

文章编号: 1001-8166(2009)12-1331-08

地球深部与表层的相互作用*

汪品先

(同济大学海洋地质国家重点实验室, 上海 200092)

摘要: 板块理论和全球变化是 20 世纪地球科学中的 2 大突破性进展。进入 21 世纪, 地球系统科学进入将这两方面结合起来, 探索地球深部和表层系统的相互作用, 即“固体地球动力学与行星循环 (planetary cycle)”的新阶段。根据最近国际综合大洋钻探计划关于 2013 年后学术新方向的讨论, 从俯冲带加工厂、大洋中脊与巨型火成岩省 3 个方面进行介绍, 提出我国打破传统的学科界限、迎接新方向的建议。

关键词: 地球系统; 深部过程; 表层系统; 行星循环; 大洋钻探

中图分类号: P31; P54 **文献标志码:** A

1 引言

20 个国家的学者会聚布莱梅, 讨论 2013 年后大洋钻探新阶段学术方向的 INVEST 会上, 一个突出的新亮点是地球深部与表层的相互作用, 有人把它叫做“固体地球动力学与行星循环 (planetary cycle)”。地球系统进展到“行星循环”, 将是一次学术上的飞跃。地质界研究地球系统, 按照传统习惯“软”、“硬”岩石兵分 2 路: “软”的一路针对全球变化研究地球表层系统; “硬”的一路针对构造和岩浆作用研究地球深部过程。1980 年代出于“温室效应”之忧, 开始追踪全球碳循环, 发现必须和大洋和土壤植被联系起来才能知道 CO₂ 的去处, 结果导出了全球变化的研究。但是近年来又发现, 只看表层仍然无法理解地球系统的变化, 需要进一步深入研究板块运动与火山和热液活动, 于是又将地球系统的探索推进到地球深部。

从另一方面看, 板块学说的建立确实是地球科学的革命, 但这是在构造运动含义上的革命。现在意识到: 板块构造其实是更大的过程, 也就是地幔环

流在地球表层的表现^[1], 只是“固体地球循环”的表面部分。从“行星循环”的高度看, 一方面深处的地幔会受到俯冲板块物质成分, 也就是从表层带来深部的影响; 另一方面地幔物质逸出地球表面, 又会改变海水和大气的成分, 将地球内部的能量释放到表层。这就是表层与深部的相互作用, 探索地壳、地幔和水圈、大气圈、生物圈的相互交换。其重点无非是两头: 一头是向下的俯冲带; 另一头是向上的洋中脊和由地幔柱产生的巨型火成岩省。这 3 者都是大洋钻探 30 多年来的研究对象, 一旦提到深部和表层相互作用的高度, 又为 2013 年后的钻探计划指出了一系列新的研究方向。

2 俯冲带加工厂

大洋壳的俯冲, 是当前海洋地质在地球系统研究中的突破口, 因为它不仅是研究深部过程和地震灾害机理的切入点, 也是揭示大陆壳来源和大洋水演变的关键环节。约 10 年前提出了“俯冲带加工厂”的概念, 把俯冲带比喻为一个几乎是“零排放”的工厂, 原料是大洋壳和大洋沉积, 产品是岩浆和大

* 收稿日期: 2009-11-04 修回日期: 2009-11-27

* 基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目“大洋碳循环与气候演变的热带驱动”(编号: 2007CB815900); 国家高新技术研究发展计划重点项目“大洋钻探站调查关键技术研究”(编号: 2008AA093001)资助。

作者简介: 汪品先 (1936-), 男, 江苏苏州人, 教授, 中国科学院院士, 主要从事古海洋学及古环境研究。

E-mail pxiwang@tongji.edu.cn

陆壳,而生产过程的“废品”就是经过脱水和熔融过程后俯冲到地幔深处的板片(图 1)^[2]。俯冲带是地

球深部与表层之间能量与物质交流的要道,其中最突出的是水的交换。

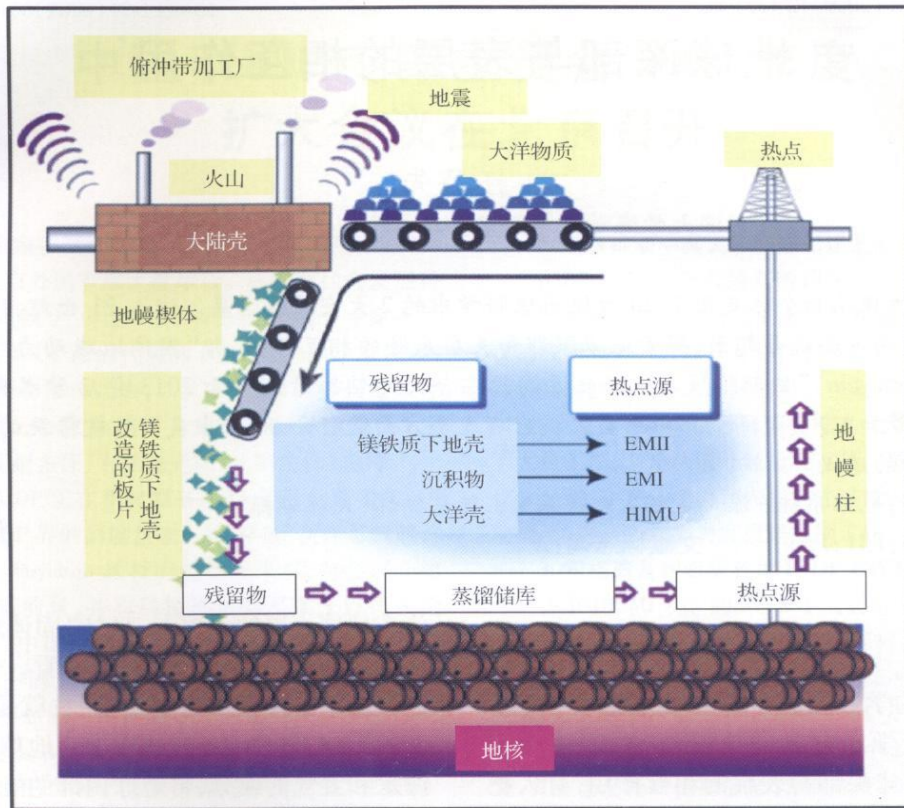


图 1 “俯冲带加工厂”在固体地球演化中的作用^[2]

Fig 1 Role of the subduction factory in the evolution of the solid Earth^[2]

俯冲带大规模的研究,始自 1998 年开始执行的美国大陆边缘计划,即 MARGNS。在其 4 大主题中有 2 个研究俯冲带:俯冲带加工厂计划(SubFac)和发震带试验(SEIZE),前者的重点在能量与物质的交换,后者的重点在于地震的机制和机理。MARGNS 在东、西太平洋各选一个研究区:东边是尼加拉瓜和哥斯达黎加西岸外的中美洲海沟;西边是菲律宾海东缘的伊豆一小笠原海沟^[3]。到 2008 年进行 10 年总结时,SubFac 和 SEIZE 计划都取得了辉煌成绩,加上日本“地球号”大洋钻探设施的投入,成为当今的研究热点。和我们最为贴近的是 SubFac 计划在菲律宾海东缘的研究:沿着西太平洋长达 2 800 km 的俯冲带,包括北边的伊豆一小笠原海沟和南边的马里亚纳海沟,大洋钻探研究了正要俯冲的海洋沉积和该区火山物质的成分,通过两者比较,就可以看出这里“俯冲工厂”的加工情形^[4]。如随着从南到北向西风带靠近,来自亚洲的风尘显著

增多,大洋沉积物中的 Th/La 比值也因而升高;而相应岛弧的火山物质中, Th/La 比值也由南向北增加,为板块物质俯冲后又回返表层提供了证据^[5]。

挥发性物质的交换,是俯冲带加工厂的研究重点,其中首先指水与碳。同样的玄武岩,水和碳的含量从俯冲带岛弧到洋中脊急剧下降。岛弧玄武岩熔岩中水含量高达 5% 以上,而大部分洋中脊玄武岩的地幔源含水只有 0.0001% ~ 0.0002%,相差 4 个量级。同样的俯冲带,中美洲海沟俯冲的深海沉积富含碳酸盐,西太平洋海沟俯冲的深海沉积缺乏碳酸盐,结果影响俯冲工厂的“产品”。看来“俯冲工厂”里有着几乎是完全的水循环,而碳循环就与之不同:俯冲下去的碳只有 25% 通过岛弧岩浆活动返回地面,原因在于板片流体中 CO₂ 溶解度低,而碳酸盐熔融所要求的温度又太高。所有这些,对于碳循环和长期气候变化都会产生深远的影响^[3]。

含水量不仅影响着地幔和俯冲板片的流变,而

且是长时间尺度上全球水循环的重要环节(图 2)。据估算,今天地球上水圈的总水量是约 1.4×10^{12} 亿 t,由海沟俯冲的水通量约为每百万年 24×10^8 亿 t,而在俯冲下去通过生成岛弧岩浆的深度之后,还能进入地幔深处的通量估计每百万年只有 9×10^8 亿 t。换句话说,地球表层系统里水圈的水,每隔 16 亿年才能在地幔深处循环一遍;但如果相信地幔里的水比大洋的水还多 4~9 倍,那就要 70~140 亿年才能循环一周^[6],已经超过了地球的年龄。地幔与表层间的水循环虽然缓慢但是量大,必然影响地球表层的长期环境演变。今天的地球是俯冲带下去的水多、火山回出来的水少,而且是显生宙以来的总趋势。从寒武纪至今世界海平面下降了几百米,当时海水的 $\delta^{18}O$ (-8‰)也比今天(0‰)轻得多,推断显生宙以来海水减少了 6%~10%^[7]。按照这种速率,全球的大洋将在 20 亿年之后干枯(Plink, 2009 报告)。不过上面所谈都是现代俯冲带的情况,板块运动在地质历史上有过哪些变化,俯冲工厂在地球系统中的作用究竟与今天有哪些异同,都是有待今后研究的新问题^[8]。

近年来,大洋岩石圈研究的另一个热门话题是蛇纹石化。蛇纹石在大洋底下广泛分布,在大西洋沿着转换断层发育,厚达 2~3 km,由热液循环的海水通过断层改造超基性岩而形成;在太平洋俯冲带,俯冲的地幔因海水渗入发生的蛇纹石化可以深达约

50 km^[9]。蛇纹石的含水量高达 13.8%,超基性岩的蛇纹石化就是个吸水过程,而在俯冲过程中蛇纹石又失去水分,构成了地球表层向深部输送水分的一种关键性途径。实验证明,蛇纹石失水可以引起岩石的破碎,是俯冲带地震的重要机制^[10]。不仅如此,洋底岩石的蛇纹石化,还是个放出甲烷的过程^[11]。因此,洋底的蛇纹石化和俯冲带深部的去蛇纹石化,都是地球系统中表层与深部相互作用的重要环节,不过目前的认识还处在起步阶段。

3 大洋中脊

自从 30 年前东太平洋中隆发现深海热液以来,沿着全大洋大约 6 万 km 长的中脊链,加上弧后盆地等处,已经发现的海底热液系统已经有 200 多处。据估算,全大洋的海水每隔 500~1 100 万年要到海底热液系统里循环一周,比在地幔里的循环周期快得多;如果把洋中脊两翼的扩散对流也算上,循环周期还会缩减到 100 万年。热液活动在地球系统中具有特殊的重要性:地球内部产生的热通量,25%~30% 由大洋热液系统向外输送^[12];在地球表层热液活动向海水输出深部物质与能量,影响着表层环境的变化,近年来从深海生物圈到海洋碳酸盐沉积,都已经得到广泛注意。如随着洋底扩张和热液活动的强弱盛衰,大洋海水中镁、钙离子的相对丰度相应变化,导致“文石大洋”和“方解石大洋”的交替,直

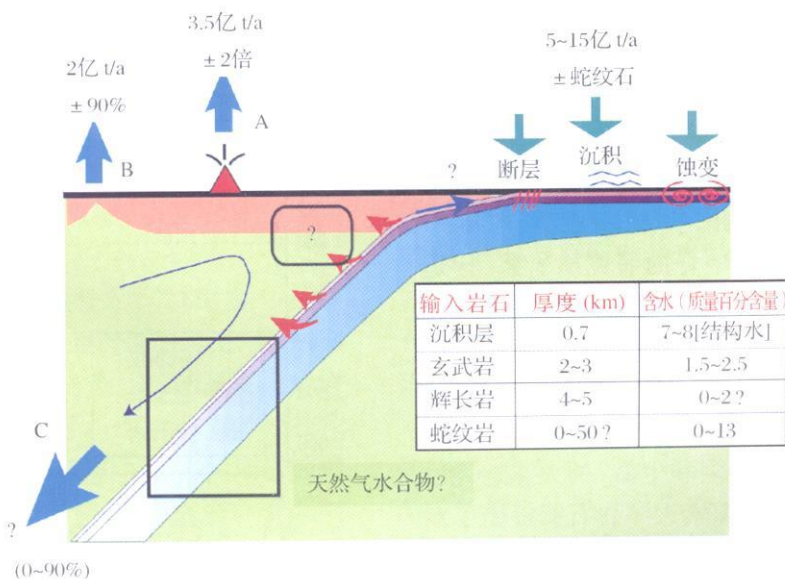


图 2 大洋俯冲板块的水平衡(据 Plank 2009 报告改)

Fig 2 H₂O budget of subducting oceanic plates (based on Plank 2009)

A 岛弧输出; B 洋中脊输出; C 地幔深部输出

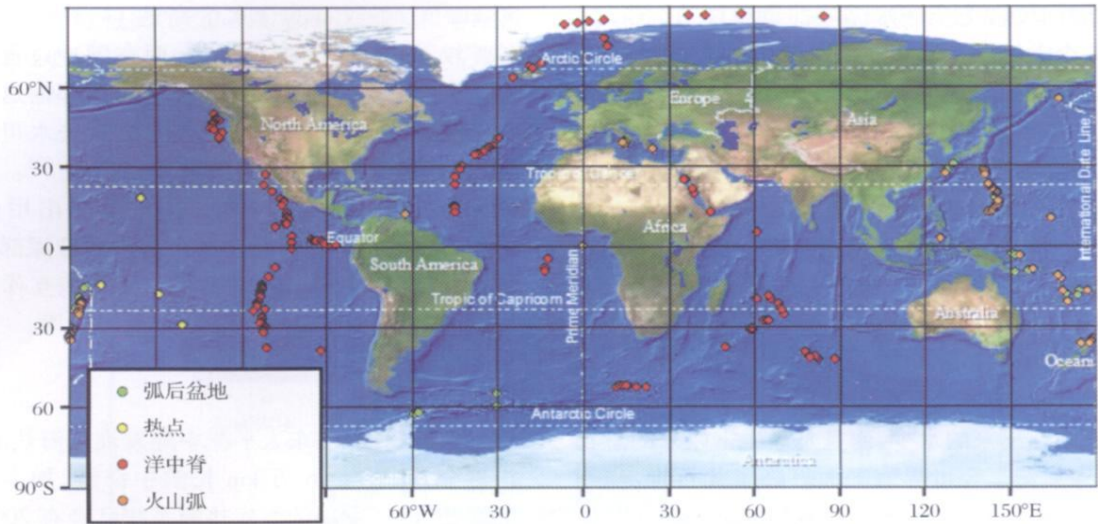


图 3 全大洋已知热液口的分布及其类型 (据美国 NOAA Vents 计划网站

<http://www.pmel.noaa.gov/vents/PlumEstudies/global-hydrothermal-vent-locations.htm>)

Fig 3 Global compilation of hydrothermal vent locations

接影响到显生宙海洋生物钙质骨骼的发育和生物演化的进程^[13]。热液从深部还带出 CO_2 、 H_2 、 CH_4 等挥发性成分, 同样对地球表层产生深刻影响。在热液系统被厚层沉积物覆盖的洋中脊, 深部带出的成分主要留在地层里成矿, 为此大洋钻探的 139、169 航次, 对东北太平洋沉积覆盖型洋中脊的块状硫化物矿床, 作过专门的探索^[14]。

大规模跨学科研究洋中脊与热液系统, 最早立项的也是美国。早在 1984 年, 美国国家海洋与大气局 (NOAA) 就设立 Vents 计划研究海底热液和火山活动对海洋的影响; 1994 年, 美国基金会设立“洋中脊跨学科全球试验 (Ridge Interdisciplinary Global Experiments RIDGE)”; 与此对应, 还成立了 Inter-Ridge 国际合作计划。洋中脊的研究从岩浆、构造到海水化学和生物, 具有很广的覆盖面, 而对大洋钻探来说就是钻探大洋壳, 因为洋中脊就是大洋壳形成的地方。为迎接 2013 年后的 DDP 新阶段, Inter-Ridge 于 2009 年 7 月 27~29 日在英国南安普敦, 举行了题为“熔融, 岩浆, 流体, 和生命”的大洋地壳讨论会, 对于今后大洋钻探探索大洋岩石圈提出了自己的建议^[15]。

打“莫霍钻”穿透大洋壳, 是当年发起深海钻探的初衷, 但时至今日离当初的目标还十分遥远。三四十年来, 为钻探大洋壳上了大量航次, 其中钻入洋壳 500 m 以上的深井便有 8 口, 最深的是东太平洋的 504 站, 先后用了 5 个航次钻到海底以下 2 111

m, 但还是在玄武岩里^[16]; 而该站西北的 1 256 井, 首次在原位打到了下地壳的辉绿岩, 揭示了整个的大洋壳剖面^[17] (图 4)。

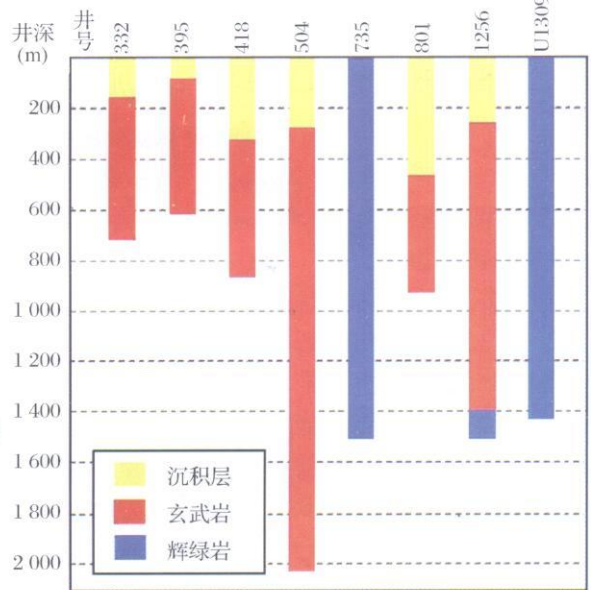


图 4 大洋钻探钻入洋壳 500 m 以上的深井^[16]

Fig 4 Ocean drilling sites where significant (> 500 m) basement penetration was achieved^[16]

大洋钻探的重要发现, 是洋壳的多样性, 发现原来蛇绿岩套所根据的分层模型只是大洋壳的一种。

各大洋的中脊都有板块扩张形成新洋壳, 但扩张和地幔物质上涌的速度各不相同。快速扩张的洋中脊岩浆供应充分, 形成的洋壳在沉积层之下是玄武岩熔岩、岩墙和辉绿岩, 即所谓 Penrose 型洋壳; 扩张速率每年不足 4 cm 的慢速和超慢速扩张中脊, 由于岩浆供应不足, 使得地幔的橄榄岩出露, 形成所谓 Hess 型洋壳。前者是洋壳形成的主流, 2 亿年来所产生的 Penrose 型洋壳覆盖了地球表面 60%; 而后者属于非“正常”类型, 其结构比前者复杂得多。不同的扩张脊和不同洋壳的形成过程, 对于海洋系统产生不同影响的^[18 19]。

大洋壳在洋中脊形成到俯冲带消失, 是一个成熟与老化的过程, 和海水相互作用的性质也随之发生变化。在地质历史上, 洋壳产生和洋底扩张的过程曾经发生重大变化。如 80~45 Ma 地球内部与表层的交换作用大幅度减弱、洋底热液活动受到“封阻”, 由此造成对于海水化学和生物的影响, 正是今后大洋钻探研究的前沿课题^[19]。

4 巨型火成岩省

洋中脊的热液作用, 是地幔物质在地球表层的输出窗口; 但地幔物质还可以在更大规模上涌上地球表层, 形成所谓的巨型火成岩省 (Large Igneous Province LIP)。1990 年代早期开始研究以来, LIP 受到越来越多的重视。LIP 的分布具有全球性, 包括陆地的高原玄武岩省 (flood basalt provinces) 和大洋的海底高原 (oceanic plateaus)^[20 21]。海底高原 LIP 区的地壳最厚可达 40 km, 比一般大洋壳厚得多。多年来 LIP 是大洋钻探的重点之一, 已经有 10 个航次加以探索, 其中北大西洋 3 次 (104, 152, 163 航次), 西太平洋 2 次 (130, 192 航次), 印度洋 5 次 (115, 119, 120, 121, 183 航次)^[21]。

与大洋中脊张裂的连续性不同, LIP 是一种间隙性活动。虽然 LIP 的成因至今尚在争论, 总的来说还是以地幔柱假说为主: 由于地核的温度比地幔高得多, 两者的界面并不稳定, 一定条件下地幔柱大规模上升, 到达地面形成 LIP (图 5)^[22]。地幔柱的上升可以是在板块张裂的时候, 如北大西洋张开时形成的 LIP 现在已经分居在洋中脊的两边^[22]; 也可以跨越海陆, 如印度的德干高原通过 200~300 km 宽的海山脊, 连接到 Mascarene 海底高原^[23]。不过最近认为原来的 LIP 定义太宽, 一些海山、海山脊不应当作 LIP^[24]。从地球系统出发, LIP 的研究不应限于现代海底。近来对于太古代以来, 甚至其他

行星上的巨型火成岩省, 也都开始注意太古代和元古代的 LIP 均被列为研究的前缘^[25]; 还提出了 LIP 出现的周期性问题。根据太古代以来 154 个实例进行时间序列分析, 发现近 16 亿年来有 1.7 亿年的周期^[26], 从而将地球深部与表层的相互作用拓展到整个地质历史。

地球系统科学研究 LIP, 重点在于地球表层的环境效应。最早注意到的是“热点”区的地幔柱, 从地幔释出的 SO₂ 之类的挥发性物质, 可以产生严重的环境后果 (图 6)^[27]。在历史上, 10 世纪和 18 世纪的冰岛都有这类记录: 1783—1784 年 Laki 的喷发将 1 亿多 t 的 SO₂ 送入大气, 硫酸云雾在北半球延续了 5 个月, 次年欧美经历了有记录以来最冷的严冬, 年平均温度下降 1.3°C 的低温在该区延续 2~3 年之久^[28]。在地质上, 证据来自德干高原的喷发事件: 67~65 Ma 前橄榄石晶体中的包裹体, 测得质量百分含量约为 1.400 × 10⁻⁶ 的 S 和 900 × 10⁻⁶ 的 Cl 说明当时的喷发具有严重的毒害效应^[29]。推测这种喷发可以导致生物大灭绝: 3 亿多年来每个 LIP 形成期几乎都伴有 大灭绝事件, 很可能是与毒性喷发相关^[21]。

除了直接释出 CO₂、S、Cl 和 F 外, LIP 事件还会间接地引起海底和永久冻土带的水合物放出甲烷气体。目前推断, 始新世初的全球升温事件 (即 PETM) 可能由此引起^[30]; 白垩纪的海底缺氧事件 (即 OAE), 也可能是当时加勒比和马达加斯加两大 LIP 的岩浆喷发, 导致缺氧事件和黑色页岩的广泛沉积^[31]。总之, 地幔柱上涌和巨型火成岩省的形成, 是一种具有全球影响的深部与表层的交流活动。

当然, 行星循环并不止于地幔, 地核与地幔之间也有交换, 地核对流的变化还直接影响地球表层的磁场, 但是需要特殊注意的是地核里的碳。地核里决不只是铁, 与同样温度压力条件下的铁相比, 地核的密度小了 10%, 说明其中有较轻元素的存在。同时, 太阳系里碳元素十分丰富, 是 Si 的 10 倍、硫的 20 倍, 太阳系最早期产物碳质球粒陨石里就含碳 3.2%, 早就有人推测地核中含有 2%~4% 的碳^[32], 最近又得到高压实验的支持^[33]。虽然这种观点都只是间接的推算, 但是地球系统深部与表层相互作用是一扇新近才打开的研究大门, 正在等待着有创新意识的人们登堂入室。

5 结 语

以上从大洋钻探的视角, 介绍了地球表层与深

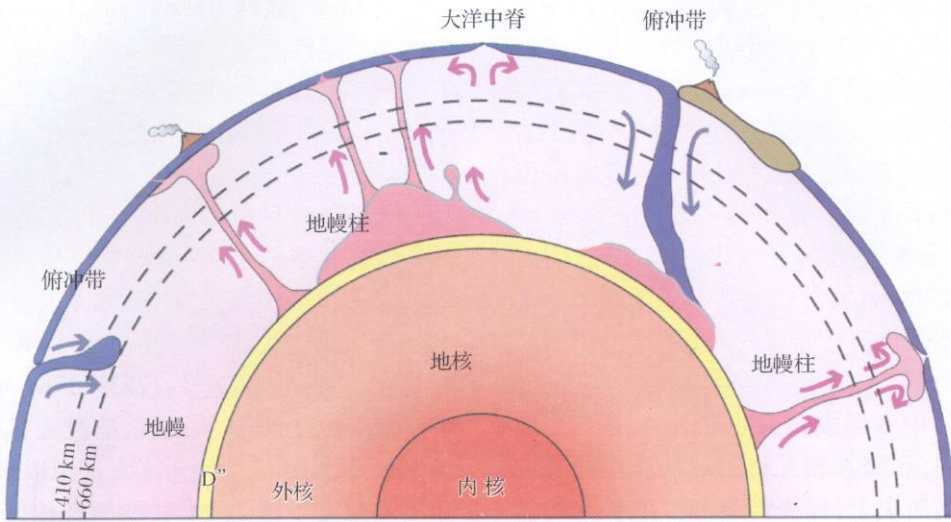


图 5 地幔柱、热点和俯冲带的示意图。D''为地核与地幔的界面^[21]

Fig. 5 Schematic cross section of Earth depicting sources of LIPs and hot spots and fate of subducting lithosphere. D''-core-mantle boundary^[21]

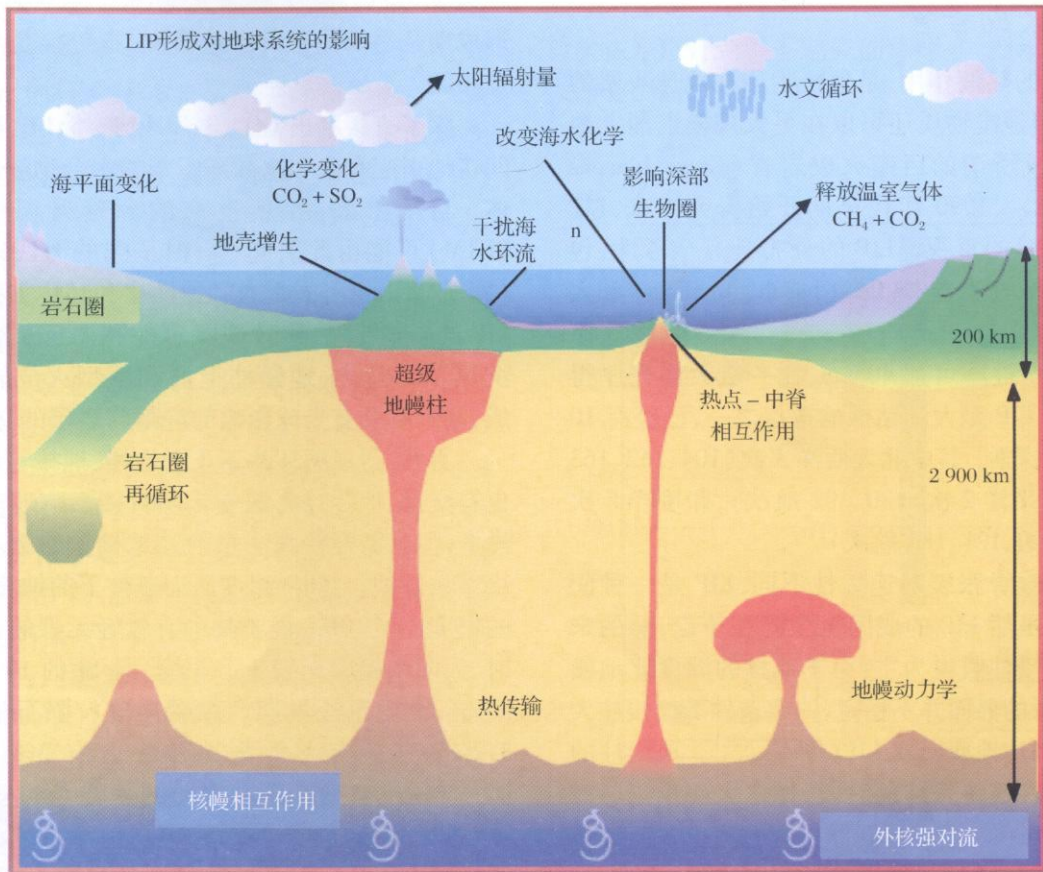


图 6 LIP 形成对地球表层系统的影响^[27]

Fig. 6 The process of LIP emplacement and associated environmental effects^[27]

部相互作用的研究方向, 其实这是涉及整个地球科学的重大议题。这里讨论的是将大气圈到地核“一网打尽”的地球系统科学, 探讨整个行星所有圈层的物流与能流, 特色在于“行星循环”的大视野。如果说 21 世纪地球科学的突破口在于地球系统, 那指的就应该是这种行星范围的大科学; 如果说 21 世纪中国地球科学界应当作出世界等级的贡献, 那就应该在这最新层面上去迎接挑战。中国有着世界上最大的地球科学队伍, 近年来又得到了前所未有的支撑条件, 义不容辞地应当去迎战学科新前沿。

这里最大的“关口”在于打破传统的学科界限, 实现固体与流体地球科学之间、“古”与“今”之间、和“软”与“硬”之间的结合。一旦“跨学科”从口号变成行动, 从形式变为实质, 中国的地球科学就会登上一个新的台阶。INVEST 是放眼 2013 以后 10 年的会议, 展望的是相当我国“十三·五”到“十四·五”之间, 也就是我国中长期规划的时段。参照国际的战略讨论, 我国的地球科学是不是也应当从“行星循环”的大视野出发, 来讨论我们的“中长期”目标呢?

参考文献 (References):

[1] Langmuir C H, Forsyth D W. Mantle melting beneath mid-ocean ridges [J]. *Oceanography*, 2007, 20 (1): 78-89

[2] Tatsumi Y. The subduction factory: How it operates in the evolving Earth [J]. *GSA Today*, 2005, 15 (7): 4-10

[3] NSF MARGINS Science Plans [R]. New York: Lanont, 2004

[4] Stern R J, Fouch M J, Klumper S L. An overview of the Izu-Bonin-Mariana subduction factory [C] // Eiler J, ed. *Inside the Subduction Factory*. Geophysical Monograph Series 2003, 138: 175-222

[5] Plank T, Kelly K A, Murray R W, et al. Chemical composition of sediments subducting at the Izu-Bonin trench [J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* 2007, 8, Q04116 doi 10.1029/2006GC001444

[6] Hacker B R. H₂O subduction beyond arcs [J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* 2008, 9 (3), Q03001, doi 10.1029/2007GC001707.

[7] Walther K. The geologic water cycle and the evolution of marine $\delta^{18}\text{O}$ values [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2001, 65: 2469-2485.

[8] Ludden J. Subduction fluxes through geologic time [J]. *Applied Geochemistry*, 2009, 24 (6): 1052-1057.

[9] Kerrick D. Serpentine seduction [J]. *Science* 2002, 298: 1344-1345.

[10] Dobson D P, Meredith P G, Boon S A. Simulation of subduction zone seismicity by dehydration of serpentine [J]. *Science*, 2002, 298, 1407-1410.

[11] Charlou J L, Fouquet Y, Bougault H, et al. Intense CH₄ plumes generated by serpentinization of ultramafic rocks at the intersection of the 15° 20' N fracture zone and the Mid-Atlantic Ridge [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1998, 62: 2323-2333.

[12] Herzig P M, Hannington M D. Input from the deep: Hot vents and cold seeps [C] // Schulz H D, Zabel M, eds. *Marine Geochemistry* (2nd ed). Berlin: Springer, 2006: 457-479.

[13] Dickson J A D. Echinoderm skeletal preservation: Calcite-aragonite seas and the Mg/Ca ratio of Phanerozoic oceans [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2004, 74: 355-365.

[14] Zierenberg R A, Miller D J. Overview of Ocean Drilling Program Leg 169: Sedimented Ridges III [C] // Zierenberg R A, Fouquet Y, Miller D J, eds. *Proceeding of ODP, Science Results 2000*, 169: 1-39.

[15] InterRidge Melting, Magma Fluids and Life: Challenges for the Next Generation of Scientific Ocean Drilling into the Oceanic Lithosphere [R]. Workshop Report NOC, Southampton, 27-29 July, 2009.

[16] Larsen H C, Cannat M, Ceuleneer G, et al. Oceanic Crustal Structure and Formation: IODP and ODP Achievements November 2002-December 2005 [R]. IODP-M J Sapporo, 2009: 1-65.

[17] Wilson D S, Teagle D A H, Alt J A, et al. Drilling to gabbro in intact ocean crust [J]. *Science*, 2006, 312: 1016-1020.

[18] Snow J E, Edmonds H N. Ultra-slow-spreading ridges: Paradigm changes [J]. *Oceanography*, 2007, 20 (1): 90-101.

[19] Teagle D, Abe N, Bach W, et al. The Ocean Lithosphere: A Fundamental Component of the Earth System [R]. InterRidge Workshop Report NOC, Southampton, 27-29 July, 2009.

[20] Wignall P B. Large igneous provinces and mass extinctions [J]. *Earth-Science Reviews*, 2001, 53: 1-33.

[21] Coffin M F, Duncan R A, Ekholm O, et al. Large igneous provinces and scientific ocean drilling: Status quo and a look ahead [J]. *Oceanography*, 2006, 19: 150-160.

[22] Campbell I H. Testing the plume theory [J]. *Chemical Geology*, 2007, 241: 153-176.

[23] Campbell I H. Large igneous provinces and the mantle plume hypothesis [J]. *Elements*, 2005, 1: 265-269.

[24] Bryan S E, Emst R E. Revised definition of Large Igneous Provinces (LIPs) [J]. *Earth-Science Reviews*, 2008, 86: 175-202.

[25] Emst R E, Buchan K L, Campbell I H. Frontiers in Large Igneous Province research [J]. *Lithos*, 2005, 79: 271-297.

[26] Prokoph A, Emst R E, Buchan K L. Time-series analysis of large igneous provinces: 3500 Ma to present [J]. *Journal of Geology*, 2004, 112: 1-22.

[27] Neal C R, Coffin M F, Amdt N T, et al. Investigating large igneous province formation and associated paleoenvironmental events: A white paper for scientific drilling [J]. *Scientific Drilling*, 2008, 6: 4-18.

[28] Thordarson T, Self S. Atmospheric and environmental effects of the 1783-1784 Laki eruption: A review and reassessment [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2003, 108 (D1), 4011, doi

- 10 1029/2001JD002042.
- [29] Self S, Blake S, Shama K, *et al*. Sulfur and chlorine in Late Cretaceous Deccan magmas and eruptive gas release[J]. *Science*, 2008, 319: 1 654-1 657.
- [30] Svensen H, Planke S, Malthes-rensens A, *et al*. Release of methane from a volcanic basin as a mechanism for initial Eocene global warming[J]. *Nature*, 2004, 429: 542-545.
- [31] Kuroda J, Ogawa N O, Tanizumi M, *et al*. Massive volcanism as a causal mechanism for a cretaceous oceanic anoxic event[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2007, 256: 211-223.
- [32] Wood B J. Carbon in the core[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1993, 117: 593-607.
- [33] Nakajima Y, Takahashi E, Suzuki T, *et al*. "Carbon in the core" revisited[J]. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 2009, 174: 202-211.

Interactions between Earth's Deep and Surface

WANG Pinxian

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

Abstract The Plate Tectonics and Global Changes were two major breakthroughs in Earth science over the 20th century. A new focus of Earth science in the 21st century will be the interactions between the Earth's deep and surface systems, i.e. "solid Earth dynamics and planetary cycle". The present paper briefly discusses the new research frontiers on the basis of the IODP meeting on its scientific targets beyond 2013, including three parts: Subduction factory, mid-ocean ridge, and large igneous province. The paper ends with a suggestion that China has to develop cross-disciplinary studies to meet the new targets in Earth science.

Key words Earth system; Deep processes; Surface system; Planetary cycle; Ocean drilling

《地球科学进展》“IODP 研究”专栏征稿启事

2004年4月,我国以“参与成员”的身份加入 IODP,这对于我国地球科学研究早日整体上进入国际前沿、造就一批勇于承担推动地球科学发展重任的中国科学家来说,是一次难得的机遇。

为了推动我国在 IODP 研究中发挥更大的作用,展示国内学术界参与 ODP 及 IODP 相关研究所取得的科学成果,中国 IODP 办公室与《地球科学进展》达成协议,合作开辟“IODP 研究”专栏,目前已刊出多篇相关论文。

该专栏由中国 IODP 办公室负责组稿,并组织专家审稿,论文通过审稿后将以最快速度在《地球科学进展》上刊载。同时,中国 IODP 办公室为专栏论文支付出版补贴(版面费)。

欢迎国内从事相关研究的广大科研人员踊跃投稿,来稿应具有科学性、创新性,与 ODP/IODP 相关的研究性论文和综述论文均可,请参照《地球科学进展》杂志格式要求撰写。

有关投稿事宜请联系中国 IODP 办公室(<http://www.iodp-china.org>),本启事长期有效。

地址:上海市四平路 1239 号同济大学海洋地质国家重点实验室 邮政编码:200092

联系人:拓守廷 电话:021-65982198 E-mail: iodp-china@tongji.edu.cn

中国 IODP 办公室