有战略眼光的地球化学家

——解读 1986 年 Crafoord 奖获得者 Claude Jean Allègre

赵子福^{①*}, 吴福元^②, 郑永飞^①

① 中国科学技术大学地球和空间科学学院, 合肥 230026;

② 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029

* E-mail: zfzhao@ustc.edu.cn

收稿日期: 2015-09-10; 接受日期: 2016-01-05; 网络版发表日期: 2016-03-24

摘要 Allègre 教授是国际著名的地球化学家, 他在太阳系和行星早期演化、陨石形成、地球层圈结构与演化及其相互作用的化学地球动力学等诸多领域取得了杰出的成就, 并因此于 1986 年获得瑞典皇家科学院颁发的 Crafoord 奖. 他所提出的化学地球动力学是当前地球化学领域最活跃、最具生命力的学科领域. 目前, 化学地球动力学研究已经从大洋俯冲带拓展到大陆俯冲带. Allègre 教授不仅是一位杰出的科学家, 也是一位热衷于科学普及的大师, 还是一位有争议的政治和公众人物. 他曾担任法国教育部部长, 但由于要推行激进的改革而被迫下台. 他曾参与中法喜马拉雅-青藏高原合作研究, 是中国地学界熟悉的老朋友. 本文简要介绍了 Allègre 教授的生平、学习和工作经历、取得的主要学术成就, 希望能对中国地球科学家们有所启示.

关键词 Allègre 教授, Crafoord 奖, 地球化学家, 化学地球动力学

1 引言

Crafoord 奖是 Crafoord 夫妇捐资瑞典皇家科学院于 1980 年设立的, 旨在奖励那些诺贝尔奖所没有涵盖科学领域的杰出科学家, 包括天文学、数学、地球科学和生物科学四个领域, 后来又增加了多发性关节炎(风湿性关节炎)领域. 该奖于 1982 年开始颁发, 并对上述学科逐年轮流授奖. Crafoord 奖是一项世界自然科学界的最高大奖之一, 可以与众所周知的诺贝尔奖相媲美.

瑞典皇家科学院将 1986 年 Crafoord 奖授予法国地球化学家 Claude Jean Allègre 教授和美国地球化学家 Wasserburg 教授, 以表彰他们在同位素地质学领域所做出的一系列开拓性工作. Crafoord 奖官方网站对两位科学家的杰出贡献给予了高度评价: Allègre 和 Wasserburg 富有想象力的研究使人们更好地理解太阳系、地球、月球、陨石的形成和演化、地球大气成因以及地壳与地幔之间的关系, 同时促进了新的研究仪器、技术和方法的发展. 同位素地质学是地球和行星科学领域的一个分支学科, 它应用

中文引用格式: 赵子福, 吴福元, 郑永飞. 2016. 有战略眼光的地球化学家——解读 1986 年 Crafoord 奖获得者 Claude Jean Allègre. 中国科学: 地球科学, 46: 519–528, doi: 10.1360/N072015-00348
英文引用格式: Zhao Z F, Wu F Y, Zheng Y F. 2016. A geochemist of strategic foresight: Highlighting of 1986 Crafoord prizier Claude Jean Allègre (in Chinese). Scientia Sinica Terrae, 46: 519–528, doi: 10.1360/N072015-00348

放射性同位素的衰变规律和稳定同位素的丰度变化来研究地球和行星的形成和演化历史, 以及在不同地质作用下物质的迁移过程. 同位素地质学的重要用途是确定地质作用的年龄, 示踪地球和行星系统的形成与演化过程, 为地球科学从定性到定量发展作出了重要贡献, 在解决地球科学重大基础问题研究上发挥了重要作用.

本文简要介绍Allègre教授的生平、学习和工作经历以及他在地球化学和宇宙化学领域取得的主要学术成就, 解读他在科学研究中的求实精神和创新精神. 希望能对中国地球科学家们有所启示, 从他身上找到值得我们学习和借鉴的地方.

2 生平、学习和工作经历简介

Allègre教授(图1)1937年3月31日出生于法国巴黎, 是世界著名的地球化学家和宇宙化学家, 也是法国知名的政治家. 他在很小的时候就对石头有兴趣, Tilton(1987)在Allègre获得1986年戈尔德施密特奖(the V. M. Goldschmidt Award)的介绍中这样写到: “21个月大的Claude在一次父母给他准备的众多圣诞礼物中挑选了一个园艺耙, 父母很惊讶地问他为什么? 他回答说用它来捡石头”. 但真正促使他选择地球化学作为研究领域, 是因为他受到了一位法国科学记者写的一本书*Science in Quest of the Past*的影响, 这本书介绍了Libby发现 ^{14}C 的工作、Nier的Pb同位素工作、Urey和Epstein关于O同位素地质温度计的工作等(Allègre, 1987). 通过阅读前苏联出版的*Research in Geochemistry*中的一系列论文, 他对地球化学特别是同位素地球化学产生了浓厚的兴趣. 20世纪60年代, 尽管法国一些物理实验室也安装有质谱仪, 但还不能高精度地测量同位素组成. Allègre于1965年夏天来到美国加州理工学院Wasserburg的实验室访问学习, 回到法国后着手建立了自己的实验室, 并组建了研究小组. 从此以后, Allègre教授就成为法国地球化学界的代表人物, 并代表法国跻身国际地球化学研究的前列.

Allègre教授的主要学习和工作经历如下: 1962年毕业于巴黎大学, 获物理学博士学位, 在这期间他还选修了地质学; 1962~1968年, 巴黎大学物理学助理讲师; 1967年, 在法国国家科学研究中心创建了地球

图1 Allègre教授照片

化学和宇宙化学实验室并出任该实验室主任; 1970年, 巴黎第七大学教师; 1971~1976年, 巴黎第七大学地球科学系主任; 1976~1986年, 巴黎地球物理研究所所长; 1997年6月至2000年3月, 法国教育部部长; 目前已经正式退休, 但仍是巴黎地球物理研究所的名誉教授. 他曾多次到欧美一些著名大学和研究机构做访问学者, 如康奈尔大学、麻省理工学院、加州理工学院、加州伯克利大学、牛津大学、美国地质调查局和华盛顿卡内基研究所等.

3 主要学术成就

Allègre教授的研究兴趣涉及众多的地球科学领域, 这已经显著超过了本文作者的知识范围. 但从经典地球化学角度出发, 他的主要研究领域包括: 地壳和地幔放射性和稀有气体同位素体系、岩浆过程微量元素分配定量模型、化学地球动力学等. 他在法国引进和发展了一系列母-子体同位素体系(如Rb-Sr、U-Th-Pb、Sm-Nd和Re-Os等)和稀有气体同位素体系等分析方法, 特别是对地球样品Re-Os、U系不平衡和稀有气体同位素分析方法的建立和应用, 为研究地球内部及其对地表圈层地质过程的控制书写了新的篇章, 为更好地认识地壳和地幔以及这两个圈层之间复杂的相互作用铺平了道路.

Allègre教授具有深厚的数理功底, 首次将反演理论方法应用到岩浆结晶过程中的微量元素配分研究(Allègre等, 1977; Allègre和Minster, 1978), 为定量理解岩石成因和地壳演化奠定了基础(Minster等, 1977; Minster和Allègre, 1978). 此外, 他创建了许多复杂的地质过程定量模型(如火山作用、地球大气演化和地球层圈形成)和破裂、地震、地球化学分布和

能量平衡的标度定律. 他还应用地球化学方法模拟了早期太阳系、行星早期演化和陨石的形成. 正是由于他在宇宙化学领域的卓越研究成果, 他被美国国家航天航空局选中参加阿波罗登月计划, 他是首次确定月球年龄的科学家之一.

Allègre教授是化学地球动力学(chemical geodynamics)的缔造者. 他将化学地球动力学定义为化学观察在地球动力学格架中的应用, 因此是地球化学与地球物理学之间的交叉学科. 他关于化学地球动力学的首篇论文是用法文写的, 发表在1980年; 1982年他用英文在国际构造地球物理学杂志 *Tectonophysics* 发表了这篇论文, 将反演理论方法应用到地幔地球化学研究中. Zindler和Hart(1986)以化学地球动力学为题在地球和行星科学年评 *Annual Reviews on Earth and Planetary Sciences* 上发表长篇大作, 对地幔地球化学进行了系统的总结, 由此使化学地球动力学成为20世纪末期地幔地球化学研究的热点和前沿(郑永飞, 1999).

Allègre教授的这些科研成果以400余篇科学论文的形式发表在 *Nature* 和 *Science* 以及国际地球科学领域顶级期刊如 *Earth and Planetary Science Letters* 和 *Geochimica et Cosmochimica Acta* 等上(图2), 其中包括一系列经典的论文(如, Allègre等, 1977, 1983, 1984; Allègre和Minster, 1978; Allègre和Othman,

1980; Allègre和Luck, 1980; Allègre, 1982; Allègre和Turcotte, 1986). 他的这些论文已被SCI引用26000余次, 其中他引24000余次(图3). 他的论文主要发表在20世纪70~80年代, 至今每年还有超过1000次的引用, 表明其长久的影响力. 除了学术论文外, Allègre教授还出版了10余部专著, 如Allègre和Michard在1974年出版的 *Introduction to Geochemistry*(图4)、Allègre在2008年出版的 *Isotope Geology*(图5)等, 这些都是相关领域经典的教科书.

由于Allègre教授在地球化学领域的杰出贡献, 他获得了许多奖励和荣誉, 主要如下: 1985年当选美国国家科学院外籍院士(Foreign Associate of the National Academy of Sciences of United States); 1986年获地球化学学会戈尔德施密特奖(Goldschmidt Award of the Geochemical Society); 1986年获瑞典皇家科学院Crafoord奖(Crafoord Prize of the Royal Swedish Academy of Sciences); 1987年当选美国艺术和科学院外籍荣誉院士(Foreign Honorary Member of the American Academy of Arts and Sciences); 1987年获伦敦地质学会沃拉斯顿奖(Wollaston Medal of the Geological Society of London); 1994年获法国国家科学研究中心金奖(Gold Medal of CNRS); 1995年当选法国国家科学院院士(Member of the French Academy of Sciences); 1995年获美国地球物理学会威廉鲍威奖

图2 Allègre教授1967~2013年发表论文数量逐年分布统计图(引自 Web of Science)

图3 Allègre 教授发表论文被 SCI 引用次数逐年分布统计图(引自 Web of Science)

图4 Allègre 教授 1974 年发表的专著 *Introduction to Geochemistry*

(William Bowie Medal of the American Geophysical Union).

图5 Allègre 教授 2008 年发表的专著 *Isotope Geology*

4 科学精神

一个真正的科学家应该满足下面两个基本条件:
(1) 懂科学并从事科学研究; (2) 具有科学精神, 实

事求是、勇于探索真理和捍卫真理的精神. 科学精神包括求实精神、创新精神、怀疑精神和宽容精神. 其中最主要的是求实精神和创新精神, 不求实就不是科学, 不创新科学就不会发展. 这两种精神在Allègre教授身上都得到了明显的体现.

地球化学是一门偏重实验数据分析的学科, Allègre教授非常注重实验分析工作. 他在接受2004年地球化学学会特别服务奖的时候这样说到: “如果你想利用地球化学数据, 你必须了解获得这些数据的方法和细节”(Allègre, 2004). 他认为地球化学如果没有细致的分析工作, 什么都得不到. 这不难看出Allègre教授非常重视实验分析工作, 体现了他求真务实的精神.

化学地球动力学的诞生体现了Allègre教授在科学研究上的创新精神, 这可以从该学科当时产生的背景看出. 除了微量元素与同位素示踪理论和技术方法的发展, 奠定了地幔地球化学发展的一般基础外, 直接影响到化学地球动力学产生的因素包括: (1) 板块构造理论影响, 板块构造理论使地球科学家与地球化学家能够统一到整个地球系统, “透视”板块运动伴随着大规模壳幔相互作用和物质再循环. (2) 多种地幔端元组分的发现, 大洋和大陆玄武岩同位素和微量元素揭示了地幔物质储库的多样性, 即除了原始地幔和亏损地幔两个端元组分外, 尚存在一些其他地幔端元组分, 以致造成玄武岩同位素和化学成分的多多样性. 尝试由地球层圈的相互作用, 包括壳/幔、上/下地幔、乃至核/幔过渡带的物质交换与再循环等, 来揭示多种地幔端元的成因. 由地幔化学结构的多样性, 进而产生了从地球层圈相互作用来揭示地球动力学的构想. (3) 多同位素体系线性和非线性数值模拟技术的发展, 可以模拟地球化学结构和地幔不均一的形成与层圈相互作用, 以期揭示壳幔演化历史及地球动力学. 因此, 产生了将地球视为一个统一的动力学系统, 以层圈的相互作用为主导, 以揭示地壳和地幔化学组成和演化为基础, 探讨地球演化历史与动力学的化学地球动力学的构想(Allègre, 1982, 2008).

5 政治生涯和公众人物

Allègre教授是在取得突出的学术成就之后又成

功进入政界的为数不多的科学家之一. 他曾是法国社会党执行局的成员、国家科学研究代表、社会党第一书记特别顾问、欧洲议会成员和市区议员等. 当然, 最为公众熟知的是他曾在1997年6月至2000年3月出任法国希拉克政府教育部部长. 后来因为一系列关于基础教育方面的改革引发民众不满而被迫辞职.

Allègre教授为大众熟知的另外一个原因是他在“全球气候变化”上的立场. 早在1987年, 他就提出: “由于化石燃料的燃烧, 人类增加了大气二氧化碳的浓度, 使上世纪全球平均温度上升了0.5℃”. 其后Allègre与1500位世界著名科学家签发出了“全球科学家对人类的警告”的公开信, 强调了全球变暖对人类带来的巨大危险. 2005年Allègre改变了他的观点, 这主要是新的观察证据, 特别是来自同位素地球化学的证据并不支持人类温室气体排放导致全球变暖的观点, 同时也由于人类活动引起全球变暖的支持者将这一认识政治化为“不可逆转的一致意见”, 使他很反感. 2010年他发表了《气候骗局》新著, 引起了500多名法国科研人员的强力不满和抗议, 使他失去了即将在萨科奇政府中担任的科技部长的职位. 萨科奇政府认为, 如果任命一位反对全球变暖的人当部长, 可能会使人们理解为法国政府在这个议题上的政策倾向, 给哥本哈根谈判带来难堪. 一家环境杂志甚至辑文号召, 对Allègre这些全球变暖怀疑论者进行纽伦堡式国际法庭审判. 2010年Allègre曾在北京西苑饭店作“全球变化模拟的局限性”的学术报告, 提出全球变暖是由水蒸气而不是CO₂造成的, 所谓的碳减排不过是西方列强妄图阻止中国、印度等国家发展的战略.

Allègre教授作为公众人物的另一个重要标志是, 他热衷于科学普及工作. 他在繁忙的科学研究与行政工作之余, 先后为法国民众撰写过20余本科普著作, 其中有多部著作被翻译成中文. 如*L'écume de la Terre* (1983, 中文译名: 活动的大陆)、*De la Pierre à l'Etoile* (1985, 中文译名: 陨石地球太阳系)、*Économiser la Planète* (1990, 中文译名: 珍惜地球)、*Écologie des villes, écologie des Champs* (1993, 中文译名: 城市生态/乡村生态)、*L'imposture climatique* (2010, 中文译名: 气候骗局)(图6)等. 此外, Allègre教授还是一位热衷于学术共同体的科学家. 他曾担任巴黎地球物理研究所(IPGP)两届所长, 并使该所成为国际上重要的地球科

图6 Allègre教授2010年发表的科普著作 *L'imposture climatique*

学研究中心。在他的带领下, 1981和1985年分别成立了欧洲地球科学联合会(European Union of Geosciences)和欧洲地球化学协会(European Association of Geochemistry), 并使*Earth and Planetary Science Letters*和*Chemical Geology*这两本欧洲地学界举办的杂志成为当前地球科学研究领域极为重要的学术交流阵地, 极大地推进了地球科学的发展, 并为地球化学作为一门独立的学科得到学术界认可, 做出了突出贡献。

Allègre教授还是一位对中国地质科学研究有显著促进作用的科学家。1980~1982年执行的中法“喜马拉雅地质构造和地壳上地幔的形成与演化”研究是我国刚改革开放后实行的第一个大型国际合作项目, Allègre教授积极推动和参与了此项工作, 并任当时考察队的技术负责, 亲临野外工作。这次合作成长了一批从事喜马拉雅-青藏高原研究的中外地质学家,

Allègre教授后来发表的中法合作总结也是目前喜马拉雅-青藏高原研究的重要文献(Allègre等, 1984)。

6 化学地球动力学

化学地球动力学是Allègre教授在事业顶峰时期提出的概念, 也是他最有影响的学术成就之一。这个概念一经提出, 就成为20世纪末地球化学研究的前沿领域。经过30多年来的发展, 这个领域已经从传统的大洋地壳俯冲再循环扩展到大陆地壳俯冲再循环, 对地球的形成和演化研究影响深远, 一直是地球化学科学研究的前沿和热点。

6.1 理论提出: 地幔地球化学和大陆生长

在Allègre(1982)提出化学地球动力学这个命题时, 主要考虑了三个方面的研究内容: (1) 重大地质事件(特别是壳幔分异、大陆生长和壳幔相互作用时间)年龄的测定, (2) 地幔地球化学不均一性的识别、分布和原因, (3) 大陆地壳生长原因和速率。Zindler和Hart(1986)对这个命题进行了深化, 强调地幔地球化学不均一性的分布和原因。虽然这两篇里程碑式的论文在引言中都提到与地球物理学之间的结合, 但是并没有将地球化学数据与地球物理探测结果真正结合到一起来认识地球层圈的形成和演化。实际上, 这两篇论文研究主要集中在同位素地球化学示踪地壳物质再循环方面, 其指导思想源于Amstrong(1968)的地壳再循环模型。虽然Hofmann和White(1982)首次从微量元素比值角度提出俯冲洋壳对洋岛玄武岩成分的贡献, 但是假设俯冲的地壳岩石整体加入到玄武岩的地幔源区后与橄榄岩一起部分熔融, 而不是地壳岩石先脱水熔融产生英质熔体交代地幔橄榄岩, 然后再部分熔融形成玄武岩, 因此对地壳分异衍生物与地幔橄榄岩之间的化学反应考虑不够。此外, 对微量元素在部分熔融过程中的分异效应考虑不够, 忽视了俯冲地壳变质脱水和部分熔融过程对微量元素分异的影响。在20世纪过分强调了深俯冲洋壳对地幔不均一性的贡献, 忽视了洋壳浅俯冲过程的地壳分异物质对大洋弧玄武岩和大陆弧安山岩源区成分的贡献。

在Allègre(1982)所提出的化学地球动力学框架中, 他应用反演理论方法将地球的主要地球化学储

库简化为若干“盒子”模型(Box model), 通过解译不同储库间的物质与能量交换, 建立了这些地球化学储库演化的化学动力学模型(图7). 仅就大陆地壳形成而言, 他根据初始地壳来源于地幔的基本约束, 提出地幔应该分为上部析出地壳的上地幔和下部相对未亏损的下地幔. 根据演算结果, 他提出亏损地幔的深度应在800km左右, 大陆地壳主要形成在前寒武纪(平均年龄为25亿年), 并在20亿年达到形成速率的最大值. 这些论点虽然被后来的研究有所修正, 如上下地幔的边界应为670km, 大陆地壳的平均年龄在18~20亿年左右等. 但重要的是, 他为我们解译复杂的地球提供了简便而实用的模型与方法, 从而极大地推进了人类对地球形成与演化的了解.

在海底扩张和板块构造学说发展过程中诞生的化学地球动力学, 在研究大洋玄武岩地球化学的许多基本问题中已经取得了巨大成功. 在建立了地幔地球化学基本体系基础上, 人们认识到大洋板片俯冲进入地幔是引起地幔化学不均一性的主要地质过程(Hofmann, 1997). 作为地球化学与地球物理学或地球动力学的交叉学科, 化学地球动力学从提出至

今仅有30多年的历史, 但它已经成为目前地球科学中最前沿的学科领域(郑永飞等, 2015). 它综合应用同位素地球化学、微量元素地球化学以及地球物理手段研究地壳、地幔和地核的化学演化及其相互作用过程, 从物理和化学过程的本质上认识地球及其各组成部分的演化、相互关系以及它们对资源、环境和自然灾害的制约.

6.2 理论发展: 从大洋到大陆

20世纪80年代以来对地幔地球化学不均一性进行了充分研究, 对大洋玄武岩地幔源区不同类型富集组分的识别和成因机制进行了探讨(Hofmann, 1997), 对大洋俯冲带脱水引发地幔楔部分熔融形成岛弧玄武岩这个经典机制进行了多方位研究(Green和Falloon, 1998). 进入21世纪以来, 化学地球动力学研究致力于综合应用主量和微量元素、放射成因同位素和稳定同位素等指标示踪大洋/大陆板块俯冲对地幔地球化学的影响, 认识大洋/大陆俯冲带在高压/超高压条件下的地球化学传输和地壳物质再循环过程(Bebout, 2007; Zheng等, 2011; Hermann等, 2013; Zheng和Hermann, 2014). 现代岩石学研究手段为深化化学地球动力学研究提供了有力保证. 因此, 虽然化学地球动力学仍然以同位素和微量元素地球化学为主要研究手段, 但是它密切结合矿物岩石矿床学、大地构造学乃至地球物理学等方法, 特别是矿物微区地球化学分析, 对大洋和大陆俯冲带地壳物质再循环、大陆地壳生长与地幔化学演化、地球层圈之间相互作用等过程进行时间-空间上的综合研究, 以期从本质上认识地球内部各组成单元的化学演化和相互关系. 随着相关研究的深入, 地球化学家们已不满足“地壳物质再循环引起地幔化学不均一性”这种框架性的认识, 对相关地球动力学过程的深入和细化研究已经成为当前化学地球动力学研究的发展趋势(Zheng, 2012).

20世纪末期随着柯石英和金刚石等超高压变质矿物在大陆表壳岩石中的发现, 证明大规模的低密度长英质陆壳岩石曾整体俯冲到大陆上地幔顶部并发生超高压变质, 然后又折返到浅部地壳(Chopin, 2003). 由于大陆地壳物质与地幔物质之间在地球化学组成上的巨大差异, 大陆地壳的深俯冲和折返必然会对地幔的化学组成造成显著影响, 从而使目前

图7 化学地球动力学交换结构的盒子模型

据 Allègre(1982)修改

的化学地球动力学研究从大洋俯冲带拓展到大陆俯冲带(Zheng, 2012). 与此同时, 俯冲隧道概念的提出(Shreve和Cloos, 1986)及其开展的一系列多学科综合研究(Bebout, 2007), 对大洋俯冲带壳幔相互作用的理解获得了长足的进展(郑永飞等, 2015). 特别是将大洋俯冲隧道模型拓展到大陆俯冲带(Gerya等, 2002; 郑永飞等, 2013), 使人们对俯冲带岩浆作用的发生发展步骤和过程有了更全面的认识(郑永飞等, 2015). 对大陆深俯冲的研究进一步将壳幔相互作用拓展到大陆俯冲带及其牵引洋壳的深俯冲, 构成两类壳幔相互作用(赵子福等, 2015). 图8是将Allègre教授提出的壳幔相互作用化学地球动力学理论框架(图7)拓展到大陆俯冲带, 细化大陆俯冲隧道中的壳幔物质交换和相互作用, 反映了化学地球动力学从当时的理论粗线条发展到现今的精细刻画和深入认识.

对大陆内部幔源镁铁质火成岩的研究, 不仅能够认识它们的成因, 更重要的是揭示其地幔源区的地球化学性质及其形成的化学地球动力学机制. 许多大陆碰撞造山带中出露有大量同折返或碰撞后火成岩(赵子福和郑永飞, 2009). 探讨它们(特别是镁铁质火成岩)的源区性质及其与俯冲陆壳和先前俯冲洋壳再循环的关系对于理解大陆俯冲带壳幔相互作用具有重大意义. 例如, 近年来通过对秦岭-红安-大别-苏鲁造山带广泛分布的同折返和碰撞后镁铁质火成岩进行系统的岩石学和地球化学研究(Dai等, 2011, 2012, 2014, 2015a, 2015b; Zhao等, 2011, 2012, 2013;

Yang等, 2012a, 2012b; Zhang等, 2012), 识别出两类地球化学性质截然不同的镁铁质火成岩, 指示在大陆俯冲带存在两种类型的壳幔相互作用(赵子福等, 2015). 其中一类壳幔相互作用是通过先前俯冲洋壳来源长英质熔体与上覆软流圈地幔反应来实现的, 另一类壳幔相互作用是通过随后俯冲陆壳来源长英质熔体与上覆古老岩石圈地幔反应来实现的. 前者形成新生洋岛型地幔源区, 后者形成古老岛弧型地幔源区. 因此, 大陆碰撞造山带碰撞后镁铁质火成岩是俯冲隧道中两种类型板片-地幔相互作用的产物, 它们为研究大陆俯冲带地壳物质再循环及其壳幔相互作用的化学地球动力学提供了岩石学和地球化学记录. 这些结果成功地将化学地球动力学研究从大洋俯冲带拓展到了大陆俯冲带, 为发展板块构造理论做出了贡献.

另一方面, 对华北东南缘新生代大陆玄武岩的岩石地球化学研究显示(Zhang等, 2009; Wang等, 2011; Xu等, 2012, 2014a, 2014b), 其中存在俯冲的太平洋板片地壳组分, 指示这些新生代大陆玄武岩的地幔源区是俯冲太平洋板片衍生熔体与上覆软流圈地幔在俯冲隧道中发生熔体-橄榄岩反应所形成的新生富集地幔交代岩. 这是一种发生在古老大陆边缘之下的板片-地幔相互作用(郑永飞等, 2015), 在很多方面不同于东太平洋俯冲带之上的安第斯型大陆边缘. 正是由于这种克拉通岩石圈之下俯冲洋壳脱水熔融过程中的地球化学分异, 使得这些新生代大陆玄武岩在地球化学组成上有别于常见的大洋弧玄武岩和大陆弧安山岩.

Dai等(2016)对华北东南缘胶东地区中生代和新生代镁铁质火成岩的系统同位素年代学和地球化学研究揭示, 中生代镁铁质火成岩出现两种地球化学类型, 华北克拉通岩石圈地幔属性在~121Ma发生显著变化, 由大陆深俯冲交代克拉通岩石圈地幔所形成的地幔源区在~135Ma才开始部分熔融形成古老岛弧型镁铁质火成岩, 由大洋板片俯冲交代软流圈地幔所形成的新生洋岛型地幔源区部分熔融时间可以追溯到早白垩世的~121Ma. 在~200至~135Ma期间缺乏镁铁质岩浆活动, 指示这个时期太平洋板片西向平俯冲到华北克拉通之下, 在~135Ma至~121Ma期间太平洋板片俯冲角度变陡并发生后撤, 软流圈地幔侧向充填进入克拉通岩石圈地幔与后撤俯冲板片之

图8 大陆俯冲带壳幔相互作用示意图

据郑永飞等(2013)

间的空间. 侧向充填的软流圈地幔上涌一方面加热克拉通岩石圈底部的地幔交代岩, 使其部分熔融形成古老岛弧型镁铁质火成岩, 另一方面加热后撤俯冲太平洋板片顶部岩石使其部分熔融并发生熔体-橄榄岩反应, 形成新生洋岛型镁铁质火成岩的地幔源区. 正是在这个过程中, 由于地幔不稳定流动才造成华北克拉通破坏并引发大规模岩浆活动. 因此, 这两种类型的中生代镁铁质火成岩记录了中生代时期太平洋板块俯冲引起华北克拉通破坏的化学地球动力学过程.

7 总结

Allègre教授是一位有战略眼光的地球化学家. 他在地球层圈结构与演化及其相互作用、太阳系和行星早期演化等诸多领域取得了杰出的成就, 并由此于1986年获得瑞典皇家科学院颁发的Crafoord奖. 他所提出的化学地球动力学成功地将地球化学与大地构造学结合起来, 已经成为大地构造与地球化学交叉领域最活跃、最具生命力的研究方向. 他想别人没有想到的, 做别人没有做到的, 坚持科学真理, 维护科学政治. 从他的身上我们能够体会到一个真正的科学家所具备的科学精神, 即实事求是、勇于探索真理和捍卫真理的精神.

致谢 感谢滕方振博士和一位匿名审稿人对本文提出的宝贵意见.

参考文献

- 赵子福, 郑永飞. 2009. 俯冲大陆岩石圈重熔: 大别-苏鲁造山带中生代岩浆岩成因. 中国科学D辑: 地球科学, 39: 888–909
- 赵子福, 戴立群, 郑永飞. 2015. 大陆俯冲带两类壳幔相互作用. 中国科学: 地球科学, 45: 900–915
- 郑永飞. 1999. 化学地球动力学: 从同位素到板块构造. 见: 郑永飞, 主编. 化学地球动力学. 北京: 科学出版社. 1–14
- 郑永飞, 赵子福, 陈伊翔. 2013. 大陆俯冲隧道过程: 大陆碰撞过程中的板块界面相互作用. 科学通报, 58: 2233–2239
- 郑永飞, 陈伊翔, 戴立群, 赵子福. 2015. 发展板块构造理论: 从洋壳俯冲带到碰撞造山带. 中国科学: 地球科学, 45: 711–735
- Allègre C J, Michard G. 1974. Introduction to Geochemistry. Boston: D Reidel Publishing Company, Dordrecht-Holland. 142
- Allègre C J, Treuil M, Minster J F, Minster B, Albarède F. 1977. Systematic use of trace-element in igneous processes, Part I: Fractional crystallization processes in volcanic suites. Contrib Mineral Petrol, 60: 57–75
- Allègre C J, Minster J F. 1978. Quantitative models of trace-element behavior in magmatic processes. Earth Planet Sci Lett, 38: 1–25
- Allègre C J, Othman D B. 1980. Nd-Sr isotopic relationship in granitoid rocks and continental-crust development: A chemical approach to orogenesis. Nature, 286: 335–342
- Allègre C J, Luck J M. 1980. Osmium isotopes as petrogenetic and geological tracers. Earth Planet Sci Lett, 48: 148–154
- Allègre C J. 1982. Chemical geodynamics. Tectonophysics, 81: 109–132
- Allègre C J, Staudacher T, Sarda P, Kurz M. 1983. Constraints on evolution of Earth's mantle from rare gas systematics. Nature, 303: 762–766
- Allègre C J, Courtillot V, Tapponnier P, Hirn A, Mattauer M, Coulon C, Jaeger J J, Achache J, Scharer U, Marcoux J, Burg J P, Girardeau J, Armijo R, Gariépy C, Gopel C, Tindong L, Xuchang X, Chenfa C, Guangqin L, Baoyu L, Jiwen T, Naiwen W, Guoming C, Tonglin H, Xibin W, Wanming D. 1984. Structure and evolution of the Himalaya-Tibet orogenic belt. Nature, 307: 17–22
- Allègre C J, Turcotte D L. 1986. Implications of a 2-component marble-cake mantle. Nature, 323: 123–127
- Allègre C J. 1987. Acceptance speech for the V. M. Goldschmidt Award. Geochim Cosmochim Acta, 51: 1773–1774
- Allègre C J. 2004. Acceptance of the 2004 distinguished service award to Claude J. Allègre. Geochim Cosmochim Acta, 70: S20–S21
- Allègre C J. 2008. Isotope Geology. Cambridge: Cambridge University Press. 512
- Armstrong R L. 1968. A model for Sr and Pb isotope evolution in a dynamic Earth. Rev Geophys, 6: 175–199
- Bebout G E. 2007. Metamorphic chemical geodynamics of subduction zones. Earth Planet Sci Lett, 260: 373–393
- Chopin C. 2003. Ultrahigh-pressure metamorphism: Tracing continental crust into the mantle. Earth Planet Sci Lett, 212: 1–14
- Dai L Q, Zhao Z F, Zheng Y F, Li Q, Yang Y, Dai M. 2011. Zircon Hf-O isotope evidence for crust-mantle interaction during continental deep subduction. Earth Planet Sci Lett, 308: 224–244
- Dai L Q, Zhao Z F, Zheng Y F, Zhang J. 2012. The nature of orogenic lithospheric mantle: Geochemical constraints from postcollisional mafic-ultramafic rocks in the Dabie orogen. Chem Geol, 334: 99–121
- Dai L Q, Zhao Z F, Zheng Y F. 2014. Geochemical insights into the role of metasomatic hornblende in generating alkali basalts. Geochem Geophys Geosyst, 15: 3762–3779
- Dai L Q, Zhao Z F, Zheng Y F, Zhang J. 2015a. Source and magma mixing processes in continental subduction factory: Geochemical evidence from postcollisional mafic igneous rocks in the Dabie orogen. Geochem Geophys Geosyst, 16: 659–680
- Dai L Q, Zhao Z F, Zheng Y F. 2015b. Tectonic development from oceanic subduction to continental collision: Geochemical evidence from postcollisional mafic rocks in the Hong'an-Dabie orogens. Gondwana Res, 27: 1236–1254

- Dai L Q, Zheng Y F, Zhao Z F. 2016. Termination time of peak decratonization in North China: Geochemical evidence from mafic igneous rocks. *Lithos*, 240-243: 327–336
- Gerya T V, Stöckhert B, Perchuk A L. 2002. Exhumation of high-pressure metamorphic rocks in a subduction channel: A numerical simulation. *Tectonics*, 21: 1056; doi: 10.1029/2002TC001406
- Green D H, Falloon T J. 1998. Pyrolite: A Ringwood concept and its current expression. In: Jackson I, ed. *The Earth's Mantle: Composition, Structure, and Evolution*. Cambridge: Cambridge University Press. 311–378
- Hermann J, Zheng Y F, Rubatto D. 2013. Deep fluids in subducted continental crust. *Elements*, 9: 281–288
- Hofmann A W, White W M. 1982. Mantle plumes from ancient oceanic crust. *Earth Planet Sci Lett*, 57: 421–436
- Hofmann A W. 1997. Mantle geochemistry: The message from oceanic volcanism. *Nature*, 385: 219–229
- Minster J F, Minster B, Treuil M, Allègre C J. 1977. Systematic use of trace-element in igneous processes, Part II: Inverse problem of the fractional crystallization process in volcanic suites. *Contrib Mineral Petrol*, 61: 49–77
- Minster J F, Allègre C J. 1978. Systematic use of trace-element in igneous processes, Part III: Inverse problem of batch partial melting in volcanic suites. *Contrib Mineral Petrol*, 68: 37–52
- Shreve R L, Cloos M. 1986. Dynamics of sediment subduction, melange formation, and prism accretion. *J Geophys Res*, B91: 10229–10245
- Tilton G R. 1987. Introduction of Claude Allègre for the V. M. Goldschmidt Award 1986. *Geochim Cosmochim Acta*, 51: 1771–1772
- Wang Y, Zhao Z F, Zheng Y F, Zhang J J. 2011. Geochemical constraints on the nature of mantle source for Cenozoic continental basalts in east-central China. *Lithos*, 125: 940–955
- Xu Z, Zhao Z F, Zheng Y F. 2012. Slab-mantle interaction for thinning of cratonic lithospheric mantle in North China: Geochemical evidence from Cenozoic continental basalts in central Shandong. *Lithos*, 146-147: 202–217
- Xu Z, Zheng Y F, He H Y, Zhao Z F. 2014a. Phenocryst He-Ar isotopic and whole-rock geochemical constraints on the origin of crustal components in the mantle source of Cenozoic continental basalt in eastern China. *J Volcanol Geotherm Res*, 272: 99–110
- Xu Z, Zheng Y F, Zhao Z F, Gong B. 2014b. The hydrous properties of subcontinental lithospheric mantle: Constraints from water content and hydrogen isotope composition of phenocrysts from Cenozoic continental basalt in North China. *Geochim Cosmochim Acta*, 143: 285–302
- Yang Q L, Zhao Z F, Zheng Y F. 2012a. Modification of subcontinental lithospheric mantle above continental subduction zone: Constraints from geochemistry of Mesozoic gabbroic rocks in southeastern North China. *Lithos*, 146-147: 164–182
- Yang Q L, Zhao Z F, Zheng Y F. 2012b. Slab-mantle interaction in continental subduction channel: Geochemical evidence from Mesozoic gabbroic intrusives in southeastern North China. *Lithos*, 155: 442–460
- Zhang J J, Zheng Y F, Zhao Z F. 2009. Geochemical evidence for interaction between oceanic crust and lithospheric mantle in the origin of Cenozoic continental basalts in east-central China. *Lithos*, 110: 305–326
- Zhang J, Zhao Z F, Zheng Y F, Liu X, Xie L. 2012. Zircon Hf-O isotope and whole-rock geochemical constraints on origin of postcollisional mafic to felsic dykes in the Sulu orogen. *Lithos*, 136-139: 225–245
- Zhao Z F, Zheng Y F, Wei C S, Wu F Y. 2011. Origin of postcollisional magmatic rocks in the Dabie orogen: Implications for crust-mantle interaction and crustal architecture. *Lithos*, 126: 99–114
- Zhao Z F, Zheng Y F, Zhang J, Dai L Q, Li Q, Liu X. 2012. Syn-exhumation magmatism during continental collision: Evidence from alkaline intrusives of Triassic age in the Sulu orogen. *Chem Geol*, 328: 70–88
- Zhao Z F, Dai L Q, Zheng Y F. 2013. Postcollisional mafic igneous rocks record crust-mantle interaction during continental deep subduction. *Sci Rep*, 3: 3413, doi: 10.1038/srep03413
- Zheng Y F, Xia Q X, Chen R X, Gao X Y. 2011. Partial melting, fluid supercriticality and element mobility in ultrahigh-pressure metamorphic rocks during continental collision. *Earth Sci Rev*, 104: 342–374
- Zheng Y F. 2012. Metamorphic chemical geodynamics in continental subduction zones. *Chem Geol*, 328: 5–48
- Zheng Y F, Hermann J. 2014. Geochemistry of continental subduction-zone fluids. *Earth Planets Space*, 66: 93, doi: 10.1186/1880-5981-66-93
- Zindler A, Hart S R. 1986. Chemical geodynamics. *Ann Rev Earth Planet Sci*, 14: 493–571