

DOI: 10.5846/stxb201701050044

杨玉盛.全球环境变化对典型生态系统的影响研究:现状、挑战与发展趋势.生态学报,2017,37(1):1-11.

Yang Y S.The impacts of global environmental changes on typical ecosystems: status, challenges and trends.Acta Ecologica Sinica,2017,37(1):1-11.

# 全球环境变化对典型生态系统的影响研究:现状、挑战与发展趋势

杨玉盛<sup>1,2,\*</sup>

1 福建师范大学湿润亚热带山地生态国家重点实验室培育基地,福州 350007

2 福建师范大学地理科学学院,福州 350007

**摘要:**随着全球环境变化和人类活动对生态系统影响的日益加深,生态系统结构和功能发生强烈变化,生态系统提供各类资源和服务的能力在显著下降。在这种背景下,全面认识生态系统的结构功能与全球环境变化的关系已成为当前生态学研究热点之一。本文综述了全球环境变化对典型生态系统(包括森林生态系统、河口湿地生态系统、城市生态系统)影响以及全球环境变化适应的研究现状,分析研究面临的困难及挑战。在此基础上,提出对未来研究发展趋势的展望。在森林生态系统与全球环境变化研究上,未来应重视能更好模拟现实情景的、多因子、长期的全球环境变化控制试验,并注重不同生物地球化学循环之间的耦合作用。在湿地生态系统与全球环境变化研究上,未来应加强氮沉降、硫沉降及盐水入侵对湿地生态系统碳氮循环的影响,明晰滨海湿地的蓝碳功能,加强极端气候和人类干扰影响下湿地生态系统结构和功能变化及恢复力的研究。在城市生态系统与全球环境变化研究上,未来应深化城市生物地球化学循环机制研究,实现城市生态系统的人本需求侧重与转向,并开展典型地区长期、多要素综合响应研究。在全球环境变化适应研究上,未来应构架定量化、跨尺度的适应性评价体系,加强典型区域/部门的适应性研究以及适应策略实施的可行性研究,注重适应与减缓对策的关联研究及实施的风险评估。期望本综述为我国生态系统与全球环境变化研究提供一些参考。

**关键词:**全球环境变化;森林;河口湿地;城市生态系统;全球环境变化适应

## The impacts of global environmental changes on typical ecosystems: status, challenges and trends

YANG Yusheng<sup>1,2,\*</sup>

1 State Key Laboratory of Subtropical Mountain Ecology (Founded by Ministry of Science and Technology and Fujian Province), Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China

2 School of Geographical Sciences, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China

**Abstract:** With the increasing impacts of global environmental changes and human activities on ecosystems, structures and functions of ecosystem change greatly, and their capacities in providing all kinds of services and resources are deteriorating. Therefore, a comprehensive understanding of the relationships between structures and functions of ecosystems and global environmental changes has become the research focus in ecology. This paper reviews the impacts of global environmental changes on typical ecosystems (including forest ecosystem, estuary wetland ecosystem and city ecosystem) and the adaptation to the global change, analyzes the difficulties and challenges facing ahead, and based on this puts forward the prospects for future researches. For the study of the relationships between forest ecosystems and global environmental changes, the future research will pay attention to long-term global environmental change experiments with controlled multi-

**基金项目:**国家重大基础研究计划课题(2014CB954003);国家自然科学基金重点项目(31130013)

**收稿日期:**2017-01-05

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: geoyys@ fju.edu.cn

factors and better simulated reality, and the coupling function between different biogeochemical cycles. For the study on the relationships between wetland ecosystems and global environmental changes, we will focus on the impacts of nitrogen deposition, sulfur deposition and salt water intrusion on carbon and nitrogen cycles in wetland ecosystem, clarify blue carbon function of coastal wetland, and learn more about the changes in structure and function of wetland ecosystems and their resilience under the influences of the extreme climate and human disturbance. For the study on the relationships between urban ecosystems and global environmental changes, we will deepen the understanding of the mechanisms of urban biogeochemical cycles, attach importance to humanistic demand in urban ecosystem and carry out long-term, multi-factor responsive researches in typical region. For the study on the adaptation to global environmental changes, a quantified and trans-scale adaptability evaluation system should be established, and we will strengthen the research on the adaptability of typical area/department and feasibility of adaptive strategy, attaching importance to the relationship between adaptive strategy and alleviating strategy, as well as the implementing risks. We hope the review will provide references for the researches on ecosystems and global environmental changes in China.

**Key Words:** global environmental change; forest; estuary wetland; urban ecosystem; adaptation to global environmental change

近几十年来全球环境变化已对人类生存、社会经济可持续发展构成严重威胁。据 IPCC 第五次评估报告预测,到本世纪末全球地表平均增温 0.3—4.8℃;全球大气 CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>和 N<sub>2</sub>O 等温室气体的浓度已上升到过去 80 万年来最高水平。全球变暖引起降水格局的变化和极端干旱天气将是全球气候变化的重要特征之一,未来多数地区将因降水量的减少和土壤蒸发量的增加而面临严重的和大面积的干旱<sup>[1]</sup>。由于化石燃料的使用和农业施肥的增加,预计到 21 世纪末全球氮沉降速率会增加 2—3 倍<sup>[2]</sup>。全球环境变化早在 20 世纪 80 年代就成为了国际学术界关注的热点问题,而生态系统与全球环境变化的研究亦已成为现代生态学发展的一个重要新兴研究领域。随着全球环境变化和人类活动对生态系统影响的日益加深,生态系统结构和功能发生强烈变化,生态系统提供各类资源和服务的能力在显著下降。而人口增加和生活水平的提高则对生态系统服务和产品提出更高要求。在这种背景下,全面认识生态系统的结构功能及与环境变化的关系已成为生态学家的重大科学挑战。

本文主要从全球环境变化对典型生态系统(包括森林生态系统、河口湿地生态系统、城市生态系统)的影响,以及全球环境变化的适应研究等几个方面,介绍其研究现状,分析其面临的困难和挑战,并对未来的研究发展趋势进行展望,以期为我国生态系统与全球环境变化研究提供一些参考。

## 1 森林生态系统与全球环境变化研究现状与挑战

### 1.1 研究现状

自 20 世纪 80 年代末期以来,围绕森林生态系统结构与功能,以及森林生态系统对全球环境变化的响应与适应这一科学命题,生态学家们广泛开展了针对温度升高、降水变化、氮沉降增加、CO<sub>2</sub>浓度富集等的控制实验研究,主要内容围绕在碳循环和氮循环上,仅有少数研究涉及磷素循环。

全球变暖与生态系统碳吸存之间是否存在正反馈关系,是许多增温控制实验关心的重大科学问题。尽管增温可能引起总植物碳库的升高,但土壤有机碳(SOC)库的变化仍具有不确定性,SOC 分解与全球变暖间存在正反馈作用的这种模型预测结果越来越被证实与实际情况不符。已有增温试验结果的整合分析发现<sup>[3]</sup>,增温引起 SOC 贮量的变化在不同研究间有很大差异,增温总体上对 SOC 贮量没有显著影响。其主要原因与土壤微生物是否对升温产生适应仍然不清楚有关;有关 SOC 对温度的敏感性亦存在许多争议<sup>[4]</sup>;人们对植物碳输入特别是地下碳输入如何响应全球变暖亦仍缺乏足够了解。

目前有关降水改变对碳循环的影响研究还十分有限,水分因子对碳动态的影响还没有得出一致结论,多

数表现为干旱减少碳的排放;但也有发现在受干旱胁迫的温带地区,降雨量的减少导致森林碳积累量的减少<sup>[5]</sup>。

许多研究发现 CO<sub>2</sub> 浓度升高可以促进光合作用并提高植物生产力。但一些研究发现,随着时间延长促进作用降低或消失,其原因到底是出现光合适应还是受 N 限制目前仍存在争议。迄今为止,大多数关于 CO<sub>2</sub> 升高研究较少关注 SOC 的变化,因而 CO<sub>2</sub> 升高对生态系统碳贮量(植物和土壤)的综合影响尚不清楚。一些研究发现,在 CO<sub>2</sub> 升高条件下养分限制树木的生长,这将会增加分配到地下的碳<sup>[6]</sup>。但地下碳输入的增加是促进土壤碳吸存,还是加速土壤碳周转,目前仍存在争议<sup>[7]</sup>。

关于 N 沉降能否增加森林生态系统的碳储存,在科学界还存在激烈的争论。一般在全球尺度上 N 输入增加会促进森林生态系统碳吸存<sup>[8]</sup>;meta 分析表明<sup>[9]</sup>,在氮不限制土壤微生物生长的温带森林土壤,氮沉降会抑制土壤有机质分解,从而降低土壤呼吸并促进碳吸存,其促进作用与氮沉降对林木生长的促进作用相当。而一些研究表明,N 输入对生态系统碳储存没有明显促进作用,相反,会一定程度上减少生态系统碳储量<sup>[10]</sup>。然而,由于缺乏研究,目前氮沉降对氮相对饱和的热带亚热带土壤碳循环的影响仍无法评估。

最近 20 年,对森林生态系统进行了大量的增温实验,探讨氮循环与净初级生产力(NPP)、C 循环、土壤呼吸以及 C、N 循环的耦合<sup>[11-12]</sup>。实验表明增温能提高森林土壤有机氮的矿化和净硝化速率<sup>[11,13]</sup>,从而为植物的生长提供更多额外的无机氮<sup>[14]</sup>。增温提高了微生物新陈代谢和酶的活性<sup>[15]</sup>,导致更多的有机物质分解和总 N 矿化增加。但是,通过 meta 分析发现增温并不会增加温带森林土壤氮发生淋溶的风险性;也没有显著增加土壤 N<sub>2</sub>O 的释放<sup>[16]</sup>。

巨大数量的氮沉降,对原来普遍氮缺乏的生态系统氮循环必然产生严重的影响。在热带和温带森林的研究表明大量的氮输入能显著影响森林土壤氮状态并增加土壤氮的有效性;如果氮输入超过土壤的保持能力将引起氮淋失。研究发现在高氮沉降的站点土壤氮的淋失率提高,而且几乎都是以 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 的形式淋失的<sup>[17]</sup>;实验添加的氮(50—150 kg N hm<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>)增加了所有三片亚热带森林的无机氮的淋失,大约有 25%—66%添加的氮在 3 年的时期发生淋失<sup>[18]</sup>。而且在高氮输入的条件下土壤 DON 的淋失增加<sup>[19]</sup>。氮沉降的不断加将降低森林生态系统土壤溶液的缓冲能力,显著提高土壤的酸性和 Al<sup>3+</sup> 的移动性,导致盐基离子的淋失<sup>[20]</sup>。

健康森林生态系统具备完善的有效磷维持机制,对外界的变化存在反馈及调节机制。而在全球环境变化背景下,探讨全球变暖、大气 CO<sub>2</sub> 浓度升高、土地利用变化、N、S 沉降对森林生态系统有效磷维持机制影响及作用机制成为当前研究的热点<sup>[21-24]</sup>。但目前的研究主要集中在氮沉降对磷素的影响上,研究结果普遍认为氮沉降提高了土壤磷酸酶活性、增加叶片 N/P 比,并加剧生态系统磷的限制<sup>[25-26]</sup>。而其它全球环境变化因子对生态系统磷素的影响研究仍然十分缺乏。

## 1.2 困难与挑战

虽然全球环境变化对森林生态系统的影响研究已有一定开展,但仍存在以下几点不足:野外增温实验的开展主要针对中高纬度地区的草原、农田、冻原和森林生态系统;迄今为止,在 30°N 以南的热带和亚热带地区仍没有野外增温试验,热带森林碳交换量对增温响应的模型预测仍存在巨大的不确定性。由于建造成本和火灾的隐患,森林增温研究常仅限于土壤增温,而整个森林生态系统水平的增温研究仍然缺乏<sup>[27]</sup>。降雨的变化包括降雨量、降雨强度、降雨发生时间和降雨间隔等,但目前森林生态系统的降雨控制试验经常仅考虑降雨量<sup>[27]</sup>。已有 CO<sub>2</sub> 升高研究大多是对生长室和开顶箱中小苗和幼树的研究,利用 FACE 设施对野外条件下森林特别是热带森林成年大树的研究较少<sup>[27]</sup>。虽然 N 沉降增加对森林碳循环影响近年来开展了较多的研究,但已有结果仍未能明确氮沉降对碳循环过程的确切影响及其影响效应的方向及大小;在热带亚热带森林的氮沉降研究亦仅有少数几例。全球环境变化对森林生态系统的影响主要集中在碳循环上,而对于氮、磷及其它元素循环的研究仍然非常少。全球环境变化因子间通常不是独立的,而是相互作用的,但目前全球环境变化多因子交互作用的控制试验研究亦仍然不足。另外,试验研究通常在样地或林分水平上开展,且时间相对较短,对气候变化在景观和区域尺度上的长期影响仍缺乏认识<sup>[27]</sup>。

## 2 河口湿地生态系统

### 2.1 研究现状

河口湿地是陆地河流向海洋物质输运、转化及沉积的活跃地带,其对于外界胁迫压力反应的特有敏感性使其成为当前全球环境变化研究的理想区域。近年来,关于全球环境变化背景下河口湿地生态过程及其对近岸生态系统结构与功能的影响已成为国际海岸带陆海相互作用计划的研究热点<sup>[28-30]</sup>。当前国内外主要围绕气候变化<sup>[31-32]</sup>、海平面上升<sup>[33-35]</sup>、酸沉降、外来植物入侵<sup>[36-37]</sup>以及氮沉降等方面开展其对于河口湿地盐沼<sup>[28,38]</sup>、海草床以及红树林<sup>[31]</sup>等重要河口湿地生态系统的耦合影响研究。

过去二十年中,关于气候变化对河口湿地生态过程影响的研究在迅速增加。气候变化通常以气温升高<sup>[39]</sup>、水文情势改变<sup>[40]</sup>和极端气候频发等形式对湿地生物多样性、生态过程以及生态系统的完整性产生直接或间接威胁<sup>[41]</sup>。气候变化可导致温度升高,改变蒸散量,进而可影响到河口湿地生源元素的生物地球化学过程<sup>[42-43]</sup>;气候变化也可改变湿地悬浮泥沙荷载,影响湿地有机物质的氧化速率和氧化途径,并加剧海水入侵。气候变化导致的极端气候事件频发亦可对河口湿地产生深远影响<sup>[44]</sup>;改变河口湿地水文过程,进而影响其他生态过程<sup>[45]</sup>;改变动物行为与活动<sup>[46]</sup>。气候变化还会影响河口湿地生物入侵过程<sup>[47]</sup>。

全球变暖导致的海平面上升将对河口湿地生物地球化学循环产生深远影响<sup>[48]</sup>。一方面,河口湿地遭受海平面上升的直接威胁,未来有许多河口湿地将消失。海平面上升将改变河口湿地的淹水频率,进而导致湿地生态系统初级生产力<sup>[49]</sup>、有机质分解途径<sup>[50]</sup>、营养盐等发生明显变化。另一方面,海平面上升可推进盐水楔而对河口湿地地下水系统产生入侵。盐水入侵后,硫酸盐增加会加速湿地沉积物中铁氧化物和氢氧化物分解,形成螯合铁的化合物(如黄铁矿)<sup>[51]</sup>。铁氧化物在还原过程中也将进一步促进沉积物中磷的释放<sup>[52]</sup>。盐度的增加也会影响河口湿地硝化和反硝化菌、硫酸盐氧化菌与还原菌、铁氧化菌与还原菌、甲烷产生菌与还原菌的生理机能,从而加速或抑制有机质代谢和分解速率,并改变有机质代谢途径<sup>[53]</sup>。此外,盐水入侵还会促进硫酸盐异化还原过程,并抑制产甲烷菌,从而减少河口湿地的甲烷排放<sup>[54]</sup>。

### 2.2 困难与挑战

目前,河口湿地生态系统与全球环境变化研究面临的困难与挑战主要如下:(1)尺度转换难度大。各种不同尺度之间的转换问题始终是生态学研究领域的难点,河口湿地研究同样面临这样问题。(2)生态系统脆弱,人类干扰频繁。河口湿地往往地处经济快速发展地区,受人类生产、生活影响深远,缺乏无人干扰的理想研究样地。(3)生态过程复杂,研究结果存在不确定性。河口湿地生态系统受到陆地、海洋等多重影响,在河口湿地开展相关控制实验容易受到径流、潮汐等因素影响,实验设计方面具有很大的挑战。(4)极端事件频发,生态过程存在突变性。河口湿地是台风、海啸、风暴潮等极端气候事件多发地带,生态过程的突变性无疑增加了其研究难度。(5)模型构建与模拟困难。河口湿地生态系统因其复杂多变,影响因素众多,相关生态模型构建十分困难<sup>[42]</sup>,也为未来研究提出了严峻挑战。(6)受损生态系统恢复困难。河口湿地在适应全球环境变化方面往往较为脆弱,尤其是河口地区人类活动频繁,而相关研究往往赶不上其遭受的威胁与破坏速度,尤其需要加快相关方面的研究。

## 3 城市生态系统

### 3.1 研究现状

城市生态系统是大气、土壤、植被和人类等要素组成的有机整体与复杂人地系统。在当前人类与日俱增的物质能源需求及环境约束背景下,城市生态系统与全球环境变化关系问题已得到气象、环境、城市等多个学科领域专家学者的广泛关注,并取得了一系列重要研究成果,包括:(1)全球气候变化导致极端事件影响范围扩大、频次增加<sup>[55-57]</sup>,特别是城市化地区夏季气温与极端高温的叠加效应<sup>[58-60]</sup>使得热岛问题加剧,其他季节气温<sup>[61-63]</sup>、暖夜数<sup>[64-65]</sup>与年均温<sup>[66-67]</sup>等上升趋势同样显著,气候系统失序,如气候带移动<sup>[68-69]</sup>、干旱与降水异

常<sup>[70-71]</sup>、发病率与死亡率上升<sup>[72-73]</sup>、生计与脆弱性问题<sup>[74-77]</sup>以及城市生态系统服务效率<sup>[78-79]</sup>等内容也逐渐成为学者们与社会的关注焦点;(2)全球环境变化与资源问题愈发突出,研究发现不同尺度下的城市经济发展与资源环境存在倒 U 型、倒 N 型或其他曲线变化关系<sup>[80-83]</sup>。随着中国成为制造业强国及全球人口、碳排放大国,国内能源环境变化<sup>[84-86]</sup>、模拟预测<sup>[87]</sup>、居民消费<sup>[88-89]</sup>等内容将逐渐占据主导位置,但城市碳循环及碳市场交易等研究仍显薄弱<sup>[90]</sup>;(3)时空变化、动力机制和环境效应是当前土地利用/覆被变化(LUCC)研究的重要方面,研究认为工业革命以来的全球气候变化与人类活动使得 LUCC 在不同时空尺度上快速变化<sup>[91]</sup>,其中城市扩张的人口变化、经济增长、城市政策等是导致土地利用/覆被变化的重要原因<sup>[92]</sup>;(4)由于人类活动,过量 CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O、SO<sub>2</sub>等温室和污染气体已排放至大气环境,改变了其中的化学物理性质<sup>[93]</sup>,有研究表明城市活性氮量已经超过周边非城市生态系统<sup>[94]</sup>,不同功能区的氮输入、输出等具有明显空间差异<sup>[95]</sup>,空气污染具有明显的区域扩散与迁移特征<sup>[96-97]</sup>。其他诸如水土流失与水质恶化<sup>[98-99]</sup>、生物多样性丧失<sup>[100]</sup>以及碳循环功能减弱<sup>[101]</sup>等问题同样突出。

### 3.2 困难与挑战

当前城市生态系统与全球环境变化研究侧重自然科学领域,尽管相关研究有助于进一步了解城市系统对全球环境变化的响应机制,但指导城市可持续发展还需更多学科的综合运用与交叉参与。近年来,国内外学者对气候变化所导致的健康、贫困生计问题及脆弱性研究是探讨人类社会适应外部环境变化的新尝试,也是人文系统参与全球环境变化研究的新切入点。然而现有生态系统中的人文研究仍显不足,仍需深入剖析系统内不同社会等级群体及其不同资源依赖性所导致的全球环境变化响应差异。此外,由于全球环境变化的影响往往是跨越城市、跨区域边界,现有研究结果对宏观区域而言仍具有不确定性,因此在分析城市生态系统对全球环境变化响应应充分考虑宏观现实背景,加强跨边界比较研究,进一步了解城市系统与环境变化在局地、区域、国家和全球不同尺度上的反馈效用。

## 4 全球环境变化适应的研究现状与挑战

### 4.1 研究现状

气候变化严重威胁着人类可持续发展<sup>[102]</sup>,适应研究经历了依附于脆弱性和相对独立两个阶段<sup>[103]</sup>。适应性研究曾作为脆弱性研究的一部分而提出,如今已经自成体系<sup>[104]</sup>,并逐步把适应研究提升到可持续发展能力建设的高度<sup>[105]</sup>,成为全球环境变化研究前沿<sup>[106-107]</sup>。主要集中在适应性研究体系<sup>[108-109]</sup>、适应能力现状评价<sup>[110-111]</sup>、适应策略预测性<sup>[112]</sup>等三个方面。适应性研究体系在于针对不同背景识别适应主体、客体、过程以及效果四个方面,是制定适应策略的基础<sup>[113]</sup>。适应能力现状评价研究主要包括气候变化特点、生态系统结构和功能,与社会、经济、政治条件以及人为影响、干预密切相关<sup>[114-115]</sup>。主要包括成本效益分析和情景模拟预测两类,有采用强健性、稳定性等定性表征适应能力或采用具体的要素指标定量构建适应能力指数<sup>[116-118]</sup>。结合经济指标、环境、社会因素、政治影响等对适应效果的评价<sup>[118-120]</sup>。适应策略预测性研究主要集中在适应性能力建设及虚拟试验区域适应研究两方面。

### 4.2 困难与挑战

综合现有研究,主题侧重于影响评价(如适应能力、脆弱度等)和策略响应,尽管这些有助于进一步了解区域对全球环境变化的适应,但是指导区域自然、社会、经济可持续发展是一个多学科综合运用与交叉的系统性工程。适应和气候变化均会带来各系统的转型和变化,但因其目的、时空尺度、影响、形式和表现的不同而不同,这增加了适应性研究的难度<sup>[119]</sup>。目前国内外对于这些变化及响应都有不同程度的探讨。全球环境变化的影响和治理具有全球性的特质,各国各区域历史温室气体排放累积量不同、面临的机遇与挑战不同、适应能力不同,适应涉及到从个人到政府层面,且各影响因素相互交织<sup>[120]</sup>。需要加强区域和行业层面的经济、社会、技术和政策决策及行动等方面的适应性研究,构建各区域、各行各业的适应方案,模拟适应结果,这对评估其潜力、风险和实施能力具有重要的理论意义和应用价值<sup>[107,121]</sup>。需进一步定量分析自然-社会-经济系统各

子系统内不同区域与不同行业对全球环境变化响应差异及相互关系,进一步诠释、反映系统内人类活动、生态环境、经济发展、宗教等复杂联系,并在相应的数据采集、监测、模拟等方面创新技术手段与实验方法。

## 5 未来发展趋势

### 5.1 森林生态系统

今后森林生态系统对全球环境变化响应的研究,应深入开展如下方面的研究:(1)关注开展模拟增温对热带亚热带森林生态系统的影响研究,发展大尺度的空气增温(包括生态系统水平)和改进红外加热技术以应用在森林生态系统中,促进增温对森林地上过程影响的认识。(2)开展森林特别是热带亚热带森林更加多样化的降雨控制试验,以促进大尺度森林生态系统对真实降雨变化情景响应的认识。(3)气候变化响应研究中,应关注气候变异和极端气候事件(热浪、冰雪灾害、干旱、热带风暴等)对森林生态系统的影响。(4)开展多因子试验,特别是增温与降雨变化、氮沉降、CO<sub>2</sub>浓度升高等的多因子试验,以及气候变化和其他生态压力(如森林转换、生物入侵、栖息地破碎化)等的多因子试验,以揭示全球环境变化因子间的交互作用及其在不同地区的表现差异。已有研究表明,森林对全球环境变化因子的响应常常是非线性和非可加性的。(5)未来急需十年或更长时间的长期试验研究以揭示森林生态系统对气候变化的长期响应。(6)在生态系统过程研究上,应重视森林地下生态过程对全球环境变化的响应,以及碳、水、养分循环(特别是氮、磷循环)之间的耦合作用。

### 5.2 河口湿地生态系统

全球环境变化对滨海河口湿地的影响及其适应机制研究在近二十年来已得到长足发展,今后仍需深入开展如下研究:(1)加强对各种湿地生态系统碳库和碳吸存的研究,明晰氮沉降和硫沉降对湿地生态系统碳循环的影响;(2)加强盐水入侵对河口湿地生态系统碳氮循环、温室气体排放和有机质代谢途径的影响研究;(3)加强极端气候(热带气旋、风暴潮、海岸侵蚀)对湿地生态系统过程与功能的影响研究;(4)加强全球气候变化对湿地植物种类的分布和扩张、外来物种入侵、高低纬度区域的各湿地植物群落演替和适应策略的影响;(5)加强全球环境变化下滨海湿地蓝碳功能的研究;(6)加强湿地生态系统恢复力和结构转换的研究。应加强人类活动,尤其是土地复垦对湿地生态系统的影响研究;建群种改变对滨海湿地结构和功能的影响;研究滨海红树林修复生态系统的服务和功能。

### 5.3 城市生态系统

城市生态系统与全球环境变化研究未来应:(1)深化城市生物地球化学循环机制研究。我国快速城市化进程将通过高密度的城市活动强烈影响城市生物地球化学循环及分布格局。通过对系统内要素循环的全面分析,有助于理解城市发展中的人为因素对环境要素变化的影响,包括不同社会经济水平生物地球化学输入格局、要素循环过程与代谢方式改变、途径与效率、演变规律和趋势等。同时需要建立完善的要素监测网络,为研究宏观及微观尺度城市生态系统对要素循环变化的响应和反馈等提供重要数据支持。(2)实现城市生态系统的人本需求侧重与转向。目前城市建设目标已从一维社会经济繁荣向三维复合生态繁荣(包括财富、健康、文明)转变<sup>[122]</sup>,未来城市生态系统研究除了对传统时空尺度上的物质、经济活动进行分析,还应实现系统研究中人本需求的侧重与转向,更多地考虑如居民生计、人群健康、风险预警、城市脆弱性等内容的人文视角观察与问题梳理,深入刻画不同层次(家庭、社区、群体、区域、国家)对环境变化的动态反应,从而提高研究成果客观性和适用性,更好地指导城市生态环境建设与可持续发展。(3)开展典型地区长期、多要素综合响应研究。目前城市生态系统的物质变化及其时空过程与机制研究一直是关注热点,但多以系统内关键要素(如大气)时空变化与作用研究为主,多要素综合研究不足,难以完成对复杂巨系统的进一步研究与分析,综合视角下的系统性耦合研究,以及深入探讨系统内多要素变化协同性和差异性等工作还需进一步展开。此外,开展不同生态类型的城市系统特别是典型地区的研究,找出其中变化规律与作用机制等,将有助于更好地分析气候变化和城市化进程的复杂关系,掌握不同区域城市系统对全球环境变化的响应机制等。

#### 5.4 全球环境变化的适应

在全球环境变化的适应研究上,未来应:(1)构架定量化、跨尺度的适应性评价体系。如何定量测度全球环境变化带来的影响,以及如何制定适应策略来规避风险,采取什么指标体系,评价体系之间的时空尺度如何转换,各评价模型的精度测量等是未来需要解决的难题。(2)加强典型区域/部门的适应性研究。气候变化影响是全球尺度的,然而在全球不同区域或者系统所产生的影响则因各自功能和应对能力不同而不同<sup>[123-124]</sup>。因而,各个区域或部门的适应策略需要结合自身的特点及适应能力的差异进行规划制定。(3)提高适应策略实施的可行性研究。因为区域的适应能力取决于适应策略的科学性及可行性<sup>[125]</sup>。地理可视化、地学模拟、虚拟现实等能帮助制定不同城市化和全球环境变化情境下的适应性政策<sup>[125]</sup>,发展计算机模拟、3S技术及其他先进手段和设备,可提高适应性研究的评估、试验和模拟等方面的应用能力。(2)注重适应与减缓对策的关联研究及实施的风险评估。减缓与适应之间以及不同适应响应之间存在显著的共生效益、协同效应和权衡取舍<sup>[55]</sup>;区域内和区域间存在相互影响,这具有很高的可信度<sup>[55]</sup>。一些适应方案可能产生不良副作用,即与其他适应目标、减缓目标或更广泛的发展目标存在实际或感知的权衡取舍,因而需要加强风险评估。

#### 参考文献 (References):

- [ 1 ] Dai A G. Increasing drought under global warming in observations and models. *Nature Climate Change*, 2013, 3(1): 52-58.
- [ 2 ] Lamarque J F, Kiehl J T, Brasseur G P, Butler T, Cameron-Smith P, Collins W D, Collins W J, Granier C, Hauglustaine D, Hess P G, Holland E A, Horowitz L, Lawrence M G, McKenna D, Merilees P, Prather M J, Rasch P J, Rotman D, Shindell D, Thornton P. Assessing future nitrogen deposition and carbon cycle feedback using a multimodel approach: analysis of nitrogen deposition. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2005, 110(D19): D19303.
- [ 3 ] Lu M, Zhou X H, Yang Q, Li H, Luo Y Q, Fang C M, Chen J K, Yang X, Li B. Responses of ecosystem carbon cycle to experimental warming: a meta-analysis. *Ecology*, 2013, 94(3): 726-738.
- [ 4 ] Davidson E A, Janssens I A. Temperature sensitivity of soil carbon decomposition and feedbacks to climate change. *Nature*, 2006, 440(7081): 165-173.
- [ 5 ] Heimann M, Reichstein M. Terrestrial ecosystem carbon dynamics and climate feedbacks. *Nature*, 2008, 451(7176): 289-292.
- [ 6 ] Palmroth S, Oren R, McCarthy H R, Johnsen K H, Finzi A C, Butnor J R, Ryan M G, Schlesinger W H. Aboveground sink strength in forests controls the allocation of carbon belowground and its [CO<sub>2</sub>]-induced enhancement. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2006, 103(51): 19362-19367.
- [ 7 ] van Groenigen K J, Qi X, Osenberg C W, Luo Y Q, Hungate B A. Faster decomposition under increased atmospheric CO<sub>2</sub> limits soil carbon storage. *Science*, 2014, 344(6183): 508-509.
- [ 8 ] Liu L L, Greaver T L. A global perspective on belowground carbon dynamics under nitrogen enrichment. *Ecology Letters*, 2010, 13(7): 819-828.
- [ 9 ] Janssens I A, Dieleman W, Luyssaert S, Subke J A, Reichstein M, Ceulemans R, Ciais P, Dolman A J, Grace J, Matteucci G, Papale D, Piao S L, Schulze E D, Tang J, Law B E. Reduction of forest soil respiration in response to nitrogen deposition. *Nature Geoscience*, 2010, 3(5): 315-322.
- [ 10 ] Cao M K, Woodward F I. Dynamic responses of terrestrial ecosystem carbon cycling to global climate change. *Nature*, 1998, 393(6682): 249-252.
- [ 11 ] Melillo J M, Steudler P A, Aber J D, Newkirk K, Lux H, Bowles F P, Catricala C, Ahrens T, Morrisseau S. Soil warming and carbon-cycle feedbacks to the climate system. *Science*, 2002, 298(5601): 2173-2176.
- [ 12 ] Hopkins F M, Torn M S, Trumbore S E. Warming accelerates decomposition of decades-old carbon in forest soils. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2012, 109(26): E1753-E1761.
- [ 13 ] Butler S M, Melillo J M, Johnson J E, Mohan J, Steudler P A, Lux H, Burrows E, Smith R M, Vario C L, Scott L, Hill T D, Aponte N, Bowles F. Soil warming alters nitrogen cycling in a New England forest: implications for ecosystem function and structure. *Oecologia*, 2012, 168(3): 819-828.
- [ 14 ] Melillo J M, Butler S, Johnson J, Mohan J, Steudler P, Lux H, Burrows E, Bowles F, Smith R, Scott L, Vario C, Hill T, Burton A, Zhou Y M, Tang J. Soil warming, carbon-nitrogen interactions, and forest carbon budgets. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2011, 108(23): 9508-9512.
- [ 15 ] Cookson W R, Osman M, Marschner P, Abaye D A, Clark I, Murphy D V, Stockdale E A, Watson C A. Controls on soil nitrogen cycling and

- microbial community composition across land use and incubation temperature. *Soil Biology and Biochemistry*, 2007, 39(3): 744-756.
- [16] Bai E, Li S L, Xu W H, Li W, Dai W W, Jiang P. A meta-analysis of experimental warming effects on terrestrial nitrogen pools and dynamics. *New Phytologist*, 2013, 199(2): 441-451.
- [17] Chen X Y, Mulder J, Wang Y H. Atmospheric deposition, mineralization and leaching of nitrogen in subtropical forested catchments, South China. *Environmental Geochemistry and Health*, 2004, 26(2): 179-186.
- [18] Fang Y T, Gundersen P, Mo J M, Zhu W X. Nitrogen leaching in response to increased nitrogen inputs in subtropical monsoon forests in southern China. *Forest Ecology and Management*, 2009a, 257(1): 332-342.
- [19] Fang Y T, Zhu W X, Gundersen P, Mo J M, Zhou G Y, Yoh M. Large loss of dissolved organic nitrogen in nitrogen-saturated forests in subtropical China. *Ecosystems*, 2009b, 12(1): 33-45.
- [20] Liu X J, Duan L, Mo J M, Du E Z, Shen J L, Lu X K, Zhang Y, Zhou X B, He C E, Zhang F S. Nitrogen deposition and its ecological impact in China: an overview. *Environmental Pollution*, 2011, 159(10): 2251-2264.
- [21] Cleveland C C, Townsend A R, Taylor P, Alvarez-Clare S, Bustamante M M C, Chuyong G, Dobrowski S Z, Grieron P, Harms K E, Houlton B Z, Marklein A, Parton W, Porder S, Reed S C, Sierra C A, Silver W L, Tanner E V J, Wieder W R. Relationships among net primary productivity, nutrients and climate in tropical rain forest: a pan-tropical analysis. *Ecology Letters*, 2011, 14(9): 939-947.
- [22] Dijkstra F A, Pendall E, Morgan J A, Blumenthal D M, Carrillo Y, LeCain D R, Follett R F, Williams D G. Climate change alters stoichiometry of phosphorus and nitrogen in a semiarid grassland. *New Phytologist*, 2012, 196(3): 807-815.
- [23] Xu X F, Thornton P E, Post W M. A global analysis of soil microbial biomass carbon, nitrogen and phosphorus in terrestrial ecosystems. *Global Ecology and Biogeography*, 2013, 22(6): 737-749.
- [24] Matias L, Castro J, Zamora R. Soil-nutrient availability under a global-change scenario in a Mediterranean mountain ecosystem. *Global change biology*, 2011, 17(4): 1646-1657.
- [25] Menge D N, Field C B. Simulated global changes alter phosphorus demand in annual grassland. *Global Change Biology*, 2007, 13(12): 2582-2591.
- [26] Sardans J, Peñuelas J. Increasing drought decreases phosphorus availability in an evergreen Mediterranean forest. *Plant and Soil*, 2004, 267(1-2): 367-377.
- [27] Hui D F, Deng Q, Tian H Q, Luo Y Q. Climate Change and Carbon Sequestration in Forest Ecosystems. *Handbook of Climate Change Mitigation and Adaptation*, 2017: 555-594.
- [28] Duarte C M, Losada I J, Hendriks I E, Mazarrasa I, Marbà N. The role of coastal plant communities for climate change mitigation and adaptation. *Nature Climate Change*, 2013, 3(11): 961-968.
- [29] Temmerman S, Meire P, Bouma T J, Herman P M J, Ysebaert T, De Vriend H J. Ecosystem-based coastal defence in the face of global change. *Nature*, 2013, 504(7478): 79-83.
- [30] Webb E L, Friess D A, Krauss K W, Cahoon D R, Guntenspergen G R, Phelps J. A global standard for monitoring coastal wetland vulnerability to accelerated sea-level rise. *Nature Climate Change*, 2013, 3(5): 458-465.
- [31] Osland M J, Enwright N, Day R H, Doyle T W. Winter climate change and coastal wetland foundation species: salt marshes vs. mangrove forests in the southeastern United States. *Global Change Biology*, 2013, 19(5): 1482-1494.
- [32] Garris H W, Mitchell R J, Fraser L H, Barrett L R. Forecasting climate change impacts on the distribution of wetland habitat in the Midwestern United States. *Global Change Biology*, 2015, 21(2): 766-776.
- [33] Cahoon D R. Estimating relative sea-level rise and submergence potential at a coastal wetland. *Estuaries and Coasts*, 2015, 38(3): 1077-1084.
- [34] Nuse B L, Cooper R J, Hunter E A. Prospects for predicting changes to coastal wetland bird populations due to accelerated sea level rise. *Ecosphere*, 2015, 6(12): 1-23.
- [35] Spencer T, Schuerch M, Nicholls R J, Hinkel J, Lincke D, Vafeidis A T, Reef R, McFadden L, Brown S. Global coastal wetland change under sea-level rise and related stresses: the DIVA wetland change model. *Global and Planetary Change*, 2016, 139: 15-30.
- [36] Guo W Y, Lambertini C, Li X Z, Meyerson L A, Brix H. Invasion of Old World *Phragmites australis* in the New World: precipitation and temperature patterns combined with human influences redesign the invasive niche. *Global Change Biology*, 2013, 19(11): 3406-3422.
- [37] Lishawa S C, Lawrence B A, Albert D A, Tuchman N C. Biomass harvest of invasive *Typha* promotes plant diversity in a Great Lakes coastal wetland. *Restoration Ecology*, 2015, 23(3): 228-237.
- [38] Kirwan M L, Mudd S M. Response of salt-marsh carbon accumulation to climate change. *Nature*, 2012, 489(7417): 550-553.
- [39] Gatland J R, Santos I R, Maher D T, Duncan T M, Erler D V. Carbon dioxide and methane emissions from an artificially drained coastal wetland during a flood: Implications for wetland global warming potential. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2014, 119(8): 1698-1716.
- [40] Grafton R Q, Pittock J, Davis R, Williams J, Fu G B, Warburton M, Udall B, McKenzie R, Yu X B, Che N, Connell D, Jiang Q, Kompas T,

- Lynch A, Norris R, Possingham H, Quiggin J. Global insights into water resources, climate change and governance. *Nature Climate Change*, 2013, 3(4): 315-321.
- [41] Hulme P E. Adapting to climate change: is there scope for ecological management in the face of a global threat? *Journal of Applied Ecology*, 2005, 42(5): 784-794.
- [42] Bridgman S D, Cadillo-Quiroz H, Keller J K, Zhuang Q L. Methane emissions from wetlands: biogeochemical, microbial, and modeling perspectives from local to global scales. *Global Change Biology*, 2013, 19(5): 1325-1346.
- [43] Mitsch W J, Bernal B, Nahlik A M, Mander Ü, Zhang L, Anderson C J, Jørgensen S E, Brix H. Wetlands, carbon, and climate change. *Landscape Ecology*, 2013, 28(4): 583-597.
- [44] Erwin K L. Wetlands and global climate change: the role of wetland restoration in a changing world. *Wetlands Ecology and Management*, 2009, 17(1): 71-84.
- [45] Cormier N, Krauss K W, Conner W H. Periodicity in stem growth and litterfall in tidal freshwater forested wetlands: influence of salinity and drought on nitrogen recycling. *Estuaries and Coasts*, 2013, 36(3): 533-546.
- [46] Wassens S, Walcott A, Wilson A, Freire R. Frog breeding in rain-fed wetlands after a period of severe drought: implications for predicting the impacts of climate change. *Hydrobiologia*, 2013, 708(1): 69-80.
- [47] Diez J M, D'Antonio C M, Dukes J S, Grosholz E D, Olden J D, Sorte C J B, Blumenthal D M, Bradley B A, Early R, Ibáñez I, Jones S J, Lawler J J, Miller L P. Will extreme climatic events facilitate biological invasions? *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2012, 10(5): 249-257.
- [48] Burkett V, Kusler J. Climate change: potential impacts and interactions in wetlands of the United States. *Journal of the American Water Resources Association*, 2000, 36(2): 313-320.
- [49] Morris J T, Sundareshwar P V, Nietch C T, Kjerfve B, Cahoon D R. Responses of coastal wetlands to rising sea level. *Ecology*, 2002, 83(10): 2869-2877.
- [50] Chambers R M, Odum W E. Porewater oxidation, dissolved phosphate and the iron curtain: iron-phosphorus relations in tidal freshwater marshes. *Biogeochemistry*, 1990, 10(1): 37-52.
- [51] Lamers L P M, Dolle G E T, Van Den Berg S T G, Van Delft S P J, Roelofs J G M. Differential responses of freshwater wetland soils to sulphate pollution. *Biogeochemistry*, 2001, 55(1): 87-101.
- [52] Caraco N F, Cole J J, Likens G E. Evidence for sulphate-controlled phosphorus release from sediments of aquatic systems. *Nature*, 1989, 341(6240): 316-318.
- [53] Rysgaard S, Thastum P, Dalsgaard T, Christensen P B, Sloth N P. Effects of salinity on  $\text{NH}_4^+$  adsorption capacity, nitrification, and denitrification in Danish estuarine sediments. *Estuaries*, 1999, 22(1): 21-30.
- [54] Bu N S, Qu J F, Zhao H, Yan Q W, Zhao B, Fan J L, Fang C M, Li G. Effects of semi-lunar tidal cycling on soil  $\text{CO}_2$  and  $\text{CH}_4$  emissions: a case study in the Yangtze River estuary, China. *Wetlands Ecology and Management*, 2015, 23(4): 727-736.
- [55] IPCC. Working Group I Contribution to the IPCC Fifth Assessment Report, Climate Change 2013: The Physical Science Basis; Summary for Policymakers. (2014-01-29) [2016-11-20]. [http://www.climatechange2013.org/images/report/WG1AR5\\_ALL\\_FINAL.pdf](http://www.climatechange2013.org/images/report/WG1AR5_ALL_FINAL.pdf)
- [56] 陈少勇, 王劲松, 郭俊庭, 芦旭东. 中国西北地区 1961—2009 年极端高温事件的演变特征. *自然资源学报*, 2012, 27(5): 832-844.
- [57] 王艳姣, 任福民, 闫峰. 中国区域持续性高温事件时空变化特征研究. *地理科学*, 2013, 33(3): 314-321.
- [58] 李娇, 任国玉, 任玉玉, 沈志超, 孙秀宝. 辽宁地区夏季高温极值预测模型. *气象与环境学报*, 2012, 28(6): 50—57.
- [59] 史军, 丁一汇, 崔林丽. 华东极端高温气候特征及成因分析. *大气科学*, 2009, 33(2): 347-358.
- [60] 郑祚芳. 北京极端气温变化特征及其对城市化的响应. *地理科学*, 2011, 31(4): 459-463.
- [61] 杨萍, 肖子牛, 刘伟东. 北京气温日变化特征的城郊差异及其季节变化分析. *大气科学*, 2013, 37(1): 101-112.
- [62] Kürbis K, Mudelsee M, Tetzlaff G, Brzdil R. Trends in extremes of temperature, dew point, and precipitation from long instrumental series from central Europe. *Theoretical and Applied Climatology*, 2009, 98(1-2): 187-195.
- [63] 陈正洪, 史瑞琴, 陈波. 季节变化对全球气候变化的响应——以湖北省为例. *地理科学*, 2009, 29(6): 911-916.
- [64] Panday P K, Thibeault J, Frey K E. Changing temperature and precipitation extremes in the Hindu Kush-Himalayan region: an analysis of CMIP3 and CMIP5 simulations and projections. *International Journal of Climatology*, 2015, 35(10): 3058-3077.
- [65] 李庆祥, 黄嘉佑. 环渤海地区城市化对夏季极端暖夜的影响. *气象学报*, 2013, 71(4): 668-676.
- [66] Schlünzen K H, Hoffmann P, Rosenhagen G, Riecke W. Long-term changes and regional differences in temperature and precipitation in the metropolitan area of Hamburg. *International Journal of Climatology*, 2010, 30(8): 1121-1136.
- [67] Dettinger M D, Ghil M, Keppenne C L. Interannual and interdecadal variability in United States surface-air temperatures, 1910-87. *Climatic Change*, 1995, 31(1): 35-66.

- [68] 赵昕奕, 张惠远, 万军. 青藏高原气候变化对气候带的影响. 地理科学, 2002, 22(2):190-195.
- [69] 黄亮, 高苹, 谢小萍, 谢志清, 于庚康. 全球变暖背景下中国干湿气候带变化规律研究. 气象科学, 2013, 33(5):570-576.
- [70] White C J, McInnes K L, Cechet R P, Corney S P, Grose M R, Holz G K, Katzfey J J, Bindoff N L. On regional dynamical downscaling for the assessment and projection of temperature and precipitation extremes across Tasmania, Australia. *Climate dynamics*, 2013, 41(11-12): 3145-3165.
- [71] 邓振镛, 张强, 尹宪志, 孙存杰, 辛吉武, 刘德祥, 蒲金涌, 董安祥. 干旱灾害对干旱气候变化的响应. 冰川冻土, 2007, 29(1):114-118.
- [72] Kovats R S, Hajat S. Heat stress and public health: a critical review. *Annual Review of Public Health*, 2008, 29: 41-55.
- [73] 王敏珍, 郑山, 王式功, 尚可政. 高温热浪对人类健康影响的研究进展. 环境与健康杂志, 2012, 29(7): 662-664.
- [74] 韦惠兰, 欧阳青虎. 气候变化对中国半干旱区农民生计影响初探——以甘肃省半干旱区为例. 干旱区资源与环境, 2012, 26(1): 117-121.
- [75] Jones P G, Thornton P K. Croppers to livestock keepers: livelihood transitions to 2050 in Africa due to climate change. *Environmental Science & Policy*, 2009, 12(4):427-437.
- [76] Schilling J, Freier K P, Hertig E, Scheffran J. Climate change, vulnerability and adaptation in North Africa with focus on Morocco. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2012, 156:12-26.
- [77] 李克让, 曹明奎, 於琰, 吴绍洪. 中国自然生态系统对气候变化的脆弱性评估. 地理研究, 2005, 24(5):653-663.
- [78] 欧阳志云, 王效科, 苗鸿. 中国陆地生态系统服务功能及其生态经济价值的初步研究. 生态学报, 1999, 19(5): 607-613.
- [79] 孟雪松, 欧阳志云, 崔国发, 李伟峰, 郑华. 北京城市生态系统植物种类构成及其分布特征. 生态学报, 2004, 24(10):2200-2206.
- [80] 孙昌龙, 靳诺, 张小雷, 杜宏茹. 城市化不同演化阶段对碳排放的影响差异. 地理科学, 2013, 33(3):266-272.
- [81] 徐国泉, 刘则渊, 姜照华. 中国碳排放的因素分解模型及实证分析:1995-2004. 中国人口·资源与环境, 2006, 16(6):158-161.
- [82] 杨凯, 叶茂, 徐启新. 上海城市废弃物增长的环境库兹涅茨特征研究. 地理研究, 2003, 22(1):60-66.
- [83] 虞依娜, 陈丽丽. 中国环境库兹涅茨曲线研究进展. 生态环境学报, 2012, 21(12):2018-2023.
- [84] Liu Z, Guan D B, Crawford-Brown D, Zhang Q, He K B, Liu J G. Energy policy: A low-carbon road map for China. *Nature*, 2013, 500(7461): 143-145.
- [85] 张雷. 中国一次能源消费的碳排放区域格局变化. 地理研究, 2006, 25(1):1-9.
- [86] 祁悦, 谢高地. 碳排放空间分配及其对中国区域功能的影响. 资源科学, 2009, 31(4):590-597.
- [87] 朱永彬, 王铮, 庞丽, 王丽娟, 邹秀萍. 基于经济模拟的中国能源消费与碳排放高峰预测. 地理学报, 2009, 64(8):935-944.
- [88] 张馨, 牛叔文, 赵春升, 胡莉莉. 中国城市化进程中的居民家庭能源消费及碳排放研究. 中国软科学, 2011, (9):65-75.
- [89] Halicioglu F. An econometric study of CO<sub>2</sub> emissions, energy consumption, income and foreign trade in Turkey. *Energy Policy*, 2009, 37(3): 1156-1164.
- [90] 赵荣钦, 黄贤金, 徐慧, 高珊. 城市系统碳循环与碳管理研究进展. 自然资源学报, 2009, 24(10): 1847-1859
- [91] 刘纪远, 邵全琴, 延晓冬, 樊江文, 邓祥征, 战金艳, 高学杰, 黄麟, 徐新良, 胡云峰, 王军邦, 匡文慧. 土地利用变化对全球气候影响的研究进展与方法初探. 地球科学进展, 2011, 26(10):1015-1022.
- [92] 郑海金, 华璐, 欧立业. 中国土地利用/土地覆盖变化研究综述. 首都师范大学学报(自然科学版), 2003, 24(3):89-95.
- [93] 杜习乐, 吕昌河, 王海荣. 土地利用/覆被变化(LUCC)的环境效应研究进展. 土壤, 2011, 43(3):350-360.
- [94] Jordan T E, Weller D E, Correll D L. Sources of nutrient inputs to the Patuxent River estuary. *Estuaries*, 2003, 26(2):226-243.
- [95] Groffman P M, Law N L, Belt K T, Band L E, Fisher G T. Nitrogen fluxes and retention in urban watershed ecosystems. *Ecosystems*, 2004, 7(4):393-403.
- [96] 王淑兰, 张远航, 钟流举, 李金龙, 于群. 珠江三角洲城市间空气污染的相互影响. 中国环境科学, 2005, 25(2): 133-137.
- [97] 许珊, 邹滨, 蒲强, 郭宇. 土地利用/覆盖的空气污染效应分析. 地球信息科学学报, 2015, 17(3): 290-299.
- [98] 夏军, 谈戈. 全球变化与水文科学新的进展与挑战. 资源科学, 2002, 24(3):1-7.
- [99] 赵文武, 傅伯杰, 陈利顶, 吕一河, 刘永琴. 黄土丘陵沟壑区集水区尺度土地利用格局变化的水土流失效应. 生态学报, 2004, 24(7): 1358-1364.
- [100] 吴建国, 吕佳佳. 土地利用变化对生物多样性的影响. 生态环境学报, 2008, 17(3): 1276-1281.
- [101] 陈广生, 田汉勤. 土地利用/覆盖变化对陆地生态系统碳循环的影响. 植物生态学报, 2007, 31(2):189-204.
- [102] 郑大玮, 潘志华. 适应气候变化的意义. 中国西部科技, 2015, 14(4): 40-41.
- [103] Rael R C, Costantino R F, Cushing J M, Vincent T L. Using stage-structured evolutionary game theory to model the experimentally observed evolution of a genetic polymorphism. *Evolutionary Ecology Research*, 2009, 11: 141-151.
- [104] Bose P S. Vulnerabilities and displacements: adaptation and mitigation to climate change as a new development mantra. *Area*, 2016, 48(2): 168-175.
- [105] Edenhofer O, Seyboth K. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)//Shogren J, ed. *Encyclopedia of Energy, Natural Resource, and*

- Environmental Economics. Amsterdam; Elsevier, 2013, 1:48-56.
- [106] 陈宜瑜. 对开展全球环境变化区域适应研究的几点看法. 地球科学进展, 2004, 19(4):495-499.
- [107] Ivey J L, Smithers J, de Loë R C, Kreutzwiser R D. Community capacity for adaptation to climate-induced water shortages: linking institutional complexity and local actors. Environmental Management, 2004, 33(1):36-47.
- [108] Adger W N. Social capital, collective action, and adaptation to climate change. Economic Geography, 2003, 79(4):387-404.
- [109] Adger W N, Dessai S, Goulden M, Hulme M, Lorenzoni I, Nelson D R, Naess L O, Wolf J, Wreford A. Are there social limits to adaptation to climate change? Climatic Change, 2009, 93(3-4):335-354.
- [110] Pike A, Dawley S, Tomaney J. Resilience, adaptation and adaptability. Cambridge Journal of Regions, Economy and Society, 2010, 3(1):59-70.
- [111] Ndamani F, Watanabe T. Determinants of farmers' adaptation to climate change: a micro level analysis in Ghana. Scientia Agricola, 2016, 73(3):201-208.
- [112] Kato T, Ellis J. Communicating Progress in National and Global Adaptation to Climate Change. OECD/IEA Climate Change Expert Group Papers, 2016.
- [113] Adger W N, Arnell N W, Tompkins E L. Successful adaptation to climate change across scales. Global Environmental Change, 2005, 15(2):77-86.
- [114] Mertz O, Halsnæs K, Olesen J E, Rasmussen K. Adaptation to Climate Change in Developing Countries. Environmental Management, 2009, 43(5):743-752.
- [115] O'Brien K, Eriksen S, Schjolden A, Nygaard L P. What's in a Word? Conflicting Interpretations of Vulnerability in Climate Change Research. Climate Policy, 2004, 7-7.
- [116] Kloeckner C A. Towards a Psychology of Climate Change//Filho W L, ed. The Economic, Social and Political Elements of Climate Change. Berlin Heidelberg: Springer, 2011:153-173.
- [117] Rindfuss R R, Walsh S J, Turner B L, Fox J, Mishra V. Developing a science of land change: challenges and methodological issues. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2004, 101(39):13976-13981.
- [118] Fu R, Pu L, Qian M, Zhu M. Multi-agent system in land-use change modeling// Tian H H, Zhou M, eds. Advances in Information Technology and Education. Berlin Heidelberg: Springer, 2011:288-295.
- [119] Bryant C R, Sarr M A, Délusca K. Agricultural Adaptation to Climate Change. Switzerland: Springer International Publishing, 2016.
- [120] Eakin H, Lemos M C. Adaptation and the state: Latin America and the challenge of capacity-building under globalization. Global Environmental Change, 2006, 16(1):7-18.
- [121] Plummer R, Armitage D. Integrating perspectives on adaptive capacity and environmental governance//Armitage D, Plummer R, eds. Adaptive Capacity and Environmental Governance. Berlin Heidelberg: Springer, 2010:1-19.
- [122] 王如松. 转型期城市生态学前沿研究进展. 生态学报, 2000, 20(5):830-840.
- [123] McCarthy J J, Canziani O F, Leary N A, Dokken D J, White K S. Climate Change 2001: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2001: 81-111.
- [124] Grimm N B, Faeth S H, Golubiewski N E, Redman C L, Wu J G, Bai X M, Briggs J M. Global change and the ecology of cities. Science, 2008, 319(5864):756-760.
- [125] Simonovic S P. Adaptation to climate change: risk management//Elpida K, Oishi S, Teegavarapu R S V, eds. Sustainable Water Resources Planning and Management Under Climate Change. Singapore: Springer, 2017.