

生态系统在全球变化中的调节作用

林万涛

中国科学院大气物理研究所大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室, 北京 100029

摘要 讨论在全球变化的背景下, 生态系统对全球变化的调节作用。首先论述陆地生态系统对全球变化的调节作用, 主要包括陆地生态系统对大气成分的调节以及对全球气候的调节; 其次, 论述水生生态系统对全球变化的调节作用, 主要包括淡水生态系统对全球变化的调节作用以及海洋生态系统对全球变化的调节作用; 最后, 论述湿地生态系统对全球变化的调节作用, 主要包括湿地生态系统对生物多样性保护的功能, 湿地对全球变化的元素调节作用以及湿地对气候和水文的调节。

关键词 全球变化 调节作用 陆地生态系统 水生生态系统 湿地生态系统

文章编号 1006-9585 (2005) 02-0275-06 **中图分类号** P461 **文献标识码** A

Adjustment Action of Ecosystem in Global Change

LIN Wan-Tao

*State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics,
Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029*

Abstract Based on the background of global change, the adjustment action of ecosystem for global change is discussed. First, the adjustment action of terrestrial ecosystem for global change is discussed, mostly included the adjustments of terrestrial ecosystem for atmospheric composition and global climate; then, the adjustment action of aquatic ecosystem for global change is discussed, mostly included the adjustments of freshwater and ocean ecosystem for global change; finally, the adjustment action of wetland ecosystem for global change is discussed, mostly included the protective function of wetland ecosystem for biological diversity, the adjustment actions of wetland for elements of global change, climate and hydrologic cycle.

Key words global change, adjustment action, terrestrial ecosystem, aquatic ecosystem, wetland ecosystem

1 引言

近年来, 全球气候变化逐渐开始为人们所重视, 并在各个领域进行了相关的研究, 取得了一定的成果。全球气候变化的表现, 主要是全球气温升高、ENSO 出现频繁、大气环流异常等。以“全球变暖”为突出标志的全球环境变化及其可能

对生态系统产生的严重影响, 已经引起了科学家、各国政府与社会各界的极大关注^[1~4]。

生态系统是指在一定空间内生物成分和非生物成分通过物质的循环和能量的流动相互作用、相互依存而构成的一个生态学的功能单位。在自然界只要在一定空间存在生物和非生物两种成分, 并能相互作用达到某种功能上的稳定性, 哪怕是短暂的, 这个整体都可以视为一个生态系统。在

收稿日期 2004-04-28 收到, 2005-04-20 收到修定稿

资助项目 国家重点基础研究发展规划项目 2003CB415101-03 和中国科学院重大创新项目 KZCX3-SW-221

作者简介 林万涛, 男, 博士, 研究员, 1962年4月出生, 研究方向为数值天气预报、海洋与大气相互作用及气候与植被相互作用。
E-mail: linwt@lasg.iap.ac.cn

我们居住的这个地球上有着大大小小诸多生态系统时刻发生能量流动、物质循环和信息传递,而系统处于相对稳定的动态平衡之中。这种生态系统的相对稳定来源于生态系统内部的自我调节能力,同时动态稳定的生态系统对外部变化的环境条件也有调节作用,这是由于稳定的生态系统对外部环境的改造作用。

全球变化自古就有。在 50 多亿年的历史过程中发生了许多次全球范围的巨变,这些巨变既促成了生物进化中的大发展、大爆炸,又导致了某些生物的大灭绝。过去十几年,全球变化又有了明显的拓展,可概括为:人口增长,全球气候变化,大气成分变化,生物地球化学循环的变化,土地利用/土地覆被的变化,生物多样性丧失等。这些变化对生态系统都会产生重大影响,反过来生态系统对全球变化也会有重要的调节作用。

2 陆地生态系统对全球变化的调节作用

陆地生态系统对全球变化的调节作用过去的研究并不多,只有近几年,这方面的研究才逐渐受到重视,特别是陆地生态系统在减缓或加剧全球变化,尤其是大气成分和全球气候方面的重要性积累了实验证据。

2.1 陆地生态系统对大气成分的调节

近些年,大气成分发生显著地变化,主要是由于 CO_2 、 CH_4 和 N_2O 等温室气体和破坏臭氧层的 CFCs 等气体的增加。陆地生态系统既可以是大气中主要温室气体的源,也可以是这些气体的汇,因而在调节大气成分组成中起着十分重要的作用。首先,贮存在陆地生态系统中的总碳量高达 2.5×10^{12} t 左右,其中热带雨林、热带稀树草地和北方泥炭地贮存的碳量最高。通过植物光合作用,陆地生态系统每年从大气吸收高达 1.22×10^{11} t 的碳,但其中的绝大部分(约 1.2×10^{11} t 碳)又以植物和土壤的呼吸返回大气,只有约 2×10^9 t 的碳留在陆地生态系统中,正好平衡全球的碳循环^[5]。

现在,有一些模型和实验结果都表明陆地生态系统由于 CO_2 浓度的增加能提高对大气 CO_2 的固定量。IPCC (Intergovernmental Panel on Cli-

mate Change) 资料表明:从 1980 年到 1989 年的 10 年中,平均每年因化石燃料的利用所释放的 CO_2 量达 5.5×10^9 t (C),土地利用改变释放 1.6×10^9 t (C),总计每年向大气输入约 7.1×10^9 t (C) 的 CO_2 。留在大气中的 CO_2 每年达 3.2×10^9 t (C),而海洋每年因 CO_2 浓度增加对大气 CO_2 的净吸收量达 2×10^9 t (C)。剩下的 2.1×10^9 t (C) 现在认为是被陆地生态系统所吸收^[6]。但是,随着 CO_2 浓度的进一步增加,陆地生态系统对 CO_2 的这种吸收能力最终达到饱和,因而陆地生态系统对大气 CO_2 浓度的调节必将会逐渐减少^[7~9]。

陆地生态系统对大气成分的调节还表现在对其他温室气体特别是 N_2O 和 CH_4 的影响。就 N_2O 而言,陆地生态系统对其调节能力是很大的。首先,陆地生态系统可以是大气 N_2O 很重要的氮源,尤其是热带森林土壤^[10]。据估计,热带森林和热带稀树草原的土壤每年排放约 4×10^6 t N_2O ,占全球人为和自然总排放的 $1/4$ ^[11]。温带森林和草原每年的 N_2O 排放量只有 2×10^4 t 左右,而农田生态系统由于氮肥投入每年排放的 N_2O 可达 $3 \times 10^6 \sim 4 \times 10^6$ t^[6]。其次,陆地土壤还可氧化或吸收 N_2O ,但这方面的证据还很缺乏。大气 CH_4 每年以 1.1% 的速率递增,主要是由于人为造成的土地利用改变^[12]。一方面,每年人为向大气中注入的 CH_4 达 $4 \times 10^8 \sim 6.5 \times 10^8$ t,其中水稻排放 $0.35 \times 10^8 \sim 1.7 \times 10^8$ t,亚马孙河流域盆地也产生 $8 \times 10^6 \sim 1.3 \times 10^7$ t。人类对天然湿地的改造如排水或灌溉都能改变大气的 CH_4 含量。另一方面,许多陆地生态系统特别是温带地区的森林、草原和荒漠的土壤上层微生物,能够氧化大气中的 CH_4 ,从而减缓了 CH_4 随人类活动的加强而增加的趋势^[12]。同时,土壤这种能力因受到一些人为干扰(如种植、施肥等)而降低^[13]。

另外,陆地生态系统对大气成分的调节还表现为植被,特别是森林树木对大气污染物质的净化作用。大量的研究表明:气态污染物在大气扩散和流动的过程中,一旦与植物接触后,气体便被束缚或溶解于植物表面,或通过气孔被植物吸收。而且森林植物在新陈代谢过程中,要从周围的环境中吸收空气、水分和营养物质以及一些有

害有毒的气体（如 CO_2 、 SO_2 、 Cl_2 等）或大气颗粒物。这个过程既是对大气污染物质的净化过程也是对大气成分的调节过程。由于 SO_2 在水中的溶解度很大，因此当树木外表湿润时能吸收大量的 SO_2 。在干燥条件下， SO_2 也能被树叶迅速吸收并氧化成硫酸盐。在正常条件下 SO_2 吸收量为植物干重的 0.1%~0.3%，在 SO_2 污染区植物对 SO_2 的吸收量为正常地区的 5~10 倍。研究表明：不同树种对 SO_2 的吸收能力也有较大的差异，如 1 kg 柳杉叶片，每天能吸收大气中 3 g 的 SO_2 。柑橘叶片中贮存的硫可达叶片干物质的 0.77%。森林树木对氟、氯也有很强的吸收能力，在正常情况下植物体内的氟、氯含量分别为 0.5×10^{-6} ~ 2.5×10^{-5} 和 0.01%，在污染区树木的氟、氯含量分别比清洁区高几百倍至数千倍和十倍至数百倍。同时，森林也有吸收大气中烟尘、灰尘、铅、汞、镉、金属粉尘等无机有害物质和酮、醛、醇、醚、安息香吡啶等有机污染物的能力^[14]。森林植被就是通过净化能力实现对大气成分的调节作用。

2.2 陆地生态系统对全球气候的调节

陆地生态系统既可以通过调节大气温室气体含量间接地影响全球气候变化的条件，又能直接地通过改变水文条件、热量平衡、云层分布等对全球气候变化产生反馈作用。地表植被的蒸腾作用和表土的蒸发都能影响大气中水蒸汽的含量。陆地植被以直接或间接的方式影响水循环。首先，植被是陆地的重要水源，蓄水功能强大，截流高达 1/3 的降水量。其次，植被有很强的保持水土的功能，防止水土流失。另外，植被可以降低地表水的蒸发，同时可以通过叶面的蒸腾作用使水分流向大气。植被生产 1 g 初级生产量大约要蒸腾 500 g 的水，陆地植被每年蒸腾大约 5.5×10^{13} m^3 的水，几乎相当于陆地蒸发蒸腾的总量。这就增加了空气中的水分，促进了水分循环^[15]。

陆地植被影响地表温度和热量平衡是通过它影响太阳辐射在地球表面的分布来实现的。大气环流模式的研究结果表明，植被的分布和特征显著地影响到地表的反射能力、降雨量和大气温度^[16]。因此，陆地生态系统可以直接或间接地调节全球气候的变化。

3 水生生态系统对全球变化的调节作用

水生生态系统包括淡水生态系统和海洋生态系统。由于水的比热和溶解热较大，对大气温度变化的影响有一定的缓冲作用。同时水生生态系统，尤其是海洋生态系统能有效地吸收大气 CO_2 ，影响全球碳循环，缓解因大气中 CO_2 浓度增加而产生的温室效应。

3.1 淡水生态系统对全球气候变化的调节作用

淡水生态系统包括河流、湖泊和水库等水域，共同构成一个碳库，主要以溶解的无机碳（DIC），溶解态有机碳（DOC）和生物体有机碳（BOC）形式存在。不同存在形式的碳在不同水体的含量差异，取决于碳的沉积、代谢利用和无机碳化学因素。溶解态无机碳主要来源于岩石的风化和大气的 CO_2 溶解；溶解态有机碳主要来源于土壤和污水排放；生物有机碳主要来源于生物合成（水生植物、光合细菌和某些化能细菌利用 CO_2 的合成）。

湖泊对溶解的无机碳有很大的库存能力，特别是碳酸盐对溶解态无机碳有很高的滞留率。全球范围内，位于碳酸盐地带的湖泊总面积约为 1.8×10^5 km^2 。碳酸盐湖泊对 DIC 的平均滞留率为 $100 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ (C)，而非碳酸盐湖泊只有 $5 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ (C) 左右。世界湖泊对 DIC 的总汇估计可达到 $2.6 \times 10^{13} \text{ g} \cdot \text{a}^{-1}$ (C)，其中至少有 70% 来源于大气 CO_2 。另外，以 DOC 沉积率为 30% 计，有 $1.5 \times 10^{13} \text{ g} \cdot \text{a}^{-1}$ (C) 的 DOC 沉积在湖泊中，全球范围内约有 $5.1 \times 10^{13} \text{ g} \cdot \text{a}^{-1}$ (C) 停滞在湖泊中；而贮存湖泊中的总 BOC 大约有 $3.6 \times 10^{13} \text{ g} \cdot \text{a}^{-1}$ (C)^[17]。另外，水库在全球碳循环中的作用也不容忽视^[18]。由此可见，淡水生态系统对大气碳循环有着及其重要的作用，它通过吸收大气 CO_2 而减缓大气中 CO_2 浓度的增加，对全球气候变化有着十分重要的意义。

3.2 海洋生态系统对全球气候变化的调节

海洋中的碳大部分是以碳酸根（ CO_3^{2-} ）和碳酸氢根（ HCO_3^- ）的形式存在。海洋对 CO_2 的吸收量在很大程度上决定于混合层碳酸盐化学的平衡、水中溶解碳的平流传输， CO_2 通过空气—海

水界面的扩散、海洋有机体生物的生产及所产生的碎屑沉降等进入海洋。在海洋表层浮游生物通过光合作用将海水中溶解的无机碳转化为有机碳,水中 CO_2 分压降低;在其初级生产过程中,还需从海水中吸收溶解的硝酸盐、磷酸盐等无机盐,这使得表层水的碱度升高,也降低了水中 CO_2 的分压。这两个过程造成空气—海洋交界面两侧的 CO_2 分压差,促使大气 CO_2 向海水扩散。又由于海洋有机颗粒物携带的营养盐沉降速率大于有机物的分解速率,因而使得大气 CO_2 源源不断地传输到海洋^[19]。因此,海洋对调节大气 CO_2 平衡有着及其重要的作用,它通过缓和大气 CO_2 浓度,调节大气温室效应。

4 湿地生态系统对全球变化的调节作用

4.1 湿地对生物多样性的保护功能

根据《湿地公约》的定义,“湿地是指天然或人工,长久或暂时之沼泽地、湿原、泥炭地或水域地带,带有或静止或流动,或为淡水、半咸水或咸水水体者,包括低潮时水深不超过 6 m 的海域”。它兼有水域和陆地生态系统的特点,具有独特的结构和功能。湿地生态系统无论是淡水湿地还是滨海湿地都被认为是一种独特功能的系统,重要性体现在生物多样性的保护和蓄水、调节气候等方面。

湿地独特的生态环境条件为诸多生物提供了优良的生存基地,堪称生物多样性的贮存库。湿地是相当多脊椎动物的永久生长地,如海牛、河马、沼泽乌龟等;还有留居的兽类,如卡富埃羚羊。湿地是多种鱼、虾、贝类的生产、繁殖基地。据统计,全世界 2/3 的渔业生产集中在湿地地区,在我国仅湿地鱼类就有 1 040 种,约占全国总数的 37%;另外,湿地也是众多鸟类的物种源地,在我国湿地鸟类有 300 余种,约占全国鸟类的 26%,其中 40 余种为我国一级保护动物^[20]。

工业革命以来全球变化迅速发展,生物种类大量丧失。曾经被认为受人类干扰较少的湿地,在全球变化的影响下,湿地生态系统的结构、功能以及生物的组成结构也正发生着变化。人类保护好湿地生态系统的结构和功能是保护湿地的关

键,也是保护全球生物多样性的重要途径之一。

4.2 湿地对元素的调节作用

湿地生态系统对进入其中的营养物质有去除功能。进入湿地的 N 可通过植物、微生物的集聚、沉积、脱 N 作用而将其排除;水生植物吸收水域中的 N、P 等营养物质,并可富集金属和一些有毒物质,连同植物体一起堆积在沉积物中,因而可使营养物质滞留较长时间;湿地生态系统通过吸附、生物吸收、沉降等作用阻截悬浮物质;另外,湿地有助于降解有机污染物质,并将其分解成简单的无机物质。湿地的这些功能都对元素循环起着重要的作用。

湿地作为重要的生态系统既是 CO_2 的“源”,又是 CO_2 的“汇”。在湿地环境中地表经常积水,土壤通气性差,温度低且变幅小,造成好气性细菌数量的降低,而嫌气性细菌较快繁殖,植物残体分解缓慢,形成的有机物质不断积累,这是 CO_2 的“汇”。湿地经过排水后,改变了土壤的物理性状,地温升高,通气性得以改善,提高了植物残体的分解速率,而在有机残体的分解过程中产生大量的 CO_2 气体,因此湿地生态系统又表现为 CO_2 的“源”^[21]。

同时,湿地生态系统还是 N_2O 和 CH_4 的重要“源”。大气中绝大多数 N_2O 来源于生态系统 N 循环中的硝化和反硝化过程。高温、湿润、高碳氮含量的土壤是 N_2O 产生的最佳环境。而湿地恰好满足 N_2O 产生的理想条件,因此,湿地生态系统是 N_2O 的重要“源”。湿地生态系统还是 CH_4 的重要“源”。据估计全球湿地每年约释放 150 Tg 的 CH_4 , 约占每年大气总 CH_4 来源的 25%,其中多数来源于稻田。它主要是由在厌氧条件下甲烷菌分解土壤有机质产生^[22]。

4.3 湿地对气候和水文的调节作用

湿地地表积水,是一个巨大的贮水库。湿地生态系统通过强烈蒸发和蒸腾作用,把大量的水分送回大气,调节降水,并使局部的气温和湿度等气候条件得到改善。而湿地释放的 N_2O 、 CH_4 、 H_2S 和 CO_2 等微量气体对全球变化也有重要的意义^[23]。

5 讨论

全球变化已是不容争辩的事实,并在未来还

将以更快的速度发展。如何减缓这种全球性的环境变化以及如何适应于这种变化后的新环境,不仅是科学界研究的重要课题,也是各国政府在制定政策和计划日常活动时必须考虑的一个重要问题。如何应对全球变化,防止日益严重的全球环境恶化趋势,以及如何利用全球变化可能带来的机遇,都需要有创新的策略。而合理的应对策略必须建立在对全球变化和生态系统相互作用的正确认识基础上。虽然过去十几年世界各国科学家已做了大量这方面的研究和探索,但我们仍面临着许多挑战,无论是在加强科学认识方面,还是在如何把科学认识转化为社会动力来适应全球变化方面。因此,未来全球变化和生态系统相互作用的研究,主要面临以下挑战:

(1) 全球变化速率的控制: 地球的环境始终在变,不过人为造成的全球变化远比自然变化快得多,因而可能对地球生态系统造成十分严重的影响。现在的问题是: 什么是全球变化的“安全”速率,即不会造成自然生态系统功能受到严重威胁的速率? 我们需要做些什么来减缓全球变化的速率?

(2) 生态系统对全球变化调节作用的极限: 地球生态系统,无论是陆地生态系统、水生生态系统还是湿地生态系统,对全球变化的调节作用都是非常重要的。但不容置疑的事实是随着人类活动的加剧和经济的发展,地球生态系统正遭到越来越严重的破坏,其对全球变化的调节作用也变得越来越小。我们面临的挑战是: 地球生态系统被破坏至什么程度会完全丧失对全球变化的调节作用? 当地球生态系统对全球变化不能再起调节作用时,全球变化是否会变成不可逆转的行为?

(3) 地球生态系统的有序利用和保护: 地球生态系统作为资源是有限的。而人类要生存和发展,就必然会在不同程度上影响和破坏地球生态系统。如何在发展经济的同时,尽可能最大限度地保护地球生态系统,对地球生态系统进行科学、合理的有序利用,以保证地球生态系统对全球变化始终保持最大的调节能力,以有效防止全球变化向着不可逆转的方向发展,是摆在我们面前的一个十分重要的科学问题,同时也是一个十分重要的社会问题。如果对人类的经济活动不加以有效控制,世界各国任凭温室气体继续增加排放,

任凭地球生态系统继续遭到人为的破坏而不进行遏制和保护,势必造成严重的气候危害和生态灾难,对人类的生存和发展造成危险的影响。因此,遏制温室气体的持续增加,加强对地球生态系统的保护,已成为全人类面临的刻不容缓的重要任务。

参考文献

- [1] Wood F B J. The need for systems research on global climate change. *Systems Research*, 1988, **5**: 225~240
- [2] Houghton J T, Jenkins G T, Ephraums J J. *Climate change: The IPCC Scientific Assessment*. Cambridge: Cambridge University Press, 1990
- [3] Rosenzweig C, Parry M L. Potential impact of climate change on world food supply. *Nature*, 1994, **367**: 133~138
- [4] 符淙斌, 黄燕. 亚洲的全球变化问题. 气候与环境研究, 1996: **1** (2), 97~112.
Fu Congbin, Huang Yan. Global Change in Asia. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese). 1996, **1** (2): 97~112
- [5] Schimel D S, Braswell B H, Holland E A, et al. CO₂ and carbon cycle. *Climate Change 1994: Radiative Forcing of Climate Change* (IPCC). Cambridge: Cambridge University Press, 1995. 35~71
- [6] IPCC. *Climate Change 1994: Radiative Forcing of Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press, 1995
- [7] Cao M, Woodward F I. Dynamic responses of terrestrial ecosystem carbon cycling to global climate change. *Nature*, 1998, **393**: 249~252
- [8] Lin G, Stermberg L D S, Phillips S L, et al. An experimental and modeling study of the responses in ecosystem carbon exchanges to increasing CO₂ concentration using a tropical rainforest mesocosm. *Australian Journal of Plant Physiology*, 1998, **25**: 547~556
- [9] Lin G, Phillips S L, Ehleringer J R, et al. Ecosystem carbon exchange in two terrestrial ecosystem mesocosms under changing atmospheric CO₂ concentrations. *Oecologia*, 1999, **119**: 97~108
- [10] Matson P, Vitousek P. Ecosystem approach to a global nitrous oxide budget. *Biosphere*, 1990, **40**: 667~672
- [11] Keller M, Matson P. Biosphere-atmosphere exchange of trace gases in the tropics: evaluating the effects of land-use changes. In: *Global Atmospheric-Biospheric Chemistry*, Prinn R, Ed., New York: Plenum Press, 1994. 103~118
- [12] Mooney H A. The carbon balance of plants. *Annual Review of Ecology and Systematics*. 1972, **3**: 313~346

- [13] Reeburgh W S, Roulet N T, Svensson B H. Terrestrial biosphere-atmosphere exchange in high latitudes. In: *Global Atmospheric-Biospheric Chemistry*, Prinn R, Ed. New York: Plenum Press, 1993. 165~178
- [14] 孙铁珩, 周启星, 李培军. 污染生态学. 北京: 科学出版社, 2002. 401pp
Sun Tieheng, Zhou Qixing, Li Peijun. *Pollution Ecology* (in Chinese). Beijing: Science Press, 2002. 401pp
- [15] 方精云, 唐艳鸿, 林俊达, 等. 全球生态学. 北京: 高等教育出版社, 2000. 319 pp
Fang Jingyun, Tang Hongyan, Lin Junda, et al. *Global Ecology* (in Chinese). Beijing: China Higher Education Press, 2000. 319 pp
- [16] Gao Xuejie, Luo Yong, Lin Wantao. Simulation of effects of Land use change on climate in China by a regional climate model. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2003, **20** (4): 583~592
- [17] Downing J P. Land and water interface zones. *Water, Air and Soil Pollution*, 1993, **70**: 123~137
- [18] Meybeck M. C, N, P and S in rivers: From sources to global inputs. In: *Interaction of C, N, P and S, Biogeochemical Cycles and Global Change*, Wollast R, et al., Eds. Berlin: Springer-Verlag, 1993. 163~193
- [19] Broecker W S, Peng T H. Evaluation of the ^{13}C constraint on the uptake of fossil fuel CO_2 by the ocean. *Global Biogeochemistry Cycles*, 1993, **7**: 619~626
- [20] 蔡晓明. 生态系统生态学. 北京: 科学出版社, 2002. 331pp
Cai Xiaoming. *Ecosystem Ecology* (in Chinese). Beijing: Science Press, 2002. 331 pp
- [21] 刘厚田. 湿地生态环境. 生态学杂志, 1996, **15** (1): 75~78
Liu Houtian. Ecological Environment of Wetland. *Chinese Journal of Ecology* (in Chinese), 1996, **15** (1): 75~78
- [22] 孙广友. 中国湿地科学的进展与展望. 地球科学进展, 2000, **15** (6): 666~671
Sun Guangyou. Development and Prospect of Wetland Science in China. *Advance in Earth Sciences* (in Chinese), 2000, **15** (6): 666~671
- [23] 裴铁藩, 于系民, 金昌杰, 等. 生态动力学. 北京: 科学出版社, 2001. 549 pp
Pei Tiefan, Yu Ximin, Jin Changjie, et al. *Ecological Dynamics* (in Chinese). Beijing: Science Press, 2001. 549 pp