G, ed. *Scientists Talk about the 21st Century*. Shanghai: Juvenile & Children's Publishing House, 1959 [尹赞勋. 下海, 入地, 上天. 见: 李四光, 著. 科学家谈21世纪. 上海: 少年儿童出版社, 1959]
- 7 Sun S. The past, present, and future of Geological Science in China (in Chinese). *Geol Rev*, 2002, 48: 576–584 [孙枢. 中国地质科学的过去、现在和未来. 地质论评, 2002, 48: 576–584]
- 8 Research Group of "Development Strategy of Chinese Geoscience" of the Geosciences Department, Chinese Academy of Sciences. *Some Issues in the Development Strategy of Chinese Geoscience: From a Big Country in Geoscience to a Powerful One* (in Chinese). Beijing: Science Press, 1998. 93 [中国科学院地学部"中国地球科学发展战略"研究组. 中国地球科学发展战略的若干问题——从地学大国走向地学强国. 北京: 科学出版社, 1998. 93]
- 9 Wang P X, Tian J, Huang E Q, et al. *Earth System and Evolution* (in Chinese). Beijing: Science Press, 2018. 565 [汪品先, 田军, 黄恩清, 等. 地球系统与演化. 北京: 科学出版社, 2018. 565]
- 10 Guo Z T. *Earth System and Evolution: A future frame of Earth Sciences* (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2019, 64: 883–884 [郭正堂. 《地球系统与演变》: 未来地球科学的脉络. 科学通报, 2019, 64: 883–884]
- 11 Wang P X. Cenozoic deformation and the history of sea-land interactions in Asia. In: Clift P, Wang P, Kuhnt W, et al., eds. *Continent-Ocean Interactions within the East Asian Marginal Seas*. Geophysical Monograph AGU, 2004, 149: 1–22
- 12 Jiao N, Herndl G J, Hansell D A, et al. Microbial production of recalcitrant dissolved organic matter: Long-term carbon storage in the global ocean. *Nat Rev Microbiol*, 2010, 8: 593–599
- 13 Wang P X. Low-latitude forcing: A new insight into paleo-climate changes. *Innovations*, 2021, 2: 100145
- 14 Guo Z T, Berger A, Yin Q Z, et al. Strong asymmetry of hemispheric climates during MIS-13 inferred from correlating China loess and Antarctica ice records. *Clim Past*, 2009, 5: 21–31
- 15 Xie S C, Jiao N Z, Wang P X. Promoting studies on the geological evolution of marine biological carbon pumps (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2022, 67: 1597–1599 [谢树成, 焦念志, 汪品先. 加强海洋生物碳泵地质演化的研究. 科学通报, 2022, 67: 1597–1599]
- 16 Zhu M Y, Guo Z T, Wang P X. The importance of studying the geological evolution of water cycle (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2023, 68: 1421–1424 [朱茂炎, 郭正堂, 汪品先. 水循环地质演变研究的重要性. 科学通报, 2023, 68: 1421–1442]
- 17 Tian J, Wu H C, Huang C J, et al. Revisiting the Milankovitch Theory from the perspective of the 405 ka long eccentricity cycle (in Chinese). *Earth Sci*, 2022, 40: 3543–3568 [田军, 吴怀春, 黄春菊, 等. 从40万年长偏心率周期看米兰科维奇理论. 地球科学, 2022, 40: 3543–3568]

Summary for “中国地球系统科学的十年展望”

Development of East system science of China: A decadal prospect

Pinxian Wang^{1*}, Zhengtang Guo², Nianzhi Jiao³, Zhijun Jin⁴ & Chengshan Wang⁵

¹ School of Ocean and Earth Science, Tongji University, Shanghai 200092, China;

² Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;

³ Carbon Neutral Innovation Research Center, Xiamen University, Xiamen 361002, China;

⁴ Research School of Energy Resources, Beijing University, Beijing 100871, China;

⁵ School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China

* Corresponding author, E-mail: pxwang@tongji.edu.cn

A “Strategic Research Group on Earth System Science” was jointly mandated by the National Natural Science Foundation of China (CNNSF) and the Chinese Academy of Sciences. Within three years of activities, the group organized 14 thematical workshops with participation over 500 experts from various research fields. Now its final report is published under the title of “Earth System Science in China: The Development Strategy for 2035”.

Worldwide, the system approach to Earth Science was initiated in the 1980s when the “Global Change” program augmented in a search for the missing carbon released into the atmosphere from fossil fuel burning. Since the 2000 s, the endeavor has extended temporally beyond the human dimension into deep time in geology, and spatially penetrated into the Earth’s interior. In essence, Earth system science represents a regime shift in Earth science, a fundamental transition from phenomenological description to mechanism exploration.

The transition in global Earth science happens to occur in parallel with China’s reform and opening-up, and China has played an active role in the “Global Change” international program from its beginning. Currently, China possesses the world’s largest scientific contingent and ranks first in the number of scientific publications, and is now confronted with a radical transition in its scientific development, from a “data export type” to “deep processing type” in its researches. The task of this strategic research is, therefore, to find a way to combine the regime shift in global Earth science with the transition of science in China and to identify the route of its implementation.

Given the broad scope of Earth science, strategic research is unable to cover all of its numerous fields. Instead, we focused on a few significant topics of great theoretical and practical significance where China has its advantages. Notably, Chinese scholars have contributed remarkably to the fields of climate change and tectonic evolution in recent years and enjoy an international reputation in these fields. They have come out with several new concepts or hypotheses to challenge traditional wisdom.

In consequence, our strategic research is targeted at three key points with potential for scientific breakthrough, these are: (1) revisiting the marine biological pump; (2) hydrological cycle and orbital forcing; and (3) ocean-continent connection between the Pacific and Asia.

Earth system science, strategy research, regime shift, key research fields, scientific breakthrough

doi: [10.1360/TB-2024-0907](https://doi.org/10.1360/TB-2024-0907)