



# 全球变化与生态系统研究现状与展望

牛书丽\* 陈卫楠

<sup>1</sup>中国科学院地理科学与资源研究所生态系统网络观测与模拟重点实验室, 北京 100101; <sup>2</sup>中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100049

**摘要** 全球变化与生态系统研究是一个宏观与微观相互交叉、多学科相互渗透的前沿科学领域, 重点研究生态系统结构和功能对全球变化的响应及反馈作用, 其目标是实现人类对生态系统服务的可持续利用。《植物生态学报》的《全球变化与生态系统》专辑在对国内外全球变化研究进行历史回顾和综合分析的基础上, 总结了全球变化与生态系统研究的阶段性重大进展及存在的主要问题, 并对全球变化研究的前沿方向进行展望和建议。根据研究内容和对象, 该专辑系统地综述了不同全球变化因子, 包括CO<sub>2</sub>和O<sub>3</sub>浓度升高、气候变暖、降水格局改变、氮沉降增加、土地利用变化等对陆地植物生理生态、群落结构及生态系统功能等的影响以及全球变化对海洋生态系统的影响; 探讨生态系统关键过程以及生物多样性的变化; 在明确全球变化生态效应的基础上, 阐明这些影响对气候和环境变化的反馈机制, 为构筑全球变化的适应对策提供生态学理论基础。

**关键词** 气候变化; 生态系统; 气候变暖; 氮沉降; 降水格局; CO<sub>2</sub>浓度上升; 土地利用改变

牛书丽, 陈卫楠 (2020). 全球变化与生态系统研究现状与展望. 植物生态学报, 44, 449–460. DOI: 10.17521/cjpe.2019.0355

## Global change and ecosystems research progress and prospect

NIU Shu-Li\* and CHEN Wei-Nan

<sup>1</sup>Key Laboratory of Ecosystem Network Observation and Modeling, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; and <sup>2</sup>College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

### Abstract

The response and feedback of ecosystems to global change is a scientific frontier in ecosystem ecology, which combines macro- and micro-level studies across multidisciplines. It focuses on the responses of ecosystem structure and function to global change, and its objective is to achieve sustainable use of ecosystem services. Based on the review of previous studies, we summarized the major progress and main achievements in this field and made an outlook for future challenges. According to the research content and object, this special issue systematically reviewed the effects of different global change factors, including increasing atmospheric CO<sub>2</sub> and O<sub>3</sub> concentration, global warming, precipitation change, increasing nitrogen deposition and land use change, on terrestrial plant ecophysiology, community structure, and ecosystem functions, and global change impacts on marine ecosystems. It mainly discussed the changes in biogeochemical cycles and biodiversity under global change, and clarified the mechanisms underlying feedback between ecosystem and climate change. The study of this research area could provide theoretical basis for the construction of global change adaptation strategies.

**Key words** climate change; ecosystem; warming; nitrogen deposition; altered precipitation; CO<sub>2</sub> enrichment; land use change

Niu SL, Chen WN (2020). Global change and ecosystems research progress and prospect. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 44, 449–460. DOI: 10.17521/cjpe.2019.0355

## 1 全球变化与生态系统研究概况

全球变化是指由自然和人为因素引起的地球系统结构和功能的变化, 以及这些变化所产生的影响, 主要包括大气成分变化(如CO<sub>2</sub>浓度及其他温室气体的变化)、气候变化、土地利用和土地覆盖变化、

生物多样性变化、冰川消融及海平面上升等(Vitousek, 1992, 1994; 方精云, 2000; 于贵瑞, 2003)。全球变化已经导致生态系统发生深刻改变, 这些改变将直接影响甚至威胁人类的生存环境及社会经济的可持续发展(IPCC, 2014)。全球变化与生态系统的研究正是在这样的背景下形成的, 是一门宏观与微观

收稿日期Received: 2019-12-22 接受日期Accepted: 2020-03-14

基金项目: 国家自然科学基金委员会基础科学中心项目(31988102)。Supported by the National Natural Science Foundation of China for Basic Science Center Project (31988102).

\* E-mail: sniu@igsnrr.ac.cn

相互交叉、多学科相互渗透的前沿研究领域, 主要研究全球变化要素对生态格局、过程和功能的影响, 以及生态系统对全球变化的响应和适应, 目标是实现人类对生态系统服务的可持续利用(傅伯杰等, 2005; 田汉勤等, 2007)。

全球变化与生态系统研究是20世纪60年代初开始逐步形成、发展起来的生态学分支领域。一些全球研究计划的兴起支撑和推动了全球变化与陆地生态系统的研究, 比如国际地圈生物圈计划(IGBP)、全球变化人文因素计划(IHDP)、世界气候研究计划(WCRP)、生物多样性计划(DIVERSITAS)等。IGBP是在国际生物学计划(IBP)和人与生物圈计划(MAB)的基础上由国际科学理事会(ICSU)于1986年建立组织起来的, 旨在制定区域和国际政策, 讨论全球变化及其所产生的影响。其中“全球变化和陆地生态系统”(GCTE)研究计划是IGBP的一个核心研究计划, 旨在分析全球尺度上大气成分、气候、人类活动和其他环境变化对陆地生态系统结构和功能的影响, 预测未来全球变化可能带来的农业、林业、土壤和生态系统复杂性的改变。2014年, 由ICSU和国际社会科学理事会(ISSC)发起的未来地球计划(Future Earth)整合了上述4个计划, 促使全球变化研究加强自然科学与社会科学的沟通与合作, 标志着全球变化与陆地生态系统研究跨入了一个新的深度和广度, 逐步走向服务于可持续发展的新阶段。

伴随着这些研究计划的执行, 一系列全球变化与陆地生态系统研究的专著陆续出版, 标志着这一学科逐步走向成熟。例如: 国际上2003年由Melillo等编著的《Interactions of the Major Biogeochemical Cycles: Global Change and Human Impacts》系统阐述了全球变化对生物地球化学循环的影响。其后全球碳计划(Global Carbon Project)连续公布了7期碳循环研究报告。2011年由Shugart和Woodward编著的《Global Change and the Terrestrial Biosphere: Achievements and Challenges》介绍了全球变化对陆地生态系统影响的最新进展。此外, IPCC已出版发行了5期评估报告, 全面总结了气候变化及其影响的研究成果。Post于2013年编著的《Ecology of Climate Change: the Importance of Biotic Interactions》从生物间相互作用的角度诠释了气候变化的生态影响。中国学者方精云于2000年主编的《全球生态学: 气候变化与生态响应》推动了国内全球变化与陆地生态

系统研究的发展, 2016–2017年由国家自然科学基金委员会组织出版的《生态学的现状与发展趋势》(于振良, 2017)《地理科学三十年: 从经典到前沿》(冷疏影, 2016)从学科发展角度也分别对中国的全球变化与陆地生态系统研究进展进行了阶段性的总结和展望。

本专辑从生态系统生态学研究的角度, 根据全球变化各个因子对生态系统的影响特征, 重点综述陆地生态系统植物生理生态、群落结构、生物地球化学循环等过程对大气CO<sub>2</sub>和臭氧浓度升高(冯兆忠等, 2020a, 2020b)、气候变暖(夏建阳等, 2020)、降雨格局改变(周贵尧等, 2020)、氮沉降(付伟等, 2020)、土地利用(白娥和薛冰, 2020)和放牧(张扬建等, 2020)的响应, 海洋生态系统(叶幼亭等, 2020)及淡水生态系统(邢鹏等, 2020)对全球变化的响应等方面取得的重大进展, 并指出存在的主要问题、前沿方向展望及需要加强的优先研究领域等, 以期促进全球变化和生态系统研究的发展。

## 2 基于文献计量分析的近20年来全球变化与生态系统研究发展状况

### 2.1 数据来源与研究方法

基于Clarivate Analytics公司的Web of Science (WOS)核心数据库和广泛应用于文献计量领域的CiteSpace软件(CiteSpace 5.5.R2), 对2000–2019年间全球有关全球变化与生态系统的WOS核心数据库文章进行检索和统计分析。检索式是(TS = global climate change OR TS = climate change OR TS = global change) AND (TS = ecosystem), 共检索到文献51 600篇。利用CiteSpace的关键词聚类 and 突变检测功能(陈超美等, 2009), 对上述记录进行了分析。突变词是指所分析文献中在某些年份骤增的关键词或主题, CiteSpace软件可以实现突变词探测(burst detection), 从导入文献记录中检测频次变化率高的突变词及其突变开始与结束年份, 以强度表征其受关注度, 可以确定某个领域的研究前沿(陈超美等, 2009; 梅振荣和李杨, 2018)。同时针对不同国家、科研机构、生态系统类型、研究方法、权威期刊等不同方面对2000–2019年间全球变化和生态系统领域的文章发表情况分别进行了统计分析。

### 2.2 结果分析

过去几十年来, 科研人员在全球变化对生物多

样性、群落结构和生态系统功能影响三个方面都取得了突破性的进展,持续关注物种分布、生物多样性、生物群区对全球变化的响应、生态系统生产力、碳源汇功能、生态系统的脆弱性与生态系统健康变化等焦点问题。基于CiteSpace的关键词聚类可以反映出近20年来全球变化和生态系统领域的总体研究内容和主要关注问题。根据高频度的关键词统计结果(表1),过去近20年间全球变化与生态系统的研究内容主要集中在以下几个方面:生物多样性、碳氮水循环、土地利用变化、不同全球变化因子下森林和草地等主要生态系统受到的影响及其响应与适应。这些高频关键词涵盖了过去近20年来全球变化与生态系统研究的主要领域及其关键科学问题,反映了该学科研究的科学前沿主要集中在全球变化背景下生态系统的组成、结构、过程、功能,服务的格局、动态、趋势、稳定性、脆弱性、变异性和适应性,以及减缓和适应气候变化的管理措施。此外,植被、模型、碳、土壤等大类关键词也频繁出现,说明植被和土壤碳循环对全球变化的响应和适应以及模型研究手段等依旧是分析全球变化生态学问题的

重要角度和切入点。此外,美国和中国等词汇的频繁出现也反映出中美是目前全球变化研究领域最为活跃的两个国家。类似地,关键词突变检测结果(表2)也显示,在21世纪前10年,本领域的聚焦点主要集中在碳循环对全球变化的响应上;同时CO<sub>2</sub>浓度升高、光合、分解和火烧是2000–2014年间不间断的突变词,反映了这几个主题在此期间一直都是备受关注的。近5年来,生态系统脆弱性、生态系统恢复、景观和可持续性等方面的研究工作成为全球变化领域新的热点,具有较高的活跃度,未来可能会成为全球气候变化研究领域重要前沿。同时,值得注意的是,近几年来中国在全球变化国际舞台上的活跃度日益增强,未来在引领前沿研究上将会发挥更大的作用。

在全球变化和生态系统研究领域,近20年来发文量排在前10的国家分别为美国、中国、英国、德国、加拿大、澳大利亚、法国、西班牙、瑞典和意大利(图1A)。2000–2019年间全球和以上10个国家在该领域的文章发表量都呈现出指数增长态势,其中中国的上升速度远超其他主要国家和全球总体水平

表1 2000–2019年间全球变化与生态系统方向Web of Science核心数据库文章中出现频次最多的前40个关键词

Table 1 Top 40 keywords with the highest frequency in articles of Web of Science on global change and ecosystem during 2000–2019

序号 Number	关键词 <sup>1)</sup> Keyword <sup>1)</sup>	频次 Frequency	序号 Number	关键词 <sup>1)</sup> Keywords <sup>1)</sup>	频次 Frequency
1	Global change (全球变化)	28 551	21	Drought (干旱)	1 917
2	Ecosystem (生态系统)	9 362	22	Water (水)	1 785
3	Biodiversity (生物多样性)	7 784	23	Soil (土壤)	1 763
4	Carbon (碳)	6 507	24	Precipitation (降水)	1 515
5	Impact (影响)	4 478	25	Biome (生物群区)	1 511
6	Temperature (温度)	3 934	26	Productivity (生产力)	1 442
7	Dynamics (动态)	3 738	27	Elevated CO <sub>2</sub> (CO <sub>2</sub> 浓度上升)	1 436
8	Land use (土地利用)	3 335	28	Resilience (弹性)	1 371
9	Vegetation (植被)	3 333	29	Grassland (草地)	1 362
10	Management (管理)	3 304	30	United States (美国)	1 327
11	Model (模型)	3 015	31	Ecology (生态学)	1 258
12	Response (响应)	3 000	32	Disturbance (干扰)	1 206
13	Forest (森林)	2 993	33	Plant (植物)	1 134
14	Ecosystem service (生态系统服务)	2 816	34	Adaptation (适应)	1 105
15	Variability (变异)	2 674	35	Trend (趋势)	1 075
16	Conservation (保护)	2 634	36	China (中国)	752
17	Pattern (格局)	2 453	37	Population (种群)	730
18	Growth (增长)	2 383	38	Vulnerability (脆弱性)	696
19	Community (群落)	2 264	39	Photosynthesis (光合)	677
20	Nitrogen (氮)	2 165	40	Respiration (呼吸)	620

1)在Web of Science中使用英文单词进行检索,为方便国内读者,在括号中标出中文。

1) English keywords were used to retrieve information from the Web of Science; Chinese keywords for Chinese reader.

DOI: 10.17521/cjpe.2019.0355

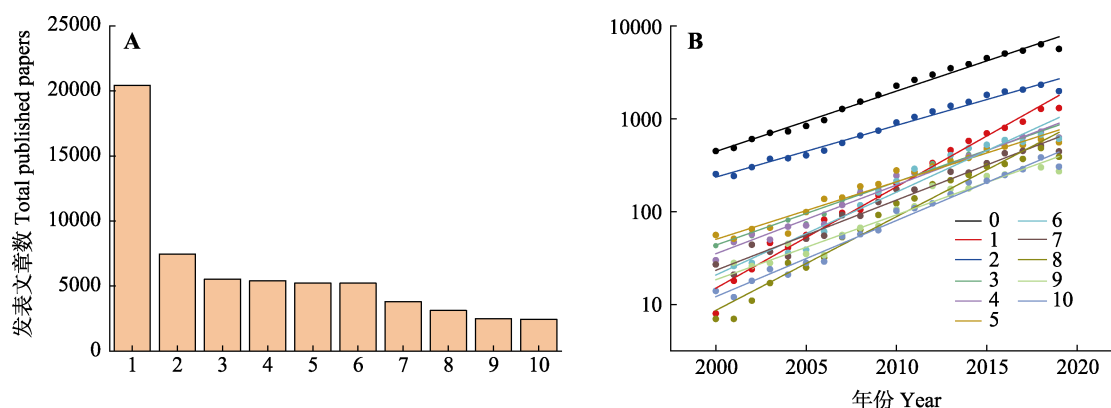
表2 2000–2019年间全球变化与生态系统方向Web of Science核心数据库文章关键词突变检测结果

Table 2 Keywords burst detection results of articles of Web of Science on global change and ecosystem during 2000–2019

关键词 Keyword	中文 Chinese	发表年份 Published year	强度 Strength	开始年份 Begin year	结束年份 End year
El Nino	厄尔尼诺	2000	57.34	2000	2004
Elevated CO <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub> 浓度升高	2000	154.21	2000	2014
Forest ecosystem	森林生态系统	2000	40.77	2000	2004
Simulation	模拟	2000	39.49	2000	2004
Carbon cycle	碳循环	2000	47.14	2000	2004
Net primary productivity	净初级生产力	2000	140.50	2000	2009
Global change	全球变化	2000	76.92	2000	2007
Soil respiration	土壤呼吸	2000	114.42	2000	2009
Atmospheric CO <sub>2</sub>	大气CO <sub>2</sub>	2000	223.11	2000	2009
Photosynthesis	光合作用	2000	138.90	2000	2014
Nitrogen	氮	2000	17.94	2000	2002
Ocean	海洋	2000	104.00	2000	2009
Carbon dioxide	二氧化碳	2000	83.29	2000	2006
Decomposition	分解	2000	120.64	2000	2014
Boreal forest	北方森林	2000	147.81	2000	2009
Fire	火烧	2000	122.93	2000	2014
United States	美国	2000	55.06	2001	2008
Grassland	草地	2000	4.11	2003	2004
Terrestrial ecosystem	陆地生态系统	2000	5.87	2003	2006
Global warming	全球变暖	2000	75.50	2005	2009
Long term	长期	2000	78.38	2005	2009
Population	种群	2000	129.29	2005	2014
Phytoplankton	浮游植物	2000	102.34	2010	2014
Restoration	恢复	2000	89.04	2015	2019
Landscape	景观	2000	88.71	2015	2019
Vulnerability	脆弱性	2000	100.25	2015	2019
China	中国	2000	110.83	2015	2019
Framework	框架	2000	85.46	2015	2019
Sustainability	可持续性	2000	81.89	2015	2019

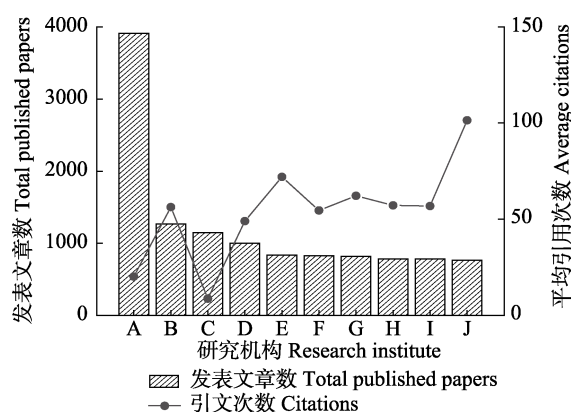
(图1B)。从图1B可以看出, 相比欧美学术界, 中国虽然在全球变化领域的研究起点较低, 起步较晚, 但是随着“绿水青山就是金山银山”的科学论断的提出和“大力推进生态文明建设”的战略决策的实施, 近年来我国对于全球变化背景下生态环境问题和可持续发展等方面的研究日益重视, 成果飞速增加。对研究机构的分析表明, 2000–2019年间该领域发表文章数最多的10个研究机构分别为中国科学院、美国地质调查局、中国科学院大学、美国林务局、美国科罗拉多州立大学、美国华盛顿大学、美国国家海洋大气局、美国俄勒冈州立大学、加拿大英属哥伦比亚大学、美国加州大学伯克利分校(图2)。其中, 在排名前10的研究机构中, 来自美国的机构占到了7

席, 在一定程度上反映出美国依然拥有全球变化领域最活跃的研究群体。同时, 作为中国自然科学最高学术机构和国家战略科技力量的中国科学院在该领域发文量远超其他机构; 成立时间仅数年的中国科学院大学排名跃居第三。这表明我国在全球变化研究上具有强劲的发展势头, 已成为该领域的重要力量。值得注意的是, 从引用情况来看, 美国加州大学伯克利分校虽然发文量显著低于中国科学院, 但是其平均引用次数远远高于其他所有机构, 说明在该领域具有较强的影响力。这表明相比美国科研机构, 中国在该领域的论文影响力尚有一定的提升空间, 需要科研成果数量和质量齐头并进, 从而全方位实现从跟跑、并跑到领跑的跨越。



**图1** 2000–2019年间不同国家在全球变化与生态系统方向Web of Science核心数据库文章发表总量(A)及变化趋势(B)。其中B中的数据经过了以10为底的对数转换处理。0, 全球; 1, 中国; 2, 美国; 3, 英国; 4, 德国; 5, 加拿大; 6, 澳大利亚; 7, 法国; 8, 西班牙; 9, 瑞典; 10, 意大利。

**Fig. 1** Total published papers (A) and temporal variation (B) of articles of Web of Science on global change and ecosystem from different countries during 2000–2019. Data in B were applied with a log transformation. 0, global; 1, China; 2, USA; 3, UK; 4, Germany; 5, Canada; 6, Australia; 7, France; 8, Spain; 9, Sweden; 10, Italy.



**图2** 2000–2019年间不同研究机构在全球变化与生态系统方向Web of Science核心数据库文章发表总量及引用情况。A, 中国科学院; B, 美国地质调查局; C, 中国科学院大学; D, 美国林务局; E, 美国科罗拉多州立大学; F, 美国华盛顿大学; G, 美国国家海洋大气局; H, 美国俄勒冈州立大学; I, 加拿大英属哥伦比亚大学; J, 美国加州大学伯克利分校。

**Fig. 2** Total published papers and citations of Web of Science of different research institutes worldwide on global change and ecosystem during 2000–2019. A, Chinese Academy of Sciences; B, U.S. Geological Survey; C, University of Chinese Academy of Sciences; D, U.S. Forest Survey; E, Colorado State University, U.S.; F, University of Washington, U.S.; G, U.S. National Oceanic and Atmospheric Administration; H, Oregon State University, U.S.; I, University of British Columbia, Canada; J, University of California, Berkeley, U.S..

同时, 我们分别从生态系统类型、研究方法、全球变化因子、权威期刊等不同方面对2000–2019年间全球变化和生态系统领域的文章发表情况进行了统计分析(图3)。从生态系统类型来看, 目前全球变化领域陆地生态系统相关的研究多于海洋生态系统和淡水生态系统, 前者的研究又主要集中于森林和草地这两种陆地主体生态系统。其中, 中国在草

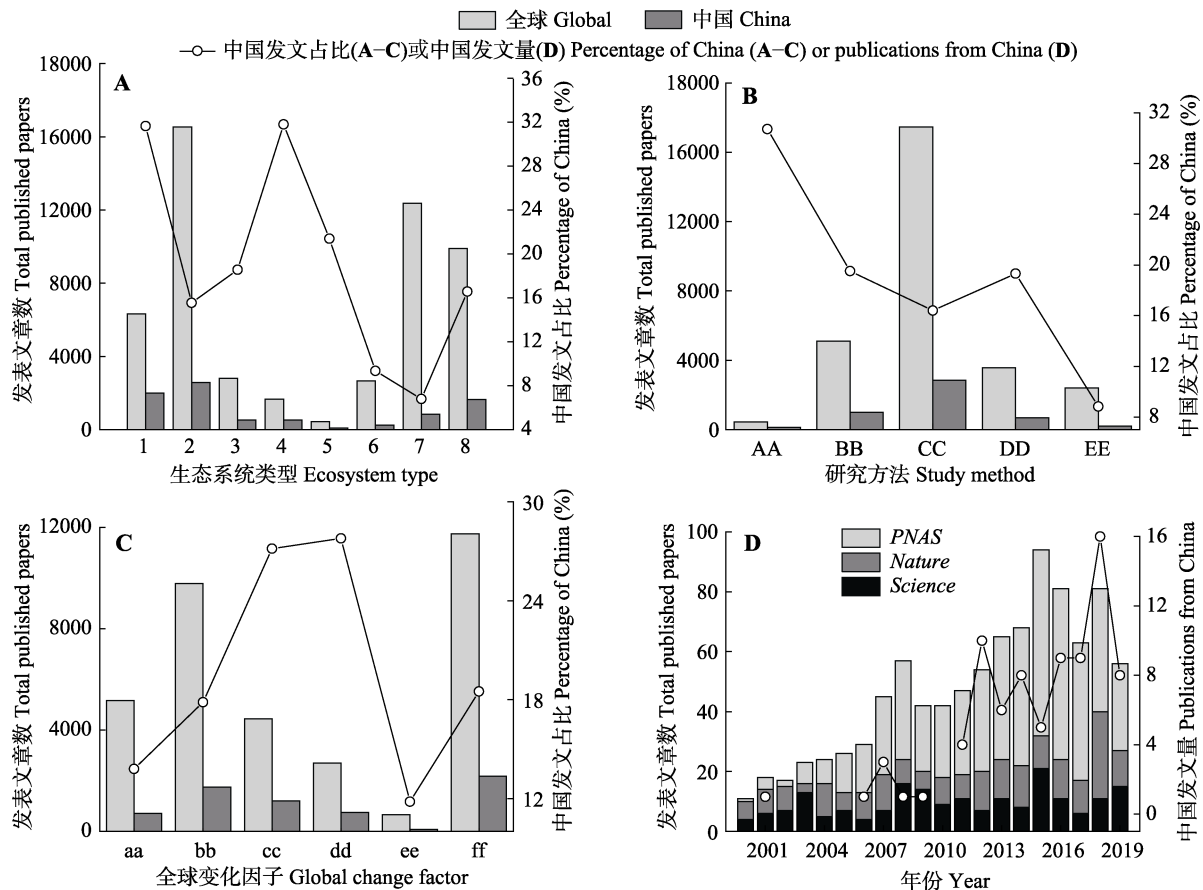
地和荒漠生态系统的研究占比较高, 海洋相关的研究相对不足。从研究方法来看, 模型是近年来研究全球变化最常用的手段, 相关发文量远超实验和观测等方法。模型的出现频次如此之高, 部分原因可能是经常作为关键词在研究背景和意义中使用所致。我国在整合分析方面发文较为突出, 但在具有国际影响力的高水平综述发表上还有很大提升空间。从全球变化因子来看, 土地利用变化和全球变暖方面研究最为活跃, 且臭氧相关研究在上世纪末最为活跃, 近20年来关于臭氧对生态系统影响的研究已相对较少。我国在降水格局改变和氮沉降对生态系统影响方面做了大量工作, 在CO<sub>2</sub>浓度上升和臭氧影响领域成果占比相对较低。从权威期刊来看, 近20年来, *Nature*、*Science*和*PNAS*三大主流期刊全球变化与生态系统相关的发文量整体呈现上升趋势; 中国在该领域的顶级期刊发文量也从无到有, 波动增加, 在2018年达到一个高峰。

### 3 全球变化与生态系统研究的发展规律

#### 3.1 新理论引领该领域的发展

全球变化生态学是一门扎根于野外观测与实验的学科, 单个点上的研究结果对全球变化与生态系统过程机理的解释有一定的促进作用, 但具有更高普适性和代表性的理论、概念、模型的发展对于本学科的建设与长期发展会起到更为重要的推动和引领作用。全球变化生态学家始终在努力从不同地区、不同生态系统、不同因子、不同时间尺度的大量观测和实验中, 提炼发展统一化的理论框架, 这些普





**图3** 2000–2019年间全球变化与生态系统研究方向在不同生态系统类型(A)、不同研究方法(B)、不同全球变化因子(C)、不同主流期刊(D)中Web of Science核心数据库文章发表量以及中国发文占比情况。1, 草地; 2, 森林; 3, 湿地; 4, 荒漠; 5, 灌丛; 6, 极地; 7, 海洋; 8, 淡水。AA, 整合分析; BB, 实验; CC, 模型; DD, 观测; EE, 综述。aa, CO<sub>2</sub>浓度上升; bb, 全球变暖; cc, 降水格局改变; dd, 氮沉降; ee, 臭氧; ff, 土地利用变化。

**Fig. 3** Total published papers and percentage of Chinese publications of Web of Science on global change and ecosystem in different ecosystem types (A), different study methods (B), different global change factors (C), different top journals (D) during 2000–2019. 1, grassland; 2, forest; 3, wetland; 4, desert; 5, shrubland; 6, polar; 7, ocean; 8, freshwater. AA, meta-analysis; BB, experiment; CC, model; DD, observation; EE, review. aa, elevated CO<sub>2</sub>; bb, warming; cc, altered precipitation; dd, nitrogen deposition; ee, ozone; ff, land use change.

遍规律可以给区域甚至全球尺度模型提供理论依据从而极大地降低模型预测的不确定性。例如动态非平衡理论认为, 如果没有全球变化的扰动, 生态系统会达到一个动态平衡; 全球变化的干扰使得多种循环偏离平衡, 趋向于非平衡状态, 这种生态系统内在的趋平衡力和全球变化引起的趋非平衡力相互作用, 使得生态系统处于动态非平衡(Luo & Hui, 2009)。另外, 针对不同的全球变化因子和生态系统响应, 全球变化生态学家们还致力于发展出具有预测力的生态学普适性理论, 例如: 非线性响应理论(Zhou *et al.*, 2008; Hallett *et al.*, 2014; Garcia-Palacios *et al.*, 2018)、温度适应性理论(Luo *et al.*, 2001; Huang *et al.*, 2019)、双向不对称理论(Knapp *et al.*, 2017)、渐进式氮限制理论(Luo *et al.*, 2004)、氮饱和理论(Aber *et al.*, 1989, 1998)等。新理论的提出

往往能带动与之相关的大量的野外观测和实验研究的开展, 使全球变化生态学机制和框架日趋成熟和完善。全球变化生态学家目前的一大任务就是整合这些理论从而实现对不同时间和空间尺度上生态过程的响应和适应的准确解释和精确预测。新理论的发展在促进我们对全球变化背景下生态系统过程的认识的同时, 也必定会使定量预测生态系统属性响应与适应的能力大大加强。

### 3.2 新技术推动该领域的进步

#### (1) “高通量”野外观测技术

观测技术的进步促进了全球变化生态学的发展。便携式移动观测仪器的出现使从室内离体分析到野外现场活体测定成为可能, 促进了植物生理生态对全球变化响应相关研究的发展。例如: 数码相机、红外成像、激光雷达技术的出现改变了传统的

观察手段和对象, 光合作用和蒸散测定系统的应用实现了对叶片光合速率、蒸腾速率、气孔导度和胞间CO<sub>2</sub>浓度等生理指标以及叶片周围微环境的测定记录。野外定位长期观测仪器的研制对生态系统生态学发展发挥了巨大推动作用, 实现了多种生物和环境要素从短期离散的人工测定向长期连续的自动观测的转变。例如, 以涡度相关技术为代表的生态系统碳、氮、水和能量通量观测技术的突破, 实现了对生态系统功能变化的直接测定, 为生态系统生态学研究提供了连续、稳定、可靠的科学观测数据(Baldocchi, 2020)。同时, 遥感(RS)、地理信息系统(GIS)以及卫星定位(GPS)技术的发展和成熟为生态系统的变化研究提供了强大的技术支撑, 大大促进了大尺度上生态系统格局及其对全球变化响应的研究。借助于卫星和遥感资料, 生态学研究实现了从点到面、从定性到定量、从单项到综合的突破, 使我们可以从空间大范围观测和定量分析陆地生态系统的变化。3S技术弥补了传统生态调查方法调查周期长、野外劳动强度大的不足, 特别是对一些高寒严酷、人迹罕至地带的调查更具有优势, 其应用领域将会越来越广泛(Sun *et al.*, 2018; Schimel *et al.*, 2019; Xiao *et al.*, 2019; Zellweger *et al.*, 2019)。

## (2) 大型野外控制实验技术

自然条件下的大型控制实验是研究全球变化生态学的主要方法, 在很大程度上丰富了科学界关于全球变化对陆地生态系统影响过程的认识, 并能为模型模拟和预测提供必需和关键的参数估计、模型驱动、模型验证和校正数据。自20世纪80年代末期以来, 围绕生态系统结构与功能, 以及生态系统对全球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>浓度升高、物种多样性改变以及其他环境要素(如UV-B、O<sub>3</sub>等)变化的控制实验研究(Song *et al.*, 2019)。控制实验的设计理念是依托自然环境梯度或人为设置环境要素为若干等级, 模拟研究未来环境变化对生态系统过程和功能的影响, 伴随多过程的深度测定, 揭示生态系统对环境变化的响应与适应机制。自然环境梯度实验主要有陆地水平样带置换实验和山地海拔垂直带位移实验, 比较具有代表性的是北美“巨型完整土块”交互置换控制实验和长期跨区域分解实验。在环境控制实验方面, 增温、降水控制、氮沉降模拟等方面的技术日益成熟,

多因子环境因素交互关系的研究也正在成为重点。

## (3) 生态模拟技术

迄今为止, 人们还无法在地区和全球尺度上通过观测和野外控制实验等手段直接和全面地获取生态系统各个过程的变化信息, 利用计算机模拟分析大尺度生态系统结构和功能动态变化是一个重要的实现途径。尽管模型的构建、参数化和检验依旧困难重重, 模型的输出结果常常遭受质疑, 其仍然在评价过去、当前和预测未来条件下生物圈动态变化中起到了不可替代的作用(Fisher *et al.*, 2018; Fatichi *et al.*, 2019; Luo & Schuur, 2020)。在IBP、IGBP等计划的推动下, 从20世纪70年代起, 模型的开发和运用都得到了迅速发展, 形成了统计模型、机理模型、混合模型三大类模型。然而, 目前主要的过程机制模型都是基于个体或小尺度、短时期的生理生态实验建立的。由于个体、生态系统、生物圈之间的关系并不是简单的线性关系, 将个体尺度的观测结果上推到生态系统和生物圈的尺度便增加了很大的不确定性。同时, 生态过程及其主控因子在不同时间尺度上差异也很大, 而目前在模型中往往对其进行了大量简化或者直接不予考虑。面对如此复杂、多变、多尺度的生态系统, 如何利用模型模拟及时、有效地评估生态系统对全球变化的响应既是一个挑战, 更是一个机遇。

## (4) 稳定同位素技术

稳定同位素技术因具有示踪、整合和指示等多项功能, 以及检测快速、结果准确等特点, 在全球变化生态学研究中日显显示出广阔的应用前景。利用稳定同位素的示踪功能研究生态系统中生源要素的循环及其与环境的关系、利用稳定同位素技术的时空整合能力来研究不同时间和空间尺度生态过程与机制, 以及利用稳定同位素技术的指示功能来揭示生态系统功能的变化规律, 已成为了解生态系统功能和动态的重要研究手段。随着同位素研究技术与方法的日趋完善, 稳定同位素技术在全球变化生态学领域中的应用前景将更加广阔。例如, 通过稳定同位素的分析, 不仅可以追踪重要元素如碳、氮和水等的地球化学循环过程及其对全球变化的响应, 还可以研究动植物对环境胁迫的响应及相互关系, 追踪污染物的来源与去向, 推断古气候和古生态过程。稳定同位素红外光谱技术克服了传统稳定同位素技术限制, 使得大气碳、氮、水的稳定同位素的

连续观测成为可能(Craigne *et al.*, 2015; Wehr *et al.*, 2016; Denk *et al.*, 2017; Kyaschenko *et al.*, 2019)。总之, 稳定同位素技术的应用所提供的信息, 大大加深了我们对自然环境下生物及生态系统对全球变化的响应与反馈作用等方面的认识。

### 3.3 新需求指引该领域的发展方向

早期的全球变化生态学研究主要关注生态系统的响应现象与发生机制。近年来人类活动导致地球环境向着不利于人类生存的方向迅速恶化, 社会发展和人类生存都要求生态学家为诸多环境问题提出解决方案。这种强烈的社会需求驱动着生态学的理论发展和技术进步, 使得生态学的发展越来越注重解决实际问题(Oro *et al.*, 2013; Erb *et al.*, 2016)。这种趋势使得生态学家可以在实践中检验理论知识的解释力、预测力, 也推动了生态学尤其是生态系统生态学、全球变化生态学等领域的快速发展。近期生态学领域的许多国际研究计划都把研究焦点集中在生态系统以上的空间尺度上。从20世纪70年代的MAB、80年代的IGBP、90年代的DIVERSITAS到2001年启动的千年生态评估(MA), 宏观生态学的研究从生物群区(Biome)结构与功能发展到生态系统的服务功能, 最近更加明确地把生态系统与人类福祉的相互作用关系作为研究计划的核心科学问题, 全球变化与陆地生态系统成为大尺度生态学研究的主题。尽管全球变化生态学目前对解决人类社会面临的环境问题所做出的贡献还远不如人意, 但它已经为应对全球变化、生态灾害风险评估、濒危物种保育、生物入侵预警和控制、退化生态系统恢复等诸多问题提供了理论基础和实现途径的支撑(Walther *et al.*, 2009; Rands *et al.*, 2010; Vilà *et al.*, 2011; Castello & Macedo, 2016; Tilman *et al.*, 2017)。全球变化生态学家已经逐渐担负起把不断发展中的生态学知识(尽管还远远不够完善)转变为调控和管理生态系统的实践活动的任务。

## 4 研究前沿展望

全球变化已经在不同的时间和空间尺度上深刻地影响了陆地生态系统的结构和功能。尽管在过去几十年中, 已经有大量的研究工作针对全球变化对陆地生态系统的影响而展开, 并取得了丰硕的成果, 然而全球变化与陆地生态系统研究不仅需要研究全球变化对陆地生态系统的影响, 还需要关注陆地生

态系统对气候变化的适应和反馈。目前这两方面的研究还处于起步阶段, 各种适应和反馈的机制还不清晰, 适应和反馈的强度还有非常大的不确定性。

通过先进的研究方法, 准确了解陆地生态系统对全球变化的响应、适应与反馈是生态系统科学面临的巨大挑战。未来的全球变化与陆地生态系统研究需要综合考虑生态系统内部的各要素的相互联系、影响和制约, 从而提高对全球变化的预测能力, 为相关决策提供科学依据。以往的研究已经对小尺度、孤立的科学现象和变化规律有了较为深刻的认识, 将来的研究将体现为多学科交叉、微观与宏观相结合、野外长期定位观测与生态系统模型模拟、多源遥感数据相结合, 提高对不同时间和空间尺度上的全球变化与陆地生态系统之间关系的研究。另外, 我们需要将联网定位观测、控制实验、遥感、模型模拟等多种技术手段结合起来, 采用多尺度观测、多方法印证、多过程融合、跨尺度模拟等集成研究, 整合研究将为未来区域乃至全球尺度地表过程的研究提供更有力的支持。

此外, 定量评价生态系统对气候变化的敏感性、脆弱性以及恢复力也是目前面临的巨大挑战, 对这些指标进行定量与定位研究成为全球变化与生态系统综合管理的前置环节。找出陆地生态系统对气候变化敏感的区域, 不仅具有理论上的意义, 而且对于因地制宜、合理管理生态系统, 发展农牧业生产等方面都具有重要的现实意义, 也能够为制定宏观生态环境综合整治政策提供科学依据。

关于全球变化与陆地生态系统领域研究的前沿方向, 可总结为以下几个方面。

#### (1) 加强控制实验联网观测和综合集成研究

由于涉及大尺度时空格局与过程, 全球变化与陆地生态系统研究需要反映不同时空尺度的生态系统各组分的分布与动态信息。在不同方面和多个时空尺度上开展对生态系统的动态监测可为全球变化与陆地生态系统研究提供不可或缺的数据和信息基础。正因如此, 包括国际长期生态研究网络(ILTER)、全球生物多样性监测网络(BMN)、国际通量研究网络(FLUXNET)、国际关键带研究网络(CZO)、国际养分添加联网控制实验(NutNet)、国际干旱实验网络(IDE)、中国生态系统研究网络(CERN)、中国通量网(ChinaFlux)等在内的一系列全球-区域-国家尺度环境变化与生态系统联网研究发



展迅猛,成为全球变化与陆地生态系统研究的主流手段。因此,基于多尺度、多途径的生态系统长期监测及评价指标的研究成为全球变化与生态系统研究的重点内容。与此同时,随着遥感数据、野外台站观测数据、实验数据以及模型模拟数据的快速积累,促进了生态数据的综合分析和处理技术的发展。如何及时、有效地挖掘生态数据,揭示大尺度生态学问题,将会成为未来全球变化生态学研究的一个主要方向。

## (2)生态系统地下过程的响应与反馈机制研究

过去20多年来,全球变化因子对植物光合和生长、生产力和产量的影响等方面取得较大进展,但生态系统地下过程的响应方面仍然存在一定挑战和较大不确定性。例如,不同时空尺度上土壤微生物如何调控不同生态系统碳-氮循环?在未来全球变化情形下,土壤碳组分的精细计量及其响应的微生物学机制是什么?土壤微生物调控的土壤养分有效性变化是否以及如何影响植物与生态系统对全球变化的响应?生态系统渐进式氮限制的形成与土壤微生物-植物互作有什么相互关系?这些是全球变化研究领域内悬而未决的热点问题,对这些问题的回答将有助于我们更深刻理解地球生态系统的响应。这方面的研究重点和热点主要包括:将稳定同位素和基因组学等相关技术耦合,定向研究土壤微生物群落以及相关功能微生物,揭示微生物调控碳氮循环等耦合过程和机理。

## (3)综合考虑自然和人为等多因子复合研究

全球变化因子间通常不是独立的,而是相互作用的(Reich *et al.*, 2018; Quan *et al.*, 2019)。目前对单个因子的变化研究取得较大进展,而对多因子交互作用的研究较少,研究结果存在很大的不确定性。全球变化包括了CO<sub>2</sub>/O<sub>3</sub>浓度升高、干旱胁迫、氮沉降和降水格局分布、土地利用变化等多因子复合影响,生态系统在复合因素影响下往往呈现复杂的作用特征。比如O<sub>3</sub>浓度升高和增温对于植物的负效应往往能抵消一部分CO<sub>2</sub>浓度升高的“施肥”正效应(Way *et al.*, 2015),而抵消的强度与生态系统类型、物种、增温幅度、升高的CO<sub>2</sub>/O<sub>3</sub>浓度、实验持续时间等因素相关。未来的研究需结合多种手段,加强多个全球变化因子的交互作用对生态系统过程和功能的影响研究,明确短期响应与长期适应规律,深入揭示格局背后的环境控制机制和生物驱动机制。

## (4)加强对极端气候事件以及脆弱生态系统的研究

全球变化背景下极端气候事件的发生日益频繁,但关于生态系统结构和功能对极端事件的响应机制和恢复过程的研究十分缺乏。研究极端气候事件对陆地生态系统的触发、影响和生态系统的反馈机制,能够增强我们了解和预测未来极端气候事件对陆地生态系统过程和服务功能的影响。脆弱生态系统往往是全球变化的启动区和敏感区(如山地、高原、极地、湿地、热带雨林分布区),利用长期观测、控制实验、模型模拟等手段,未来需要加强研究生态系统特别是脆弱生态系统内关键生物,生态系统碳、氮、水循环等关键生态学和生物学过程对极端气候事件的响应,更准确地评估极端气候事件所造成的生态系统服务功能的丧失,解析生态系统在极端气候事件干扰后的恢复过程,更多关注多相态、非对称性、突变等关键环节,从而揭示陆地生态系统关键过程对极端环境变化的响应和恢复机制。

## (5)生态系统响应全球变化的过程模拟与未来预测

生物与环境因子通过发生复杂的相互作用,产生一系列生态学过程,形成多样化的生态系统功能。因此,准确模拟生态系统的关键过程对预测我国各类生态系统的功能具有极其重要的意义。如果缺乏对陆地生态系统过程的准确模拟,人类将难以准确预测气候与海洋等其他系统或圈层的未来动态。近年来,生态系统过程的区域与全球模拟研究在国际上迅速发展,这些模型普遍构建于新近发现或发展出的生态系统生态学机理与理论。这种发展态势也使实验生态学与野外生态系统观测获益,尤其促使实验和观测数据同生态系统模型得到了空前的融合。我国在世界上拥有最丰富的生态系统类型,在生态系统实验与观测方面具有坚实的基础,但在生态系统过程的模拟与功能预测方面,则落后于国际先进水平。因此,结合生态学实验或长期观测资料,针对各类生态系统尤其是脆弱生态系统或敏感区域(如青藏高原高寒生态系统)开展模拟研究,将有助于提升我国在生态系统功能的短期预报、中长期预估和科学管理等方面的能力。

## (6)加强生态系统服务功能可持续性与人地耦合关系的研究

生态系统为人类提供的各种必不可少的服务一

直是人类生存和发展的基础。但是, 人类活动和气候变化正在不同时间和空间尺度上对生物多样性、生态系统生产力、水土资源保持、碳汇功能、森林火灾、病虫害等方面产生深刻影响, 并显著改变生态系统脆弱性及稳定性。在此背景下生态系统服务功能的持续降低和退化给学界带来了严峻的挑战。因此, 需要深入探究人类活动和全球变化对生态系统和人类福祉及其反馈关系的影响, 重点关注未来气候变化情形下不同生态系统服务功能的响应与适应, 提高人地关系耦合度, 降低人地耦合系统的脆弱性, 有效适应和减缓全球变化带来的不利影响; 为有效加强生态系统管理、保持生态系统健康和维持生态系统服务功能的可持续性提供理论依据。

**致谢** 此专辑由方精云院士主持的中国科学院学部学科战略发展研究项目“生态系统生态学”(2016-SM-B-01)资助。

## 参考文献

- Aber J, McDowell W, Nadelhoffer K, Magill A, Berntson G, Kamakea M, McNulty S, Currie W, Rustad L, Fernandez I (1998). Nitrogen saturation in temperate forest ecosystems: hypotheses revisited. *BioScience*, 48, 921–934.
- Aber JD, Nadelhoffer KJ, Steudler P, Melillo JM (1989). Nitrogen Saturation in Temperate Forest Ecosystems. *BioScience*, 39, 378–386.
- Bai E, Xue B (2020). A review of influences of land use and land cover change on ecosystems. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 44, 543–552. [白娥, 薛冰 (2020). 土地利用与土地覆盖变化对生态系统的影响. 植物生态学报, 44, 543–552.]
- Baldocchi DD (2020). How eddy covariance flux measurements have contributed to our understanding of Global Change Biology. *Global Change Biology*, 26, 242–260.
- Castello L, Macedo M (2016). Large-scale degradation of Amazonian freshwater ecosystems. *Global Change Biology*, 22, 990–1007.
- Chen C, Chen Y, Hou J, Liang Y (2009). CiteSpace II: detecting and visualizing emerging trends and transient patterns in scientific literature. *Journal of the China Society for Scientific and Technical Information*, 28, 401–421. [陈超美, 陈悦, 侯剑华, 梁永霞 (2009). CiteSpace II: 科学文献中新趋势与新动态的识别与可视化. 情报学报, 28, 401–421.]
- Craine JM, Brookshire ENJ, Cramer MD, Hasselquist NJ, Koba K, Marin-spiotta E, Wang L (2015). Ecological interpretations of nitrogen isotope ratios of terrestrial plants and soils. *Plant and Soil*, 296, 1–26.
- Denk TRA, Mohn J, Decock C, Lewicka-Szczebak D, Harris E, Butterbach-Bahl K, Kiese R, Wolf B (2017). The nitrogen cycle: a review of isotope effects and isotope modeling approaches. *Soil Biology & Biochemistry*, 105, 121–137.
- Erb K-H, Lauk C, Kastner T, Mayer A, Theurl MC, Haberl H (2016). Exploring the biophysical option space for feeding the world without deforestation. *Nature Communications*, 7, 11382. DOI: 10.1038/ncomms11382.
- Fang JY (2000). *Global Ecology: Climate Change and Ecological Responses*. Higher Education Press, Beijing. [方精云 (2000). 全球生态学: 气候变化与生态响应. 高等教育出版社, 北京.]
- Fatichi S, Pappas C, Zscheischler J, Leuzinger S (2019). Modelling carbon sources and sinks in terrestrial vegetation. *New Phytologist*, 221, 652–668.
- Fisher RA, Koven CD, Anderegg WRL, Christoffersen BO, Dietze MC, Farrior CE, Holm JA, Hurtt GC, Knox RG, Lawrence PJ, Lichstein JW, Longo M, Matheny AM, Medvigy D, Muller-Landau HC, Powell TL, Serbin SP, Sato H, Shuman JK, Smith B, Trugman AT, Viskari T, Verbeeck H, Weng E, Xu C, Xu X, Zhang T, Moorcroft PR (2018). Vegetation demographics in Earth System Models: a review of progress and priorities. *Global Change Biology*, 24, 35–54.
- Feng ZZ, Li P, Zhang GY, Li ZZ, Ping Q, Peng JL, Liu S (2020a). Impacts of elevated carbon dioxide concentration on terrestrial ecosystems: problems and prospective. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 44, 461–474. [冯兆忠, 李品, 张国友, 李征珍, 平琴, 彭金龙, 刘硕 (2020a). 二氧化碳浓度升高对陆地生态系统的影响: 问题与展望. 植物生态学报, 44, 461–474.]
- Feng ZZ, Yuan XY, Li P, Shang B, Ping Q, Hu TJ, Liu S (2020b). Progress in the effects of elevated ground-level ozone on terrestrial ecosystems. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 44, 526–542. [冯兆忠, 袁相洋, 李品, 尚博, 平琴, 胡廷剑, 刘硕 (2020b). 地表臭氧浓度升高对陆地生态系统影响的研究进展. 植物生态学报, 44, 526–542.]
- Fu BJ, Niu D, Zhao SD (2005). Study on global change and terrestrial ecosystems history and prospect. *Advances in Earth Science*, 20, 556–560. [傅伯杰, 牛栋, 赵士洞 (2005). 全球变化与陆地生态系统研究: 回顾与展望. 地球科学进展, 20, 556–560.]
- Fu W, Wu H, Zhao AH, Hao ZP, Chen BD (2020). Ecological impacts of nitrogen deposition on terrestrial ecosystems: research progresses and prospects. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 44, 475–493. [付伟, 武慧, 赵爱花, 郝志鹏, 陈保冬 (2020). 陆地生态系统氮沉降的生态效应: 研究进展与展望. 植物生态学报, 44, 475–493.]
- Garcia-Palacios P, Gross N, Gaitan J, Maestre FT (2018). Climate mediates the biodiversity-ecosystem stability relationship globally. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 115, 8400–8405.

- Hallett LM, Hsu JS, Cleland EE, Collins SL, Dickson TL, Farrer EC, Gherardi LA, Gross KL, Hobbs RJ, Turnbull L, Suding KN (2014). Biotic mechanisms of community stability shift along a precipitation gradient. *Ecology*, 95, 1693–1700.
- Huang M, Piao S, Ciais P, Peñuelas J, Wang X, Keenan TF, Peng S, Berry JA, Wang K, Mao J, Alkama R, Cescatti A, Cuntz M, De Deurwaerder H, Gao M, He Y, Liu Y, Luo Y, Myneni RB, Niu S, Shi X, Yuan W, Verbeeck H, Wang T, Wu J, Janssens IA (2019). Air temperature optima of vegetation productivity across global biomes. *Nature Ecology & Evolution*, 3, 772–779.
- IPCC (2014). *The Physical Science Basis—Summary for Policymakers. Contribution of WG1 to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Knapp AK, Ciais P, Smith MD (2017). Reconciling inconsistencies in precipitation-productivity relationships: implications for climate change. *New Phytologist*, 214, 41–47.
- Kyaschenko J, Ovaskainen O, Ekblad A, Hagenbo A, Karlton E, Clemmensen KE, Lindahl BD (2019). Soil fertility in boreal forest relates to root-driven nitrogen retention and carbon sequestration in the mor layer. *New Phytologist*, 221, 1492–1502.
- Leng SY (2016). *The Geographical Sciences During 1986–2015: from the Classics to the Frontiers*. Science Press, Beijing. [冷疏影 (2016). 地理科学三十年: 从经典到前沿. 科学出版社, 北京.]
- Luo Y, Hui D (2009). *In Real World Ecology, Large-Scale and Long-Term Case Studies and Methods*. Springer, New York.
- Luo Y, Schuur EAG (2020). Model parameterization to represent processes at unresolved scales and changing properties of evolving systems. *Global Change Biology*, 26, 1109–1117.
- Luo Y, Su B, Currie WS, Dukes JS, Finzi A, Hartwig U, Hungate B, McMurtrie RE, Oren R, Parton WJ, Pataki DE, Shaw RM, Zak DR, Field CB (2004). Progressive nitrogen limitation of ecosystem responses to rising atmospheric carbon dioxide. *BioScience*, 54, 731–739.
- Luo Y, Wan S, Hui D, Wallace LL (2001). Acclimatization of soil respiration to warming in a tall grass prairie. *Nature*, 413, 622–625.
- Mei Z, Li Y (2018). Knowledge mapping analysis on subject service research in China's Libraries based on CiteSpace II. *Journal of Library and Information Sciences in Agriculture*, 30, 88–93. [梅振荣, 李杨 (2018). 基于CiteSpace II的国内图书馆学科服务研究知识图谱分析. 农业图书情报学刊, 30, 88–93.]
- Melillo JM, Field CB, Moldan B (2003). *Interactions of the Major Biogeochemical Cycles: Global Change and Human Impacts*. Island Press, Washington DC.
- Oro D, Genovart M, Tavecchia G, Fowler MS, Martínez-Abraín A (2013). Ecological and evolutionary implications of food subsidies from humans. *Ecology Letters*, 16, 1501–1514.
- Post E (2013). *Ecology of Climate Change: the Importance of Biotic Interactions*. Princeton University Press, Princeton.
- Quan Q, Tian DS, Luo YQ, Zhang FY, Crowther TW, Zhu K, Chen HYH, Zhou QP, Niu SL (2019). Water scaling of ecosystem carbon cycle feedback to climate warming. *Science Advances*, 5, eaav1131. DOI: 10.1126/sciadv.aav1131.
- Rands MRW, Adams WM, Bennun L, Butchart SHM, Clements A, Coomes D, Entwistle A, Hodge I, Kapos V, Scharlemann JPW, Sutherland WJ, Vira B (2010). Biodiversity conservation: challenges beyond 2010. *Science*, 329, 1298–1303.
- Reich PB, Sendall KM, Stefanski A, Rich RL, Hobbie SE, Montgomery RA (2018). Effects of climate warming on photosynthesis in boreal tree species depend on soil moisture. *Nature*, 562, 263–267.
- Schimel D, Schneider FD, JPL Carbon and Ecosystem Participants (2019). Flux towers in the sky: global ecology from space. *New Phytologist*, 224, 570–584.
- Shugart HH, Woodward FI (2011). *Global Change and the Terrestrial Biosphere: Achievements and Challenges*. Wiley-Blackwell Press, Oxford.
- Song J, Wan S, Piao S, Knapp AK, Classen AT, Vicca S, Ciais P, Hovenden MJ, Leuzinger S, Beier C, Kardol P, Xia J, Liu Q, Ru J, Zhou ZX, Luo Y, Guo D, Langley JA, Zscheischler J, Dukes JS, Tang J, Chen J, Hofmockel KS, Kueppers LM, Rustad L, Liu L, Smith MD, Templer PH, Thomas RQ, Norby RJ, Phillips RP, Niu S, Fatichi S, Wang Y, Shao P, Han H, Wang D, Lei L, Wang J, Li XN, Zhang Q, Li XM, Su FL, Liu B, Yang F, Ma G, Li G, Liu Y, Liu Y, Yang Z, Zhang K, Miao Y, Hu M, Yan C, Zhang A, Zhong M, Hui Y, Li Y, Zheng M (2019). A meta-analysis of 1,119 manipulative experiments on terrestrial carbon-cycling responses to global change. *Nature Ecology & Evolution*, 3, 1309–1320.
- Sun Y, Frankenberg C, Jung M, Joiner J, Guanter L, Köhler P, Magney T (2018). Overview of Solar-Induced Chlorophyll Fluorescence (SIF) from the Orbiting Carbon Observatory-2: retrieval, cross-mission comparison, and global monitoring for GPP. *Remote Sensing of Environment*, 209, 808–823.
- Tian HQ, Wan SQ, Ma KP (2007). Global change biology: global change and terrestrial ecosystems. *Journal of Plant Ecology (Chinese Version)*, 31, 173–174. [田汉勤, 万师强, 马克平 (2007). 全球变化生态学: 全球变化与陆地生态系统. 植物生态学报, 31, 173–174.]
- Tilman D, Clark M, Williams DR, Kimmel K, Polasky S, Packer C (2017). Future threats to biodiversity and pathways to their prevention. *Nature*, 546, 73–81.

DOI: 10.17521/cjpe.2019.0355

- Vilà M, Espinar JL, Hejda M, Hulme PE, Jarošík V, Maron JL, Pergl J, Schaffner U, Sun Y, Pyšek P (2011). Ecological impacts of invasive alien plants: a meta-analysis of their effects on species, communities and ecosystems. *Ecology Letters*, 14, 702–708.
- Vitousek PM (1992). Global environmental change—An introduction. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 23, 1–14.
- Vitousek PM (1994). Beyond global warming—Ecology and global change. *Ecology*, 75, 1861–1876.
- Walther G-R, Roques A, Hulme PE, Sykes MT, Pyšek P, Kühn I, Zobel M, Bacher S, Botta-Dukát Z, Bugmann H, Czúcz B, Dauber J, Hickler T, Jarošík V, Kenis M, Klotz S, Minchin D, Moora M, Nentwig W, Ott J, Panov VE, Reineking B, Robinet C, Semchenko V, Solarz W, Thuiller W, Vilà M, Vohland K, Settele J (2009). Alien species in a warmer world: risks and opportunities. *Trends in Ecology & Evolution*, 24, 686–693.
- Way DA, Oren R, Kroner Y (2015). The space-time continuum: the effects of elevated CO<sub>2</sub> and temperature on trees and the importance of scaling. *Plant, Cell & Environment*, 38, 991–1007.
- Wehr R, Munger JW, McManus JB, Nelson DD, Zahniser MS, Davidson EA, Wofsy SC, Saleska SR (2016). Seasonality of temperate forest photosynthesis and daytime respiration. *Nature*, 534, 680–683.
- Xia JY, Lu RL, Zhu C, Cui EQ, Du Y, Huang K, Sun BY (2020). Response and adaptation of terrestrial ecosystem processes to climate warming. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 44, 494–514. [夏建阳, 鲁芮伶, 朱辰, 崔二乾, 杜莹, 黄昆, 孙宝玉 (2020). 陆地生态系统过程对气候变暖的响应与适应. 植物生态学报, 44, 494–514.]
- Xiao J, Chevallier F, Gomez C, Guanter L, Hicke JA, Huete AR, Ichii K, Ni W, Pang Y, Rahman AF, Sun G, Yuan W, Zhang L, Zhang X (2019). Remote sensing of the terrestrial carbon cycle: a review of advances over 50 years. *Remote Sensing of Environment*, 233, 111383. DOI: 10.1016/j.rse.2019.111383.
- Xing P, Li B, Han YX, Gu QJ, Wan HX (2020). Responses of freshwater ecosystems to global change: research progress and outlook. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 44, 565–574. [邢鹏, 李彪, 韩一萱, 顾秋锦, 万洪秀 (2020). 淡水生态系统对全球变化的响应: 研究进展与展望. 植物生态学报, 44, 565–574.]
- Ye YT, Shi DL (2020). Effects of global change on key processes of primary production in marine ecosystems. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 44, 575–582. [叶幼亭, 史大林 (2020). 全球变化对海洋生态系统初级生产关键过程的影响. 植物生态学报, 44, 575–582.]
- Yu GR (2003). *Global Change, Carbon Cycle and Storage in Terrestrial Ecosystem*. China Meteorological Press, Beijing. [于贵瑞 (2003). 全球变化与陆地生态系统碳循环和碳蓄积. 气象出版社, 北京.]
- Yu ZL (2017). *Ecology: Current Knowledge and Future Challenges*. Higher Education Press, Beijing. [于振良 (2017). 生态学的现状与发展趋势. 高等教育出版社, 北京.]
- Zellweger F, Frenne PD, Lenoir J, Rocchini D, Coomes D (2019). Advances in microclimate ecology arising from remote sensing. *Trends in Ecology & Evolution*, 34, 327–341.
- Zhang YJ, Zhu JT, Shen RN, Wang L (2020). Research progress on the effects of grazing on grassland ecosystem. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 44, 553–564. [张扬建, 朱军涛, 沈若楠, 王荔 (2020). 放牧对草地生态系统影响的研究进展. 植物生态学报, 44, 553–564.]
- Zhou GY, Zhou LY, Shao JJ, Zhou XH (2020). Effects of extreme drought on terrestrial ecosystems: review and prospects. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 44, 515–525. [周贵尧, 周灵燕, 邵钧炯, 周旭辉 (2020). 极端干旱对陆地生态系统的影响: 进展与展望. 植物生态学报, 44, 515–525.]
- Zhou X, Weng E, Luo Y (2008). Modeling patterns of nonlinearity in ecosystem responses to temperature, CO<sub>2</sub>, and precipitation changes. *Ecological Applications*, 18, 453–466.

责任编辑: 陈保冬 责任编辑: 谢 巍