

近、现代地壳演化思想的历史回顾

段 联 合

(长安大学小寨校区人文社科部, 西安 710061)

关键词: 地壳演化思想 地质学史 哲学总结

摘 要: 地壳演化是地质学的纲领性问题。本文通过对近、现代地壳演化思想的历史回顾, 得出许多有现实意义的哲学结论。

[中图分类号]N09 [文献标识码]A [文章编号]1000-763(2001)06-0060-07

无疑,“地壳(岩石圈)处于永恒的演化之中”,这一观念在今天是普遍被接受的,然而这一认识的形成却经历了一个极其曲折的历史过程。如果把十八世纪中叶当作经典地质学的肇始,那么,在从此至今的这 250 年间,人们在“地壳(岩石圈)是如何演化的”这一地质学的纲领性问题上,表现出四种观念形态,经历了三次观念转变。本文拟就这一问题加以总括性的评论。

一、静态地壳观阶段(1750 士~1830 士)

这一时期,人们关于地壳的知识主要局限于显生宙的沉积盖层,主要任务是搜集基本地质学事实;对岩石、矿物进行肉眼观察分类、成因分类(水成或火成);建立生物地层系统以及确立经验地质学研究方法。可以看出,在这一时期静态(机械)的自然观始终束缚着人们的认识,同时宗教神学仍然是制约地壳演化思想发展的一道无形樊篱。

布丰(G. L. de Buffon, 1707~1788)是第一个用实验和数学方法解决地球演化问题的人,他用灼热铁球冷却方法,求得了一个与宗教教义(6000 年)相悖的 74800 年的地球年龄,并把地球演化划分为 7 个阶段。这本是一个对机械自然观及宗教神学的有意义突破,然而迫于教会的淫威,他却不得不违心地附和宗教循环论中的“6 个宇宙天”,把 74800 年划分为 6 个纪(Epoch)。尽管这样,巴黎大学还是宣布在他的著作中有 14 处“违背了宗教信条”,使得他后来不得不放弃自己的学说^[1]。

魏纳(Werner A G, 1749~1817)是第一个把地质知识系统化的学者,他建立了一门“地球构成学”(Geognosy),旨在研究矿物的性质、用途和地理分布,而不大关心矿物成因和形成过程^[2]。在他看来,地壳是僵硬不动的,并且存在一个一成不变的、普遍适用的地层序列——

[收稿日期]1999 年 10 月

[作者简介]段联合(1957-)男,理学硕士,西安长安大学人文社科部副教授。

“万有建造”(Universal Formations)^[3]，——这与牛顿的“自然法则”何其相似！他把地表变化的原因归于不可预测的某种超自然的力量^[4]。他的学生詹姆森(Jamson R, 1774 ~ 1854)则更加露骨地宣扬神创论，认为圣经条文是解释自然的最终根据^[5]。

由郝顿(Hutton J, 1727/1797)提出、由莱伊尔(Lyell C, 1797 ~ 1875)系统化了的“均变论”(Uniformitarianism)或“渐变论”(Gradualism)实际上把地球看作一个无始无终的实体^[6]，地质过程“没有开端的迹象，也没有终结的前景”^[7]。在莱氏看来，变化是存在的，但却极其缓慢，现今存在和发生的，必定在无限的地质史中永恒地存在^[8]。现今的变化规则在地质史中永远适用(The present is the key to the past)。正如恩格斯批评莱伊尔讲的，“地球的冷却对他来说是不存在的，地球不是按照一定的方向发展着”^[9, 10]。他们所犯的错误是混淆了方法论上的均变与本体论上的均变^[11]，把现实主义原则的适应范围夸大到不适当的程度。

居维叶(Cuvier D C, 1769 ~ 1832)的灾变论(Catastrophism)完全是科学事实与观念冲突的产物。一方面，他通过实际观察看到了生物化石在各地层中的差异性，甚至总结了一些在时间上的变化规律，另一方面，“物种不变”的自然观和根深蒂固的宗教情感却不允许他做出一个合乎理性的解释，于是只能借助于上帝之手。

二、探究地壳、岩矿成因阶段(1850 ± ~ 1910 ±)

这一时期，人们关于地壳演化知识的增长和观念变化主要有如下五个方面：

①经过阿尔伯特(Alberti)、席基威克(Sedgwick)、麦其生(Murchison)等人的努力，建立了较完整的显生宙地层表。这对以后的地质学发展具有奠基性意义；

②从波蒙(E. de. Beaumont)的《论山系》(1852)到徐士(Suess E)的《地球面貌》(1883)，反映了地质学开始从区域地层、全球山脉走向及走向变化、构造形态、排布规律等的对比分析上思考山脉形成机理和地壳演化问题。这反映出区域地层、古生物、岩相古地理等地质资料的日益丰富，也反映出全球地貌研究的迅速发展；

③槽台学说的创立。由美国人霍尔(Hall J, 1859)和丹纳(Dana J D, 1873)创立的，后经欧洲学者奥格(Haügl)、寇伯(Kober L)、徐士等人完善化了的地槽-地台理论，第一次详尽地讨论了地表狭长的活动带与宽阔的稳定地块、盆地与山脉、洋壳与陆壳之间的生因关系。首次建立了一个基于可靠经验事实之上的地壳演化模式。

④以尼科尔(Nicol W, 1829)偏光显微镜的发明的肇始，后经索尔比(Solby H C)、齐尔克尔(Zirkel F)、罗森布什(Rosenbusch H)等几代师生薪火相传的努力，到60年代末建立了一套完整的岩矿显微结构研究的方法和理论。1890年，俄国的费罗多夫(Федоров Е С)又发明了双环测角器(费氏台)。届时，人们便超越了传统的肉眼观察方法，能够对矿物的显微结构、结晶规律、理化性质等做出可靠的说明。尤其重要的是70年代以后，由于地球化学的兴起，使得人们能够把显微方法与化学分析相结合对岩石学进行有效分类和成因探讨。由美国岩石学家克鲁斯(Cross)等创立的CIPW岩石分类体系(1905, 根据矿物共生规律，把化学分析折算成一系列标准矿物并依此进行分类的方法)是一个典型的例子。

⑤基于岩矿分析化学、地球化学的迅速发展，50年代以后出现了丰富的岩石、矿床、矿物的成因理论。例如德国的鲁特(Roth, 1869)的火成岩同源岩浆分异说；俄国列文生-列星格(Левинсон-Лессинг)与美国的戴利(Daly)的低共熔同化分异假说，德国的尚德伯格(Sandberger)关于矿脉成因的侧分泌说等。此外，法国的一批学者如达罗切尔(Dulocher, 1857)等还提出了

花岗岩生成理论,提出了岩石旋回(原生沉积-变质-花岗岩)等假说,这反映出人们已注意到三大岩类的生因及转化关系。

这一时期存在问题可归纳如下几点:

①由于对壳下放射性元素的存在及其功能的无知,人们对地内热状态缺乏准确的知识。总体上仍停留在布丰的“单纯冷却”模式上,对地壳运动的能量来源尚处于直观、模糊的猜测阶段。有两个显著的表现:a 整个这一时期是以冷缩说占主导地位的地壳演化模式,把地壳收缩的水平作用力当作山脉形成的主因;b 物理学家(以 Thoms William 为代表)仍坚持以热球冷却法来估算地球年龄。

②由于没有可靠的同位素测龄方法,对于山脉、岩石等地质体的年龄、同时性、序次性等不能给出准确的答案,因而限制了对地质客体的历史演化、生因关系及事件的持续久暂等作有效讨论。

③在地壳演化模式上,地槽学说无疑是一个里程碑。但该学说从一开始就陷于“是此非彼”的思维模式,即“非槽即台,非台即槽”,递进演化思想尚不具备。

④在海陆位置及其关系上固定论占据统治地位。

此外,必须指出,达尔文进化论(1859)的提出是一个重大的地质学事件。它对于整个地质学的发展具有观念变革的意义。如果说以前自然科学家的信条是“自然的固定秩序”,那么从这时开始,自然科学家的格言就变成了“进化”。人类学、文化史、比较生态学,甚至比较宗教学都开始积极地寻找与生物进化论的接合部位^[2]。但是,概念的普遍使用并不等于对概念的深刻理解,尤其在地壳演化这一地质学纲领性问题上,递进演化的观念直至 20 世纪 60 年代才真正树立起来。

三、递进演化的地壳观形成阶段(1910 士~1960 士)

这一时期地壳演化知识的主要进展如下:

(1)活动论的兴起。新世纪活动论的兴起有两个重要原因。一是区域地层、古生物、岩相古地理、宏观构造形态等地质资料的大量积累,使得人们能从横向比较上悟出各大陆在地史上的几何关系。徐士(1885)的活动论思想倾向就是以此为为基础的,而泰勒(F. B. Taylor)的活动论(1910)则是徐士思想的继承和发展。后来的李四光思想(1926)又是对泰勒思想的完善化。由于物理学革命对放射性元素蜕变释热功能的揭示(居里夫妇, 1903)及其在地壳岩石中的广泛分布这一事实的发现,使得人们相信这足以补偿甚至超过地壳散失的总热量(Rayleith, 1906)。这无疑为地壳运动找到了巨大的动力源泉。这一事实不仅和地球冷缩说产生明显的冲突(如按冷缩说单是形成第三纪褶皱,地球就需要整体降温 2400℃,没有足够的补偿,漫长地史中的构造运动就难以解释),而且只有在地球膨胀时表壳才会有一个相互分离、飘移的几何空间。所以这一条是魏格纳活动论的最重要依据。

顺便指出,魏格纳的活动论与泰勒-李四光活动论存在三点区别。一是前者关注的是诸大陆形态上的可拼接性,后者则从两极-赤道地质建造的规律性变化上得到启示;二是前者以南美与非洲的古生物地层对比为基础,而后者则立足于全球构造形态的规则性和连贯性;三是前者把地球转动作为陆块分立的动力,而后者则强调地球自转速度的变化造就了全球构造系统。

(2)槽台学说的精致化。魏格纳活动论之所以在当时被视为标新立异甚至“轻率的空想”,

其主要原因有两方面,一是它只注意到各大陆壳体的运动学特征,而忽视了地球历史建造方面。这显得与根深蒂固的、有扎实基础的“槽台”说的对立太突出、尖锐^[14];二是与当时已知的“大西洋、印度洋下面许多地方仍是下沉的陆地”等重大事实不符^[15]。所以直到60年代以前,“槽台”理论仍占据着主导地位,并不断走向精致化。“槽台”学说在这一时期的主要进展有:

a. 对地槽空间结构的研究。例如史蒂勒(H. Stille, 1913-1940)把地槽分为“阿尔卑斯型”和“日耳曼型”。并在1936年将地槽分为正地槽、准地槽。别洛乌索夫(В. В. Вельусок, 1930)划出中央隆起、前缘拗陷、山间拗陷等。

b. 对地槽演化史的研究。典型的例子是史蒂勒(1940)提出的正地槽岩浆演化的四个阶段:先造山期(形成蛇绿岩);同造山期(硅铝壳成岩作用期);安山岩型火山作用期;后造山作用期(玄武岩喷发)。

c. 对地槽活动横向迁移的研究。如葛利普(A. W. Graban)对喜马拉雅山的研究;黄汲清(1931)对秦岭地槽迁移的研究。

d. 对造山作用全球同时性或准同时性、幕次性的讨论。如史蒂勒(1913—1940)、丁文江(1923)、黄汲清(1931—1945)的研究和讨论。

e. 对地槽演化与地壳深层分异联系起来进行研究。如别洛乌索夫指出地槽的发展伴随着地壳深部不断的物质分异,结果导致硅铝壳酸性组分不断增加^[16]。

(3)从“槽台”论到“动—静”递进转化观

“槽台”学说的问世,打破了僵死不变的地壳观,因而具有革命性意义。然而科学上的巨大进步往往成为巨大的羁绊。随着“槽台”理论的创立,人们便把“槽”与“台”看作地壳上两种最基本的构造单元和构造性质。活动的“槽”转变为稳定的“台”被当作地壳演化的固定模式和唯一的发展方向,地槽一旦演化为地台就永恒地停业下来。别洛乌索夫和沙特斯基(Н. С. Шатский)曾经认为,在全部地球史中,地台面积的扩大和地槽面积的缩小,乃是地壳发展的“一般规律”。而裴伟(А. В. Лейве)和西尼林(В. М. Сидин)则基于对前苏联和中国的研究,认为在先寒武纪存在一个“泛地台”^[17]。这两种观点都是传统“槽台”观念的衍生物。“泛地槽”说的错误在于假想地壳最终会走向永恒的宁静,而“泛地台”说的错误在于认为地壳在6亿年前已进入到近乎静止的状态,之后的演化只是微弱的活动。

到了1954年—1956年,哈茵(В. Е. Хаин)、别洛乌索夫、巴捕洛夫斯基(Е. В. Павловский)等先后注意到,中亚地区许多已经稳定了的地台在中生代以来又发生了强烈的构造运动。这种现象被称为地台“活化”,意指地槽在地台上的“复活”。别洛乌索夫开始觉悟到,这一发现说明,“地壳变为死亡”的观念是错误的。并指出地壳演化会有很多周期,我们不能把这些周期比作一个圆圈,而应比作一条螺旋曲线^[18]。

也许由于特殊的大地构造背景和历史,中国学者很快认识到中国地台的非稳定性。1956年,陈国达注意到华南的地台活化现象(后称之为“地洼区”)。同年黄汲清指出中国地台普遍具有不稳定性,提出“准地台”概念。黄陈二人的观点存在着观念上的分歧,由此展开了旷日持久的“黄陈论战”。今天看来,陈国达的地洼学说具有观念变革的意义,他清醒地意识到,地台不是地台演化的最终产物。地台的“活化”也决非地槽历史的简单重演,活化会导致一个内容新颖的构造层。而黄汲清的递进演化意识相对淡薄,当时他的提法是“多轮回”(1962年后改为“多旋回”)。综合当时一些批评者的意见,“准地台”概念和“多轮回”说存在两方面问题。一是“准地台”假定了一个终极的、理想的稳定地台存在,这实际上是“非台即槽”观念的反映,二是“多轮回”说把历次构造运动同等对待,否认了地壳“动—静”转化中的螺旋式递进

性^[19~21]。60年代以后,这一问题变得清楚了,从太古代开始,便出现了两种对立的构造单元“萌地槽”和“萌地台”,以后又有不同名称的活动与稳定二元构造单元同时存在。活动与稳定阶段不断交替,每一阶段都产生与以前性质迥异的地质体。

四、综合的、不可逆的地壳演化观形成(1960±~)

50年代—60年代初的海底三大发现(全球裂谷系、地热异常、地磁条带)与其说导致了活动论的复活不如说使得传统固定论(“槽台”说)遭到致命挑战。海底巨裂谷系的巨大错移、地磁极的多端变化都是固定论无法解释的。而地热流异常却极大地支持了霍姆斯(A. Holmes, 1928)的地幔对流假说,为大陆漂移说解决了地壳驱动力问题。可以说,海底三大发现对新旧两种地质理论具有判决性事实的意义。

板块构造理论(1962)的创立具有科学革命的意义。它不仅引起了地质学观念的变革,而且它给地质学带来了一个知识激增的时月。地质科学以广泛综合的方式迅速繁衍,新的方法、概念、理论大量涌现。标花宠草难以胜数,就地壳演化研究而论,以下几条是其梗概。

(1)观测、探测、测试、分析技术日新月异。新的测试、分析技术不断问世,朝着高灵敏度、高精度(≤ 10 微米)、快速的方向迅速发展,红外技术能用以观察化学反应动力学过程;地震、重、磁手段广泛用于探测地球圈层结构、壳下地体物性状态;航测遥感技术用于普查和综合评价;全球卫星定位系统(GPS)可有效测定板块位移速度和进行海洋钻探定位;通过对痕量元素及其同位素、稀土元素、Ra—Os系等的化学分析,能确定构造背景、物质来源、地壳成熟度、洋壳再循环、灾变事件等;同位素测年方法日益精细、多样化;高温、高压实验能模拟壳下、上地幔成岩成矿过程,对地壳演化机理和历史作出有效说明;新一代的计算机能处理复杂地质信息和进行地质绘图。

(2)研究对象在时、空两方面大大拓展。海洋是板块理论的发迹之地。60—70年代,为了寻求新的证据,地质学家们在包括红外、地中海、北冰洋在内的各海洋、洋域展开了广泛的工作,取得了大量的地形、地热、地磁、构造、岩石、同位素等资料。极大加深了人们对海洋地质的认识,并使得板块理论获得支配性地位。80年代,地质学把眼光转向大陆边缘。由于大陆地壳的高成熟度和演化记录的完整性,很快,地壳演化研究又向大陆内部转移。裂谷或裂谷系、造山带、盆地等成为新的热点;另一个拓展是深部地质研究,主要有大陆超深钻(如科拉半岛超深钻已达1.3万米)、深源地震、深部(超)高压、高温模拟、国际深大断面、大陆岩石圈四维填图等。空间上的第三个拓展是比较行星地质学的建立。从1961年阿波罗太空船在月球上取样开始,人类进入了太空时代。40年来,人们通过各种飞行器从太空取得了大量资料,包括月球、火星的照片、岩石样品等。通过对月岩、陨石的常量元素及微量元素(如Sr比值)、稀土元素、同位素年龄的对比分析,大大加深了人们对地球早期(星子原地体阶段)历史、不均一性及地体成熟度的认识。时间拓展主要表现在对前寒武地体、古老地盾、早期生命、早期大气圈、海洋化学岩等的多方位研究,初步勾勒出一幅地球早期演化的生动画面。

(3)关注地壳演化的多种因素。现在,人们不再把地壳看成一个孤立的壳体,而是把它置于一个复杂的地球物质系统甚至宇宙系统之中。当作一个与多种因素复杂相干的子系统。探讨地壳演化,不单考虑地壳本身的性质、地壳表层的海陆变化,而是同时考虑上地幔物源、温度、压力、重力、含矿热液、水份、生物、大气圈、天文事件以及时间效应等多种因素。如以水而论,水不仅是重要的外动力,而且能通过降低岩石熔点以影响深部地质过程;以含矿热液而论,

它不仅成岩成矿，而且可以长距离运移，起到润滑剂作用以改变地壳运动的动力学条件；以生物而论，地球上曾经存在的生命质量总和等于地球质量的 1000 倍。生命演化直接影响大气构成，进而影响地表温度、化学元素的循环和聚集^[23]；以天文事件而论，随着越来越多的灾变层位的发现，人们不再只是把地层、古生物的缺失看作是地质记录的不完整，而是归结于周期性的天文事件。地外物体撞击地球所造成的动力学(气化、爆炸、熔融、破碎等)及环境效应日益为人们所关注；以时间而论，漫长的地质时间保证了地质客体能以蠕变或晶格错移的方式发生大幅度的韧性剪切或构造置换，使得固体地壳能产生与流体相似的形变。长时间的、平稳的作用累积可以导致与骤变相同的效果。时间也帮助人们认识到地质作用的剧烈性与物理、化学的剧烈性之间的巨大差异。

(4)新理论、新概念大量涌现。随着研究领域的拓展、深度的加大、实践手段的进步，各个地质学科之间、各地质学科与其它基础科学和技术之间广泛地进行着杂交、嫁接。新的地壳演化理论、名词层出不穷，旧的概念又常常被赋予新的内涵。如太古代绿岩带、高级地体、三叉裂谷、A 型俯冲、拆离构造、薄皮构造、厚皮构造、推覆构造、韧性剪切、盆地演化、大陆动力学、地幔柱构造理论、新灾变论、新脉动说……。由于科学事实的迅猛积累，在活动论得到普遍支持的同时，又扩大了其遭受攻击的面积。人们已不满足于一种单一的理论解释，试图寻找一个更加完美的、新的系统性行星地球演化理论体系。

(5)国际合作日益加强。由于地壳(岩石圈)客体的巨大性、复杂性、横向不均一性，任何一个国家或地区都难以实施全面而深入的研究。共享技术设备、资料、人才、资金及地质客体已成为各国地质学家的共识。50 年代后期国际上开展的“地球物理年”活动、60 年代初期的“上地幔计划”、70 年代组织的“地球动力学计划”、80 年代的“国际岩石圈计划”等为各国地质学家提供了广泛的协作与竞争的舞台。与之同时，国际地科联组织的国际地质大会及其他学术会议为地质学家们提供了了解信息、交流思想的机会。

“板块革命”以来地壳演化观念的变化不仅由“固定论”转向“活动论”，而且还突出表现在“不可逆”的地壳演化观逐渐形成，主要有如下两点。

一是对地质条件历史性的认识。每一时代都有其特殊的地壳演化背景和条件，地史时期的地壳面貌具有一去不复返的性质。各时代的地质条件既有可比的一面又有不可比的一面。以板块运动而论，至少 10 亿年前缺乏现今意义上的大洋和洋壳，20 亿年前地球未形成整体性的软流圈和岩石圈^[29]。那时广泛存在的是陆间盆地，类似于秦岭宽坪群(2300Ma)蛇缘岩套与陆源碎屑岩的交替出现，便是明证。所以把板块理论无限外推便会遇到很大的困难。以地壳演化的温压条件而论，由于早期岩石圈较现在薄，上地幔物源浅，分异程度低，地球半径仅是现在的一半，这样形成类似于紫苏花岗岩、变粒岩的区域深变质作用就不需要 30—40km 的巨大深度，7.5—12.5km，即可满足要求。否则就会得出象“快速冷侵入、上升”这样令人难以置信的结论^[24]。

二是对地壳演化的结果和原因的相互转化的认识。地壳演化的产物反过来又作为地壳演化的条件，新的条件又导致新的产物……，如此不断递进。原始地球是一个炽热熔融球体，逐渐冷却导致了薄而不连续的陆壳产生，陆壳的产生改变了地壳演化的温压条件，减缓了地球释热速度；水圈的形成大大改变了地球外动力条件，沿深断裂的下渗作用可导致壳下岩石熔点的降低，并引起能量的积蓄和缓慢结晶；早期缺氧的大气圈层是生命出现的重要保证，而厌氧生物的出现又导致了大气圈 O₂ 含量的提高，进一步地又导致了喜氧生物的产生，而生命的产生对调整大气组成有重要意义，否则会因 CO₂ 的不断增殖，导致温室效应，以致地表水丧未殆尽，

这样就会产生一个类似于金星表面的面貌,往后的演化及板块运动就难以想象^[27],人类的活
动不再被认为一种自然力量,而是当作最强大的地质营力。人类活动对地壳物质迁移、生态面
貌、大气圈组成的变化等方面的作用日益受到广泛关注。

[参 考 文 献]

- [1] 王子贤,王恒礼:简明地质学史. 郑州:河南科学技术出版社,1985. 69.
- [2] 孙荣圭:地质科学史纲. 北京:北京大学出版社,1984. 54.
- [3] 孙荣圭:地质科学史纲. 北京:北京大学出版社,1984. 23.
- [4] 孙荣圭:地质科学史纲. 北京:北京大学出版社,1984. 316.
- [5] [日]小林英夫:地质学发展史. 北京:地质出版社,1983. 75~76, 169.
- [6] Hallam A. Great geological controversies. Oxford: Oxford University Press, 1983. 8.
- [7] 王子贤,王恒礼. 简明地质学史. 郑州:河南科学技术出版社,1985. 87.
- [8] 孙荣圭:地质科学史纲. 北京:北京大学出版社,1984. 322.
- [9] 恩格斯:反杜林论. 北京:人民出版社,1970. 134.
- [10] Greene M T. Geology in the nineteenth century. London: Cornell University Pr, 1982. 144~167.
- [11] 段联合,雷援朝,彭建兵:地质学中的时间问题. 自然辩证法研究,1997(7): 16.
- [12] Toulmin S. The discovery of time. Manchester: Lit. phil. Men. proc. 1962/1963. 121.
- [13] 孙荣圭:地质科学史纲. 北京:北京大学出版社,1984. 80~81.
- [14] [日]小林英夫:地质学发展史. 北京:地质出版社,1984. 316.
- [15] 燕东鲁:论地壳运动的本质. 地质论评,1958(1): 60.
- [16] 燕东鲁:论地壳运动的本质. 地质论评,1958(1): 59.
- [17] 孙荣圭:地质科学史纲. 北京:北京大学出版社,1984. 54.
- [18] B. B. 别洛乌索夫:地质构造和地壳发展问题. 地质学报,1953(4): 304~306.
- [19] 宇声:我国大地构造主要学说简介. 地质学报,1961(2): 212~217.
- [20] 黄汲清:黄汲清著作选集第三卷. 北京:地质出版社,1992. 142~150.
- [21] 陈国达:地洼区的特征和性质及其与所谓“淮地台”的比较. 地质学报,1960(2): 167~184.
- [22] 陈国达:地壳动静转化递进说——论地壳发展的一般规律. 地质学报,1959(3): 279~291.
- [23] 张昉:新自然观与人类文明. 现代科学的哲学探索(赵光武主编). 北京:北京大学出版社,1993. 306~318.
- [24] 国家自然科学基金委员会:地质科学——自然科学发展战略研究报告. 北京:科学出版社,1991. 44.
- [25] 渠天祥(译):地球膨胀及脉动说的发展与现状. 地质构造学,1998(2): 59~61.
- [26] 欧阳自远,王世杰:中国天体化学研究展望世纪之交矿物学岩石学地球化学的回顾与展望(欧阳自远主编). 北京:原子能出版社,1998. 177.
- [27] 张昉:新自然观与人类文明. 现代科学的哲学探索(赵光武主编). 北京:北京大学出版社,1993. 311~312.

[责任编辑 刘新彦]