

DOI: 10.5846/stxb201912062648

张玉, 冯晓明, 陈利顶, 吕一河, 傅伯杰. 区域生态学的国际起源和研究热点. 生态学报, 2021, 41(8): 3277-3285.

Zhang Y, Feng X M, Chen L D, Lü Y H, Fu B J. International origin and research hotspots of regional ecology. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(8): 3277-3285.

## 区域生态学的国际起源和研究热点

张 玉<sup>1,2</sup>, 冯晓明<sup>1,2,\*</sup>, 陈利顶<sup>1,2</sup>, 吕一河<sup>1,2</sup>, 傅伯杰<sup>1,2</sup>

1 中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085

2 中国科学院大学, 北京 100049

**摘要:** 20 世纪 80 年代以来, 区域生态学迅速发展, 成为生态学领域重要的分支学科。本文综述了区域生态学的国际起源、发展脉络, 以及主要研究热点, 对比了国内外区域生态学研究的区别以及对国内区域生态学发展的启示。分析表明, 在国际上, 区域生态学的研究热点主要集中在生物多样性保护、区域气候变化影响、生态系统服务、城市生态学、区域生态修复和可持续发展等方面。由于国情以及学科发展进度不同, 国内外区域生态学研究在关注问题、研究思路和研究手段上存在区别。国内区域生态学受学科起步较晚、相关数据的质、量和利用率较低及对方法和模型研究尚浅的影响, 未来研究要在深度利用遥感数据的基础上, 加强学科理论和方法的学习, 重点关注气候变化影响生态过程的机理、生态模型优化、全国生态系统服务评估与定价、区域生态安全以及区域可持续发展规划。

**关键词:** 区域生态学; 学科发展; 研究热点; 国内外差异

## International origin and research hotspots of regional ecology

ZHANG Yu<sup>1,2</sup>, FENG Xiaoming<sup>1,2,\*</sup>, CHEN Liding<sup>1,2</sup>, LÜ Yihe<sup>1,2</sup>, FU Bojie<sup>1,2</sup>

1 State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract:** Regional ecology has developed rapidly since 1980 and already become a principal branch of ecology. This article summarizes the international origin, development and research hotspots of regional ecology, compares the differences between domestic and foreign regional ecology research, and provides enlightenment to the development of domestic regional ecology. The analysis shows that international regional ecology hotspots mainly focus on biodiversity protection, the impact of regional climate change, ecosystem services, urban ecology, regional ecological restoration and sustainable development. Due to the difference of national conditions and progress of discipline development, there are differences between domestic and foreign regional ecological study in terms of concerns, ideas and methods. Domestic regional ecology is affected by the late start of discipline, the low quality, quantity and utilization of relevant data and the shallow research on methods and models. Future research should strengthen the learning of theories and methods based on deep utilization of remote sensing data, and focus on how climate change affects ecological processes, optimization of ecological models, assessment and pricing of national ecosystem services, regional ecological security and regional sustainable development planning.

**Key Words:** regional ecology; subject development; research hotspots; domestic and foreign differences

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(41722104)

收稿日期: 2019-12-06; 网络出版日期: 2021-02-24

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: fengxm@rcees.ac.cn

区域生态学作为生态学一门重要的分支学科,将生态学、地理学 and 经济学紧密结合,主要研究区域生态结构、过程、功能,以及区域间生态要素耦合和相互作用机理<sup>[1]</sup>。区域生态学的研究理论强调区域生态系统的整体性和综合性,研究重点从生物多样性和物种保护逐渐扩展到区域生态结构功能关系与复合生态系统等领域。从研究内容来看,生物多样性保护、区域生态结构研究、区域生态安全以及区域可持续发展是主要研究内容。

20 世纪末期开始,与区域生态学相关的研究迅速引起国际关注。在 Web Of Science 上以“Regional Ecology”为主题对所有数据库进行检索,检索结果如图 1。2000—2019 年,区域生态学相关 SCI 论文发表数不断增加,其中 2018 年发表论文数高达 6000 篇。由此可见,在区域发展一体化的形势下,区域生态问题日益得到重视,区域生态学迅速发展,在解决生态问题中举足轻重。

区域生态学作为一门生物学和生态学领域新兴的交叉学科,其诞生到现在已有 30 余年。尽管区域生态学的学科理论以及知识体系还不够完善,但其在解决大尺度生态问题、维持社会可持续发展中发挥着重要作用<sup>[2]</sup>。本文主要对区域生态学的国际起源及其发展历史进行简述,并根据其发展历程和研究文献的综合分析,总结现阶段区域生态学的国际研究热点,并通过国内外的对比,为国内的相关研究给出未来发展方向。

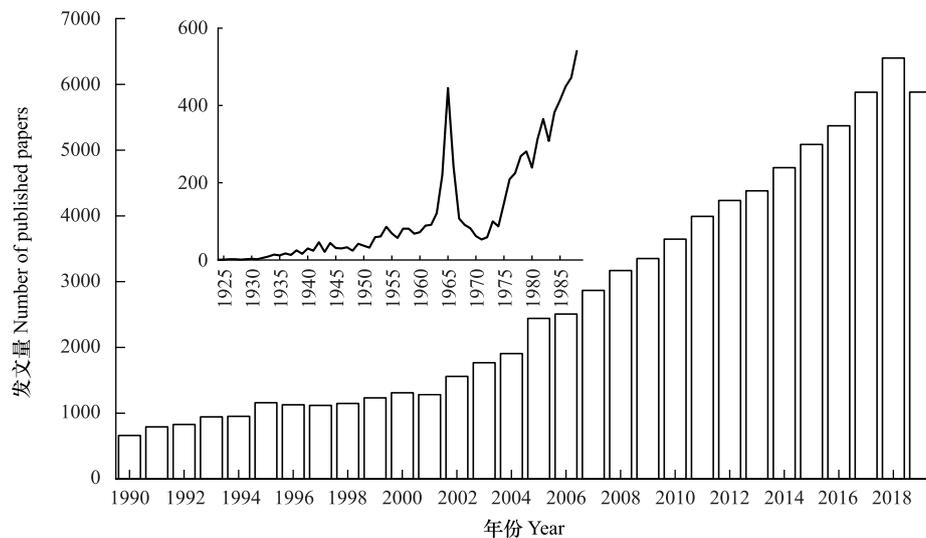


图 1 国际区域生态学论文发表量

Fig.1 Number of published papers about regional ecology in foreign

## 1 区域生态学的国际起源和发展脉络

20 世纪 70 年代,生态学领域中首次出现空间规模的概念<sup>[3]</sup>,科学家意识到部分生态问题具有区域性。1989 年 Brown 和 Maurer<sup>[4]</sup>在发表的文章中提出不同时空尺度上发生的生态现象之间具有耦合过程,而普通生态实验通常假设生态区域同质性,从概念上消除了生态问题的时空相互作用<sup>[5]</sup>。传统生态学方法对全球变化下物种丰度、分布和多样性的研究受限,亟需对生态学研究方法和模式进行创新改进,宏生态学便应时而生。1995 年 Brown<sup>[6]</sup>在出版的 *Macroecology* 一书中系统阐述了宏生态学的定义及研究方法,不仅将时间和空间的概念引入生态学研究,还将生态学的研究推向多学科交叉发展。由于时空尺度实验的不可重复性,宏生态学中强调通过统计模式分析来解决具有时空尺度的生态地理问题。同时,书中相关研究的空间尺度与地理上对区域的定义范围相似,因此区域生态学的起源可追溯至此。1999 年, *Global Ecology and Biogeography* 杂志开始采用 *A Journal of Macroecology* 作为其副标题。区域生态学真正的诞生时间应该是 2003 年,其标志之一是 Kevin Gaston<sup>[7]</sup>出版的 *The Structure and Dynamics of Geographic Ranges* 一书。此书的出版说明生态学家

已经认识到区域生态学在解决具有生物地理特征问题中的重要性,区域生态学开始迅猛发展。学科国际起源时间脉络如图 2。

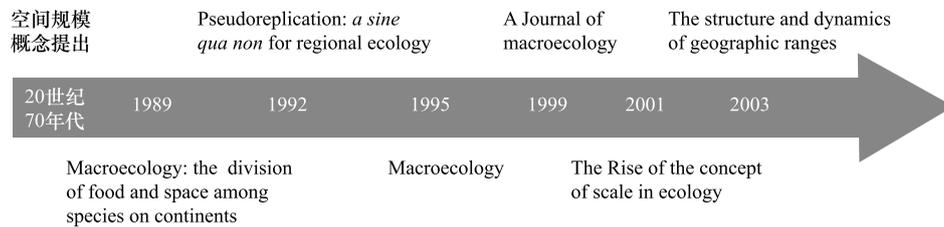


图 2 国际区域生态学起源

Fig.2 International origin of regional ecology

在区域生态学发展初期,受技术发展的限制——仅靠收集科学信息、野外调查、定位观测等生态学技术无法获取足够区域生态相关信息<sup>[8]</sup>。这一时期的研究主要集中于生物个体特征、物种丰富度与物种地理分布三者之间的关系<sup>[9-13]</sup>,生物多样性<sup>[14]</sup>和区域生态过程模型建立<sup>[15-17]</sup>等主要依靠自然实验获取数据的科学问题,其中 Running 等人对生态过程模型的研究推动了遥感等技术在区域生态领域的应用。

20 世纪末,生态学家发现生态问题具有综合性特征,仅靠单一的生态学知识体系无法解决复杂生态问题,为了社会的可持续发展,中国生态学家马世骏率先提出了社会-经济-生态的理论<sup>[18]</sup>,并将其融入到区域生态学的知识体系中,生态学家也开始广泛与其他学科的专家、规划者、工程师等进行合作,从多个角度研究区域生态问题。同时,遥感、卫星成像等空间信息技术迅速发展,生态学研究从生态系统尺度扩展景观、区域甚至全球尺度。强大的空间信息采集和处理功能技术使得获得的区域生态学研究数据充足且更为精确,能精准通过模型系统进行科学预测,揭示区域生态各要素之间的内在联系<sup>[19]</sup>。在强有力的技术支撑下,科学家开始对区域生态安全、区域生态调控以及复杂区域生态进行深入研究。例如对热带森林的生态学研究,生态学家一直受到采样困难的困扰,遥感技术的发展使其能够采集足够的信息数据,这些数据生成的生态学信息推动对热带森林结构和动态的研究<sup>[20]</sup>。

21 世纪后,由于学科理论的完善和研究技术的发展,区域生态学对生物多样性保护以及物种组成等基础内容的研究更加深入,以帮助揭示区域生态结构、功能之间的相互作用关系,进而从区域的视角进行自然保护规划。同时,在全球变化研究热潮下,区域生态学开始重视复合生态系统结构、功能和过程对全球变化的响应,并在研究中充分利用 4S 技术获取高精度高分辨率数据。社会快速进步背景下,经济发展与生态保护之间的矛盾越来越深,人类的社会行为改变了土地覆盖和利用方式,为了响应可持续发展政策,社会对生态系统服务提出了更高要求。在发展中国家,特别是中国,在生态文明建设的号召下,生态学家对区域生态学的研究从区域环境综合治理扩展到生态环境建设。

## 2 国际研究热点

本文以 Web Of Science 数据库中 Web Of Science 核心合集为数据源,以“Regional Ecology”为主题,检索得到 7469 篇相关论文。提取论文关键词,合并同义词并删除无义词,对关键词的频次进行分析,结果如图 3。根据图 3 可以看出,Biodiversity, Climate Change, Conservation, Urban Ecology 和 Sustainability 等是国际区域生态学研究频次较高的关键词。由此可见,国际区域生态研究主要集中在生物多样性保护、气候变化、城市生态等方向,研究空间尺度大多在区域和国家层面。

### 2.1 生物多样性保护

联合国大会决议将 2010 年定为“联合国生物多样性年”,接着将 2011—2020 年定为“联合国生物多样性十年”,生物多样性保护受到了越来越多的重视。在区域生态学领域中,外来物种入侵的预警、监测和防治,



作用,促进植物生长,增加冻土带生态系统的碳封存。同时冻土融化会释放土壤有机碳,影响区域碳循环。现有的模型不能耦合所有影响因素,对碳循环的研究还需要不断发展技术以深入了解<sup>[41]</sup>。

气候变化带来的温度升高、极端气候、海洋热浪等对区域生态系统的结构、过程和功能影响巨大,若不实行减缓气候变化的措施,气候变化会愈演愈烈。研究气候变化影响区域生态系统的机理、预测评估不同程度气候变化对区域生态的效应,是未来应对气候变化的重要任务。

### 2.3 区域生态系统服务

生态系统服务是人类福利的直接来源,是支撑社会经济的基础。对自然生态系统的过度开发导致其服务功能受损,反过来又影响人类社会。通过文献分析可知土地利用变化和气候变化是影响生态服务功能的两个重要因素。Tolessa 等<sup>[42]</sup>对埃塞俄比亚中部高地 40 年的土地利用变化对其生态系统服务的影响进行研究,发现随着林地的减少,生态系统服务也减弱,Liu 等<sup>[43]</sup>也对土地利用与生态系统服务的关系进行研究,认为土地利用数据可用于衡量生态系统服务。由气候变化引起的海洋热浪,改变海洋生态结构,减少海洋碳固存,减弱海洋生态系统服务,尤其是调节服务<sup>[44]</sup>。现有的研究多关注区域生态系统的供给、支持和调节服务,对文化服务的研究尚不足。自然生态系统对人的心理健康具有疗愈作用,这为人居环境的绿地建设以及减少人类接触自然的机会成本提供了参考<sup>[45]</sup>。多个生态系统之间存在相互作用,影响生态系统服务功能。Schirpke 等<sup>[46]</sup>绘制了生态系统服务的供应、流量和需求图,对八个关键生态系统服务功能进行相关性分析和聚类分析,研究生态系统服务之间的联系。最后对区域和跨国治理提出了建议:要将生态系统服务供应区域与生态系统服务需求区域联系起来,并应对不同水平和类型的生态系统服务关系进行说明。

生态系统服务的研究需要重视各生态系统服务及其供需之间的权衡协同关系,保证区域生态系统服务达到最佳状态。建立合适的生态系统服务评估与管理系统,确定生态系统服务价值,以便更好地管理区域生态系统。

### 2.4 城市生态学

城市生态成为区域生态领域新兴的研究热点。目前全球各国城市化进程加快,城市扩张往往侵占高产农田,减少耕地面积,造成粮食减产,威胁贫困脆弱地区的生计,城市的发展要与其他资源的可持续发展结合<sup>[47]</sup>。城市绿地是城市生态中一个重要的研究对象。绿地空间能保证生物多样性以及为城市居民提供多种生态服务<sup>[48]</sup>,城市森林是城市绿地的一种,其分布具有明显的地区差异:居住区和开放区的森林覆盖度更高,富裕地区比贫困地区覆盖度高<sup>[49]</sup>。这增加了贫困区居民接近自然的机会成本,加剧社会不公平性。同时城市生态系统受人为干扰严重,更好地建设城市、管理城市绿地,需要从政治、经济、文化以及技术方面协调社会与自然之间的关系。城市化导致自然生境破碎或丧失,人工生境对生物的影响不可忽视,城市进化生态学的进展讨论了城市化对生物非适应性进化(突变、基因漂变、基因流)的影响、对自然选择的影响以及环境异质性对进化的影响等等<sup>[50]</sup>,其中城市化会阻碍生物基因流,增加生物基因漂变,降低其种群遗传多样性<sup>[51]</sup>。目前已有学者通过基因技术研究城市化对生物的影响,例如 Jason 等<sup>[52]</sup>对城市化程度不同的 23 只白足鼠进行全基因组变异的检测,结果表明城市化程度与白足鼠的全基因组变异成反比关系,并指出增加城市斑块之间的连通性能促进生物进化。

对城市生态学的研究要以协调人与自然的关系为主,解决现存城市生态问题,制定城市健康发展的规划方案。深入讨论城市进化生态学中城市化对生物的影响,以更好进行生物保护。

### 2.5 区域生态修复与管理

随着生态环境的恶化,为缓解经济发展对生态的影响,世界环境与发展委员会提出了可持续发展理念。2015 年,联合国提出 17 个可持续发展目标(SDGs)。实现可持续发展目标,最重要的是通过自然和社会系统的力量,从单纯的环境保护转向结合生态、经济和社会知识进行区域生态恢复和管理<sup>[53]</sup>。地中海地区存在水资源分布不均、生态破坏、粮食安全以及渔业发展受到威胁等问题。作为跨国域的地区,地中海的发展治理需要沿岸 22 个国家的政府合作、学科合作和国家政策支撑以应对未知风险<sup>[54]</sup>,未来需要对整个区域的综合风

险进行全面一致的评估。对渔业的评估管理往往只关注生产力,易破坏水生生态,影响渔业发展。加拿大为可持续管理渔业,从生态、经济和社会方面制定了一系列管理目标,并将目标与相关绩效指标结合,建立全国渔业管理操作框架<sup>[55]</sup>。

基于自然的解决方案(NbS)是保护、可持续管理、恢复自然以及改良生态系统的方法,是实现生态修复和区域可持续发展的有效办法。日本芜栗沼湿地的修复,依靠多个利益相关方合作、国家政策支持、生态补偿等方式,既保证了湿地的生态系统服务,也为当地居民创造了新收入。墨西哥湾北部湿地和屏障岛的修复,通过复垦运河、水沙分流和改变物种组成并进行长期监测等方式,减弱当地台风危害<sup>[56]</sup>。

无论是区域生态系统的恢复还是可持续管理,都要清楚认识到这是一个复合型生态系统,需要进行跨部门、跨学科的合作才能解决问题。同时各国需尽快完善国家生态监测网络平台,积极推进搭建全球生态系统观测网络的国际合作,为大时空尺度生态的修复、管理及预测提供数据和技术支撑。

### 3 国内外研究差异

区域生态学在中国的研究尚处在初级阶段,大多数区域生态研究理论和技术都是借鉴国际上的研究经验,尚未形成相对完整的研究范式。由于国情的不同,产生的区域生态问题具有不同的特征,国内的生态学家在对区域生态的研究过程中形成了适合中国生态情况的学科体系,与国际区域生态形成差别。

#### 3.1 关注问题上的差别

国际上大多数发达国家已经进入工业发展后期,对于区域生态学的研究多偏向于国家或大洲等大尺度的生态空间格局、生物保护、气候变化对生态系统结构和功能的影响以及区域碳氮循环等,而我国目前整体上仍处于快速的工业化和城市化进程中,社会的发展使得资源与环境问题日益突出,区域生态学研究更加关注经济发展过程中典型区域的生态环境问题<sup>[19]</sup>,研究尺度偏小,如黄土高原生态修复、青藏高原生态保护等。

#### 3.2 研究思路上的差别

国内外区域生态学的基本研究思路均为:以系统和整体的观点,利用空间信息技术、数学计算模型等科学技术和区域生态学核心理论对区域生态系统进行分析、模拟、预测并提供解决问题的方案。以欧美为例,其区域生态学发展较为成熟,研究关注的区域尺度较大,探索先进理论方法以指导解决区域生态问题。而我国区域生态学起步较晚,各种生态基础数据不全,区域生态研究关注尺度较小,偏向基础研究。根据生态因果关系和互动机制,对城市生态系统和几个主要自然生态系统进行规划性保护和修复,探索复合生态系统理论以及土地利用改变对生态系统影响。

#### 3.3 研究手段的差别

空间信息技术与数学计算模型的运用能够耦合区域各要素之间的相互作用,深入理解生态问题的动态过程。国内外对区域生态学的研究主要是通过 4S 技术、数学模型应用以及多学科专家合作来系统地分析区域生态结构、过程和功能的特征和变化。由于关注的区域生态重点以及学科发展进度不同,二者的差异体现在:国际上侧重跨学科综合以及统计分析方法,而国内偏向文献研究和问题导向研究方法。

### 4 对国内研究的启示

尽管区域生态学在中国的起源与国际同步,但受前期国情的限制,区域生态学在中国的发展落后国际。国际上的区域生态学经历了从理论、过程模型研究到问题导向研究再到以全局观研究区域生态系统的过程,形成了较为系统的学科体系,而我国的区域生态学是在 21 世纪后区域生态环境问题日益严重的背景之下才得到重视,国内生态学家在探索学科理论体系的同时开始着手解决生态环境问题,导致学科的发展缓慢。国内区域生态学的研究应该循序渐进,用成熟的学科理论基础和研究方法来支撑区域生态的综合研究。

区域生态学研究的科学价值很大程度上取决于实验数据的精度,高质量的研究会充分利用遥感技术获取高时空分辨率数据进行地表反演,以获取研究所需的实验数据。目前国内区域生态学缺乏对遥感数据与野外

实测生态数据的结合,使得大部分遥感数据不具备生态学意义,未来的发展需要对遥感数据进行深度挖掘,让遥感数据的使用价值最大化。

国外区域生态学研究发展比国内成熟,国内许多区域生态研究所运用的理论方法、生态模型等均借鉴了国际研究实例。但不同区域生态系统的生态结构与功能具有差异,不能将国际上成功的研究案例生搬硬套到国内相似的区域生态研究中。在方法应用和数学模型使用时,需要根据实际区域生态系统的情况进行参数修改,同时积极开发适合国内生态研究的模型。

结合国际研究热点、国内生态环境现状以及国内区域生态学研究的不足——学科起步较晚、相关数据的质量及利用率较低及对理论及模型的研究尚浅,未来区域生态学的研究应该在利用高精度实验数据的基础上,将研究重点放在气候变化影响生态过程的机理、生态模型优化、全国生态系统服务评估与定价、区域生态安全以及区域可持续发展规划上。无论是国际还是国内,区域生态学的研究都是在出现生态环境问题之后才发展的,即先经济发展后生态治理保护。这样的发展模式显然是不科学的,未来的发展应该在解决现有生态问题的同时完善生态系统的保护和管理系统,将生态损失降到最低。

## 5 结语

区域生态学作为一门生态学领域新兴的学科,其诞生到现在已有 30 余年。随着空间信息技术的发展以及区域生态问题的恶化,区域生态学的研究内容从生物多样性和物种保护逐渐扩展到区域生态结构功能关系与复合生态系统等领域,开始对区域生态安全、区域生态调控以及复杂区域生态问题进行深入研究。生物多样性保护、区域气候变化影响、生态系统服务、城市生态学、区域生态修复和可持续发展是国际区域生态学领域的研究热点。未来研究会侧重土地利用变化对生态系统的影响、气候变化与人类活动影响生态过程的机理、生态模型优化、生态系统服务全面评估以及如何实现联合国可持续发展 17 个目标等内容。由于学科发展进度和国情不同,国内外的区域生态学研究在关注问题、研究思路和研究手段上有一定的区别。结合国际研究热点、国内生态环境现状以及国内区域生态学研究的不足,未来国内区域生态学的研究要深度挖掘遥感数据并加强对学科理论和方法的学习,重点关注气候变化影响生态过程的机理、生态模型优化、全国生态系统服务评估与定价、区域生态安全以及区域可持续发展规划。

## 参考文献 (References):

- [ 1 ] 高吉喜. 区域生态学基本理论探索. 中国环境科学, 2013, 33(7): 1252-1262.
- [ 2 ] 陈利顶, 吕一河, 赵文武, 卫伟, 冯晓明. 区域生态学的特点、学科定位及其与相邻学科的关系. 生态学报, 2019, 39(13): 4593-4601.
- [ 3 ] Schneider D C. The rise of the concept of scale in ecology: the concept of scale is evolving from verbal expression to quantitative expression. *Bioscience*, 2001, 51(7): 545-553.
- [ 4 ] Brown J H, Maurer B A. Macroecology: the division of food and space among species on continents. *Science*, 1989, 243(4895): 1145-1150.
- [ 5 ] Hargrove W W, Pickering J. Pseudoreplication: a *sine qua non* for regional ecology. *Landscape Ecology*, 1992, 6(4): 251-258.
- [ 6 ] Brown J H. *Macroecology*. Chicago: University of Chicago Press, 1995.
- [ 7 ] 彭宗波, 蒋英, 蒋菊生. 区域生态学研究热点及进展. 生态科学, 2012, 31(1): 91-96.
- [ 8 ] Farina A. Editorial comment: from global to regional landscape ecology. *Landscape Ecology*, 1993, 8(3): 153-154.
- [ 9 ] Gaston K J, Blackburn T M. Range size-body size relationships: evidence of scale dependence. *Oikos*, 1996, 75(3): 479-485.
- [ 10 ] Gaston K J, Lawton J H. Patterns in the distribution and abundance of insect populations. *Nature*, 1988, 331(6158): 709-712.
- [ 11 ] Gaston K J, Lawton J H. Effects of scale and habitat on the relationship between regional distribution and local abundance. *Oikos*, 1990, 58(3): 329-335.
- [ 12 ] Hanski I. Dynamics of regional distribution; the core and satellite species hypothesis. *Oikos*, 1982, 38(2): 210-221.
- [ 13 ] Hanski I, Gyllenberg M. Uniting two general patterns in the distribution of species. *Science*, 1997, 275(5298): 397-400.
- [ 14 ] Gaston K J. Global patterns in biodiversity. *Nature*, 2000, 405(6783): 220-227.
- [ 15 ] Coughlan J C, Running S W. Regional ecosystem simulation: a general model for simulating snow accumulation and melt in mountainous terrain. *Landscape Ecology*, 1997, 12(3): 119-136.
- [ 16 ] Running S W, Coughlan J C. A general model of forest ecosystem processes for regional applications I. Hydrologic balance, canopy gas exchange and primary production processes. *Ecological Modelling*, 1988, 42(2): 125-154.

- [17] Running S W, Nemani R R. Regional hydrologic and carbon balance responses of forests resulting from potential climate change. *Climatic Change*, 1991, 19(4): 349-368.
- [18] 马世骏, 王如松. 社会-经济-自然复合生态系统. *生态学报*, 1984, 4(1): 1-9.
- [19] 高吉喜. 区域生态学核心理论探究. *科学通报*, 2018, 63(8): 693-700.
- [20] Chambers J Q, Asner G P, Morton D C, Anderson L O, Saatchi S S, Espirito-Santo F D B, Palace M, Souza Jr C. Regional ecosystem structure and function: ecological insights from remote sensing of tropical forests. *Trends in Ecology & Evolution*, 2007, 22(8): 414-423.
- [21] Blackburn T M, Bellard C, Ricciardi A. Alien versus native species as drivers of recent extinctions. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2019, 17(4): 203-207.
- [22] Lester P J, Beggs J R. Invasion success and management strategies for social *Vespula* wasps. *Annual Review of Entomology*, 2019, 64: 51-71.
- [23] Chan F T, Stanislawczyk K, Sneekes A C, Dvoretzky A, Gollasch S, Minchin D, David M, Jelmert A, Albrechtsen J, Bailey S A. Climate change opens new frontiers for marine species in the Arctic: current trends and future invasion risks. *Global Change Biology*, 2019, 25(1): 25-38.
- [24] Simberloff D, Martin J L, Genovesi P, Maris V, Wardle D A, Aronson J, Courchamp F, Galil B, García-Berthou E, Pascal M, Pyšek P, Sousa R, Tabacchi E, Vilà M. Impacts of biological invasions: what's what and the way forward. *Trends in Ecology & Evolution*, 2013, 28(1): 58-66.
- [25] Mauvisseau Q, Coignet A, Delaunay C, Pinet F, Bouchon D, Souty-Grosset C. Environmental DNA as an efficient tool for detecting invasive crayfishes in freshwater ponds. *Hydrobiologia*, 2018, 805(1): 163-175.
- [26] Reid A J, Carlson A K, Creed L F, Eliason E J, Gell P A, Johnson P T J, Kidd K A, MacCormack T J, Olden J D, Ormerod S J, Smol J P, Taylor W W, Tockner K, Vermaire J C, Dudgeon D, Cooke S J. Emerging threats and persistent conservation challenges for freshwater biodiversity. *Biological Reviews*, 2019, 94(3): 849-873.
- [27] Crooks K R, Burdett C L, Theobald D M, King S R B, Di Marco M, Rondinini C, Boitani L. Quantification of habitat fragmentation reveals extinction risk in terrestrial mammals. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2017, 114(29): 7635-7640.
- [28] Fahrig L. Ecological Responses to Habitat Fragmentation Per Se. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 2017, 48(1): 1-23.
- [29] Fahrig L, Arroyo-Rodriguez V, Bennett J R, Boucher-Lalonde V, Cazetta E, Currie D J, Eigenbrod F, Ford A T, Harrison S P, Jaeger J A G, Koper N, Martin A E, Martin J L, Metzger J P, Morrison P, Rhodes J R., Saunders D A, Simberloff D, Smith A C, Tischendorf L, Vellend M, Watling J I. Is habitat fragmentation bad for biodiversity? *Biological Conservation*, 2019, 230: 179-186.
- [30] Stevens-Rumann C S, Kemp K B, Higuera P E, Harvey B J, Rother M T, Donato D C, Morgan P, Veblen T T. Evidence for declining forest resilience to wildfires under climate change. *Ecology Letters*, 2018, 21(2): 243-252.
- [31] Esquivel-Muelbert A, Baker T R, Dexter K G, Lewis S L, Brienen R J W, Feldpausch T R, Lloyd J, Monteagudo-Mendoza A, Arroyo L, Álvarez-Dávila E, Higuchi N, Marimon B S, Marimon-Junior B H, Silveira M, Vilanova E, Gloor E, Malhi Y, Chave J, Barlow J, Bonal D, Cardozo N d, Erwin T, Fauset S, Hérault B, Laurance S, Poorter L, Qie L, Stahl C, Sullivan M J P, Ter Steege H, Vos V A, Zuidema P A., Almeida E, de Oliveira E A, Andrade A, Vieira S A, Aragão L, Araujo-Murakami A, Arets E, Aymard C G A, Baraloto C, Camargo P B, Barroso J G, Bongers F, Boot R, Camargo J L, Castro W, Moscoso V C, Comiskey J, Valverde F C, Da Costa A C L, Del Aguila Pasquel J, Di Fiore A, Duque L F, Elias F, Engel J, Llampazo G F, Galbraith D, Fernández R H, Coronado E H, Hubau W, Jimenez-Rojas E, Lima A J N, Umetsu R K, Laurance W, Lopez-Gonzalez G, Lovejoy T, Cruz O A M, Morandi P S, Neill D, Vargas P N, Camacho N C P, Gutierrez A P, Pardo G, Peacock J, Peña-Claros M, Peñuela-Mora M C, Petronelli P, Pickavance G C, Pitman N, Prieto A, Quesada C, Ramírez-Angulo H, Réjou-Méchain M, Correa Z R, Roopsind A, Rudas A, Salomão R, Silva N, Espejo J S, Singh J, Stropp J, Terborgh J, Thomas R, Toledo M, Torres-Lezama A, Gamarra L V, Van De Meer P J, Van Der Heijden G, Van Der Hout P, Martinez R V, Vela C, Vieira I C G, Phillips O L. Compositional response of Amazon forests to climate change. *Global Change Biology*, 2019, 25(1): 39-56.
- [32] Duke N C, Kovacs J M, Griffiths A D, Preece L, Hill D J E, Van Oosterzee P, Mackenzie J, Morning H S, Burrows D. Large-scale dieback of mangroves in Australia's Gulf of Carpentaria: a severe ecosystem response, coincidental with an unusually extreme weather event. *Marine and Freshwater Research*, 2017, 68(10): 1816-1829.
- [33] Hoegh-Guldberg O, Poloczanska E S, Skirving W, Dove S. Coral reef ecosystems under climate change and ocean acidification. *Frontiers in Marine Science*, 2017, 4: 158.
- [34] Hughes T P, Kerry J T, Baird A H, Connolly S R, Dietzel A, Eakin C M, Heron S F, Hoey A S, Hoogenboom M O, Liu G, McWilliam M J, Pears R J, Pratchett M S, Skirving W J, Stella J S, Torda G. Global warming transforms coral reef assemblages. *Nature*, 2018, 556(7702): 492-496.
- [35] Stuart-Smith R D, Brown C J, Ceccarelli D M, Edgar G J. Ecosystem restructuring along the Great Barrier Reef following mass coral bleaching. *Nature*, 2018, 560(7716): 92-96.
- [36] Lee J R, Raymond B, Bracegirdle T J, Chadès I, Fuller R A, Shaw J D, Terauds A. Climate change drives expansion of Antarctic ice-free habitat. *Nature*, 2017, 547(7661): 49-54.
- [37] The IMBIE team. Mass balance of the Antarctic Ice Sheet from 1992 to 2017. *Nature*, 2018, 558(7709): 219-222.
- [38] Biskaborn B K, Smith S L, Noetzi J, Matthes H, Vieira G, Streletskiy D A, Schoeneich P, Romanovsky V E, Lewkowicz A G, Abramov A, Allard M, Boike J, Cable W L, Christiansen H H, Delaloye R, Diekmann B, Drozdov D, Eitzmüller B, Grosse G, Guglielmin M, Ingeman-Nielsen T, Isaksen K, Ishikawa M, Johansson M, Johannsson H, Joo A, Kaverin D, Kholodov A, Konstantinov P, Kröger T, Lambiel C,

- Lanckman J P, Luo D L, Malkova G, Meiklejohn I, Moskalenko N, Oliva M, Phillips M, Ramos M, Sannel A B K, Sergeev D, Seybold C, Skryabin P, Vasiliev A, Wu Q B, Yoshikawa K, Zheleznyak M, Lantuit H. Permafrost is warming at a global scale. *Nature Communications*, 2019, 10(1): 264.
- [39] Mammola S, Goodacre S L, Isaia M. Climate change may drive cave spiders to extinction. *Ecography*, 2018, 41(1): 233-243.
- [40] Jiang Y Y, Rocha A V, Rastetter E B, Shaver G R, Mishra U, Zhuang Q L, Kwiatkowski B L. C-N-P interactions control climate driven changes in regional patterns of C storage on the North Slope of Alaska. *Landscape Ecology*, 2016, 31(1): 195-213.
- [41] Sitch S, Friedlingstein P, Gruber N, Jones S D, Murray-Tortarolo G, Ahlström A, Doney S C, Graven H, Heinze C, Huntingford C, Levis S, Levy P E, Lomas M, Poulter B, Viovy N, Zaehle S, Zeng N, Arneth A, Bonan G, Bopp L, Canadell J G, Chevallier F, Ciais P, Ellis R, Gloor M, Peylin P, Piao S L, Le Quéré C, Smith B, Zhu Z, Myneni R. Recent trends and drivers of regional sources and sinks of carbon dioxide. *Biogeosciences*, 2015, 12(3): 653-679.
- [42] Tolessa T, Senbeta F, Kidane M. The impact of land use/land cover change on ecosystem services in the central highlands of Ethiopia. *Ecosystem Services*, 2017, 23: 47-54.
- [43] Liu W, Zhan J Y, Zhao F, Yan H M, Zhang F, Wei X Q. Impacts of urbanization-induced land-use changes on ecosystem services: a case study of the Pearl River Delta Metropolitan Region, China. *Ecological Indicators*, 2019, 98: 228-238.
- [44] Smale D A, Wernberg T, Oliver E C J, Thomsen M, Harvey B P, Straub S C, Burrows M T, Alexander L V, Benthuyzen J A, Donat M G, Feng M, Hobday A J, Holbrook N J, Perkins-Kirkpatrick S E, Scannell H A, Gupta A S, Payne B L, Moore P J. Marine heatwaves threaten global biodiversity and the provision of ecosystem services. *Nature Climate Change*, 2019, 9(4): 306-312.
- [45] Bratman G N, Anderson C B, Berman M G, Cochran B, De Vries S, Flanders J, Folke C, Frumkin H, Gross J J, Hartig T, Kahn Jr P H, Kuo M, Lawler J J, Levin P S, Lindahl T, Meyer-Lindenberg A, Mitchell R, Ouyang Z Y, Roe J, Scarlett L, Smith J R, Van Den Bosch M, Wheeler B W, White M P, Zheng H, Daily G C. Nature and mental health: an ecosystem service perspective. *Science Advances*, 2019, 5(7): eaax0903.
- [46] Schirpke U, Candiago S, Vigl L E, Jäger H, Labadini A, Marsoner T, Meisch C, Tasser E, Tappeiner U. Integrating supply, flow and demand to enhance the understanding of interactions among multiple ecosystem services. *Science of the Total Environment*, 2019, 651: 928-941.
- [47] D'Amour C B, Reitsma F, Baiocchi G, Barthel S, Güneralp B, Erb K H, Haberl H, Creutzig F, Seto K C. Future urban land expansion and implications for global croplands. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2017, 114(34): 8939-8944.
- [48] Aronson M F J, Lepezyk C A, Evans K L, Goddard M A, Lerman S B, MacIvor J S, Nilon C H, Vargo T. Biodiversity in the city: key challenges for urban green space management. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2017, 15(4): 189-196.
- [49] Fan C, Johnston M, Darling L, Scott L, Liao F H. Land use and socio-economic determinants of urban forest structure and diversity. *Landscape and Urban Planning*, 2019, 181: 10-21.
- [50] Rivkin L R, Santangelo J S, Alberti M, Aronson M F J, De Keyser C W, Diamond S E, Fortin M J, Frazee L J, Gorton A J, Hendry A P, Liu Y, Losos J B, MacIvor J S, Martin R A, McDonnell M J, Miles L S, Munshi-South J, Ness R W, Newman A E M, Stothart M R., Theodorou P, Thompson K A, Verrelli B C, Whitehead A, Winchell K M, Johnson M T J. A roadmap for urban evolutionary ecology. *Evolutionary Applications*, 2019, 12(3): 384-398.
- [51] Johnson M T J, Munshi-South J. Evolution of life in urban environments. *Science*, 2017, 358(6363): eaam8327.
- [52] Munshi-South J, Zolnik C P, Harris S E. Population genomics of the Anthropocene; urbanization is negatively associated with genome-wide variation in white-footed mouse populations. *Evolutionary Applications*, 2016, 9(4): 546-564.
- [53] Keesstra S, Mol G, De Leeuw J, Okx J, Molenaar C, De Cleen M, Visser S. Soil-related sustainable development goals: four concepts to make land degradation neutrality and restoration work. *Land*, 2018, 7(4): 1-20.
- [54] Cramer W, Guiot J, Fader M, Garrabou J, Gattuso J P, Iglesias A, Lange M A, Lionello P, Llasat M C, Paz S, Peñuelas J, Snoussi M, Toreti A, Tsimplis M N, Xoplaki E. Climate change and interconnected risks to sustainable development in the Mediterranean. *Nature Climate Change*, 2018, 8(11): 972-980.
- [55] Stephenson R L, Wiber M, Paul S, Angel Eric, Benson A, Charles A, Chouinard O, Edwards D, Foley P, Lane D, McIsaac J, Neis B, Parlee C, Pinkerton E, Saunders M, Squires K, Sumaila U R. Integrating diverse objectives for sustainable fisheries in Canada. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 2019, 76(3): 480-496.
- [56] Cohen-Shacham E, Walters G, Janzen C, Maginnis S. Nature-based solutions to address global societal challenges. Gland: IUCN, 2016.