

李本纲 ,冷疏影. 2011. 二十一世纪的环境科学——应对复杂环境系统的挑战[J]. 环境科学学报, 31(6): 1121-1132

Li B G ,Leng S Y. 2011. Environmental science for the 21st century——meeting the challenge from complex environmental systems[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 31(6): 1121-1132

二十一世纪的环境科学 ——应对复杂环境系统的挑战

李本纲¹, 冷疏影^{2,*}

1. 北京大学城市与环境学院, 地表过程分析与模拟教育部重点实验室, 北京 100871

2. 国家自然科学基金委员会地球科学部, 北京 100085

收稿日期: 2011-04-20 录用日期: 2011-04-28

摘要: 综合已有的文献表述, 提出了关于环境、复杂环境系统、环境问题和环境科学等基本概念的看法. 对国内外环境科学专业教育做了简要的介绍和比较, 分析了复杂环境系统背景下环境科学研究面临的挑战, 列举了环境科学研究中需要加强并尽快取得实质性进展的几个领域, 并阐述了各领域的主要研究内容和关键科学问题. 初步比较了环境科学研究在中美两国的基本状况, 重点对比分析了中美两国自然科学基金委员会对环境科学研究的支持现状. 对二十一世纪环境科学的发展做了展望, 对环境科学研究的基金支持提出了几点建议.

关键词: 环境; 复杂环境系统; 环境问题; 环境科学; 环境研究

文章编号: 0253-2468(2011)06-1121-12 中图分类号: X-1 文献标识码: A

Environmental science for the 21st century——meeting the challenge from complex environmental systems

LI Bengang¹, LENG Shuying^{2,*}

1. College of Urban and Environmental Sciences, MOE Laboratory for Earth Surface Processes, Peking University, Beijing 100871

2. Department of Earth Sciences, National Natural Science Foundation of China, Beijing 100085

Received 20 April 2011; accepted 28 April 2011

Abstract: In this review, we are trying to introduce and discuss some basic concepts in the field, i. e. environment, complex environmental systems, environmental issues and environmental science, according to the existing literatures. We introduce and compare the environmental science programs in 15 universities in the United States, United Kingdom and China. In addition, we analysis the challenges that environmental science has to face in the 21st century, summary the research fields needing essential strengthening and improvement, and present the main objectives and key scientific issues in these fields. We also compare the current status of environmental research and funding support in the United States and China. Some suggestions to the future environmental research and funding support in China are provided.

Keywords: environment; complex environmental systems; environmental issues; environmental science; environmental research

1 引言(Introduction)

自产业革命以来, 人类在社会文明和经济发展方面取得了巨大的成就. 与此同时, 人类对自然的改造也达到空前的广度、深度和强度. 研究表明, 地球一半以上的陆地表面都受到人为活动的改造, 一半以上的地球淡水资源都已被人类开发利用, 人类活动严重影响着地球系统的生物地球化学过程及

能量和物质的循环, 外来物种入侵、海洋鱼类的大量捕捞及鸟类的大量灭绝, 使地球生态系统面临空前的压力(图 1, Vitousek *et al.*, 1997). 环境污染、过度开采利用导致水资源日益短缺、油气资源和战略性矿产资源面临枯竭、物种退化灭绝及可能的生态灾难、全球气候变化、频发的自然灾害等, 都危及人类社会的生存和发展.

作者简介: 李本纲(1971—), 男, 副教授, E-mail: lbq@urban.pku.edu.cn; * 通讯作者(责任作者)

Biography: LI Bengang(1971—), male, associate professor, E-mail: lbq@urban.pku.edu.cn; * **Corresponding author**

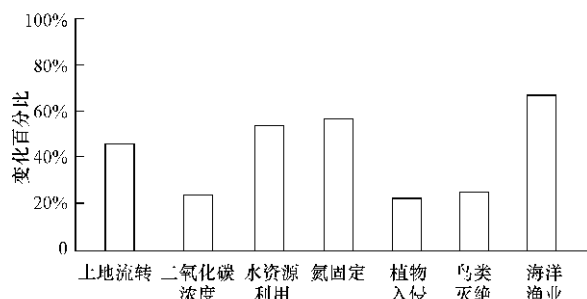


图1 人为活动对地球系统的扰动(引自 Vitousek *et al.*, 1997)

Fig. 1 Human dominance or alteration of several major components of the Earth system

人口、资源、环境、发展问题(PRED),已经被公认为人类在21世纪必须面对的巨大挑战.1962年《寂静的春天》一书的出版,引起世界范围内公众对环境污染问题的普遍关注,同时也将环境保护问题摆到了各国政府面前,从而开始了环境保护事业(Carson, 1962).1972年的斯德哥尔摩人类环境会议及《只有一个地球》一书的发表,1987年世界环境与发展委员会在东京召开环境特别会议并发布《我们共同的未来》的报告,1992年里约热内卢联合国环境与发展大会发布的《二十一世纪议程》,表明国际社会在环境与经济社会协调发展的问题上达成共识,保护生态环境、实现可持续发展,已成为全世界紧迫而艰巨的任务(UN-CED, 1987; UN-CSD, 1992).

环境科学源于人们对于周围环境及其影响的高度关注,并随着众多环境问题的出现而迅速发展成为一门新兴学科.它是一门介于自然科学、社会科学和技术科学之间的交叉学科,不仅涵盖地理学、生态学、物理学、化学、生物学等多个自然科学领域,还涉及经济学、社会学及政治学等社会科学领域.环境科学的学科形成历史虽然不长,但其学科框架日趋成熟、研究方法逐渐丰富、研究范围快速扩展、多学科交叉的特点日益彰显.从多学科到跨学科、从跨学科到学科交叉融合,环境科学经历了起源、发展并逐渐成熟的快速成长过程,同时也处于继续深入发展的重要关口.一些基本的理论问题需要归纳整理,一些重要的科学问题需要明确,一些关系到学科未来发展的框架需要搭建.

在此,本文试图从环境和环境科学的基本定义出发,对环境科学的分支学科进行分类,对环境科学的专业教育、科学研究、学科组织的现状进行介绍,对存在的问题进行深度剖析,并针对环境科学

的科研基金和未来发展进行初步讨论.

2 环境、复杂环境系统、环境问题与环境科学 (Environment, complex environmental systems, environmental issues, environmental science)

“环境”一词,泛指某一主体周围的地域、空间、介质结构.对应的英文是 environment、俄语是 Окружающая среда,其字面意思大抵相近.《世界大百科全书》对环境的定义是“环境是指生物体周围的物理和生物要素,其包括生物性要素(如植物、动物、微生物)和非生物性要素(如温度、土壤、大气和辐射)”.联合国环境规划署(UNEP)则将环境定义为“影响生物个体或群落的外部因素和条件的总和,其包括生物体周围的自然要素和人为要素”.《中华人民共和国环境保护法》总则中对环境定义为“本法所称环境,是指影响人类生存和发展的各种天然的和经过人工改造的自然因素的总体,包括大气、水、海洋、土地、矿藏、森林、草原、野生生物、自然遗迹、人文遗迹、自然保护区、风景名胜区、城市和乡村等”.美国环保局对环境的定义是“影响生物体产生、发展和生存的外部条件的总和”.

由此看出,公众对“环境”的概念理解基本一致,其主体为“包括人在内的生物体”,其客体包括“自然要素、人为要素和社会要素”.可以将环境划分为自然环境、人工环境和社会环境.自然环境,指基本未经人为改造而天然存在的自然要素,包括大气环境、水环境、土壤环境、地质环境和生物环境等,对应地球系统的五大圈层,即大气圈、水圈、土圈、岩石圈和生物圈;人工环境是相对于自然环境而言,指在自然环境的基础上经过人类加工改造所形成的次生环境;社会环境是指由各种社会关系形成的环境,包括政治制度、法律法规、经济体制、文化传统等.

从环境科学的角度出发,可以将环境定义为“环境,是在生物体的生命过程中对其产生影响的自然、人为、社会条件的总和”.对于人类来说,环境可以被理解为影响人类及其他生物生存发展的自然条件和社会条件.

环境的主体和客体,构成环境系统.该系统包含不同时间尺度、不同空间尺度和不同组织方式的多个要素,且具有开放性、非线性和不确定性等复杂系统的典型特征,不妨称之为复杂环境系统(Complex Environmental System-CES).开放性,是指系统与外部存在广泛的物质、能量及信息的流动与

交换. 非线性, 来源于环境系统各要素内部及要素之间存在的双向或多向的联系, 以及由此产生的非线性作用、响应与反馈. 系统的开放性使其远离平衡态, 其非线性直接导致其不确定性, 这也是环境系统复杂性的本质所在(侯合银, 2008; 李慧博等, 2004; 王俊博等 2004; Colwellf 2000) .

来自系统外部的扰动, 以及系统内部复杂的物质和能量流动、各要素之间的非线性作用与反馈, 都会影响复杂环境系统的稳定性, 导致其波动乃至发生趋势性的变化(侯合银, 2008) . 在此过程中产生的一系列矛盾, 即为环境问题. 如果从人类及地球生态系统的角度出发, 可以将环境问题限定为

“由于人类活动对环境系统的扰动、影响和破坏, 导致环境系统内部矛盾的加剧、环境系统结构和状态的改变、环境要素功能的丧失, 并由此引发的一系列问题”.

作为统筹全世界环境保护工作的组织, 联合国环境规划署(United Nations Environment Programme-UNEP) 每年 6 月 5 日举行世界环境日纪念活动, 并制定每年的世界环境日的主题. 这些主题的制定, 基本反映了当年世界主要的环境问题及环境热点, 很有针对性. 表 1 为联合国环境规划署成立以来历年的环境日主题.

表 1 联合国环境规划署历年世界环境日主题
Table 1 World Environment Day themes since 1974

年份	主题	英文主题
1974 年	只有一个地球	Only one Earth
1975 年	人类居住	Human Settlements
1976 年	水: 生命的重要源泉	Water: Vital Resource for Life
1977 年	关注臭氧层破坏, 水土流失	Ozone Layer Environmental Concern; Lands Loss and Soil Degradation; Firewood
1978 年	没有破坏的发展	Development Without Destruction
1979 年	为了儿童和未来——没有破坏的发展	Only One Future for Our Children-Development Without Destruction
1980 年	新的十年, 新的挑战——没有破坏的发展	A New Challenge for the New Decade: Development Without Destruction
1981 年	保护地下水和人类的食物链, 防治有毒化学品污染	Ground Water; Toxic Chemicals in Human Food Chains and Environmental Economics
1982 年	斯德哥尔摩人类环境会议十周年(提高环境意识)	Ten Years After Stockholm (Renewal of Environmental Concerns)
1983 年	管理和处置有害废弃物, 防治酸雨破坏和提高能源利用率	Managing and Disposing Hazardous Waste: Acid Rain and Energy
1984 年	沙漠化	Desertification
1985 年	青年、人口、环境	Youth: Population and the Environment
1986 年	环境与和平	A Tree for Peace
1987 年	环境与居住	Environment and Shelter: More Than A Roof
1988 年	保护环境、持续发展、公众参与	When People Put the Environment First , Development Will Last
1989 年	警惕全球变暖	Global Warming; Global Warning
1990 年	儿童与环境	Children and the Environment
1991 年	气候变化——需要全球合作	Climate Change. Need for Global Partnership
1992 年	只有一个地球——齐心协力, 共同分享	Only One Earth , Care and Share
1993 年	贫穷与环境——摆脱恶性循环	Poverty and the Environment-Breaking the Vicious Circle
1994 年	一个地球, 一个家庭	One Earth One Family
1995 年	各国人民联合起来, 创造更加美好的未来	We the Peoples: United for the Global Environment
1996 年	我们的地球、居住地、家园	Our Earth , Our Habitat , Our Home
1997 年	为了地球上的生命	For Life on Earth
1998 年	为了地球上的生命——拯救我们的海洋	For Life on Earth-Save Our Seas
1999 年	拯救地球就是拯救未来	Our Earth-Our Future-Just Save It!
2000 年	2000 环境千年-行动起来吧!	2000 The Environment Millennium-Time to Act
2001 年	世间万物 生命之网	Connect with the World Wide Web of life
2002 年	使地球充满生机	Give Earth a Chance
2003 年	水, 二十亿人生命之所系	Water-Two Billion People are Dying for It!

续表 1

年份	主题	英文主题
2004 年	海洋存亡 匹夫有责	Wanted! Seas and Oceans——Dead or Alive
2005 年	营造绿色城市 呵护地球家园	Green Cities-Plan for the Planet!
2006 年	莫使旱地变荒漠	Deserts and Desertification-Don't Desert Drylands!
2007 年	冰川消融 是个热点话题吗?	Melting Ice — a Hot Topic?
2008 年	戒除嗜好! 面向低碳经济	Kick the Habit! Towards a Low Carbon Economy.
2009 年	地球需要你: 团结起来应对气候变化	Earth needs you: to unite to address climate change
2010 年	多样的物种·唯一的星球·共同的未来	Many Species. One Planet. One Future

从联合国环境规划署历年世界环境日的主题大致可以看出,世界环境热点问题早期集中在农药污染等问题上,继而转向人类活动对自然生态系统的破坏,后来转向地区性的环境污染和环境公害问题,然后扩展到与人类生存密切相关的“全球气候变化”、“低碳经济”和“生物多样性”等全球性的环境问题。这种演替,一方面说明地球系统进入人文时期后环境问题从局部到区域、从区域到全球的大趋势(章申,1996;舒廷飞,2001),另一方面也展现了环境科学研究“单一问题→多学科→跨学科→复杂系统科学”的发展脉络。

对于环境科学(Environmental Science) 的定义,试将国内外一些主流的定义引用如下:

环境科学是研究近代(包括现代) 社会经济发展过程中出现的环境质量变化的科学。它研究环境质量变化的起因、过程和后果,并找出解决环境问题的途径和技术措施(马世骏,1983)。

环境科学是以“人类-环境”系统为其特定的研究对象,研究“人类-环境”系统的发生和发展、调节和控制以及改造和利用的科学(刘培桐,1994)。

环境科学是研究“人类-环境”之间辩证关系,掌握其发展规律,调控二者间物质、能量与信息过程,寻求解决环境问题的途径和方法,谋求人类环境系统协调和持续发展的科学(贾振邦等,2004)。

环境科学是以“人类-环境”系统为特定整体,针对不断变化的环境问题,通过自然科学、社会科学、工程科学的跨学科综合研究,逐渐形成的交叉学科群(杨志峰等,2004)。

环境科学是研究人类活动与环境系统之间相互作用关系,寻求人类社会与环境协同演化、可持续发展的途径与方法的科学(郑度等,2007)。

环境科学是研究和揭示人与环境相互作用规律、指导人类进行环境实践的科学体系(左玉辉,2010)。

Environmental science is a group of sciences that

attempt to explain how life on the earth is sustained, what leads to environmental problems, and how these problems can be solved (Botkin *et al.* 2005)。

Environmental science is a branch of science concerned with environmental issues. It stands at the interface between humans and Earth and explores the interactions and relations between them (Wright, 2005)。

Environmental science is an interdisciplinary field that includes both scientific and social aspects of human impact on the world (Enger *et al.* ,2008)。

从上面列举的环境科学定义来看,虽然表述有区别,但实质大同小异。可以归纳整理为:环境科学以复杂环境系统为研究对象、以各种环境问题为研究内容、以多学科融合交叉为典型特征、以揭示“人类-环境”相互作用规律为核心任务、以“人类-环境”协调和可持续发展为最终目标的学科群。

如前所述,环境科学是自然科学(地学、化学、物理学、生物学、医学等)、社会科学(法学、经济学、社会学、管理学等)和工程科学(材料、土建、机械等)相互交叉的边缘科学。由于环境科学是一门新兴的学科,其学科体系尚处在快速发展中,其学科分类还未完全定型。在此,仅根据杨志峰(2004)和左玉辉(2010),尝试将环境科学分为自然环境科学、社会环境科学和应用环境科学3个类别,并试图将主要的环境科学分支学科归类整理。

自然环境科学:环境科学与各自然科学的交叉学科群,运用自然科学的理论与方法,认识环境现象、揭示环境规律、解决环境问题。包括环境地学、环境化学、环境生物学、环境毒理学、环境物理学、环境医学等分支学科。

社会环境科学:环境科学与各社会科学的交叉学科群,运用社会科学的理论与方法,解析环境现象、建立环境规则、调控人类活动对环境的影响。包括环境法学、环境伦理学、环境管理学、环境经济学

等分支学科.

应用环境科学: 环境科学与各工程科学的交叉学科群, 运用工程技术科学的理论与方法, 认识环境特征、治理环境污染、改善生态环境质量. 包括环境监测学、环境工程学、环境规划学、环境控制学等. 其中环境工程学是修复污染环境、改善生态环境质量的重要途径.

由于环境科学本身就是一门交叉学科, 其分支学科也不可避免地相互交叉和相互渗透. 可以预见, 随着环境科学各分支学科的发展, 这种相互交叉与相互渗透仍将继续深入. 一些新的分支学科可能出现, 一些分支学科可能发展壮大, 建立独具特色的理论与方法, 甚至从环境科学中独立出来. 环境科学的学科体系将持续完善, 环境科学的学科网络将更加丰富, 环境科学的综合性、复杂性特点将更加鲜明.

3 环境科学专业教育 (Environmental programs in universities)

高等学校的专业教育, 是一个学科繁荣和发展的基础. 从环境科学概论或环境科学导论类基础教材的内容来看, 国内外主流教材并无太大差别, 一般都包括生态系统、人口、资源、能源、污染与控制、环境政策与环境管理等常规内容, 部分教材还介绍环境全球气候变化、环境教育及环境伦理相关内容 (Botkin *et al.*, 2005; Wright, 2005; Enger *et al.*, 2008; 贾振邦等 2004; 杨志峰等 2004). 但由于环境科学是一门新兴的交叉学科, 不同学校环境科学专业发展的历史沿革不尽相同. 因此, 在环境科学专业教育中, 各学校的侧重会有比较明显的差别. 在此, 仅列美国 5 所、英国 3 所和中国 7 所大学环境科学专业进行比较 (表 2 和表 3).

表 2 美国、英国共 8 所大学环境科学专业
Table 2 Environmental science programs in eight universities in the United States and United Kingdom

学校	系	所在学院	侧重
Stanford University 斯坦福大学	Department of Environmental Earth System Science	School of Earth Sciences	Sustainable food and Water, 粮食与水资源 Land Use Change, 土地利用变化 Contaminant and Nutrient Cycling, 污染物和氮的循环 Ocean and Ecosystem response, 海洋和生态系统响应 Climate system dynamics, 气候系统动力学
University of California Berkeley 加州大学伯克利分校	Environmental Science, Policy & Management	College of Natural Resources	Organisms & Environment, 生物与环境 Ecosystem Sciences, 生态系统科学 Society & Environment, 社会与环境
University of Illinois Urbana Champaign 伊利诺伊大学香槟分校	Department of Natural Resources and Environmental Sciences	College of Agricultural, Consumer and Environmental Sciences	Fish and Wildlife Conservation, 鱼类及野生动物保护 Global Change and Landscape Dynamics, 全球变化及景观动态 Resource Conservation, 资源保护 Restoration Ecology, 生态修复
University of Texas at Austin 德克萨斯大学奥斯汀分校	Environmental Science Institute	College of Natural Sciences, Jackson School of Geosciences	Climate, Water, Biodiversity, Sustainability 气候、水、生物多样性、可持续发展
Georgia Institute of Technology 佐治亚理工学院	-	School of Civil and Environmental Engineering	Environmental Engineering, 环境工程 Environmental Fluid Mechanics, 环境流体力学 Water Resources, 水资源 Geosystems Engineering, 地球系统工程
Cambridge University 剑桥大学	Department of Geography	-	Society & Environment, 环境与安全 Political Ecology, 政治生态学 Society & Development, 社会与发展 Environmental Processes, 环境过程
Reading University 雷丁大学	Department of Geography and Environmental Science	School of Human and Environmental Sciences	Aquatic Environments, 水环境 Soil Research, 土壤研究 Social and Cultural Geography, 社会与人文地理
University of East Anglia 东英吉利大学	School of Environmental Sciences	Faculty of Science	Climate Change, 气候变化 Marine and Atmosphere, 海洋与大气 Environmental Biology, 环境生物学 Geological Sciences, 地质学

表3 中国7所大学环境科学专业
Table 3 Environmental science programs in seven universities in China

学校	系	所在学院	侧重
北京大学	环境科学系	城市与环境学院 环境科学与工程学院	区域环境,全球环境,污染环境,环境毒理
兰州大学	环境科学与环境工程系	资源环境学院	环境地质,干旱区环境
南开大学	环境科学系	环境科学与工程学院	城市环境,水资源,污染环境修复
南京大学	环境科学系	环境学院	环境化学,环境生物学,环境规划与管理
华东师范大学	环境科学与技术系	资源与环境科学学院	环境生物学,环境生理与毒理学,环境地学, 植被生态学和城市生态学
北京师范大学	环境科学系	环境学院	流域水环境过程,土壤污染诊断与修复,湿地 生态系统模拟,城市生态规划与管理

比较表2和表3,可以看出,美国的环境科学专业多具有地球科学、资源科学或工程科学背景,英国的环境科学专业多具有地理学背景,中国的环境科学专业背景复杂,分别来自化学、地理学、生态学等,多具有环境化学背景.美国和英国的环境科学专业本科教育,以环境科学的基础知识和基本问题为主,且侧重于生态系统健康和全球变化等较大尺度的宏观环境问题,多学科交叉的复杂学科特性,在研究生阶段的教育中才得以充分体现;中国则从本科教育阶段就强调学科交叉,且明显侧重于环境污染方面的内容.这固然是由于师资力量和研究领域和研究兴趣差别所致,但不同的侧重和特点无疑会引导各国环境科学未来的发展.

4 复杂环境系统的挑战(Challenges from complex environmental systems)

环境科学的发展源于两个重要的驱动力:一是多个学科的科学家的对环境问题的共同关注和研究兴趣,二是人类社会生存和发展的需要.前者使学科交叉融合成为环境科学的鲜明特色,后者则是环境科学的社会价值与意义所在.在复杂环境系统的背景下,二十一世纪的环境科学,宏观地说,面临以下主要挑战.

挑战之一,来自持续加重的环境压力.复杂环境系统的矛盾与问题,其根本驱动是人类活动,其表现是环境系统各要素之间的协调发展被破坏,其结果是威胁到地球生态系统的稳定性乃至人类生存和发展.目前,人类生产活动及其对自然环境的改造达到空前的强度,自然生态系统改变和物种消失也日益加重.与此同时,世界各国的社会经济体系正变得相互联系、相互依存,局部的环境变化有可能相互叠加、相互增强,从而对整个人类社会的

经济、安全和发展构成实际威胁.

挑战之二,来自复杂环境系统及其变化的不确定性.复杂环境系统内部矛盾及由此衍生出的环境变化和环境问题,都具有较强的不确定性,对其进行准确预测难度极大.因此,各类应对措施和环境政策,都不免滞后于复杂环境系统的变化与问题.可以想象,面对诸多的环境问题和环境变化,无论是科学家、公众,还是决策者,对于问题和变化不确定性的担忧,都将超过来自问题和变化事实本身的压力.在这样的情况下,增强对区域性和全球性环境变化与问题的预测能力、提高反应速度和应对能力,具有非常重要的现实意义(AC-ERE 2009).

挑战之三,来自环境科学研究创新与发展的需求.复杂环境系统也是一个动态的复杂适应性系统,即系统中的局部变化会引起系统的其它部分连锁的响应和适应性变化.因此,仅仅掌握单个或几个环境要素的变化规律、仅仅了解单个或几个重要环境过程的发生发展机理,尚不足以准确描述上述连锁的非线性响应与反馈,也不能帮助有效解决一些区域性乃至全球性的环境问题.

5 复杂环境系统下的环境科学研究(Environmental research for complex environmental systems)

为应对复杂环境系统背景下的诸多挑战,环境科学研究需要更新研究理念、开拓研究思路、同时加强对复杂环境系统的方法论研究,将复杂环境系统(包括人类和人类活动在内)作为一个整体,开展长期的、区域性的环境综合研究,重点研究复杂环境系统各要素之间的相互联系、作用、响应与反馈机制.这将产生大量开创性的研究成果,在促进学科发展的同时,也必将有助于准确了解和及时应对可能发生的环境变化及环境问题.

具体而言, 以下几个领域需要首先加强研究并尽快取得实质性进展。

1) 环境信息基础设施与环境研究网络

信息基础设施(Cyberinfrastructure-CI) 是美国国家科学基金会(National Science Foundation-NSF) 于2003 年在《Revolutionizing Science and Engineering through Cyberinfrastructure》报告中首次提出, 其核心思想是利用网络技术将地理上位置不同的数据、设备、仪器等集成在一起, 建立面向网络服务的通用基础支撑环境, 实现 Internet 上各种资源的有效聚合与广泛共享, 支持以大规模计算和数据处理为特征的科学活动(Atkins *et al.*, 2003)。对复杂环境系统的研究数据, 包括生态、水文、气象、能源、社会经济、土地利用和污染监测等多种类型, 采用统计分析、仪器分析及遥感监测等多种途径, 涉及陆表、大气、海洋等多个圈层, 具有多个时间尺度和空间尺度。如果能将这些数据资源有机整合, 建设环境信息基础设施(Environmental Cyberinfrastructure-ECI), 不仅能实现数据资源共享, 还能深度挖掘这些数据资源的科学价值, 从而增进环境科学研究中的合作与交流、提高工作效率、促进多学科交叉, 并将有力推动环境科学研究中的创新和发现(AC-ERE 2003)。

在环境信息基础设施框架下, 如果增加环境研究团队、环境研究模型计算工具、环境研究仪器仪表设备, 则构成环境研究网络(Network for Environmental Research-NER)。该网络是一个能实现区域或全球协作的虚拟环境科学研究平台。虚拟的环境研究实验室或虚拟的环境研究团队, 更具有学术活力、更具有灵活性和创新性, 能真正实现环境科学研究涵盖从分子水平到全球水平的所有空间尺度、从实时监测到长时间序列的所有时间尺度, 也必将取得突破性的研究成果。

2) “人类-自然环境”系统的综合研究

人类活动与自然环境相互联系、相互作用与反馈, “人类-自然环境”是复杂环境系统中最重要的子系统, 也是最复杂的子系统。其涉及地理、地质、生态、水文、工程、人口、社会、经济等复杂环境系统的诸多要素, 需要多学科交叉进行综合研究。如大型水力发电工程, 影响河流沿岸的植被、土地利用及生物多样性, 也影响其下游的水资源、渔业及经济发展, 库区的移民还会牵扯诸多社会经济问题。再如草原畜牧养殖, 影响草原土地利用和草原生态

系统, 继而带来土地沙化、沙尘暴等诸多环境问题。这些问题, 都需要加强“人类-自然环境”系统综合研究才能科学认识 and 有效解决(AC-ERE, 2005; 2009)。

试列举“人类-自然环境”系统几个相对严重且急需加强研究的环境问题, 也是“人类-自然环境”系统综合研究的重要领域:

城市化——土地、资源和生态系统: 城市化过程中对土地资源、水资源和森林资源的掠夺性开发利用, 对生态系统和生物多样性的严重扰动, 城市化过程中产生的人口问题、环境污染问题, 城市化带来的人群对待资源和环境的方式改变, 综合起来是包括“人口-资源-环境-生态系统-社会经济”的复杂问题。

环境污染——人类和生态系统健康: 人为环境污染对人体健康的影响、环境污染及生态效应、由环境污染导致的疾病或生态系统健康问题, 包括环境污染排放清单、污染物毒理、生态毒理、生态系统对环境污染的响应等重要科学问题。

人类活动——水资源、河口及海岸生态环境: 工业、农业对水资源的过度利用, 人为污染对水资源的破坏, 大型水利水电工程(如南水北调、大型水电站等)导致的生态系统变化, 以及上述人类活动对河口及海岸生态环境的影响等, 涉及社会、经济、资源和生态环境, 是非常复杂也非常重要的研究课题。

这些综合性的复杂环境问题, 主要关注人类活动对土地资源、水资源、环境和生态系统的影响, 也包含自然环境和生态系统的反馈及其对人类活动的影响。这些问题的科学认识与妥善解决, 需要对人类活动及自然环境进行综合观测, 需要建立复杂的应用模型, 需要多学科的交叉与协作。

3) “生物-物理-化学”系统的综合研究

复杂环境系统中的生物要素与物理、化学要素, 组成一个相互联系、相互影响、相互作用与反馈的复杂子系统。“生物-物理-化学”系统的综合研究主要针对该系统中的关键过程和系统的动力学特征, 研究生态系统中物质和能量的流动与交换, 研究生物、物理、化学要素与过程的相互联系和相互作用。其中, 几个关键研究领域分别是:

物质的生物地球化学循环: 研究 C、N、重金属、POPs 等在生态系统中的生物地球化学循环, 及其对生态系统的影响。

气候变化与生态系统: 研究地球系统能量收支发生的波动与变化, 气候变化对生态系统的影响, 以及生态系统在气候变化中的作用等。

生物多样性与生态系统动力学: 研究生物多样性变化的原因、生物多样性对生态系统动力学特征的影响等。

这几个研究领域多集中在复杂环境系统的自然部分, 重点研究自然环境系统中的物质和能量迁移与转化的过程、机理, 以及复杂环境系统中不同自然要素对这些过程的响应和适应。“生物-物理-化学”系统的综合研究, 要求超越单要素及其变化所涉及的微观过程与机理, 更强调各要素之间的相互联系、相互作用和相互适应。

4) 复杂环境系统研究的方法学

复杂环境系统是非平衡、非线性、不确定的, 系统各要素之间不仅存在相互的联系和影响, 还存在相互的适应与反馈。因此, 将复杂环境系统作为一个整体进行研究, 势必会遇到一系列的难点。比如在“环境信息基础设施与环境研究网络”领域, 海量数据资源和模型资源分别来自不同地理位置和不同行业, 具有差异极大的属性和组织方式, 其远程的管理、查询、分析和互操作都超出一般数据库或数据引擎的范畴, 如何从信息技术科学领域借鉴经验、汲取灵感, 是完成这一任务的主要难点。再如对于“人类-自然环境”系统的综合研究, 需要建立包含人类活动及自然环境各要素的复杂定量模型。其中, 需要选取哪些指标来定量表征相应的人类活动及其社会经济行为? 这些指标如何进行取样和观测? 复杂模型如何综合表达人类活动与自然环境的相互联系和相互作用? 这些都是常规的环境模型未曾面临的问题。另外, 在“生物-物理-化学”系统的综合研究中, 如何将分子水平的微观机理研究与区域或全球尺度的宏观过程研究有机结合? 如何在研究中体现“生物-物理-化学”系统中多要素、多过程的相互联系与相互作用? 如何将室内实验、地面监测及遥感观测等多种资料与模型有机结合, 实现多时间尺度、多空间尺度的时空耦合复杂模型?

针对这些问题, 有必要加强复杂环境系统研究中的方法学研究, 几个可能比较关键的方向包括: 海量数据资源和模型资源的远程管理、查询、分析和互操作; 人类活动及其社会经济行为的定量表征、取样和观测; 微观和宏观的交叉与结合; 包含人类活动及多环境要素的综合模型; 具有多时间尺

度、多空间尺度的时空耦合模型; 考虑复杂环境系统各要素相互联系、相互作用和相互适应的复杂模型等。

究其实质, 复杂环境系统中的主要矛盾, 就是“人-资源”、“人-环境”的矛盾。如何准确揭示矛盾相互转化的机理, 如何为解决矛盾提供科学支撑, 是环境科学的重要任务。无论是环境问题还是资源的合理开发与利用, 其核心在于人类活动的生态系统效应以及复杂环境系统中的非线性响应、适应与反馈。

6 中美环境科学研究及其基金支持比较 (Environmental research and funding support in United States and China)

环境科学基础研究, 是环境科学发展的最前沿。一方面, 它引导环境科学的发展方向, 促进环境科学理论体系与方法论的丰富与完善; 另一方面, 其研究成果直接应用于解决各个领域的环境问题, 并在国家层面上为宏观决策提供相关的理论依据。环境科学研究, 在宏观上研究人类与环境之间相互联系与相互影响, 揭示人类与环境的相互作用规律; 在微观上研究环境中的物质和能量的迁移转化, 探讨它们对生命活动及生态系统的影响与作用机理等。环境研究涉及地球系统的各个圈层(水圈、大气圈、生物圈), 覆盖所有环境介质(水、土壤、大气、生物等)。微观的环境研究可以深入到分子水平, 宏观的环境研究则可以扩展到全球尺度。

早期的环境研究, 由于其问题导向及事件驱动的特点, 基本上关注人类活动污染的监测、评价与控制。但进入 20 世纪 80 年代, 科学家们认识到, 环境问题不仅仅是污染问题, 而是一种更为复杂的综合问题。因为面对诸如温室效应、酸雨、臭氧层的破坏、沙漠化、热带森林的减少、人口膨胀、物种消失及资源短缺等全球性的复杂环境问题, 要求以更宏观、更系统、更具前瞻性的研究思路和研究方法来分析和解决。

著名生态学家马世骏于 1983 年提出环境科学的研究范围和工作目标十个方面的问题, 其中前几个问题包括环境质量、有毒有害物质的迁移转化、环境修复等, 后几个问题则集中在环境区域研究、生态平衡、生态工程及生态经济等较宏观的领域(马世骏, 1983)。著名地理学家黄秉维在和钱学森先生的讨论中, 探讨过环境研究和“地球表层学”的相关问题, 其主要观点是: 第一要把地理学、生态

学、污染放在“环境”旗下作为主题要素,都归属于“地球表层学”;第二是希望地理学和生态学在环境研究中起到更积极的作用(黄秉维,2003)。著名环境地理学家陈静生于1994年指出,环境科学、地理学、生态学应该进一步配合,并针对“人类与环境相互作用”及“经济与环境协调发展”两大问题,向更高的综合研究发展(陈静生,1994)。著名环境科学家章申于1996年指出,环境问题主要包括环境污染与生态破坏,环境科学研究的核心任务是研究人与自然系统协调发展的机制,即研究人口、资源、环境与经济发展之间关系变化的一般规律和持续发展的基本原理。他还指出,中国的环境科学研究,应集中在环境污染(大气污染、水污染、土壤污染等)、生态破坏(土地退化、水土流失、荒漠化、生物多样性等)、全球环境变化(温室效应、C/N/P/S的生物地球化学循环等),长期目标是建立环境与发展的动态调控模型,预测中国生态、环境变化趋势,为决策者提供可选择的方案和途径(章申,1996)。

在上述战略性学术思想的引导下,过去20多年,中国的环境科学研究经历了快速而全面的发展,无论是深度还是广度,都达到空前的水平。污染环境研究方面,研究对象从重金属扩展到持久性有机污染物和内分泌干扰物等新问题,研究范围从局部扩展到区域乃至全球,研究内容从污染普查扩展到污染物的迁移转化、源解析、界面行为及生态毒理与生态风险。生态系统变化研究方面,大力开展了生态观测网络建设及不同类型生态系统变化长期定位研究,加强了生态系统物质/能量的生物地球化学循环及全球变化研究。中国生态系统研究网络(Chinese Ecosystem Research Network, CERN)建设工程,是生态环境科学研究中具有十分重要的科学和发展意义的科学工程,其“以站为本、以网为纲”,以我国主要类型农田、森林、草地、湿地、湖泊和海湾为对象,积极开展生态系统结构、功能和动态方面的长期综合研究,极大地推动了我国生态学、资源科学、环境科学的发展(孙鸿烈,2009)。在生态系统及区域环境变化研究方面,融合了人类活动的主要表现方式——土地利用及生态系统定位观测所反映的环境变化,在土地利用/土地覆被变化及其生态效应、环境变化及生态响应、生态过程及服务功能等领域取得重要突破。此外,在环境科学研究成果和工程技术进步的基础上,环境工程也得到长足发展,在污染治理、生态修复、自然保护、

防灾减灾等领域都做了相当多的工作。

但是,由于历史原因,虽然国内学者关于环境科学的定义与国外并无差异,但在专业教育和实际的研究工作中,更多关注人类活动排放的污染物引起的环境污染方面的科学问题,针对复杂环境系统的环境综合研究相对较薄弱。

环境污染的研究固然重要,但如果从广义的角度去理解和认识环境科学的学科范畴,将复杂环境系统作为整体研究对象,注重环境科学研究各相关方面的平衡发展,将有助于推动我国环境科学研究的不断深入、推动相关学科的交叉和融合,为解决中国目前面临的诸多复杂环境问题提供坚实的科学基础。

由于环境科学研究的综合性、复杂性及多学科交叉的特点,以及该领域涌现的大量优秀研究成果,美国国家科学基金会(National Science Foundation-NSF)将环境研究与教育列为优先资助领域,并于1998年成立环境问题特别小组(Task Force on the Environment),该小组后发展为一个横跨多个学部的“环境研究与教育”虚体学部(Directorate for Environmental Research & Education-ERE),专门负责NSF框架内环境科学研究资助预算与优先发展方向的统筹与协调。NSF将环境科学研究的作用定义为“提高人类在地球上持续生存能力及增强关于人类活动与自然过程关系认识的研究-Research that improves our ability to live sustainably on Earth and to strengthen our understanding of the links between human behavior and natural processes”。

美国国家科学基金会“环境研究与教育”项目经费约占NSF总经费(2010年为69.265亿美元)的20%,超过10亿美元。其主要资助方向包括:

- 生物多样性与生态系统动力学 Biodiversity & Ecosystems Dynamics;
- 生物地球化学循环 Biogeochemical Cycles;
- 气候变化与波动 Climate Variability & Change;
- 信息基础建设 Cyberinfrastructure;
- 决策与不确定性 Decision Making & Uncertainty;
- 小学中学教育 Elementary & Secondary Education;
- 环境服务与价值 Environmental Services &

Valuation;

- 实验、模型及其交互 Experiments , Models , & Their Interactions;

- 水资源,河口及海岸环境 Freshwater Resources , Estuaries & Coastal Environments;

- 人类健康与环境 Human Health & the Environment;

- 非正式教育 Informal Education;

- 土地、资源与人居环境 Land , Resources , & the Built Environment;

- 观测系统及工具 Observing Systems & Tool Development.

上述资助方向虽分布在 NSF 的多个学部(生命学部、地球科学学部、数理学部等),但由“环境研究与教育”虚体学部咨询委员会(AC-ERE)统一进行调研、规划及统筹。

在中国,对环境科学基础研究的支持,主要来自国家自然科学基金委员会(NSFC)及科技部支持的基础研究项目。NSFC 对环境科学研究的资助领域,分散于多个学部,主要方向及所属学部大体如下:

噪声、噪声效应及其控制-数理学部;

环境化工与环境化学-化学科学部;

环境微生物、生态学-生命科学部;

污染物及其环境效应、区域环境、生态经济及生态系统服务功能、灾害与风险评估、资源与可持续发展、气候变化-地球科学部;

水文水资源-地球科学部、工程与材料科学部;

环境工程-工程与材料科学部;

环境政策、环境管理-管理科学部。

比较中美两国自然科学基金会对环境研究的支持,差别主要表现在三个方面:

第一,对于环境教育(学校教育及公众教育)的差别。NSF 尤其关注全民环境教育,倡导“Citizen Scientist in environmental research”,而 NSFC 则不涉及环境教育,这可能与中国国家自然科学基金会专注于自然科学研究的特点有关,但环境教育的重要性是毋庸置疑的。

第二,NSF 资助的环境科学研究更强调“复杂环境系统下的综合研究”,而 NSFC 现阶段的环境科学研究方向分散,无论从关注的研究对象,还是研究的视角和出发点都局限于传统学科框架,环境科学的多学科综合研究、复杂系统研究的特点还有待

丰富和体现。

第三,NSF 非常注重环境科学研究的总体规划、全局统筹、资源分配及学科调研,“环境研究与教育”学部咨询委员会不定期发表环境科学与教育的咨询报告,全面分析学科研究进展并制定学科研究未来发展的宏观规划,为环境科学研究的战略布局提供决策支持。该咨询委员会分别于 2003、2005、2009 年发表的咨询报告 Complex Environmental Systems: Synthesis for Earth , Life , and Society in the 21st Century (Pfirman *et al.* , 2003)、Complex Environmental Systems: Pathways to the Future (AC-ERE , 2005)、Transitions and Tipping Points in Complex Environmental Systems (AC-ERE , 2009),对美国的环境科学与教育起着非常重要的引导作用。相比较而言,NSFC 目前的资助政策尚不能体现出其对环境科学总体布局和发展引导的战略推动作用。

7 环境科学的发展 (The future of environmental science)

21 世纪的环境科学,面临复杂环境系统的诸多挑战。整体的、综合的、长期的、多空间尺度的、多学科融合的环境科学研究是发展的大趋势,各环境要素与环境过程之间的相互联系、作用、响应、适应与反馈,是环境科学研究的重点。从学科发展的角度来看,这种挑战也是一个重大的机遇。因为跨学科的交叉研究、多要素多过程的综合研究、微观与宏观结合的多尺度研究、强调相互联系、相互作用与相互适应机理的研究,将产生大量开创性的研究成果,环境科学将实现全面快速的发展。

总的来说,21 世纪的环境科学,将是微观更微、宏观更宏,但微观和宏观的结合、过程和机理的结合、多学科交叉融合等方面将会有实质性的突破。环境科学的学科体系,将会面临调整、丰富和完善。在发展原有的“污染环境”研究的基础上,环境科学研究需要更注重资源与生态系统、更注重环境与生态系统的变化演替、更注重灾害与生态环境安全等方面的研究,更注重提升人类社会对可能到来的环境变化的应对能力。

国家自然科学基金对环境科学研究的支持与推动,也面临一些难点课题。大的方面,如何将研究对象由以前的分散状态逐渐聚合到“复杂环境系统”上?如何引导环境科学研究从各分支学科研究向“复杂环境系统综合研究”转变?具体说来,有以

下几点:

加强国家自然科学基金框架内环境科学研究战略研究, 确定优先发展方向、统筹协调资助预算, 增强国家自然科学基金对环境科学研究发展的战略引导作用; 加强国家自然科学基金框架内跨学部、多学科的环境科学研究, 鼓励综合研究、促进学科交叉, 推动环境科学从多学科到跨学科、从跨学科到学科交叉融合的发展; 同时, 由于多学科交叉的研究团队组成比较复杂, 交叉和融合需要一个过程, 可以考虑设立一些长期项目, 在较长时间内支持一些多学科交叉的研究团队, 帮助其成长和发展。

8 讨论 (Discussion)

本文从基本概念入手, 介绍并讨论了环境、复杂环境系统、环境问题和环境科学等基本概念。继而对环境科学专业教育、环境科学研究、环境科学基金支持等方面进行了介绍和分析。总的说来, 对于环境科学的发展前景, 应该持乐观和积极的态度。但是这种乐观, 是建立在环境科学研究新的战略转移的基础上, 即从单要素向多要素综合研究转移、从过程和机理研究向相互联系、相互作用与相互适应研究转移、从局部地区污染防治向区域尺度和全球尺度生态环境问题研究转移、从多学科分散研究向多学科交叉融合研究转移。当然, 这一系列的战略转移是艰巨的, 但又是必要的和可行的, 是环境科学发展的客观需求, 也是环境科学应对二十一世纪复杂环境系统挑战的必然选择。

当然, 寥寥数页, 对于回答环境科学基本概念、核心内容、未来发展等问题, 无疑是挂一漏万的。引起科学家、科研管理部门以及公众社会对这一课题的注意, 是本文的主要目的。

致谢: 本文在写作过程中, 得到陈宜瑜院士、陶澍院士的指导。在此, 表示衷心的感谢!

参考文献 (References):

AC-ERE. 2003. Environmental Cyberinfrastructure, Tools for the Study of Complex Environmental Systems [OL]. 2003-05-01. http://www.nsf.gov/geo/ere/ereweb/AC-ERE/AC-ERE1_ECI.pdf

AC-ERE. 2005. Complex Environmental Systems: Pathways to the Future [OL]. 2005-03-21. http://www.nsf.gov/geo/ere/ereweb/acere_synthesis_rpt.cfm

AC-ERE. 2009. Transitions and Tipping Points in Complex Environmental Systems [OL]. 2009-09-09. http://www.nsf.gov/geo/ere/ereweb/acere_synthesis_rpt.cfm

Atkins D E, Droegemeier K K, Feldman S I, et al. 2003. Revolutionizing Science and Engineering through Cyberinfrastructure [OL]. 2003-01-10. <http://www.nsf.gov/od/oci/reports/atkins.pdf>

Botkin D B, Keller E A. 2005. Environmental Science: Earth as a Living Planet (v5) [M]. Hoboken: Wiley. 1-2

Carson R. 1962. Silent Spring [M]. Boston: Houghton Mifflin

陈静生. 1994. 地理学、生态学、环境科学与“人类与环境相互作用”研究[J]. 地球科学进展 9(4): 1-7

Chen J S. 1994. Geography, ecology, environmental sciences and their contribution to the study on “interaction between man and environment” [J]. Advance in Earth Sciences, 9(4): 1-7 (in Chinese)

Colwell R. 2000. 生物复杂性与环境[J]. 中国人口、资源与环境, 10(3): 116-117

Colwell R. 2000. Biocomplexity and the environment [J]. China Population, Resources and Environment, 10(3): 116-117 (in Chinese)

Enger E D, Smith B F. 2008. Environmental Science: A Study of Interrelationships (v11) [M]. New York: McGraw-Hill. 3-4

侯合银. 2008. 复杂适应系统的特征及其可持续发展问题研究[J]. 系统科学学报, 16(4): 81-85

Hou H Y. 2008. Research on features of complex adaptive system and its sustainable development problems [J]. Journal of Systems Science, 16(4): 81-85 (in Chinese)

黄秉维. 2003. 关于“地球表层学”问题的几点看法[A]//《黄秉维文集》编辑组. 地理学综合研究-黄秉维文集[C]. 北京: 商务印书馆. 269-272

Huang B W. 2003. Perspectives to the “Science on the Earth surface” [A]// Editorial group of Collected Works of Huang Bingwei. Collected Works of Huang Bingwei [C]. Beijing: The Commercial Press. 269-272 (in Chinese)

贾振邦, 黄润华. 2004. 环境学基础教程[M]. 北京: 高等教育出版社. 6-9

Jia Z B, Huang R H. 2004. Basics of Environmental Sciences [M]. Beijing: Higher Education Press. 6-9 (in Chinese)

李慧博, 柴立和, 石兰兰. 2005. 复杂性科学在环境科学与工程中的应用[J]. 科技导报 23(12): 58-61

Li H B, Chai L H, Shi L L. 2005. Application of complexity science in environmental science and engineering [J]. Science & Technology Review, 23(12): 58-61 (in Chinese)

刘培桐. 1994. 环境学概论[M]. 北京: 高等教育出版社. 5-15

Liu P T. 1994. Introduction to Environmental Sciences [M]. Beijing: Higher Education Press. 5-15 (in Chinese)

马世骏. 1983. 积极开展环境科学理论研究[J]. 中国环境科学 3(3): 6-7

Ma S J. 1983. Advocate research on the theories of environmental science [J]. China Environmental Science, 3(3): 6-7 (in Chinese)

Pfirman S, the AC-ERE. 2003. Complex Environmental Systems: Synthesis for Earth, Life, and Society in the 21st Century [OL]. 2003-01-08. http://www.nsf.gov/geo/ere/ereweb/acere_synthesis_rpt.cfm

- 孙鸿烈. 2009. 生态系统综合研究[C]. 北京: 科学出版社. 2-22
- Sun H L. 2009. Synthetical research on ecosystem [C]. Beijing: Science Press. 2-22(in Chinese)
- 舒廷飞, 杨静, 温琰茂. 2001. 新技术革命对环境的影响及环境科学未来的研究方向[J]. 环境与开发, 16(3): 7-11
- Shu T F, Yang J, Wen Y M. 2001. The influence of new-technology revolution on environment and the re search tasks of environmental science in the future [J]. Environment and Development, 16(3): 7-11 (in Chinese)
- UN-CED. 1987. Our Common Future [OL]. 1987-03-20. <http://www.un-documents.net/wced-ocf.htm>
- UN-CSD. 1992. Agenda 21 [OL]. 1992-06-14. <http://www.un.org/esa/dsd/agenda21/index.shtml>
- Vitousek P M, Mooney H A, Lubchenco J, et al. 1997. Human domination of earth's ecosystems [J]. Science, 277: 494-499
- 王俊博, 柴立和, 郎铁柱, 等. 2004. 复杂性科学思维中的环境科学研究[J]. 环境保护科学, 30(125): 65-68
- Wang J B, Chai L H, Lang T Z, et al. 2004. Study of environmental science in complexity science perspective [J]. Environmental Protection Science, 30(125): 65-68(in Chinese)
- Ward B, Dubos R. 1972. Only One Earth: the Care and Maintenance of a Small Planet [M]. New York: Norton
- Wright R T. 2005. Environmental Science: Toward a Sustainable Future (v9) [M]. Upper saddle river: Pearson Prentice Hall. 1-2
- 杨志峰, 刘静玲. 2004. 环境科学概论[M]. 北京: 高等教育出版社. 10-12
- Yang Z F, Liu J L. 2004. Introduction to Environmental Science [M]. Beijing: Higher Education Press. 10-12(in Chinese)
- 章申. 1996. 环境问题的由来、过程机制、我国现状和环境科学发展趋势[J]. 中国环境科学, 16(6): 401-405
- Zhang S. 1996. Causation analysis of environmental issues, their present status and development trend of environmental science in China [J]. China Environmental Science, 16(6): 401-405 (in Chinese)
- 郑度, 谭见安, 王五一. 2007. 环境地学导论[M]. 北京: 高等教育出版社. 18-22
- Zheng D, Tan J A, Wang W Y. 2007. Introduction to Environmental Geoscience [M]. Beijing: Higher Education Press. 18-22 (in Chinese)
- 左玉辉, 华新, 柏益尧, 等. 2010. 环境学原理[M]. 北京: 科学出版社. 1-4
- Zuo Y H, Hua X, Bai Y Y, et al. 2010. Theories of Environmental Science [M]. Beijing: Science Press. 1-4(in Chinese)