

文章编号: 1001-8166(2008)12-1260-08

21 世纪地球科学研究的重大科学问题^{*}

郑军卫^{1,2}, 张志强¹, 赵纪东¹

(1. 中国科学院资源环境科学信息中心, 中国科学院国家科学图书馆兰州分馆, 甘肃 兰州 730000;
2 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083)

摘要:凝炼地球科学研究的重大科学问题,对推动地球科学基础研究的发展具有重要意义。美国国家研究理事会(National Research Council)2008年3月发布的研究报告《地球的起源和演化:变化行星的研究问题》提出了21世纪固体地球科学研究的10个重大科学问题:地球和其他行星的起源;地球早期的演化历史;生命的起源;地球内部的运动及其对地表面的影响;地球的板块构造与大陆;地球的物质特性对地球过程的控制;气候变化的原因与幅度;地球—生命的相互作用;地震、火山喷发等灾害及其后果的预测;地球内外流体运动对人类环境的影响。这些重大科学问题对我国的地质发展战略研究及地球科学基础研究均将具有重要的借鉴和指导意义。主要依据NRC的《地球的起源和演化:变化行星的研究问题》报告,对这些重大科学问题进行了解读和分析。

关键词:地球科学;固体地球科学;重大科学问题;美国国家研究理事会(NRC)

中图分类号:P **文献标志码:**A

1 引言

地球科学是与人类和人类社会密切相关的一门历史悠久的自然学科。随着地球科学自身的不断发展和完善,以及人类社会对地球科学的需求越来越迫切,地球科学与其他学科之间以及地球科学各分支学科之间的交叉融合研究越来越普遍,地球科学研究正朝向系统化、组织化、规模化、技术化、平台化方向发展。因而,开展地球科学的发展战略研究,促进地球科学在社会发展中发挥更大的作用,已成为国际地学界促进地球科学发展的重要途径。如在美国国家科学基金会(NSF)、美国宇航局(NASA)、英国自然环境研究理事会(NERC)^[1~4]有关组织或机构的基金资助指南、地球科学发展中长期规划中,均体现出以超前的理念、超前的规划、超前的部署积极推动地球科学学科发展的思想,甚至

提出对一些大型地学研究与管理机构进行整合以建立地球系统科学机构的方案^[5]。我国也很重视地球科学战略研究,近几年发布的一些不同层次的地球科学战略研究报告对指导我国地球科学研究的发展起了重要作用^[6~10]。

美国国家研究理事会(National Research Council)于2008年3月发布了其历时数年完成的《地球的起源和演化:变化行星的研究问题》(Origin and Evolution of Earth: Research Questions for a Changing Planet)研究报告^[11,12],确定了地质学和行星科学(也称为“固体地球科学”)的10个重大科学问题。这些问题反映了地球科学在21世纪面临的重要科学挑战,对我国开展地球科学研究具有重要的指导和借鉴意义,下面将主要围绕该报告对这些问题的内涵予以解读。

* 收稿日期:2008-11-20;修回日期:2008-11-26

* 基金项目:中国科学院知识创新工程重要方向项目“资源与海洋、生态与环境创新基地战略研究与科学评价”(编号:KZCX2-YW-501);国家自然科学基金专项基金项目(编号:40841015)资助。

作者简介:郑军卫(1973-),男,陕西凤翔人,副研究员,在读博士生,主要从事能源地球科学情报研究。E-mail: zhengjw@llas.ac.cn

2 重大科学问题的研究推动地球科学的发展

地球科学是人类认识行星地球和用获得的地球知识为人类服务的一门最重要的基础科学,通过对地球整体系统及其各子系统(大气圈、水圈、冰雪圈、生物圈、岩石圈,以及近地空间及人类圈)演化过程以及它们间相互作用等的研究,提高人类对地球整体系统和各子系统变化规律、机制和变化趋向的认知能力,为解决人类生存与可持续发展面临的资源供给、生态保护、环境优化、防灾减灾和国家安全等重大问题提供科学支持^[10,13]。

现代地球科学源于一些与地球和生命起源有关的基本问题。在一些古希腊学者的著作中对这些重大问题早就有记录,其为地球科学的产生奠定了基础,并且当前使用的许多地学术语也都来源于这些著作。解答这些问题的分析方法可以追溯到 16 世纪的行星科学和 18 世纪的地质科学。近代地质学重大研究问题中的第一个也是最具争议性的问题来自于人们对沉积岩石的观测。James Hutton 根据沉积岩层的厚度、变化特征、结构以及岩层内的化石推断,地球形成时间应该非常古老。地球的年龄问题成为当时最重大的科学问题。但是直到约 200 年以后,人类认识到物质是由包含原子核的原子构成的,以及部分原子核不稳定会发生衰变,这才使得地质年代表的建立成为可能。对地球年龄(45.5 亿年)的首次准确测量是在 20 世纪 50 年代中期,这是建立地球、生命和宇宙年代表的重要一步。

直到 20 世纪 60 年代,地质科学几乎完全建立在对大陆上岩石和地形的研究上,对海底几乎没有了解。这种以大陆为中心的观点,以及主要研究集中在矿产、水资源和古生物发现方面,对 20 世纪早期的重大研究问题产生深远的影响。当时的重大研究问题是:火山、山脉和沉积盆地是如何形成的?矿床和油藏为何形成于其所在的特定地点以及是何时形成的?山脉的隆起和侵蚀的速率有多快?为什么 5 亿年前生物化石首次变得丰富?什么引发冰期和地震?还有一个迫切需要回答的问题是:为什么南美洲和非洲的大西洋海岸线看起来非常相似,它们可能是曾经连接在一起的两部分吗?

这些在 20 世纪中叶存在的表面上看起来毫无联系的重大问题,随着板块构造理论的出现被很好地组织和联系在一起。在 1963—1968 年仅 5 年的时间里,在对海底地磁和海底深度的首次观测结果

的巨大刺激下,人类绘制出第一幅行星地球的动力学特征图像。由此推测,地球表面是由 10 多个非规则的刚性板块构成的,这些板块每年移动几厘米,地震、火山和山脉位于板块的边界。板块运动与地球深部全球尺度的固态对流联系在一起,这种观点是 10 年前大多数地质学家不敢想像的。

板块构造模型,包括与其相应的地幔对流、海底扩张以及大陆漂移,不仅可以解释地震、火山和山脉的格局,而且最终可以提供关于大陆和海洋的产生、地球气候在地质历史上的演化、影响地质演化的过程等的可能机理。到 20 世纪 60 年代这一分界性时代结束,美国宇航员首次登上月球,他们带回了与地球有很大不同的其他行星的岩石样品,这提供了认识其他星体的机会。这种新的视角将地球科学研究引入当代时期,科学家们将地球作为一个行星来认识,并将其结构、历史和特征与其他行星进行比较。

在 1980 年,另外一个突破来自 6500 万年以前地球被一个大的陨星撞击的证据,这次撞击可能导致了当时地球上恐龙和其他生物的灭绝。在随后的几年时间中,在地球上发现了一些来自火星的陨石。地球和月球上撞击坑研究的开展强调了这样一个观点,即科学家必须将地球放在其天文学范畴来进行认识,如生命演化可能会因一些不速之客——地外物体或来自太阳系其他行星的物体输入而中断。

在过去 20 多年,地球科学发生持续变化。技术方面的重大进步使得科学家可以在宏观和微观两个尺度上更好地对地球进行观测,同时对行星的持续探测和先进计算方面也有贡献。现在可以看到矿物里面并区分出单个的原子、测量极端温压条件下地球内部岩石的性质、实时观测大陆漂移和山脉隆升、理解有机体如何进化以及有机体如何基于它们的 DNA 与地球相互作用。也能从陨石获取新的信息,其可以告诉行星是如何形成的,甚至星体内部是如何运动变化的。在新工具的武装下,地球科学研究已转向更深度的基本问题——地球起源;生命起源;行星的结构与动力学;生命、气候与地球内部的联系以及未来地球将如何承载人类。

人类正是通过对这些重大问题的不断提出和解决推动了地球科学的发展。

3 21 世纪地球科学研究的十大科学问题

应美国能源部(DOE)、国家科学基金会(NSF)、美国地质调查局(USGS)和美国宇航局(NASA)等

的共同要求,美国国家研究理事会(NRC)成立了一个专门委员会——固体地球科学重大研究问题委员会(Committee on Grand Research Questions in the Solid-Earth Sciences),来独立地提出和探讨当今需要研究的地球科学重大问题。该委员会 2006 年 1 月 19~20 日在华盛顿召开了第一次会议,评估了相关报告和论文,并着手确定重大科学问题。

在研究过程中,固体地球科学重大研究问题委员会确定了构成“重大问题”的标准,即所选的重大问题需要至少符合以下 3 条准则中的 2 条:跨越地质学和行星科学各自学科领域的界限;涉及永恒性的问题(如地球和生命起源);与对人类福祉具有重要影响的现象存在联系。委员会挑选了涵盖各种空间和时间尺度的问题,历时 2 年多,先后召开了 4 次会议对相关问题进行了遴选,并在地质学界广泛征求意见,最后确定了固体地球科学的 10 个重大研究问题。这些研究问题可以归为四大类主题:

“起源”——地球与太阳系其他行星的起源,地球的早期历史,生命起源;“运行”——地球内部的运行与地表的现状,包括地球的物质特性及其对地球过程的基础作用;地表环境的“可居住性”——气候与气候变化,地球—生命相互作用;“地质灾害与地球资源”——地震、火山,以及与地球内、地球上的水和其它流体相关的现代环境问题。下面分别对这 10 个重大科学问题进行介绍。

3.1 地球和其他行星的起源

太阳系具有庞大的几何形态,拥有一系列不同类型的行星和卫星,如气体行星:木星、土星、天王星和海王星;岩石行星:水星、金星、地球及火星等。几个世纪以来,人们一直在研究下列问题:行星如何在恒星周围形成?太阳系行星如何形成?有关地球起源的陨星证据都说明了什么?地球的化学组成是什么?月球是否由陨星撞击而成?

现在,很多证据可以提供太阳系及行星形成的关键信息,其中非常重要的就是模拟研究。越来越多的以强大望远镜进行的天文观测,以及对小行星、彗星和其他途经太空船行星的研究为恒星和行星的形成模型加入了新的维度。地球化学研究和天文观测的交叉变得越来越多:质谱方法的改进、陨石同位素成分的新资料正在推动地球和陨石标准组成模型的改进,对陨石中的前太阳系阶段粒子的研究使人们对恒星演化及核合成的认识越来越清晰。先进的计算能力则使科学家们能够对星云盘的演化、星子与行星胎的碰撞后果、原行星体内部过程等进行更

精确的模拟。

但是,人类对地球组成成分的了解还不够详细,其中仍然存在一些重要问题:地球如何获得挥发性成分?这些成分现在还有多少?地球的难熔元素是否与陨星完全一样?地球内部生热元素的绝对浓度是多少?对于太阳系而言,需要更清楚地认识:太阳系最初数百万年里的行星形成过程,太阳系后期事件(如重大撞击)对行星的影响,早期太阳系过程对行星化学成分和大小的影响,各种形式同位素异质性的起源。未来,只有以望远镜、空间飞行器、敏感的分析设备对太阳系的其他星体和太阳系外天体作进一步的观测,人类才能更深入地了解地球和太阳系的起源。

3.2 地球“黑暗时期”(地球诞生后的最初 5 亿年)的演化历史

科学家们普遍认为,在地球的形成过程中,一颗火星大小的行星与地球发生了碰撞,撞击出一大块星云碎片,其后形成了地球的卫星即月球,同时在碰撞过程中产生了巨大的热量致使整个地球发生了熔融。从地球的诞生初期到其演化到今天人们所看到的状态,这些熔融岩究竟如何演化呢?这其中涉及一系列问题,如地球向其目前环境的过渡如何发生?地球如何形成海洋与大气?地球的金属核是在何时、如何形成的?最早地壳如何形成,其基本组成物质是什么?

地球诞生后的第一个 5 亿年被称作“冥古宙(Hadean Eon)”,这是目前人们缺少认识的一个关键时期(缺乏岩石样品),它对理解行星地球的大气、海洋、不同地核层、地幔层及外部地壳的发展、演化至关重要。基于对行星形成、内部过程、物质特性及气候的认识,科学家们建立了冥古宙地球模型。理解冥古宙气候的关键在于对大气过程的认识,尽管现代地球的大气模型已相当先进,但是人类对不同类型行星大气的认识仍处于初步阶段。

当前,人们改善冥古宙认识的希望出现了新的机遇。对古老锆石及其矿物包裹体的同位素和化学成分的精密测量不断发现新信息;对月球、火星、金星、木星和土星的卫星的观测为早期地球、早期太阳系的演化研究打开了新的窗口;陨星和地球岩石的比较则产生了更好的早期地球内部过程模型,包括金属核的形成,地球内部气体物质的出现与消失,地壳和地幔的演化。未来,更多的古代岩石和矿物样品将被发现,地质材料微分析能力将大大提高,同位素测量将更精确,更多的航天器将被发射。

3.3 生命的起源

目前,生命起源仍然是科学史上最令人好奇、最难、也是最持久的问题之一。因为太阳系中的生命形成于数十亿年以前,所以一些有关生命起源的最基本问题属于地质学范畴。有关生命起源的历史记录非常少,因此通常以理论和实验的方法进行研究。长期以来,科学家们所进行的研究活动主要涉及:达尔文的从上而下(Top-down)与从下而上(Bottom-up)模式,实验室内的生命创造,生命出现的时间、地点,生命与非生命的区别,地球之外存在生命的可能性。

在达尔文的《物种起源》(The Origin of Species)中有这样的假设:新物种出现于现有物种的向前演进过程中,也就是说形成生命的基础物质就是生命。但是,不知何故,不知何处,生命之树却开始在无生命的土壤上生长。有关生命起源以及最早生命形成地点、时间和形式的现有唯一证据来自于对岩石和矿物质的地质调查研究。当生命首次在地球上出现时,地球表面的环境可能与现在差别很大,因此准确弄清适合早期生命演化的地球物理环境和化学条件是当前研究中的一项重大挑战。科学家们也曾试图在实验室内从火花和气体中创造生命,研究地球早期环境下生命的第一次形成过程,但是无论如何限制条件,地球早期环境仍然难以捉摸。

在以后,当有机化学合成和分子生物学继续为生命起源的探索提供实验依据时,地球科学家们将更多地在实验室内进行特殊条件下实验;地层学家、古生物学家、生物地球化学家、地球年代学家将对生命起源的时间及早期有机体的代谢特点做出更多的界定;研究地壳分化和低温反应的地球化学家将改善对早期地球氧化还原条件、风化作用及金属丰度的认识;建模人员将利用新数据提出更多更完备的假说;现在探索火星和其他星体的行星科学家将更多地关注其他行星的环境和生物演化。

3.4 地球内部运动及其对地表的影响

随行星形成时间的增加,行星逐渐冷却,这使其内部过程、大气和地表过程也进入逐渐变化的状态。地球内部的演化在整体上控制着行星的演化,地球内部过程的变化表现(如山脉和火山)对地表和大气特征有重要影响。迄今为止,研究人员所探讨的问题主要包括:地幔对流与地球热演化的关系,对流和热传递的地幔柱证据,对流是否通过整个地幔或地层发生,地球内核的形成时间,地球磁场如何随时间演化,地幔对流的化学作用。

由于地球内部环境限制,无法进行直接研究。一个多世纪以来,对地表进行的地震波、地磁及重力测量改善了人们对地球内部的认识:地幔和地核处于不断的对流状态,热量从行星内部传递到表面的最基本方式是行星广泛存在的固态和液态对流。地核对流产生地球磁场,其可能对地表状况产生了重要影响;地幔对流则是火山作用、海底扩张、造山运动以及地表和地球深部之间物质交换(如水和碳)的原因。

虽然这些认识在不断进步,但现在科学家仍不能精确描述这些运动的当前状态,也无法计算出它们与过去的不同。人类对地核、地磁、地幔、地表间关系的研究,对地球不同于其它行星的原因,以及地球将可能发生的变化的探索,才刚刚开始。尽管已经有了地幔和地核对流的先进模型,地球化学和同位素测量也越来越精确,但对现有观测资料的解释仍存在重要矛盾,特别是对流模式,地幔柱的数量和起源。另外,在地球岩浆和地球化学历史及它们与地表状况关系的诸多方面,还没有形成任何共识;对俯冲带运动,板块如何响应地幔对流系统的能量等问题的认识还处于朦胧状态。

3.5 地球板块构造与大陆

地球最外层拥有处于相对运动状态的刚性板块,对地球这一特征的描述——板块构造学说,出现于 40 多年前,它提供了很多突破性的见解。现在,人们已经知道构造板块的运动及板块边界的相互作用是地震、火山爆发、山脉形成及大陆在地表缓慢漂移的原动力。如今,板块构造学说也已经相当的成熟和完善,但是,科学家仍想知道地球为何首先要有板块构造,以及板块构造与地球其他独特特征——丰富的水、大陆、海洋和生命等的联系有多么密切。如果地球仅有上述这些特征中的一种而没有其它特征,这是否可能呢?科学家们无从知道,他们也无法得知这些特征相互之间如何联系。进一步的研究需要对现有模型进行改进,对现代板块边界进行研究,并与其他行星进行对比。

地球科学的一个主要焦点是解释大陆的特征,大陆地壳的持久存在所展现出的问题如同板块构造一样,都是非常基础性的问题。大陆地壳使地球对于非海洋生命而言具有可居住性,并通过其表面的风化作用扮演着调节地球气候的角色。但是,科学家们仍然不清楚大陆形成的初始时间、大陆如何能存在数十亿年,或者准确地说大陆是如何演化到目前状态的。大陆的起源可归因于板块构造的存

在,特别是俯冲带。大陆地壳的组成中富含硅,这说明它的形成不可能与岩浆形成洋壳的简单过程相同。近年来,地幔柱对大陆形成的作用和地幔根在大陆最古老部分下方的产生,引起了越来越多的特别关注。

新的数据和观测资料表明,气候和侵蚀作用在山脉的形成及定型中扮演着重要的角色,因而也是大陆地壳形成和被破坏的基本因素。现在,这些研究正促使人们开始定量预测大陆下地壳及上地幔岩石的强度及变形特性等因素对侵蚀率的影响。

3.6 地球的物质特性与地球过程的控制

地球上岩石和矿物形成于地质作用(熔化、喷发、风化、剥蚀、变形和变质等)过程并受其改造。因此,对岩石记录的秘密的破解始于科学家们对大规模地质过程的了解。构成地球的矿物的基本物理和化学属性是了解这些问题的关键。地球内部的高压和高温、地球及其结构的巨大体积、地质时间的超长范围,以及地球组成物质及其性质的巨大差异,所有这一切都对地球研究提出特殊挑战。地球科学家需要回答的问题包括:行星内部是由什么矿物构成的?固体地球存在多少水?矿物和流体是如何反应的?人类可以预测大范围、多规模以及非常缓慢的地球作用过程吗?

对地球内部如何运动的了解要依靠岩石和矿物的属性知识。基于先进的放射源(如同步加速器、中子和激光设备)和先进的计算技术提供的新的分析工具,目前的地球岩石和矿物研究即将迎来新的突破。构成地球物质的绝大部分基本物理和化学属性都源于其在原子水平所表现出的结构和过程。新的分析工具将允许科学家们对这些小尺度问题进行直接的研究和模拟,缩小量子力学和显微结构的差距,铺就人类对更长距离尺度行星过程研究达到新水平的道路。同时,围绕天然纳米粒子、微生物对化学过程调解的一些新研究领域将得到发展。

地球物质复杂的化学组成以及行星内部的高温 and 高压环境,对了解地球过程提出了挑战。由于一些影响行星演化的重要过程发生得非常缓慢,地质过程的长时间尺度也造成复杂性。另外,由于某些变化可能是由一些在实验室时间尺度不重要甚至不宜察觉的因素引起,因而不能对其在实验室内进行模拟。大范围的物理特征、长时间尺度以及多相互作用尺度是地球科学研究存在的主要挑战,只有通过跨学科的努力才能在这些方面取得进展。

3.7 气候变化的原因与幅度

虽然在过去 1 万年或与之相当长的时间,一个地球气候保持相对稳定的非寻常时期,人类文明得到发展,但科学家也从地质证据获知在数百年或甚至数十年的短周期内发生的重大变化,可以使人类在全世界的统治中断。此外,自从工业时代开始以来,全球平均地球表面温度升高。工业排放的 CO_2 和其他温室气体即使不是造成地表温度升高的全部原因,但至少也要承担部分责任,这点已得到科学家们的广泛共识。全球变暖的潜在严重后果,涉及从海岸带人口稠密区的洪水到海洋酸化,以及热带疾病向极区的蔓延,强烈要求明确人类活动对全球变暖造成的影响有多大,以及人类对全球变暖可以做什么。地球科学的一个重要任务就是要回答上述这 2 个问题。此外地球科学需要回答的问题还有:什么过程控制地球气候变化?为什么地球气候会保持在友好的范围?什么原因引起地球地质时期异常暖和冷期?突发气候变化的触发因素是什么?人类可以确定地球过去 CO_2 的历史吗?

地质记录告诉我们,地球的气候经常被改变,但是值得注意的是在过去 35 ~ 40 亿年间地球表面温度保持在一个适合生命形成和演化的范围内。地球具有这种相对温和气候的主要原因被认为是火山喷发将 CO_2 排放到大气中,而地表岩石的风化作用又使大气中的 CO_2 减少,还有一些次要的影响因素,诸如漂移大陆的位置、海洋环流的模式、地球自转轴和绕日轨道间的方位以及太阳的发光度等。另外化学和生物的影响也可能是比较重要的,如大气中氧化态和其他形态温室气体的浓度。地球上无大范围生命存在的时间很少,仅发生在与当前温度相比地球相当温暖(地表完全没有冰),或地球又极端冷(地表完全被冰覆盖)的时期。

目前,大气中的温室气体含量在快速增加。大气中温室气体含量是决定短期地质时期气候的最重要因素,可以用模型来预测今后几十年和几个世纪的气候变化情况。而对于较长的地质历史时期来说,大气中温室气体的含量受自然地质作用过程控制,而且其他地质和自然过程也对此有影响。人类对这些因素对地球自然气候状态的贡献已有很好的定性理解,但仍然缺乏一个全面的模型来评估过去的气候变化或预测遥远未来的气候变化。对地球气候和气候历史的更准确理解,需要有更好的气候模型,该模型需要考虑影响气候旋回的火山和风化作用要素,更定量描述侵蚀及其与风化作用关系,并结

合生物圈和其他因素的加入。

3.8 生命—地球的相互作用与影响

很显然地球表面环境已经被大规模的地质变化过程所改变,但其也不断地被生命活动所广泛影响。地球的地质演化和罕见的灾难性事件,如陨石撞击,已显然影响了生命的进化。但即使可以精确描述绝灭和主要的重大进化事件,我们仍不能筛选出具体原因。地球表面环境究竟在多大程度上受地质过程所影响而不是因为生物过程?生命在可居住性的地表存在多长时间?哪种环境条件该为物种绝灭或生物形式和功能的改变负责?地球大气层的组成,尤其是高浓度的氧气,是一个缘于生命存在的重大结果,使更复杂生命的进化有了可能。到底其他的地质事件在何种程度上影响着生物的进化以及控制着生命对气候造成的影响,仍然是辩论的议题。

生命过程和地球过程本身也存在相互作用。侵蚀速率,气候和风化速率影响地球特定区域的可居住性,生态系统本身又反过来影响侵蚀率、气候和风化过程。当我们试图预测将来气候变化的影响、了解塑造地表形态和居住在其中的生命之间的相互关系的时候,就会认识到管理地表资源将成为一个非常严峻的挑战并且变得越来越重要。

了解地球上的生命和地质环境是如何相互作用以至于到达目前的状态是一个极大的智力挑战。正视这个挑战,将会帮助理解生命是如何应对当前环境变化的,但是地球科学家将不得不与生物学家和大气科学家发展新的研究和教育伙伴关系。寻找太阳系外行星生命是否成功将同样取决于是否已经更好地了解了咱们这个地球老家中生物对大气组成的影响。

3.9 地震、火山喷发等灾害及其后果的预测

由于对火山成因的更好认识和灵敏的新检测仪器,最近几十年地质学家对火山喷发的预测能力得到提高,但对地震的预测程度还较低。可是仍存在的复杂性的理论分歧问题使得地质学家的工作更加复杂,而居住在受地震威胁区人口数量的不断增加则使得开展地震预测更加紧迫。迫切需要科学家回答以下问题:可以预测地震发生的时间、地点和量级吗?预测短期地震可能吗?可以给出多少震前警告?缓慢地震的作用是什么?什么控制火山喷发的规模、频率和方式?什么样的火山喷发可以被预测?

在有关地震预测方面地球科学家已经学到了很多。板块构造理论为科学家理解大多数地震发生的地点提供了一个框架,同时也限定了复杂断层系统

的长期滑动速率。但是,就预测单个地震发生时间来说,科学家需要对控制断层破裂启动和终止因素进行更深入地了解。在地震、大地测量和地质方面新的观测能力为科学家继续提供新的洞察地震行为的方式,而且在地震科学领域的新发现也持续快速增长。对于地面运动预测而言,高性能计算为地震强地面运动的物理模拟提供了广阔前景。对于一切形式的地震预报,最重要的是要找到合适的办法来验证新技术的有效性。

技术进步,尤其是用于地下活动过程监测的实时地震、电磁和大地测量探测仪器的发展,同样也促进了火山活动研究。更好地理解火山活动需要将这些地球物理观测与火山结构实地研究和火山物质实验室研究结合起来。火山研究的最终目标是绘制一幅清晰的岩浆运动图像:从岩浆位于上地幔的源头,到其临时存储的地壳,最终到其喷发的地表。灵敏的新的地球物理和地球化学技术提升了科学家跟踪岩浆运动的能力,而对经过抬升侵蚀的岩浆层和补给系统的野外研究为如何解释这一信息提供了线索。为了提高火山易发地区不断增加的人口安全,需要提高人类对火山喷发的基本认识和加强公共教育,以及进行更好地规划以减少人类面对火山喷发的脆弱性。

3.10 地球内外流体运动对人类环境的影响

地质科学历来就与矿物、石油、天然气、地热水和地下水等自然资源的评价和发现密切相关。最近,地质学在了解排放到环境中的废弃化合物和其他物质的命运方面发挥了重要的作用。在未来,一些废弃化合物及其副产品,如 CO_2 和来自核电厂的放射性元素,可能会被人类有意封存在地层中。地质学也关注侵蚀和构造作用对地形演化的影响,并且地质学在评价人类活动对河流及其流域盆地的物理特征和这些物理特征间关系、洪水和滑坡风险以及生态系统健康等影响方面的兴趣也在不断增加。未来人类对资源和环境影响这两类社会问题关注的紧迫性可能会增加,因此需要持续努力来改善获取地下资源,维持或管理现有的地上和地下资源的能力,并尽量减少或减轻人类活动的不良后果。

人类管理自然资源、安全处置废弃物以及保持环境的能力主要取决于我们对地表和地下流体的了解。尤其是,我们必须更好地领会流体如何流动,如何运送物资和热量,以及如何与周围环境相互作用并对其改造。许多重要流体都源于水这种最丰富和重要的地球流体,包括蒸汽、碳氢化合物、液态和

气态的 CO_2 、其他有机液体和多相流体(气体和液体、不相溶液体、气体和不相溶液体)。对地下过程而言,我们需要了解这些流体在不同岩石和土壤层中是如何分布的,以及它们如何受与宿主地层的化学和热交换的影响。在地球表面,我们关注江河中的水流,河流的侵蚀和沉积如何改变地形,以及人类活动和气候变化如何影响河流和自然景观的演变。

通过几十年的研究,人类获得了大量的有关流体流动和运输的知识,但对这方面知识的应用还受增加的人口、资源需求,以及人类自己作为一个成功的物种所产生环境后果的制约。为了迎接这些行星尺度的挑战,要求人类在对地球内外部流体的了解、利用、行踪和影响监测等方面的能力有明显提升。新的可以阐明发生在矿物表面微观尺度上变化的实验设备,新的地球化学和地球物理场技术,以及对水和其他流体是如何塑造我们的星球提供了前所未有的视角的机载和星载传感器,可以应对这些挑战。

研究的最终目标是建立可以模拟自然流体体系,并能预测到久远的将来流体将如何表现和变化的强有力的数学模型。只有建立和熟练应用这些模型,人类才能够对支撑人类和地球上所有生命的土地和资源的未来做出明智的决策。

4 结 语

地球科学是认识行星地球的形成、演化规律与人类利用、管理地球以服务于人类进步的科学知识体系。地球科学的发展既是人类认识自身生存的地球环境的发展和演化规律的需要,也是人类解决自身生存和社会发展对各种地球资源需求的需要,更是人类调适自身发展与行星地球环境乃至地球系统相互作用与和谐适应过程的需要。开展地球科学发展的重大科学问题研究,对把握地球科学的学科发展方向,促进地球科学基础研究和应用基础研究的深入发展具有重要意义。

从地球科学过去、现在的发展可以看出,回答地球和生命的起源、行星的结构和动力学、气候系统变化、生命与地球相互作用、地震和火山喷发等地质灾害及其环境影响等深刻的地球科学根本问题,仍将是 21 世纪国际地球科学研究的主要方向。我国的地球科学研究,应当在把握国际上地球科学基础研究的重大科学问题的基础上,结合国家经济社会发展对地球科学创新发展的战略需求,凝炼地球科学研究的基础科学和应用科学问题,制定地球科学发展的战略和路径,布局地球科学研究机构,推动我国

地球科学在国际地球科学研究与发展中做出基础性、前瞻性、应用性、系统性的重大贡献。

参考文献 (References):

- [1] NSF Directorate For Geosciences NSF Geosciences Beyond 2000: Understanding and Predicting Earth's Environment and Habitability[R]. Washington DC, 2000.
- [2] NASA. Earth System Science[R]. Washington DC: NASA, 1988.
- [3] NASA. Earth Science Enterprise (ESE) Application Strategy for 2002-2012[R]. Washington DC: NASA, 2002.
- [4] BGS/NERC. Foundations for a Sustainable Future: A New Strategy for the British Geological Survey[R]. London: BGS, 1999.
- [5] Zhang Zhiqiang, An Peijun, translate. An Earth systems science agency[J]. *Advances in Earth Science*, 2008, 23 (10): 1 111-1 112. [张志强, 安培俊译. 科学与管理: 地球系统科学机构 [J]. 地球科学进展, 2008, 23 (10): 1 111-1 112.]
- [6] Earth Sciences NSFC. Earth Science Development Strategy in the "11th Five-Year Plan" [M]. Beijing: China Meteorological Press, 2006. [国家自然科学基金委地球科学部. 地球科学“十一五”发展战略 [M]. 北京: 气象出版社, 2006.]
- [7] Huang Dingcheng, Lin Hai, Zhang Zhiqiang. Strategic Study on Earth System Science Development[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2005. [黄鼎成, 林海, 张志强. 地球系统科学发展战略研究 [M]. 北京: 气象出版社, 2005.]
- [8] Strategic Study Group on China's Earth Science Development, CAS. Some Issues on Chinese Earth Sciences Development Strategy[M]. Beijing: Science Press, 1998. [中科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 [M]. 北京: 科学出版社, 1998.]
- [9] Strategic Study Group on China's Earth Science Development, CAS. Earth Science: A Review and Prospect at the Turn of the Century[M]. Jinan: Shandong Education Press, 2002. [中国科学院地学部中国地球科学发展战略研究组. 地球学科: 世纪之交的回顾与展望 [M]. 济南: 山东教育出版社, 2002.]
- [10] Strategic Study Group on Earth Science Development, Chinese Academy of Sciences. Strategic Report: China's Earth Science Development for 21st Century [M]. Beijing: Science Press, 2008. [中国科学院地学部地球科学发展战略研究组. 21 世纪中国地球科学发展战略报告 [M]. 北京: 科学出版社, 2008.]
- [11] Committee on Grand Research Questions in the Solid-Earth Sciences, National Research Council. Origin and Evolution of Earth: Research Questions for a Changing Planet[M]. Washington DC: National Academies Press, 2008.
- [12] Anon. Ten Questions Shaping 21st - Century Earth Science Identified [EB/OL]. <http://www.nationalacademies.org/onpinews/newsitem.aspx?RecordID=12161>
- [13] Zhang Zhiqiang. Analysis of the strategic plans of international geosciences, resources, environment and ecology[J]. *Advances in Earth Science*, 2003, 18 (6): 960-973. [张志强. 国际地球科学与资源环境科学发展战略分析 [J]. 地球科学进展, 2003, 18 (6): 960-973.]

Grand Research Questions of the Earth Sciences for 21 Century

ZHENG Junwei^{1,2}, ZHANG Zhiqiang¹, ZHAO Jidong¹

(1. *Scientific Information Center for Resources and Environment, Lanzhou Branch of the National Science Library, CAS, Lanzhou 730000, China*; 2. *Research Institute of Petroleum Exploration & Development, PetroChina, Beijing 100083, China*)

Abstract: There are many grand and basic research questions in earth sciences. The answers to these questions could profoundly affect our understanding of the planet on which we live, and could strongly promote the development of basic research in earth sciences. The 10 major scientific problems were identified in "Origin and Evolution of Earth: Research Questions for a Changing Planet" by US National Research Council in March, 2008. These questions are: How did Earth and other planets form? What happened during Earth's "dark age" (the first 500 million years)? How did life begin? How does Earth's interior work, and how does it affect the surface? Why does Earth have plate tectonics and continents? How are Earth processes controlled by material properties? What causes climate to change—and how much can it change? How has life shaped Earth—and how has Earth shaped life? Can earthquakes, volcanic eruptions, and their consequences be predicted? How do fluid flow and transport affect the human environment? These scientific issues could have important guiding value to our country for earth sciences.

Key words: Earth sciences; Solid-Earth sciences; Grand research questions; National Research Council

《地球科学进展》杂志“发展战略论坛”专栏继续征集论文的公告

《地球科学进展》杂志自 2004 年第 4 期起开辟“发展战略论坛”专栏以来,邀请各领域的专家学者,就我国学科发展方向发表自己的见解,主要刊登地球科学(包括地理学、地质学、地球化学、地球物理、空间物理、大气科学和海洋科学等分支学科)、地球系统科学、全球变化科学、环境科学和生态学的发展战略研究成果,包括学科现状分析、发展趋势、中长期发展战略目标、任务、重点发展方向、“十一五”期间优先发展领域以及政策措施,战略研究的建议和看法,国际相关领域的发展战略研究介绍等类文章 33 篇。目前正是各学科执行“十一五”计划期间,为了保证“十一五”计划的顺利执行,《地球科学进展》将继续刊登此未曾刊发过的学科发展战略报告,以供科学研究人员和相关方面的管理者参阅。稿件要求观点明确,文字简捷,论据充足,体例不作统一规定,根据内容可长可短,短文 1 000~2 000 字,长则不要超过 10 000 字,并注明“发展战略论坛”征文。

本专栏旨在宣传和交流国家中长期科学和技术发展规划战略研究和各部门、各行业学科发展战略研究成果,使其成果及时提供给广大读者共享,希望能对“十一五”期间乃至 21 世纪头 20 年我国地球科学及其相关领域的发展方向起到一定的促进作用。为此,向广大读者、作者继续征集这方面的稿件,来稿注意事项可参照《地球科学进展》投稿须知,经审定符合要求的,我们将会尽快刊出,感谢广大读者、作者对我们工作的支持和帮助。

专栏联系人:林海教授 E-mail: linhai@mail.nsf.gov.cn/linh@igsrr.ac.cn