

*How will ecosystems respond to global warming?*

# 生态系统对全球变暖的响应

方精云<sup>1\*</sup>, 朱江玲<sup>1</sup>, 石岳<sup>2</sup>

1. 北京大学城市与环境学院生态系, 中国科学院学部-北京大学气候变化研究中心, 北京 100871;

2. 中国科学院植物研究所, 北京 100019

\* 联系人, E-mail: jyfang@urban.pku.edu.cn

2017-08-28 收稿, 2017-11-06 修回, 2017-11-07 接受, 2017-12-29 网络版发表

国家自然科学基金(31621091)和国家重点研发计划(2017YFC0503900)资助

**摘要** 以温暖化为主要特征的全球气候变化对生态系统产生了深刻影响, 是21世纪人类社会最为严重的挑战之一。作为地球表层的重要组成部分, 生态系统是人类生存和发展的物质基础, 其对全球气候变化的响应直接影响着地球和人类社会的未来。因此, 生态系统对全球变化的响应成为全球变化科学的研究前沿和热点。全球温暖化会引起植物个体水平上生理生态过程的变化, 也会改变种群、群落和生态系统水平上物种组成和结构的变化, 最终可能引起一个地区生态系统类型的改变, 并导致其生态系统功能发生转变。同时, 生态系统的这种改变又会对全球变化产生反馈作用, 减缓或者加剧气候变化的发生。由于地球表层系统的复杂性, 对生态系统与全球变暖的相互关系进行深入持久的研究显得十分必要。

**关键词** 生态系统, 全球变暖, 反应

政府间气候变化专门委员会(IPCC)第五次报告指出, 自20世纪50年代以来, 地球气候系统观测到的很多变化在几十年乃至上千年时间里都是前所未有的, 大气和海洋已变暖, 积雪和冰量已减少, 海平面已上升, 温室气体浓度已增加<sup>[1]</sup>。目前地球处于过去千年以来, 温度最高的时期<sup>[1]</sup>。潮汐等观测数据表明, 尽管幅度不同, 全球大部分海域的水面均有上升趋势<sup>[2,3]</sup>。与此同时, 许多观测和研究也已经证实, 在全球变暖的影响下, 全球降水格局也有着显著的变化, 包括降水量、降水频度的改变和更多极端暴雨干旱事件的发生<sup>[4]</sup>。其中备受关注的热点还包括极端少雨事件, 特别是2005年亚马逊流域大干旱事件, 更是引起了人们对于干旱与森林死亡问题的关注和研究。尽管对于气候变化存在许多争议性和分歧性的问题<sup>[5]</sup>, 特别是其驱动因素是人类活动还是自然过程尚有很多争论, 但全球气候系统正发生着以温暖化

为主要特征的变化则是客观事实<sup>[6]</sup>。

生态系统是地球表层的重要组成部分, 又是人类生存和发展的物质基础。因此, 全球变暖引起的生态系统结构和功能的变化, 对自然和人类社会都将带来深刻的影响。在全球变化中, 温度和水分是两个核心的变化要素, 也是影响不同尺度生命现象和过程的关键生态因子, 其高低、多寡以及分布格局的改变不仅影响着生物个体的生理生态学过程, 也显著改变群落的物种组成和生态系统功能。因此, 研究并预测全球变暖所产生的生态影响以及生态系统对其响应, 成为全球变化研究的重大科学问题之一。气候环境是生态系统的重要组成部分, 因此, 气候变化势必对生态系统的组成、结构和功能产生重要影响, 同时生态系统本身也会对气候变化作出反馈。生态系统对全球变暖的响应表现为多方面和多尺度, 如生物个体的生长和发育、种群结构、群落组成和结构、

**引用格式:** 方精云, 朱江玲, 石岳. 生态系统对全球变暖的响应. 科学通报, 2018, 63: 136-140

Fang J Y, Zhu J L, Shi Y. The responses of ecosystems to global warming (in Chinese). Chin Sci Bull, 2018, 63: 136-140, doi: 10.1360/N972017-00916

以及生态系统结构和功能。

## 1 生态系统物种组成及其生长特征对全球变暖的响应

作为生态系统生产者的植物其组成和生长发育特征对全球变化表现得十分敏感。许多观测和研究已经证实,一方面,在全球变暖的作用下,植物个体形态首先发生明显的变化,特别在极地等一些对全球变化响应敏感的地区表现得更为显著,如随着温度升高,苔原植物的枝条显著变长,且叶片增大<sup>[7]</sup>。全球变暖对物种的生长发育过程会起到一定程度的促进作用。其中,最为显著的影响就是物候的变化:随着气温的升高,植物春季物候期提前、秋季物候期推迟,导致植物的生长季延长<sup>[8]</sup>。这一过程可能有利于植物生长量的积累,但物候的提前也会使得植物提前开花放叶,这对某些植物(如早春的林下植物)完成生命周期可能产生不利的影响<sup>[9,10]</sup>。再者,气温升高能够通过改善土壤环境促进植物生长<sup>[11]</sup>,但也将打破物种原有的休眠节律,抑制喜冷物种而促进喜温物种的生长<sup>[12]</sup>。另外,全球变暖的可能诱因之一——大气二氧化碳浓度的升高,在一定程度上可以起到“施肥作用”,促进植物的生长,但对不同植物的影响效果则有所不同<sup>[13,14]</sup>。全球变暖也会影响植物的化学计量特征。例如,升温能促进植物叶片氮利用效率及C:N比的增加<sup>[15,16]</sup>。

另一方面,全球变暖显著影响物种的分布<sup>[17,18]</sup>,不少地区物种分布的“暖化”(thermophilization)现象就是明显的证据。譬如,在欧洲山地的研究发现,不同物种的数量有所变化,适应温暖环境的物种增加,而适应低温环境的物种显著减少<sup>[19]</sup>;在中国内蒙古草原地区,草原群落的组成呈现“暖化”现象,C<sub>4</sub>植物的比例明显增加<sup>[20]</sup>。此外,随着全球变暖,很多动植物向高海拔和高纬度迁移<sup>[21]</sup>。例如,20世纪以来,欧洲西部山脉发生了植物物种集中向山顶迁移的现象,迁移的平均速度达到每年上升近3 m<sup>[22]</sup>;在英国、美国及芬兰等地发现鸟类大量向北方迁移,其北扩幅度在20年内可高达70 km<sup>[23-25]</sup>。

## 2 生态系统功能对全球变暖的响应

全球变暖对生态系统组成的影响——例如通过改变物种的生长发育过程和分布,会导致生态系统的物种组成和结构发生显著变化,最终可能改变一个地区的生态系统类型,引起生态系统功能的变化。

温度升高和干旱的加剧,更有利于喜温、耐旱植物的扩散和入侵<sup>[26]</sup>;而一些极端气候事件(旱灾、霜冻、雪灾、洪涝、飓风等)的发生则会造成本地物种的快速死亡,从而增加外来物种入侵的风险<sup>[27,28]</sup>。最终,那些在生态系统中处于“劣势”的物种被迫退出,新的物种侵入,从而形成新的生态系统类型。

现有研究表明,极地增温会导致木本植物在极地苔原带扩张<sup>[29]</sup>,并导致其优势度及群落生物量的增加<sup>[30]</sup>;相对地,苔藓和地衣的高度、盖度出现下降,苔原群落的多样性降低<sup>[31]</sup>,进而改变极地植物群落的结构<sup>[32]</sup>。模型研究显示,随着全球变暖,温带将向极地方向扩展,而温带森林也将侵入当前的北方森林地带。对于北方森林来说,高纬度地区显著的增温将使其分布面积缩小;同时温带内陆地区由于受夏季干旱的影响,现有的森林-草原景观将向草原-荒漠景观转变<sup>[33,34]</sup>。

生态系统类型的变化引起区域乃至全球生物地球化学循环的显著变化,并可能打破全球生态系统的碳平衡状态<sup>[35]</sup>。

## 3 生态系统碳过程对全球变暖的响应

陆地生态系统碳平衡取决于光合作用固定的二氧化碳(CO<sub>2</sub>)量与呼吸作用释放的CO<sub>2</sub>量的消长关系。若CO<sub>2</sub>的固定量大于释放量,则陆地生态系统为碳汇(大气CO<sub>2</sub>的吸收汇);反之,若呼吸作用排放的CO<sub>2</sub>量大于光合作用的固定量,陆地生态系统则为碳源(大气CO<sub>2</sub>的排放源)。总体上,气候变暖可以促进植物的生长,增加陆地生态系统的净初级生产力,但同时也会加速土壤有机质的分解。二者究竟是哪一个作用占主导地位,迄今尚无定论<sup>[36,37]</sup>。有研究认为,气候变暖会引起植物和土壤呼吸作用的增加,导致陆地生态系统释放更多的CO<sub>2</sub><sup>[38,39]</sup>,这就是较为主流的正反馈假说。最新的整合研究表明,增温一方面会导致土壤呼吸、凋落物生产及可溶性有机碳淋溶损失的增加,另一方面也促进了生态系统光合速率及净生产力的提高。也就是说,相对于增温导致的碳输出的增加,植物碳库输入也可能出现相应的增长,最终使得一些生态系统表现为微弱的碳汇<sup>[40]</sup>。

全球变暖导致的生态系统类型变化也会导致碳汇与碳源功能的转变。例如,北极苔原分布在北冰洋海岸与泰加林之间广阔的冻土沼泽带,其生态系统结构简单,主要植被是生长在冻土上的厚厚的地衣

层. 在全球变暖的情景下, 冻土融化释放大量 $\text{CO}_2$ , 加之生物入侵, 使得地衣大面积死亡, 生态系统由碳汇变为碳源<sup>[41]</sup>. 类似的生态系统碳源汇特征的转变在一些寒冷的北方针叶林中也有发现<sup>[42]</sup>.

总之, 气候变暖使得全球陆地生态系统结构、功能以及碳源汇特征和其他的生物地球化学循环过程可能发生改变. 生态系统的这种改变又会对全球变化产生反馈作用, 减缓或者加剧气候变化的发生. 而人类的衣食住行都离不开生态系统, 其生产者植物

通过光合作用合成有机物, 释放氧气, 固定能量, 这都是人类社会生存和发展的基础, 而目前在生态系统水平, 全球变暖导致的干旱已引起了大面积的森林衰退, 如北美、中国、澳大利亚等, 并造成了生产力的大幅度下降<sup>[43]</sup>. 这些都将深刻影响与人类社会可持续发展息息相关的能源、粮食和环境问题. 可以预见, 在未来的数十年, 生态系统对全球变暖的反应及其可能后果仍将是全球变化研究的热点之一. 因此, 对其进行深入研究显得十分必要.

## 参考文献

- 1 IPCC. Summary for Policymakers/Climate Change 2013: The physical science basis. In: Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2013
- 2 Church J A, White N J. A 20th century acceleration in global sea-level rise. *Geophys Res Lett*, 2006, 33: 313–324
- 3 Goddard P B, Yin J, Griffies S M, et al. An extreme event of sea-level rise along the Northeast coast of North America in 2009–2010. *Nat Commun*, 2015, 6: 6346
- 4 IPCC. Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. In: Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment. Summary for Policymakers. Cambridge: Cambridge University Press, 2014
- 5 Singer S F. Nature, Not Human Activity, Rules the Climate: Summary for Policy Makers of the Report of the Nongovernmental International Panel on Climate Change. Chicago: The Heartland Institute, 2008
- 6 Fang J Y, Zhu J L, Wang S P, et al. Global warming, human-induced carbon emissions, and their uncertainties. *Sci China Earth Sci*, 2011, 54: 1458–1468 [方精云, 朱江玲, 王少鹏, 等. 全球变暖、碳排放及不确定性. *中国科学: 地球科学*, 2011, 41: 1385–1395]
- 7 Hudson J, Hendry G, Corwell W. Taller and larger: Shifts in Arctic tundra leaf traits after 16 years of experimental warming. *Glob Change Biol*, 2011, 17: 1013–1021
- 8 Piao S L, Fang J Y, Zhou L M, et al. Variations in satellite-derived phenology in China's temperate vegetation. *Glob Change Biol*, 2006, 12: 672–685
- 9 Chmielewski F M, Rötzer T. Response of tree phenology to climate change across Europe. *Agr Forest Meteorol*, 2001, 108: 101–112
- 10 Badeck F W, Bondeau A, Böttcher K, et al. Responses of spring phenology to climate change. *New Phytol*, 2004, 162: 295–309
- 11 Chen L F, He Z B, Du J, et al. Patterns and environmental controls of soil organic carbon and total nitrogen in alpine ecosystems of northwestern China. *Catena*, 2016, 137: 37–43
- 12 Walther G R, Post E, Convey P, et al. Ecological responses to recent climate change. *Nature*, 2002, 416: 389–395
- 13 Bazzaz F A. The response of natural ecosystems to the rising global  $\text{CO}_2$  levels. *Annu Rev Ecol Syst*, 1990, 21: 167–196
- 14 Fang J, Kato T, Guo Z, et al. Evidence for environmentally enhanced forest growth. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2014, 111: 9527–9532
- 15 An Y, Wan S, Zhou X, et al. Plant nitrogen concentration, use efficiency, and contents in a tallgrass prairie ecosystem under experimental warming. *Glob Change Biol*, 2005, 11: 1733–1744
- 16 Niu S, Sherry R A, Zhou X, et al. Nitrogen regulation of the climate-carbon feedback: Evidence from a long-term global change experiment. *Ecology*, 2010, 91: 3261–3273
- 17 Chapin III F S, Zavaleta E S, Eviner V T, et al. Consequences of changing biodiversity. *Nature*, 2000, 405: 2034–2042
- 18 Hamann A, Wang T. Potential effects of climate change on ecosystem and tree species distribution in British Columbia. *Ecology*, 2006, 87: 2773–2786
- 19 Gottfried M, Pauli H, Futschik A, et al. Continent-wide response of mountain vegetation to climate change. *Nat Clim Change*, 2012, 2: 111–115
- 20 Wittmer M H, Auerswalk K, Bai Y, et al. Changes in the abundance of  $\text{C}_3/\text{C}_4$  species of Inner Mongolia grassland: Evidence from isotopic composition of soil and vegetation. *Glob Change Biol*, 2010, 16: 605–616
- 21 Sekercioglu C H, Schineider S H, Fay J P, et al. Climate change, elevational range shifts, and bird extinctions. *Conserv Biol*, 2007, 22: 140–150
- 22 Lenoir J G, Gout J C, Marquet P A, et al. A significant upward shift in plant species optimum elevation during the 20th century. *Science*, 2008, 320: 1768–1771

- 
- 23 Thomas C D, Lennon J L. Birds extend their ranges northwards. *Nature*, 1999, 399: 213
  - 24 Zuckerberg B, Woods A M, Porter W F. Poleward shifts in breeding bird distributions in New York State. *Glob Change Biol*, 2009, 15: 1866–1883
  - 25 Brommer J E. The range margins of northern birds shift polewards. *Ann Zool Fenn*, 2004, 41: 391–397
  - 26 Gates D M. *Climate Change and Its Biological Consequences*. Sunderland: Sinauer Associates, Inc, 1993
  - 27 Menzel A, Sparks T H, Estrella N, et al. European phenological response to climate change matches the warming pattern. *Glob Change Biol*, 2006, 12: 1969–1976
  - 28 Man X X, Mi X C, Ma K P. Effects of an ice storm on community structure of an evergreen broadleaved forest in Gutianshan National Nature Reserve, Zhejiang Province (in Chinese). *Biodivers Sci*, 2011, 19: 197–205 [曼兴兴, 米湘成, 马克平. 雪灾对古田山常绿阔叶林群落结构的影响. *生物多样性*, 2011, 19: 197–205]
  - 29 Hudson J M, Henry G. Increased plant biomass in a High Arctic heath community from 1981 to 2008. *Ecology*, 2009, 90: 2657–2663
  - 30 Sistla S A, Moore J C, Simpson R T, et al. Long-term warming restructures Arctic tundra without changing net soil carbon storage. *Nature*, 2013, 497: 615–618
  - 31 Walker M D, Wahren C H, Hollister R D, et al. Plant community responses to experimental warming across the tundra biome. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2006, 103: 1342–1346
  - 32 Pearson R G, Phillips S J, Lorant M M, et al. Shifts in Arctic vegetation and associated feedbacks under climate change. *Nat Clim Change*, 2013, 3: 673–677
  - 33 Kasischke E S, Stocks B J. *Fire, Climate Change, and Carbon Cycling in the Boreal Forest*. Berlin: Springer, 2000
  - 34 Bonan G B. Forests and climate change: Forcings, feedbacks, and the climate benefits of forests. *Science*, 2008, 320: 1444–1449
  - 35 Fang J Y. *Global Ecology: Climate Change and Ecological Responses* (in Chinese). Beijing: China High Education Press; Heidelberg: Springer-Verlag, 2000 [方精云. *全球生态学: 气候变化与生态响应*. 北京: 高等教育出版社; Heidelberg: Springer-Verlag, 2000]
  - 36 Cao M, Woodward F I. Dynamic responses of terrestrial ecosystem carbon cycling to global climate change. *Nature*, 1998, 393: 249–252
  - 37 Heimann M, Reichstein M. Terrestrial ecosystem carbon dynamics and climate feedbacks. *Nature*, 2008, 451: 289–292
  - 38 Schimel D S. Terrestrial ecosystems and the carbon cycle. *Glob Change Biol*, 1995, 1: 77–91
  - 39 Keyser A R, Kimball J, Nemani R, et al. Simulating the effects of climate change on the carbon balance of North American high-latitude forests. *Glob Change Biol*, 2000, 6: 185–195
  - 40 Lu M, Zhou X, Yang Q, et al. Responses of ecosystem carbon cycle to experimental warming: A meta-analysis. *Ecology*, 2013, 94: 726–738
  - 41 Oechel W C, Vourlitis G L, Hastings S J, et al. Acclimation of ecosystem CO<sub>2</sub> exchange in the Alaskan Arctic in response to decadal climate warming. *Nature*, 2000, 406: 978–981
  - 42 Goulden M, Wofsy S, Harden J, et al. Sensitivity of boreal forest carbon balance to soil thaw. *Science*, 1998, 279: 214–217
  - 43 Zhao M, Running S W. Drought-induced reduction in global terrestrial net primary production from 2000 through 2009. *Science*, 2010, 329: 940–943



### 方精云

北京大学教授, 中国科学院院士, 发展中国家科学院院士. 主要从事全球变化生态学、群落生态与生物多样性、生态遥感、生态草牧业等方面的研究. 承担国家自然科学基金委员会创新研究群体及科学技术部全球变化重大研究计划等科研项目, 先后发表学术论文 340 余篇, 其中含 *Science*, *Nature* 及 *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 论文多篇. 主持多项院士咨询评议工作, 向中央政府提交多份咨询报告, 并产生了重要影响.

Summary for “生态系统对全球变暖的响应”

## The responses of ecosystems to global warming

Jingyun Fang<sup>1\*</sup>, Jiangling Zhu<sup>1</sup> & Yue Shi<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Department of Ecology, College of Urban and Environmental Sciences, and Peking University-Chinese Academy of Sciences Joint Research Center for Climate Change, Peking University, Beijing 100871, China;

<sup>2</sup> Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100019, China

\* Corresponding author, E-mail: jyfang@urban.pku.edu.cn

Global climate change, characterized mainly by global warming, is one of the biggest challenges to human society in the 21st century. As an important component of the earth surface system, the ecosystem provides essential materials for survival and development of human beings. The responses of the ecosystems to global changes are directly relevant to the future of the earth and human society, and are becoming one of the most frontiers in the field of global change science in the world. Global warming has exerted significant influences on the ecosystems at the individual, population, community and ecosystem levels. For example, changes in temperature and precipitation can significantly influence the physiological and ecological processes of plants, and alter the composition and structures of the biological populations and communities and functioning of the ecosystems. These alterations of the ecosystems in turn could trigger their negative or positive feedbacks to the global changes, leading to a reduction or enhancement of climate warming. Because of complexity of the earth surface system, continuous studies on the responses of ecosystems to global changes are substantially needed in the next decades.

**ecosystem, global warming, ecological responses**

doi: 10.1360/N972017-00916