

文章编号 1001-8166(2004)05-0699-07

浅谈固体地球科学与地球系统科学

郭正堂^{1,2}, 吴海斌¹

(1. 中国科学院地球环境研究所, 陕西 西安 710075 2. 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029)

摘要 地球科学在 20 世纪的诸多进展中, 对后来科学发展具有深远影响的基本认识之一是地球演化的行为具有整体性, 其不同的圈层确实通过多种途径相互作用, 且人类活动已成为地球演化的重要营力之一。这些认识导致地球系统科学思想的产生和发展, 并使不同圈层相互作用的过程和机理、人与环境的相互作用研究成为 21 世纪基础科学研究的前沿。地球系统科学强调地球不同圈层、不同单元相互作用的整体性和关联性, 因而科学研究必须从“整体地球系统”的视野出发, 但研究过程又必须从关键区域入手。我国是地球系统科学研究的关键地区之一, 未来研究应立足地域优势和特色, 攻克全球性重大科学问题, 解决社会对地球科学的知识需求。

关键词 固体地球科学 地球系统科学 圈层相互作用 中国

中图分类号 P31 文献标识码 A

20 世纪后半叶以来, 人类对行星地球的认识发生了一系列突出的变化。首先, 大陆漂移—海底扩张—板块学说的产生, 从宏观上解释了大洋岩石圈的基本运动规律, 标志着地球科学认识上的一场革命, 并对后来地球科学的其它基础理论和资源勘察发挥了关键作用。其次, 相关学科与技术的快速发展, 也快速地推动了地球科学的发展, 尤其是加强了对地球外层空间、深部、海洋和极区等的探索。上述进展使地球科学工作者的科学观念发生了重大变化, 其中对后来地球科学发展具有深远影响的基本认识至少包含 3 点:

(1) 地球是一个整体的系统, 其不同的圈层通过多种途径相互作用, 且在很大程度上决定整体地球系统的演化方向。

(2) 人类活动已成为地球系统演化的重要营力之一, 在有些方面已超过自然力的作用。

(3) 天体运动对地球系统有重要影响。正是这些重要的认识, 导致了地球系统科学的逐步产生和发展, 并使不同圈层相互作用的过程和机理、人与环

境的相互作用研究成为 21 世纪地球科学基础研究的前沿。同时, 也使地球科学作为大科学研究逐步形成^[1]。

1 20 世纪固体地球科学的新认识对地球系统科学思想的产生有重要贡献

地球系统科学思想的产生是科学发展的必然产物, 标志着人类对地球认知的一个新阶段。地球系统的整体性及其不同圈层相互作用的过程和机理研究实际上是地球系统科学的核心。20 世纪固体地球科学的一系列重要认识, 应该说对地球系统科学的产生和发展有很重要的贡献, 是地球系统思想产生基础的重要组成部分。

1.1 板块理论面临的困难使人们意识到, 理解地球岩石圈演化必须研究地幔与地核

板块大地构造理论是 20 世纪地球科学最伟大的成就之一^[1]。它是以活动论的大陆漂移学说为前驱, 以海底扩张说为基础, 而逐步形成于 20 世纪 60 年代末。然而, 板块理论在解释大陆岩石圈演化

收稿日期: 2004-06-01, 修回日期: 2004-08-02.

作者简介: 郭正堂(1964-), 男, 研究员, 主要从事新生代环境与全球变化研究. E-mail: ztguo@mail.igcas.ac.cn

* 本文是作者根据郭正堂于 2004 年 3 月 22 日在国家自然科学基金委员会地球科学部地球系统科学战略调研研讨会上的报告整理而成。

的过程中,遇到一系列难题和挑战,并且它只是证实最近 2 亿年的事实。随着研究的深入,人们逐步发现板块运动涉及地幔乃至地核深处的活动,如地幔和地核在不同程度和不同尺度的横向不均匀性,对地球内部的许多动力学过程有重要影响,可能直接与板块构造相联系^[2];一些超级热柱有可能从核—幔边界上涌到地球表层。同时,外核的横向不均匀与地磁发电机理论直接相关的液体外核的流动模式相联系^[3]。在这种背景下,科学界认识到,要深入理解岩石圈的演化机理,必须对地球深部结构和过程、地壳—地幔和地核的相互作用进行深入研究。

1.2 固体地球的演化对水圈和大气圈演化有重要影响

构造运动对气候变化有显著影响,是 20 世纪地球科学的重要认识之一。它表明地球固体圈层的运动对水圈和大气圈演化有重要作用。有关全球新生代气候恶化的若干假说,多数将环境变化归因于构造变化。洋流说^[4]强调构造运动对大洋环流的影响,高原说^[5]强调山地隆升对大气环流的改变; CO_2 说^[6]强调构造运动对大陆风化和有机质埋葬对大气 CO_2 浓度的控制作用。这些学说和观点表明,板块运动对地球环境系统的演化具有重要的影响,进而改变全球的环境格局。

1.3 大气圈演化对岩石圈构造运动有重要作用

板块运动对全球气候变化有决定性的影响。但另一方面,全球气候从一种状态到另一种状态同样通过对岩石圈风化、剥蚀、搬运和堆积过程的改变而改变构造运动和岩石圈物质的运移和循环。近来的研究揭示,第四纪气候不稳定性的加剧,对山地剥蚀有重要作用^[7],导致不同区域重力负载的变化,可能是一些山脉隆升的重要原因^[8]。

1.4 水圈演化对大气圈演化具有关键作用

科学界很早就认识到水圈演化对大气圈演化的关键作用,但二者作用的机理和过程仍然是海—气相互作用研究的核心。在过去 10 多年的古气候学研究中,一个重要的进展就是认识到全球气候系统具有突发性变化的特性,和大洋环流变化密切相关^[9]。人为因素引起的全球变暖,有可能造成大洋环流的重大改变而导致突发性的变冷,使北半球气候从现在模式跳跃到另一种模式^[10],引起灾难性后果。

1.5 岩石圈演化导致生物圈重大变革

岩石圈演化可以导致生物圈的重大变化,也是 20 世纪地球科学的重要认识之一。在地球生物圈

的演化史中,生物的进化和灭绝最引人注目。一些学者^[11]详细研究了二叠纪以来 11 次大火成岩省喷发的精细年龄与地质历史时期大规模生物灭绝时代的对应关系,发现 7 次玄武岩喷发与生物灭绝年龄吻合,其中 5 次对应于大规模生物灭绝,2 次与中小规模生物灭绝事件时代一致。新生代期间地球生物圈最显著的变化之一是晚中新世(7~8 Ma 前后)草原植被的大规模扩张,代替了先前的森林环境,表现为 C_3 植物为主的生态系统转变为 C_4 植物为主的生态系统^[12,13]。一些学者认为,岩石圈构造变动对气候和生物地球化学循环的影响,可能是这次生态转变的主要原因^[14]。古生物学研究^[15]进一步显示,这类生态事件通过生态链对动物的演化和迁徙也有明显影响。热带稀疏草原的出现甚至影响到人类的出现和演化。上述事实都表明了岩石圈演化与生物圈演化之间的密切关系。

1.6 宇宙和行星演化对地球系统有深刻影响

20 世纪地球科学的另一重要认识是宇宙和行星变化对地球系统演化有深刻影响。古气候的天文理论(也称米兰科维奇理论)认为,地球轨道的变化是气候系统在万年至数十万年尺度上周期性变化的根本原因^[16,17]。近年来对第四纪晚期高分辨率记录研究进一步揭示出,气候变化还存在 11~1500 年的各种太阳活动周期^[18]。地磁场对宇宙射线的作用,就有可能造成气候变化和生物的变化^[19]。地质历史上的许多重大环境事件可能是宇宙事件的结果^[20]。因此,传统的宇宙和行星科学的部分内容应成为地球系统科学研究的重要内容。

1.7 人类活动是地球演化的重要营力之一

今天,人类对地球系统的影响已从工业革命前的“局部影响”进入到“全球影响”的时代。人类活动诱发的一些环境参数(如大气 CO_2 浓度)已超过 40 万年来的变率。许多问题可能构成人类文明发展过程的严重障碍^[21]。为应对和适应全球环境变化以及有效地利用这种变化的环境,以满足人类对可持续发展的追求,是 21 世纪地球系统科学的任务之一。

2 地球系统科学面临的科学问题及对学科交叉的要求

地球系统科学的核心是圈层相互作用,但对这些作用的机理和过程的全面认识,必须借助于本世纪大跨度的学科交叉和新技术的发展与应用才能得到有效解决。这正是地球系统科学的主要任务。从

这个意义上讲,地球系统科学的产生是科学发展的必然结果,也是人类进一步解决环境与资源困难的一种社会需求。它的根本目的在于回答地球系统是如何运行的?怎样演化的?未来将如何发展^[21]?

因此,地球系统科学面临的科学问题应当是:

2.1 地球系统不同圈层在不同时间尺度(几秒到百万/千万年和更长)和空间尺度(从微观到行星尺度)是如何相互作用的?

地球系统演化的最终行为是由不同时间和空间尺度变化过程的叠加所决定的。要真正理解地球系统的运作规律,必须研究不同时空尺度的变化过程,乃至宇宙和行星运动对地球系统的影响。否则,将难以认识许多变化的因素和机理,认识也将是不完善的。以地球环境变化为例,百万年量级的变化为更短尺度的变化奠定了基本的框架,同时对较短尺度的变化有调控作用,而一些突发性的变化则是较大尺度上的变化达到某种临界状态所诱发的。

2.2 这些作用的物理、化学和生物学过程与机理是什么?

对地球系统运作过程的机理认识是地球系统科学的核心所在,其间必须同时考虑自然和人为因素及其相互的作用。在这种情况下,传统地球科学与物理学、化学和生物科学部分领域的进一步交叉是认识突破的关键所在。虽然地球物理、地球化学和生态学等本身就是地学与物理、化学和生物学交叉的产物,但是地球系统科学研究要求的学科交叉无论从深度和跨度上都更大,涉及面会更广,比如要求地球物理、地球化学和生物学同时深入的交叉。

2.3 如何用数学和信息科学的理论和方法来描述和理解这些机理与过程?

对地球系统的全面认识,最终必须借助于大型的数值模拟,用数学和信息科学的方法来准确描述地球系统运作的过程,这就要求传统地球科学与数学、信息科学等的进一步交叉,其中先进的数学方法、计算能力和海量数据的处理能力的提高至关重要。

2.4 如何用更先进的方法和技术来获取地球系统演化的信息?

研究地球系统的运作过程,一个首要条件是准确、全面、及时地获取地球的各种信息。这就要求对地球的观测和监测手段与技术的进步,并逐步形成完善的观测体系。

因此,地球系统科学的发展不仅在很大程度依赖于其它相关学科理论的发展,而且依赖于技术的进步。从这个意义上讲,地球系统科学不可能代

替传统的地球科学,而是要求传统地球科学与物理学、化学、生物学、数学、信息科学和宇宙及行星科学相关领域的深入交叉,成为从整体地球系统视野研究地球的一门新的学科。从方法论上讲,地球系统科学研究应当强调从全球视野出发,但必须从关键区域入手。目前的地球系统科学,还谈不到自身的理论体系,而更多带有科学理念的色彩。

3 我国固体地球科学研究在未来地球系统科学中的重要性

我国处于欧亚板块、印度洋板块和太平洋板块大陆构造域的拼合部位,既有古老的演化历史,又有最新的构造记录,受到复杂的地球动力学过程的交叉、叠置和再造。地质现象丰富多彩,特征典型,是研究固体地球系统的天然实验室。

20世纪我国的固体地球科学取得重要进展^[23]，“上天、入地、下海”形成了丰富的学科知识体系,一些领域确实已达到了国际前沿。但我国地球科学的整体水平与国际先进水平还有可观的差距。随着人口增长和经济的快速发展,社会面临着越来越大的环境和资源压力。控制污染和改善环境质量、修复被污染的环境将是长期的过程。同时,我国是世界上少数受灾害影响最严重的国家之一,也需要地球系统科学研究得到解决。

3.1 我国造山带的过程机理研究,对地球固体圈层相互作用的认识具有全球典范意义

我国大陆处于不同大陆构造域的拼合部位,受到复杂的地球动力学过程的作用,在地球系统演化,特别是大陆动力学研究中具有十分重要的地位。全球五大造山带有3个在东亚大陆的形成和演化中具有重大影响,它们分别是环太平洋带、特提斯(地中海)带和中—东亚(我国及邻区称为北方造山带)带。因此,中国是研究地球固体圈层过程的关键区域。

我国的大陆动力学研究有可能为板块构造学说的完善和发展做出重要的贡献。一些区域和现象已逐步成为认识壳—幔相互作用的突破点。如青藏高原隆升的时代、幅度和地球动力学过程,北方造山带的多阶段双向增生历史,东部的超高压造山带,地壳物质深俯冲与岩石圈拆沉、壳—幔作用与物质循环,大火成岩事件与地幔柱动力学及其对地磁场和环境的影响,边缘海的形成演化和巨地貌格局的形成演化,地球内部成分、结构及地磁场演化与环境的可能关系等都涉及到地球内部各圈层的相互作用过程,从而为地球系统科学理论作出重要的贡献。

3.2 青藏高原对大区域和全球环境的影响过程和机理研究,是国际地球系统科学研究关注的焦点之一,但仍然需要相当长时间的努力

新生代是现代全球地质—环境格局形成的重要时期。两极冰盖的先后起源和逐步发展、一系列的构造运动等导致全球海洋和大气系统发生重大变革,改变了地球的环境系统。在该时期,东亚地区最为突出的地质—环境变化包括喜马拉雅—青藏高原的隆升、边缘海的扩张、季风环境的形成演化、我国西北和中亚地区的干旱化,导致我国南方广大的湿润地区、西部高寒区、西北的干旱区和黄土高原的形成,从而奠定了现代环境的基本格局。

喜马拉雅—青藏高原的形成可能是全球新生代气候恶化的重要因素^[25]。国际上的一系列研究,都将青藏高原的形成演化置于全球环境变化研究的核心位置。如新生代变冷的“高原说”^[5]和“CO₂说”^[6]都认为喜马拉雅—青藏高原的形成可能是全球晚新生代气候恶化的重要因素,高原隆升对全球大气环流若干重要分支(如东亚季风、南亚季风和亚洲冬季风)的形成演化有重要影响,高原隆升阻挡水汽导致亚洲内陆的干旱化;与我国沙漠和黄土密切关联的亚洲风尘是北半球矿物气溶胶的重要来源,而后者对太阳辐射、海洋生态及大气CO₂浓度有显著控制作用。这些领域将是地球系统科学在构造—环境相互作用理论方面的重要突破口。

3.3 我国巨地貌格局及水系演化对全球淡水、沉积物和生物地球化学循环的影响

陆地表层系统生源要素(如C、N、P、S)的生物地球化学循环,不仅是导致全球变化系列过程的重要环节,同时又与我国环境保护和可持续发展密切相关。新生代以来,由于青藏高原的隆升,我国地貌格局从新生代早期的东高西低逐步演变为现在的西高东低。构造运动引起地形变化导致东亚水系格局的重大变化,对全球性海陆物质能量交换、地球化学—生物地球化学循环产生重要的影响。

这些过程至少包括东亚对全球海洋沉积物的输送改变及其对海洋生物地球化学的影响、入海淡水变化对太平洋生态—环境的改变、沉积物输送与有机碳埋藏对大气CO₂浓度的影响、上述过程对天然气水合物的形成演化等。开展东亚大陆演化历史与全球生物地球化学循环关系的研究,有可能为揭示地质—生物化学过程与全球变化之间关系做出重要的贡献。

3.4 季风—干旱环境系统在全球水热和物质循环中的作用

亚洲季风环境和内陆型干旱环境构成亚洲地区独特的环境系统,其对全球水汽、能量和物质循环的影响及相关的海—陆—气—生相互作用过程,不仅是全球环境变化研究的重大科学问题,也是我国气候环境变化趋势预测及相应对策制定的科学基础。

亚洲季风环境系统参与南北两半球的相互作用,且与极地冰雪过程、极地—海洋—大气相互作用的过程密切相关。穿赤道的季风环流对两半球热量和水汽的输送可能有十分重要的影响。亚洲内陆的干旱区是世界上纬度最高的干旱区,其粉尘输出量占全球相当大比例,对大气化学成分、气候和海洋生态有重要影响。因此,亚洲季风—干旱环境系统在海—陆—气—生中的相互作用过程,其在全球水分、能量和生物地球化学循环中的作用,是地球系统过程的重要组成部分。

3.5 地球环境重大变化对生物灭绝和复苏的影响

生命系统与环境系统之间有着相互作用和耦合演化的关系。环境演变对生命的起源和演化有重要作用,而生命过程又对地球表层系统物质循环有显著影响,从而影响环境。

我国的地球环境和生命过程研究有得天独厚的条件,有望为地球生命演化研究做出关键性贡献。不同地质时期的地球环境和生物历史记录完整,地层古生物学研究积累丰富,中国特色的地层古生物记录已经成为认识生物演化基本规律不可缺少或独一无二的宝贵资源。近年来,诸多研究取得了举世瞩目的成就,为揭示生物的起源、辐射、危机和复苏演化过程提供了重要的证据。对不同地质时期环境演化对生物类群的起源和演化的影响研究,可为揭示生物演化的宏观规律做出重要贡献。

3.6 环境变化对人类起源、演化、迁徙和文化发展的作用

人类起源与演化是国际学术界关注的重大科学问题。一些学者认为亚洲可能是人类起源的中心之一,继1929年北京猿人第一个头盖骨及伴存石器和用火遗迹的发现之后,1965年在云南元谋发现了直立人牙齿,使中国人类历史记录大为延长^[21],在国际学术界产生了重要影响。

在人类演化进程中,许多突变环境事件对历史上的人类文明演化产生了重要的影响。我国一方面有诸如黄土、冰芯、岩溶、湖泊和海洋沉积等理想的环境记录,另一方面有丰富的、不同时期的人类活动

和考古遗址,为研究不同时间尺度的环境演化及环境与人类活动的关系提供了理想条件。研究第三纪以来环境演化对古猿和古人类演化、迁徙的影响、环境变化对人类文明的作用等,将会有效地推动该领域的发展,有可能使我国在包括早期人类起源等研究上取得一系列创新性的成果,为世界生命史探索做出贡献。

3.7 地质过程与全球碳循环

全球碳循环是当前全球变化和区域可持续发展研究的核心之一。为了减少全球环境变化估测的不确定性及地球系统的可持续管理和区域社会经济的可持续发展,百年—千年—万年时间尺度上地质过程与碳循环关系的研究是全球碳循环研究的一个不可缺少的重要环节。

我国广大地区通过诸多地质过程对全球碳元素的地球化学循环有重要影响,其中包括大陆风化作用、有机质的埋葬、岩溶过程、风尘过程对海洋生态的控制作用、构造活动区 CO_2 释放、不同时间尺度陆地生态系统的变化对碳循环的影响、边缘海和冻土区的天然气水合物形成演化过程等。围绕我国的地质过程与全球碳循环的关系,国际上产生了若干个环境变化的假说^[6,24],但这些假说有待大量研究检验和证实,开展该方面的研究有望获得在国际学术界有重要影响的成果。

3.8 天文—宇宙事件对地球系统演化的影响

天文—宇宙因素对地球系统演化有重要的影响。如新生代以来地球轨道周期对气候变化响应的驱动逐步的增强^[17],一些生物进化、人类文明史上的突发性事件可能和天文—宇宙事件有密切的关系。目前,就新生代时期而言,有关记录来自海洋的偏多,陆地的记录相对缺乏,多数发育不完整,从而影响对全球气候变化的整体认识。我国具有发育的新生代沉积盆地和连续完整的新生代环境记录,开展天文—宇宙事件对地球系统演化的影响具有独特的优势。

4 我国地球系统科学研究可能遇到的几个难点

我国在地球系统科学研究中有诸多有优势的切入点,但以下几个方面需要加强和改善。

4.1 大区域或全球数据的获取亟待加强

高新技术,特别是空间技术的应用,已从三维空间动态探测地球的结构和运动,使地球科学的理论研究以丰富的实测资料为基础。如卫星遥感技

术,提供了对整个地球系统行为进行长期和立体监测的能力,计算机技术的发展为收集、处理和分析地球系统变化的海量信息、发展复杂的地球系统数学模式提供了可能。高质量数据的获取也是地球系统过程定量化和动力学研究突破的关键所在。

我国在数据获取方面与发达国家相比仍然有较大的差距,主要表现在:

(1) 我国在本土的研究偏多,在国外其它地区的研究偏少。这在很大程度上限制了全球数据的获取,自然是限制地球系统科学一些研究的一个因素。

(2) 重要地质观测记录与资源获取和保存能力还显得不足,高精度、高分辨率、高灵敏度的测试设备与技术仍然相对缺乏,支撑条件尚需形成更合理的布局,特定监测和数据集成管理和处理能力偏低,数据观测和采集网站建设和运转机制有待加强。

因此,在较短时期内,我国的地球系统科学研究有必要在立足于本土的优势及特色的前提下,逐步走向其它地区。应有计划地采取措施,首先实现亚洲数据战略,逐步实现全球数据战略,以适应地球系统科学发展的需要。

4.2 大力强化学科交叉

科学研究人才的知识结构是决定学科发展的关键因素。知识结构的单科性不利于同其它学科的交叉渗透,不利于综合人才的培养,就不能很好适应当前地球系统科学快速发展的态势。因此,有计划地培养适应地球系统科学的新型研究人才是我国发展地球系统科学的关键一步,决定了我国该领域未来在国际上的竞争力。目前我国在研究生培养中,进行跨学科学习的人数依然不多,在促进学科交叉的人才和机制保障方面还有很多工作要做。

4.3 加强模拟计算和信息平台建设

要理解地球系统的整体运行机制,需要通过记录、观测和模拟三者的结合,才能了解过去、认识现在和预测未来。由于地球系统自身的复杂性,理解地球系统需要在数据分析和模型模拟方面做出极大的努力,这些都需要高性能的数据平台和计算机系统。与发达国家相比,我国在数据库建设和地球系统模型构建领域有些滞后,如地质、气候、环境监测和数据集成管理和处理能力依然偏低,地球系统各圈层相互作用及其变化规律模拟有待加强。

4.4 探索科学研究的新组织方式

由于地球系统科学的大尺度和综合性特点,一些重大的研究突破已不是个别研究人员、个别科学团体可以实现的,必须要联合多个分支学科和多个

科学团体,甚至多个国家共同攻关。就科学工作者来讲,很难讲哪一位科学家是“地球系统科学家”。因此,随着地球系统科学的发展,科学研究的组织方式可能也面临着一种革命性的变化。现有的一些大型国际研究计划可能正是这种全新的科学组织方式的雏形。以原有国际地圈生物圈计划(IGBP)、国际人类因素研究计划(IHDP)、世界天气研究计划(WWRP)、世界气候研究计划(WCRP)、生物多样性计划(DIVERSITAS)组成的地球系统科学研究组织应当说是一个成功的范例。从一个国家的层面上讲,探索结合自身特点的新型科学研究组织方式可能是我们面临的一项新课题。

4.5 坚持我国地域特色的地球系统科学研究

地球系统科学虽然是研究地球各圈层的相互作用和整体行为,但是必须以关键区域为切入点。我国具有很强的区域特色,地域优势显著。丰富多彩的地域单元已成为国际地学界争先涉足的研究热点。我国要想成为地球系统科学的强国,对核心理论有所贡献,不能完全参照国际上的模式。科学研究的积累是重大突破的关键。我们必须分析我国独特的自然条件,根据实际的研究力量,选择有突破前景的重大课题,组织多学科科学家开展长期研究,加强科学研究的积累,才有可能产生既有区域优势又具全球重大意义的成果。因此,我国的地球系统科学研究从近期战略上讲,应该“立足地域优势和特色,从整体地球系统的角度,攻克一些全球性和区域性的重大前沿科学问题,同时满足国家安全和社

参考文献(References):

- [1] 中国科学院地学部“中国地球科学发展战略”研究组·地球科学:世纪之交的回顾与展望[M]. 济南:山东教育出版社, 2002.
- [2] Tackley P J. Mantle convection and plate tectonics: Toward an integrated physical and chemical theory[J]. *Science*, 2000, 288: 2 002-2 007.
- [3] Buffett B A. Earth's core and the geodynamo[J]. *Science*, 2000, 288: 2 007-2 012.
- [4] Flower B P, Kennett J P. Middle Miocene ocean-climate transition: High-resolution oxygen and carbon isotopic records from Deep Sea Drilling Project site 588A, southwest Pacific[J]. *Paleoceanography*, 1993, 8: 811-843.
- [5] Ruddiman W F, Prell W L, Raymo M E. Late Cenozoic uplift in southern Asia and the American West: Rational for general circulation modeling experiments[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1989, 94: 18 379-18 391.
- [6] Raymo M E, Ruddiman W F, Froelich P N. The influence of late Cenozoic mountain building on oceanic geochemical cycles[J]. *Geology*, 1988, 16: 649-653.
- [7] Zhang P, Molnar P, Downs W R. Increased sedimentation rates and grain sizes 2-4 Ma ago due to the influence of climate change on erosion rates[J]. *Nature*, 2001, 410: 891-897.
- [8] Lamb S, Davis P. Cenozoic climate changes as a possible cause for the rise of the Andes[J]. *Nature*, 2003, 425: 792-797.
- [9] Broecker W S. Paleocan circulation during the last deglaciation: A bipolar seesaw? [J]. *Paleoceanography*, 1998, 13: 119-121.
- [10] Stocker T F. Past and future reorganizations in the climate system [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2000, 19: 301-319.
- [11] Wignall P B. Large igneous provinces and mass extinction [J]. *Earth Science Reviews*, 2001, 53: 1-33.
- [12] Quade J, Cerling T E, Bowman J R. Development of Asian monsoon revealed by marked ecological shift during the latest Miocene in the northern Pakistan [J]. *Nature*, 1989, 342: 163-166.
- [13] Cerling T E, Wang Y, Quade J. Expansion of C4 ecosystems as an indicator of global ecological change in the late Miocene [J]. *Nature*, 1993, 361: 344-345.
- [14] Pagani M, Freeman K H, Arthur M A. Late Miocene atmospheric CO₂ concentrations and the expansion of C4 grasses [J]. *Science*, 1999, 285: 876-879.
- [15] Van der Merwe N J, Tschauer H C. Plants and the development of human societies [A]. In: Sage R F, Monson R K eds. C4 Plant Biology [C]. San Diego: Academy Press, 1999: 509-538.
- [16] Shackleton N J. A new Late Neogene time scale: Application to Log 138 sites [J]. *Proceeding ODP, Science Results*, 1995, 138: 73-91.
- [17] Kashiwaya K, Ochiai S, Sakai H, et al. Orbital-related long-term climate cycles revealed in a 12 Ma continental record from Bakal [J]. *Nature*, 2001, 410: 71-74.
- [18] Bond G, Kröner B, Beer J, et al. Persistent solar influence on north Atlantic climate during the Holocene [J]. *Science*, 2001, 294: 2 130-2 136.
- [19] Guydo Y, Valet J P. Global changes in intensity of the Earth's magnetic field during the past 800 ka [J]. *Nature*, 1999, 399: 249-252.
- [20] Alvarez W, Alvarez W M, Asaro F, et al. Extraterrestrial cause for the Cretaceous-Tertiary extinction [J]. *Science*, 1980, 208: 1 095-1 108.
- [21] IPCC. Climate Change: The IPCC Scientific Assessment [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2000.
- [22] Chen Panqin (陈泮勤), Ma Zhenhua (马振华), Wang Genchen (王庚辰) translated. Earth System Science [M]. Beijing: Seismetic Press, 1992 (in Chinese).
- [23] 赵生才. 固体地球科学的研究现状和趋势 [J]. *地球科学进展*, 2000, 15(6): 757-759.
- [24] Martin J H. Glacial-interglacial CO₂ changes: The iron hypothesis [J]. *Paleoceanography*, 1990, 5: 1-13.

ON THE SOLID EARTH SCIENCE AND EARTH SYSTEM SCIENCE

GUO Zheng-tang^{1,2}, WU Hai-bin¹

(1. Institute of Earth Environment, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710075, China;

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

Abstract : The advances during the 20 th century in the field of Solid Earth Science have numerously contributed to the emergence of Earth System Science (ESS). ESS aims at understanding the Earth as a synthetic system driven by complex internal and external processes, with special emphasis given to the interactions of geosphere, atmosphere, hydrosphere and biosphere. It should answer a series of questions about the Earth, such as (1) How the Earth system evolved in the past? What are the driving forces and mechanisms of these changes? What occurs presently in the system with numerous human disturbances and what will be its future? The fundamental of the Earth System Science is to view the Earth as a whole system, but approaches of ESS need to start by key regions. China is located within a crucial region for understanding the basic Earth system processes. The study of ESS also meets China's social requirements as it is likely faced with most serious natural environmental and resource problems. We suggest a number of issues relevant to the traditional Solid Earth Science, which appear to be of importance in the ESS studies in China.

Key words : Solid Earth Science ; Earth System Science ; Interactions of geosphere ; Atmosphere ; Hydrosphere and biosphere ; China.