

# 气候变化对森林的影响与多尺度适应性管理研究进展\*

## Impacts of Climate Change on Forests and Adaptive Multi-scales Management: A Review

刘世荣<sup>1</sup>,温远光<sup>2,3</sup>,蔡道雄<sup>3</sup>,朱宏光<sup>2,3</sup>,黄雪蔓<sup>2,3</sup>,李晓琼<sup>2,3</sup>

LIU Shi-rong<sup>1</sup>, WEN Yuan-guang<sup>2,3</sup>, CAI Dao-xiong<sup>3</sup>, ZHU Hong-guang<sup>2,3</sup>, HUANG Xue-man<sup>2,3</sup>, LI Xiao-qiong<sup>2,3</sup>

(1. 中国林业科学研究院森林生态与保护研究所,北京 100091;2. 广西大学林学院,亚热带农业生物资源保护与利用国家重点实验室,广西南宁 530004;3. 中国林业科学研究院热带林业实验中心,友谊关森林生态系统定位研究站,广西凭祥 532600)

(1. Institute of Forest Ecology, Environment and Protection, Chinese Academy of Forestry, Beijing, 100091, China; 2. State Key Laboratory for Conservation and Utilization of Subtropical Agro-bioresources, Forestry College, Guangxi University, Nanning, Guangxi, 530004, China; 3. Guangxi Youyiguan Forest Ecosystem Research Station, Experiment Center of Tropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Pingxiang, Guangxi, 532600, China)

**摘要:**森林作为陆地生态系统的主体和全球气候系统的重要组成部分,对调节全球碳平衡和减缓气候变化具有不可替代的作用。目前的研究表明,气候变化已经对全球各类森林产生了不同程度的影响,而且全球气候变暖的加剧将对森林产生毁灭性的影响。森林管理是一项缓解气候变化影响的关键因子,为应对全球气候变化,森林经营管理必须做出相应的调整以适应和减轻气候变化的消极影响。本文系统总结了全球气候变化对森林及树木分布、生理生态和物候、森林生产力、碳循环、生物多样性、森林水文、森林灾害等产生的现实和潜在的影响,并针对气候变化下的可能影响,从基因、物种、森林生态系统、流域和生物圈多个尺度阐述了适应性管理的对策,以提高各生命系统适应气候变化的能力,实现森林的可持续经营和生物圈的可持续发展。

**关键词:**全球气候变化 森林 多尺度适应性管理

**中图分类号:**Q148 **文献标识码:**A **文章编号:**1005-9164(2014)05-0419-17

**Abstract:** Forests, as a principal component of terrestrial ecosystems and an important component of global climate systems, play an important role in regulating carbon balance and mitigating climate change. There is increasing evidence that global climate change is influencing global forests, which vary with forest types and geographical regions. Impacts of climate change on forests would be devastated through the increasing global climate warming. Forest management is one of the most important factor to mitigate affect of climate change. Aiming at enhancing forest resilience to climate change, the forest management should be accordingly adjusted and improved in order to maintain forest ecosystem services and reduce negative impacts of climate

change on forests. This paper reviews the impacts of the global climate change on forests, including forest and tree distribution, tree physiological ecology, phenology, forest productivity, carbon cycling, biodiversity, forest hydrology, forest pest and disease, and forest fire. Adaptive management practices are recommended and

收稿日期:2014-07-15

作者简介:刘世荣(1962-),男,研究员,主要从事全球变化和森林生态学研究。

\*国家自然科学基金项目(31460121),国家科技支撑计划项目(2012BAD22B01, 2011BAC09B02),广西重大专项计划项目(1222005)资助。

should be incorporated into the current forest management regime, including gene, species, forest ecosystem, watershed and biosphere, in order to enhance resilience of living systems to climate change, and to maintain the sustainable development in biosphere.

**Key words:** global climate change, forest, adaptive multi-scales management

联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)最近的评估报告指出,近百年来地球气候正经历一次以全球变暖为主要特征的全球气候变化<sup>[1]</sup>。全球气候变化引起区域气候的温度、降水、蒸发等气象要素的显著变化,进而导致极端气候事件频发多变,而且气候变化将长时期存在并有可能加剧<sup>[1~3]</sup>。目前的研究表明,大气中温室气体(如二氧化碳、甲烷、氮氧化物、氟氯烃等)特别是 CO<sub>2</sub> 浓度的增加是造成全球变暖的主要原因<sup>[1,4,5]</sup>。大气 CO<sub>2</sub> 浓度变化对森林及树木的影响非常复杂,因为 CO<sub>2</sub> 不仅作为光合底物,直接通过“施肥效应”影响林木的光合作用进而对森林和树木产生影响,它还能以温室气体通过“温室效应”改变其他环境因素(如温度、水分等),间接地对森林和树木产生影响。大量的研究表明,全球气候变化对森林生态系统、人类生存环境及经济社会造成了重大影响<sup>[1,6~10]</sup>,并已由单纯的科学问题演变为全球关注的经济、政治问题。

森林作为陆地生态系统的主体,是全球气候系统的重要组成部分。联合国粮食与农业组织(FAO)对全球森林资源的评估表明,全球森林面积约 40 亿 hm<sup>2</sup>, 约占全球陆地面积的 30%<sup>[11]</sup>。据报道,森林每生产 1t 木材,就要吸收 1.6t CO<sub>2</sub>, 释放 1.1t O<sub>2</sub>, 可以固定 0.5t 的碳<sup>[12]</sup>。森林植被的碳储量约为全球植被的 77%, 森林土壤的碳储量约占全球土壤的 39%<sup>[13]</sup>。因此,森林和树木具有吸收 CO<sub>2</sub>、固定碳素的重要功能和减少 CO<sub>2</sub> 排放、减缓温室效应的独特作用<sup>[14]</sup>, 在调节全球碳循环、减缓全球气候变化方面发挥着不可或缺的重要作用<sup>[15]</sup>。

森林经营是一项缓解气候变化影响的关键因子<sup>[16]</sup>, 利用森林的吸碳和储碳功能,通过植树造林和减少毁林、维持和提高森林面积、优化林分组成和结构、合理的疏伐和采伐制度等活动,吸收和固定大气中的 CO<sub>2</sub>, 被国际社会公认为应对全球气候变化最为经济、现实与有效的手段<sup>[17]</sup>。然而,气候变化对森林及树木的影响方式和作用机制错综复杂<sup>[15]</sup>, 作为受气候变化影响较大而适应能力较弱、响应较迟缓的森林生态系统,应及早开展气候变化挑战下的森林生态系统适应性管理研究,帮助我们选择适宜的森林经营管理体系,以避免气候变化的不利影响,并充分利用气候变化带给我们的机遇<sup>[18]</sup>。因此适应并减缓气

候变化的森林经营正成为当今世界林业发展的新趋势<sup>[15]</sup>。本文基于近年来作者在气候变化对森林和树木影响与适应性管理的研究<sup>[15,19~30]</sup>,就目前国内国外相关研究结果进行了总结和归纳,并针对目前研究工作中存在的局限性,展望了未来气候变化条件下森林及树木适应性管理的主要领域和途径,为全球气候变化背景下森林生态系统的适应性管理提供理论依据和科学参考。

## 1 全球气候变化的背景

### 1.1 温室效应与全球气候变暖

1824 年,法国物理学家、数学家傅立叶(J. B. J. Fourier, 1768~1830)发现了大气层的保温现象<sup>[31]</sup>。1896 年,瑞典化学家阿伦尼乌斯(S. Arrhenius, 1859~1927)率先开展大气层保温现象研究,并首次提出“温室效应”的概念<sup>[31]</sup>。温室效应是太阳短波辐射穿透大气层射向地面,使地面增暖后放出的长波辐射被大气中的 CO<sub>2</sub> 等物质所吸收,从而形成类似于温室的保温效应<sup>[1,14]</sup>。因此温室效应是一种自然现象,它让地球保持温暖而稳定的环境,使生命得以生存和繁荣。但科学家发现,如果温室气体持续增加,地球温度会因温室效应而不断上升,造成以全球变暖和极端气候事件频发多变为主要特征的气候变化<sup>[1]</sup>。

### 1.2 全球气候变化现实与预测

全球气候变化与全球大量温室气体排放和温室效应加剧密切相关。研究表明,由于化石燃料燃烧、土地利用和植被破坏等人为活动的影响,大气中 CO<sub>2</sub> 含量从工业革命前的 280 μmol/mol 升高到现在的 400 μmol/mol<sup>[1,32]</sup>, 预计到本世纪末将达到 700 μmol/mol<sup>[33~35]</sup>。大气中温室气体含量的显著提高已经引起地球表面温度和降雨量的可观测性变化<sup>[9]</sup>。全球平均地表温度在过去 100 年升高了(0.74 ± 0.18) °C, 该趋势在北半球的中高纬度大陆地区表现得尤为明显<sup>[1]</sup>。中国气象局发布的最新观测结果显示,近百年来(1908~2007)中国的地表平均气温升高了 1.1 °C<sup>[36]</sup>, 而在过去的 50 年间,美国的平均温度也增加了 1.1 °C<sup>[37]</sup>。最近的模型预测表明,到 2100 年,全球平均地表气温将升高 1.8~4.0 °C, 并且 21 世纪的全球变暖趋势将大大超过 20 世纪<sup>[38,39]</sup>。

### 1.3 森林经营与气候变化

森林是重要的碳源和碳汇,在气候系统中扮演着

重要的角色<sup>[16]</sup>,对气候系统产生显著的反馈作用<sup>[37]</sup>。森林植被通过影响下垫面特征(如太阳光反射率、空气动力阻力、植被叶面积指数等)改变地面能量和水汽能量从而对区域气候和水文产生影响。森林通过较高净辐射、较强的蒸腾和林冠截留能力,可以降低土壤含水量、提高空气湿度并降低风速,从而改变森林内部和边缘的小气候<sup>[40~43]</sup>。不仅如此,森林植被对中大尺度气候都有影响<sup>[44]</sup>。在大流域尺度上,Dickinson等<sup>[45]</sup>研究发现砍伐亚马孙流域森林使当地年蒸发散降低了220mm。在区域和全球尺度上,森林对气候的影响更为复杂,呈现极强的区域性特征<sup>[42,46~48]</sup>。森林与气候之间的复杂非线性相互作用可以减弱或加强人类造成的气候变化<sup>[37]</sup>。虽然造林或再造林会通过增加碳汇减缓全球变暖的程度和趋势,但是营林所造成的生物地球物理反馈作用,通过对反射率和能量再分配的影响又会加强或减少气候变化的动因<sup>[37]</sup>。近期的证据表明,森林破坏是仅次于化石燃料的第二大温室气体排放源,仅热带地区因森林砍伐的碳排放就高达 $2.94 \pm 0.47 \text{PgC} \cdot \text{年}^{-1}$ ,超过全球森林每年从大气中吸收固定的碳量( $2.41 \pm 0.42 \text{PgC} \cdot \text{年}^{-1}$ )<sup>[49]</sup>。因此森林经营与气候变化关系密切,通过造林、保护、收获率的改变、树种选择、合理的疏伐制度以及采伐后再造林时间的缩短等森林管理措施,可以降低气候变化的严重程度及其影响范围<sup>[16]</sup>。

## 2 全球气候变化对森林及树木的影响

以全球持续变暖和极端气候事件频发多变为主要特征的全球气候变化对森林及树木产生巨大影响。由于气候变化引起的温度、降水等气象要素的时空异质性变化,以及森林和树木的多样性、复杂性、时空动态性变化,导致不同地区、不同森林类型和树木所受影响及其响应方式存在差异<sup>[15]</sup>。从气候变化背景下森林及树木适应性管理角度考虑,气候变化的影响主要反映在森林及树木的分布、生理生态和物候、森林生产力、碳循环、生物多样性、森林水文、森林灾害等诸多方面。

### 2.1 气候变化对森林及树种分布的影响

气候变化将改变森林及树种的分布格局。大量的实证观测表明,气候变暖将导致树种向高海拔和高纬度地区迁移<sup>[50~53]</sup>。Root等<sup>[50]</sup>对143个研究中的1473个物种进行了整合分析(meta-analysis),发现有80%的物种表现出的迁移变化与温度变化紧密相关。Parmesan等<sup>[51]</sup>通过对1700多个物种在过去20~140年间分布区的变化分析,也发现物种分布区

的迁移与气候变暖有关,他们对其中99个物种的定量分析发现气候变化导致物种分布区北界向北移动的平均速率为每10年6.1km,物种最高海拔的分布高度平均上升速率为每10年6.1m。最近,Lenoir等<sup>[53]</sup>通过比较1905~1985年与1986~2005年间171个森林树种的海拔分布发现,气候变化导致的物种最适宜海拔分布平均上升速率为每10年29m。但也有实证观测表明,气候变化导致树种向低海拔迁移<sup>[53~55]</sup>。例如,Crimmins等<sup>[54]</sup>通过比较美国加利福尼亚州1930~1935年和2000~2005年间64个植物的最适宜海拔分布高度平均向低海拔下移了88.2m,并指出这是区域水分可获得性增加所致。郝建锋等<sup>[56]</sup>根据模型模拟预测研究发现,在气候变化加剧的情况下,2020年我国兴安落叶松适宜分布区域将减少58.1%,2050年将减少99.7%,即至2100年兴安落叶松适宜分布区将从我国完全消失。可见气候变化不仅会改变森林及树种的分布格局,还将使某些森林类型及树木在某一特定的区域内消失。

### 2.2 气候变化对树木形态、生理和物候的影响

大气CO<sub>2</sub>浓度增加和温室效应,直接影响到树木的形态结构、生理活动和生化反应途径,进而影响树木的生长发育和物候变化。高浓度CO<sub>2</sub>对树木形态的影响研究表明,在高浓度CO<sub>2</sub>环境中幼苗的分枝增多,针叶的厚度增大<sup>[57]</sup>、叶面积增大<sup>[58]</sup>,针叶上表皮和下表皮之和、树脂道、木质部等的相对面积减少,而针叶韧皮部的相对面积显著增加<sup>[59]</sup>。研究还发现,在大气CO<sub>2</sub>浓度升高情况下,辽东栎(*Quercus liaotungensis*)和杜仲(*Eucommia ulmoides*)等树种叶片的气孔密度显著降低,青钱柳(*Cyclocarya paliurus*)的气孔密度下降不明显,而异叶榕(*Ficus heteromorpha*)的气孔密度不受影响<sup>[60]</sup>。

光合作用和呼吸作用是碳进出生命系统的最基本的生理过程。研究表明,短期高浓度CO<sub>2</sub>处理会促进树木光合速率升高<sup>[61,62]</sup>,但不同树种间的光合能力存在很大差异。蒋高明等<sup>[63]</sup>对北京山区辽东栎林中几种木本植物的研究表明,高浓度CO<sub>2</sub>对树木光合作用有不同程度的促进作用,净光合速率平均增加75%(变化范围:37%~93%)。谢会成等<sup>[64]</sup>对麻栎(*Quercus acutissima*)的研究结果与之类似,在CO<sub>2</sub>浓度升高条件下,麻栎叶片净光合速率平均增幅为89.2%。长期高CO<sub>2</sub>浓度环境下,不同类型树种有不同响应。阔叶树对CO<sub>2</sub>变化反应较针叶树种敏感<sup>[65]</sup>,阳性树种的光合作用对长期高浓度CO<sub>2</sub>的适应能力比阴性树种强<sup>[66]</sup>,阔叶树种的生物量增加(63%)高于针叶树种的生物量增加(38%)<sup>[67]</sup>。呼吸

作用中 CO<sub>2</sub> 的排出是一个重要的生理过程,它影响到植物和生态系统的碳平衡。许多研究表明,树木的呼吸作用随 CO<sub>2</sub> 浓度升高而下降,高浓度 CO<sub>2</sub> 处理可使树木呼吸速率降低 15%~20%<sup>[68]</sup>。最近的研究发现,高浓度 CO<sub>2</sub> 处理下欧洲云杉(*Picea abies*)的茎总呼吸碳损失同正常 CO<sub>2</sub> 浓度处理的相比有所降低,而根系的呼吸速率却有所增加<sup>[69]</sup>。研究认为,高浓度 CO<sub>2</sub> 将造成树木保卫细胞收缩,气孔关闭,从而使细胞内氧分压降低,呼吸作用因之降低;另一方面,因呼吸作用的产物 CO<sub>2</sub> 分压提高,而使呼吸作用受到抑制<sup>[70]</sup>。

物候是表征植物生长发育阶段对气候变化响应的综合生物指标,也是对气候变化反应最为敏感的特征指标之一<sup>[71]</sup>。Root 等的研究发现,约 80% 的物种的物候期受到气候变化的影响<sup>[50]</sup>。许多资料证实,中高纬度区域春季物候均有提前的趋势,例如,在地中海地区,大多数落叶植物现在的叶片展叶期比 50 年前提前了 16d,同时凋落期延长 50d;在加拿大西部,近半个世纪以来,杨树(*Populus tremuloides*)开花期提前 26d<sup>[72]</sup>;Schwartz 发现在过去 30a 美国丁香展叶平均提前了 5.4d<sup>[73]</sup>。也有个别研究发现,低纬度地区也出现了这种物候期提前的趋势,例如,Matsumoto 观察到在过去 40a 中日本银杏树的发芽物候提前了 4d,落叶时间推迟了 8d<sup>[74]</sup>。大多数研究认为植物物候期随气候变暖而呈延长趋势。

### 2.3 气候变化对森林生产力的影响

气候变化会影响森林生产力,而影响的方向和量级常因环境因素和森林类型而异<sup>[75]</sup>。研究表明,以气候变暖为主要特征的气候变化,因气温升高产生的“延长生长效应”和 CO<sub>2</sub> 浓度上升带来的“施肥效应”,使得森林生态系统的生产力普遍呈增加趋势<sup>[76]</sup>。在北欧,森林的生长往往受生长季短、夏季温度低和氮供应不足的限制<sup>[77,78]</sup>。在全球气候变化背景下,预计到 2100 年,芬兰大气中 CO<sub>2</sub> 量将增加一倍,年均温将提高 2~7℃,年降水量将增加 6%~37%<sup>[79]</sup>,年均温的增加可能导致生长季延长,加快土壤有机物的分解速度,从而提高土壤中氮的供应量<sup>[80,81]</sup>,这些变化实质上都会增加北方森林中林木的生长、木材产量和碳汇<sup>[82~84]</sup>。Nemani 等<sup>[85]</sup>通过卫星植被指数数据分析表明,气候变暖使得 1982~1999 全球净第一性生产力增长了约 6%;刘世荣等<sup>[21]</sup>使用中国森林气候生产力模型预测的中国森林第一性生产力分布格局表明,气候变化没有改变中国森林生产力的地理分布格局,即气候变化后的分布格局,并没有表现出地理区域性的显著变异;周广胜

等<sup>[86]</sup>采用综合模型预测了全球增温条件下 NPP 的变化,结果显示自然植被的 NPP 均有所增加,在湿润地区增加幅度较大,而在干旱和半干旱地区增幅较小。方精云<sup>[61]</sup>指出,CO<sub>2</sub> 浓度倍增后,中国森林生产力将有所增加,增加的幅度因地区不同而异,变化于 12%~35%之间;Su 等<sup>[87]</sup>使用 BIOME-BGC 模型分析了气候变化和大气 CO<sub>2</sub> 浓度增加对新疆天山云杉林生产力的影响,研究表明,当只考虑温度和降水时,降水占主导作用,净第一性生产力将增加 18.6%;当只考虑 CO<sub>2</sub> 倍增时,净第一性生产力只增加 2.7%;而同时考虑气候变化和 CO<sub>2</sub> 浓度倍增时,净第一性生产力将增加 26.4%~37.2%。Ren 等<sup>[88]</sup>采用陆地生态系统动态模型(DLEM)研究表明,由于大气 O<sub>3</sub>、气候、CO<sub>2</sub>、氮沉降及土地利用变化,中国森林在 1961~2005 年是碳汇,模型模拟表明,大气 O<sub>3</sub> 含量不断增加,导致全国碳储量下降近 7.7%,由于 O<sub>3</sub> 导致不同森林类型的净生态系统生产力下降了 0.4%~43.1%。另一些研究结果也证实,气候变暖与干旱、火灾和生物干扰相互作用,造成了森林生产力的下降。例如,Zhao 等<sup>[89]</sup>研究发现,在 2000~2009 年增温最明显的阶段,全球净第一性生产力没有持续增加,反而下降了 5.5 亿 t(碳单位)。由此可见,气候变化对森林生产力的影响机制非常复杂,存在复杂性和不确定性。

### 2.4 气候变化对森林碳循环的影响

气候变化将会影响森林及树木的光合作用、器官衰老、凋落物及分解速率、土壤有机物质分解和转化过程,进而对森林生态系统的碳循环过程产生影响。在气候变化背景下,大气 CO<sub>2</sub> 浓度的增加和气温上升,引起植被物候期的延长,加上全球氮沉降和营林措施的改变等因素,森林的年平均固碳能力呈稳定的上升趋势<sup>[90]</sup>。虽然在正常年份森林普遍发挥碳汇功能,但是在厄尔尼诺发生的高温干旱年份,极端气候直接引起的植物生理胁迫、林木翻卷和断枝折干以及间接导致的病虫害<sup>[9]</sup>,均会引起植物生长停滞甚至大量死亡<sup>[91]</sup>,使森林内林木个体死亡率上升。因此极端气候事件的发生,一方面森林自身碳吸储能力下降,另一方面,死亡林木的腐朽分解又释放大量碳,使森林表现为一个净碳源<sup>[15]</sup>。

森林土壤有机碳储量是陆地生态系统土壤碳库中最大的储存库<sup>[92]</sup>。气候变化通过改变地上碳向地下碳的输入速率,以及调节和改变土壤微生物群落的活性等生理生化过程对森林土壤有机碳库产生影响。全球气候变暖,使土壤温度上升,进而对森林土壤和根系呼吸过程产生影响。北方地区气温较低,不利于

植物凋落物和土壤有机碳的分解,然而,随着北方高纬度地区的大幅度增温,北方森林地表的凋落物及土壤有机碳分解转化速率均有不同程度的提高,从而增加土壤碳流失速率<sup>[92]</sup>。降水量的增加,可能会提高土壤动物、微生物活性,进而促进土壤呼吸,导致森林土壤有机碳库释放的CO<sub>2</sub>速率加快。极端干旱事件则可能会通过降低土壤微生物活性以减少土壤呼吸速率<sup>[93]</sup>。大气CO<sub>2</sub>浓度的增加有可能会提高植物光合作用强度,会增加森林地上部分的生物量;同时其凋落物产量对土壤的输入量也随之增加。此外,CO<sub>2</sub>浓度的增加也会对地下根系产生影响,地上植物光合作用的增强,导致向根系输入的碳水化合物的增加,刺激根系生长并提高根系生物量<sup>[94]</sup>。当然,CO<sub>2</sub>浓度增加带来的气候变暖同时会促进土壤微生物活性,增强植物根系和土壤呼吸<sup>[69,94]</sup>,因此CO<sub>2</sub>浓度增加是否导致土壤碳库增加,目前还没有确定的结论。

## 2.5 气候变化对森林生物多样性的影响

越来越多的证据表明,气候变化会对森林生物多样性造成深刻影响<sup>[95]</sup>。首先,气候变化可以引起森林植物物候发生变化,例如,气候变化导致了开花植物的物候变化,使得植物和传粉昆虫之间的不匹配,由于植物-授粉者网络结构的断裂而可能导致相应植物和授粉者的相继灭绝<sup>[96]</sup>。其次,气候变化导致食物链的改变,由于物种之间存在复杂的相互作用,植物多样性的变化和丧失可能会引起食物链的缺损和不同物种之间的生态关系的断裂,造成级联效应而引起次生灭绝<sup>[97]</sup>,而其他的种间关系(竞争、捕食、寄生或附生)的改变也可以影响群落结构和生态系统功能<sup>[97,98]</sup>。第三,气候变化引发的环境变化可以造成热点地区的物种灭绝。据预测,热点地区有43%的物种将会消失,即约5.6万种地方植物和3700种地方脊椎动物将会灭绝。气候变暖使生物多样性减少,在青藏高原的野外增温实验发现,为期4年的增温使生物多样性降低了26%~36%<sup>[99]</sup>;环境改变还使某些关键种或稀有种丧失<sup>[100,101]</sup>。第四,生物分布区的改变也将对生物多样性造成影响<sup>[102]</sup>。随着气候变暖的加剧,许多物种的地理分布区向高纬度和高海拔地区转移<sup>[51,55,103~105]</sup>,在这种情况下,位于更高纬度或更高海拔的物种由于缺少适宜的分布区而面临灭绝的危险<sup>[106]</sup>。第五,生物入侵是影响全球生物区系的重要过程。通常情况下,能够成功入侵的植物往往在竞争能力、繁殖能力、扩散能力,以及对恶劣环境的耐受能力方面具有优势,这些优势有助于它们在面对变化的环境时能够更快速地适应,获得更多的有限资源,从而在竞争中胜过或取代本地植物<sup>[107]</sup>,因此,气

候变化带来的生物入侵加剧对本地森林生物多样性的影响。第六,气候变化引起的极端气候事件的频发多变直接影响到生物多样性,例如,2008年的中国南方发生的特大冰冻灾害造成大量物种死亡<sup>[10]</sup>。

在生态系统的尺度上,Leemans等<sup>[108]</sup>、Reusht等<sup>[109]</sup>认为伴随全球变化的加剧,许多生态系统功能将发生改变。例如《千年生态系统评估》预测5%~20%的陆地生态系统将相互转化,特别是寒温带针叶林、灌丛林地、热带稀树草原和北方森林<sup>[110]</sup>。

目前虽然气候变化引起的物种灭绝的证据还相对有限,但已有研究表明,在未来的几十年里,气候变化可能会超过其他因子而成为全球植物多样性最大的威胁<sup>[111]</sup>。

## 2.6 气候变化对森林水文功能的影响

森林生态系统水平的蒸发散变化,包括两个过程——生理蒸腾和物理蒸发。产生蒸发散的先决条件是:水分源,驱动水分运动的能量和水分传输所需的汇,即地上空气的湿度差。气候变化除伴随升温外,还出现云雾变化以及由此产生的辐射、风和湿度的变化,而所有这些变化都影响蒸发散的3个先决条件<sup>[29]</sup>。因此,气候变化直接影响着水热条件的时空格局和动态变化,从而影响森林水文功能的发挥<sup>[29]</sup>。通常,森林的水文功能在暴雨、大暴雨和连续性降雨条件下会有所减弱,甚至丧失<sup>[19]</sup>。而气候变化的结果,有可能使反常天气强化,降水更为集中,强度增大,连续性雨日增多,因此气候变化下,森林的水文功能将减弱,暴雨致洪的可能性增大<sup>[19]</sup>。基于实测和建模的一些大尺度研究表明全球气候变化已经改变了流域水文特征<sup>[112~114]</sup>。刘昌明等<sup>[115]</sup>的研究表明,在全球气候变化背景下,我国六大江河径流减少。周国逸和刘效东基于中国南部鼎湖山自然保护区长期水文过程监测以及SWAT模型的模拟,指出该流域土壤干化、河道径流量的增加和地下水位的升高是由流域尺度上气候变化背景下降水格局和气温的变化引起。由于土壤饱和含水量(的限制),暴雨形式降水量的增加并没有提高湿季土壤水分含量,而干季干燥日数的增多却显著降低了土壤含水量,进而土壤水分供给的相对不足最终导致了实际蒸散量的降低。湿季强化的降水能够增加流域产水量、地表径流和地下水位,从而更易导致洪灾。伴随着干燥日数的增加,干季较低的土壤含水量减少了地表产流以及地下水输入。这些土壤水分及水文变量的响应表明了气候变化已经导致中国南部地区干旱和洪涝极端事件的加剧<sup>[116]</sup>。

当前的研究普遍认为气候变化是决定径流变化

最重要的因素<sup>[117,118]</sup>。魏晓华等<sup>[119]</sup>对全球 23 个大流域(面积大于 1000km<sup>2</sup>)的数据分析表明,气候变化和森林变化是影响水文变化的两个最主要的驱动因素。他们同时指出,由于气候变化与森林变化对水文变化影响的极端复杂性,目前还没有一种方法能有效地阐明植被变化与气候变化如何相互作用影响流域水文的变化,亟待深入研究。

## 2.7 气候变化对森林灾害的影响

无论是生物因素还是非生物因素引起的森林灾害,其发生的时间与强度都与气候条件密切相关。当前的研究普遍认为以全球变暖和极端气候事件频发多变为特征的气候变化是许多森林灾害(如火灾、病虫害、旱灾、洪灾、低温雨雪冰冻灾害等)发生的主要诱因。

森林火灾的驱动力(如生态系统生产力、可燃物积累和环境火险条件)受气候变化的影响<sup>[120]</sup>。研究表明,极端干旱与雷击事件会显著提高林火的概率<sup>[15]</sup>。火烧对森林植被的影响取决于火烧的频率和强度,严重的森林火灾会导致森林退化为灌丛或草地,并减少植被生物量和碳储量<sup>[121]</sup>。气候变化背景下,温度升高和降水模式改变将增加干旱区的火险,火烧频度加大<sup>[120]</sup>,引起生态系统结构和功能的显著变化<sup>[122]</sup>。在 2003 年的热浪中,葡萄牙、西班牙、意大利、法国、澳大利亚、芬兰、丹麦和爱尔兰共发生了 25000 多起火灾,烧毁了 65 万 hm<sup>2</sup> 森林植被<sup>[123]</sup>。由于气候变化,我国森林火灾比较严重,森林火险期明显延长,据资料显示<sup>[15]</sup>,1952~2003 年我国平均每年发生森林火灾 1.4 万次,平均受害森林面积 82.2 万 hm<sup>2</sup>。2008 年初发生在我国南方百年一遇的低温雨雪冰冻灾害,导致林木大批折断,地表可燃物猛增 2~10 倍,平均地表可燃物载量超过 50t/hm<sup>2</sup>,部分严重地段达到 100t/hm<sup>2</sup> 以上,已超过可发生高强度林火和大火的标准(30t/hm<sup>2</sup>)<sup>[28,124]</sup>。

气候变化是森林病虫害大规模、毁灭性、高强度发生的重要诱因之一<sup>[125]</sup>。气候变暖造成森林病虫害发生区域范围扩大,森林病虫害的种类、数量、强度及频率明显增加,森林病虫害的暴发周期有所缩短。20 世纪 90 年代以来,中国森林病虫害每年平均发生面积都在 800 万 hm<sup>2</sup> 左右,其中,中度以上的受害面积达 426.7 万 hm<sup>2</sup>,相当于每年人工造林面积的 80%<sup>[15]</sup>。近年来,由于生态环境的整体恶化,以极端异常气候过程为主要诱因,病虫害发生面积进一步扩大,2007 年全国森林病虫害发生面积为 1250 万 hm<sup>2</sup>,创历史新高<sup>[15]</sup>。

气候变化引发的高温和持续干旱对树木死亡率

产生重大影响。最近《Nature》上有报道<sup>[126]</sup>:科学家们评估了生长在全球 81 个不同生物群落中的 226 个树种在干旱条件下的反应情况,结果发现 70% 的树种在减少水源供给后会变得特别容易受到伤害。他们发现干旱强度微增都会导致树木发生木质部栓塞,“水力失效”,直接损害树木增长、导致树木死亡。由于森林应对干旱脆弱表现的全球趋同性,气候变化引起的高温和持续干旱将对全球森林产生毁灭性的影响。

## 3 全球气候变化下的多尺度适应性管理

适应性是指个体或系统通过改善遗传或者行为特征从而更好地适应变化,并通过遗传保留下相应的适应性特征<sup>[127~129]</sup>。也有学者认为,全球变化背景下的适应性是指人类社会与自然生态系统针对全球变化导致的或预期的影响在不同尺度(个体、地区、国家、区域)上的调整<sup>[130]</sup>。森林及树木对全球气候变化的适应包括自然适应和人为适应。越来越多的研究表明,生物在一定程度上都具有可塑性,即生物具有为适应环境变化而改变自身的行为、形态或生理方面的能力<sup>[131]</sup>,森林对变化的环境具有较强的自组织功能、自调节能力和自恢复能力<sup>[130]</sup>。适应性森林管理正是利用森林及树木的适应性和可塑性,通过科学的研究、管理、监测、评估和调控等手段,保持森林生态系统的稳定性、生物多样性,增强森林自身抵抗各种灾害的能力,发挥森林多目标、多价值、多用途、多产品和多服务的功能<sup>[132]</sup>。适应性森林管理已成为应对气候变化的有力工具之一。

### 3.1 基因的适应性管理

在全球气候变化背景下,基因尺度的适应性管理,主要是对一些濒临灭绝或受到严重威胁物种采取种质基因保存的对策。种质基因保存包括种子库、基因资源库、染色体库,以及进行基因人为选择,培育适应性强的新物种等<sup>[133]</sup>。全球气候变化加剧了生物多样性特别是基因多样性的丧失,多样性丧失的速率是前人类活动时代的 1000 倍,而且未来的丧失速率将是目前的 10 倍<sup>[110,134,135]</sup>。种质基因的保存对适应气候变化将发挥至关重要的作用。研究发现,生物将通过基因改变<sup>[136]</sup>或微进化来适应气候变化<sup>[137]</sup>。Truong 等<sup>[138]</sup>的研究发现,气候变化引起瑞士南部桦木(*Betula pubescens* ssp. *Tortuosa*)分布相关基因改变,使这些植物在新分布区能正常生长发育。物种通过基因调控来加速植物开花有利于植物适应气候变化<sup>[139]</sup>。全球气候变化对植物基因的影响日益剧烈,在没有物种基因的适应性管理的情况下,物种

通过更适宜基因型的自然选择来响应气候变化。然而植物对气候的自然适应速率过于缓慢,无法抵消气候迅速变化所带来的影响<sup>[140]</sup>。因此,运用基因工程以及转基因技术手段改造植物的基因性状,从而获得适应气候环境变化的新物种,是基因适应性管理的重要手段之一。

### 3.2 物种的适应性管理

气候变化与生物多样性密切相关。物种在气候变化的自然适应过程中,既可通过物种的快速进化和自身的可塑性不断提高对逆境的适应性,也可通过空间、时间和自身生理特性三个方面发挥适应性响应,以最大限度地避免物种丧失和灭绝<sup>[141]</sup>。大量的研究表明,在气候变化背景下,一方面物种可以通过向新的气候适宜的栖息地迁移,比如气候变暖后物种分布范围向高纬度或高海拔地区迁移<sup>[15,36,100,142]</sup>,使物种得以生存和繁殖;另一方面,物种也可以通过物候期的改变<sup>[50~53,143]</sup>、自身性状改变和个体生理生态特性改变来适应不断变化的气候条件,以适应原生长地的新环境<sup>[144]</sup>。扩大保护区范围将有利于减少脆弱性,减轻对自然保护区物种威胁,增加生物多样性的弹性,帮助物种自然适应。

物种对气候变化的人为适应包括人为帮助物种适应、管理物种栖息地、物种迁地保护、减少环境胁迫等。自然保护区管理和设计被公认为物种适应气候变化的有效途径。Hannah 等<sup>[145]</sup>指出,气候变化可能使物种不能在保护区内生存,减少保护区的功能有效性,所以保护区管理策略是物种适应气候变化的第一选择。保护区规划和设计需要考虑气候变化对物种迁移的影响,满足物种适应气候变化而迁移的需要,增加物种保护走廊设计<sup>[146]</sup>;保护区范围选择要有代表性,要把目前和将来都能适应气候变化的保护区作为优先选择的对象,并且考虑新适宜范围与以前适宜范围的连通性<sup>[147,148]</sup>。建立物种保护的防灾体系也是物种适应气候变化的重要内容。IPCC<sup>[1]</sup>报告中提出,在考虑气候变化对生物多样性影响适应对策中,进行保护区网络通道设计有利于物种迁徙,对一些敏感和脆弱物种进行迁地保护以增加适应。在生物多样性适应气候变化方面需要考虑对海平面上升、洪水、火灾和旱灾的预防<sup>[149]</sup>。同时,生物入侵是影响全球生物区系的重要过程,面对入侵物种,也需要考虑控制生物入侵<sup>[150]</sup>,增强物种对外来入侵的抵抗力。

### 3.3 森林生态系统的适应性管理

森林生态系统的适应性管理是森林适应气候变化的核心。在生态系统尺度上,人为适应气候变化活

动主要包括维持或恢复自然生态系统,增加生态系统的功能、稳定性和弹性,以及在森林可持续经营框架下采取森林减缓和适应气候变化的对策与措施。通过造林、再造林、退化生态系统恢复、建立农林复合系统、加强森林可持续管理等措施有利于提高森林碳储量,增强森林碳固定和碳吸收能力<sup>[15]</sup>。据 FAO 报道,全球可用于造林、再造林和农用林的土地面积约 3.45 亿  $\text{hm}^2$ ,如果全部实施造林、再造林和农用林,造林碳汇潜力可达 28GtC,农用林为 7GtC,热带地区 2.17 亿  $\text{hm}^2$  退化土地的植被恢复可新增固碳 11.5~28.7GtC<sup>[151]</sup>。各地区应在保护好现有的原始天然林和次生天然林的同时,大力发展速生丰产林,并加强人工林的集约经营,提高碳汇能力。森林碳储量与森林的物种组成和立地质量密切相关<sup>[152]</sup>。考虑到未来气候变化的影响,在气候变化敏感地区,特别是交错区域更应避免大面积营造人工纯林<sup>[15]</sup>。为了森林碳汇量的最大化,可以延长林分的采伐时间(即延长轮伐期)<sup>[16]</sup>。但 Kaipainen 等<sup>[153]</sup>的研究发现土壤碳汇随轮伐期的延长而减少。通过适宜的营林技术(如疏伐、部分采伐、优化树种组成等)可以维持或增加林分水平的碳密度;通过森林保护、轮伐期延长、火灾管理和病虫害防治可以维持或增加景观水平的碳密度<sup>[16]</sup>。目前的研究进展表明,通过经营管理措施提高次生林的生长速度及其结构复杂性有助于提高林分的净初级生产力和土壤吸收碳的能力<sup>[154]</sup>。

在全球气候变化下,森林火灾的频率和强度逐年增加,林火发生的规律有所改变,从而对林火预防与管理提出了更高的要求。在气候变化引发的持续干旱频发多变的条件下,应深化防火与控制性火烧的有机结合,既要增加森林地被物积累以提高森林生态系统的碳固持能力,也要避免森林地被物的过度积累导致的高强度、破坏性火灾发生,探索适应于新气候条件下的林火预防与管理方法,防止森林火灾的大规模发生,以提高森林生态系统的碳汇能力。因此,加强森林火灾的预防和管理应成为全球林业适应全球气候变化的重要政策之一<sup>[15]</sup>。

在全球气候变暖的条件下,森林病虫害呈现恶性暴发态势<sup>[155]</sup>。为避免大规模、突发性、毁灭性森林病虫害发生,除加强检疫、预报和提高防治技术手段外,还应加强纯林改造,特别是外来树种人工林,提高混交林比例,通过林分组成和结构的优化逐步提高森林自身的多样性、稳定性、自控力和预防病虫害的能力。同时,应选用含碳率高、生长快、抗性强的造林树种,有效提高森林的抗性和适应气候变化的能力。

### 3.4 流域的适应性管理

流域是一个独特的地理单元,它可划定的边界线为流域规划和管理提供了便利<sup>[156]</sup>。在世界范围内,许多国家都把流域作为一个区域开发与保护的实体。各种针对流域的管理机构不断涌现。比如在加拿大的 Fraser 流域委员会、Mackenzie 流域委员会,在中国的长江委员会、黄河委员会和珠江委员会等<sup>[156]</sup>。这些机构的宗旨是把整个流域作为一个大生态系统,协调流域的各种规划、资源利用及环境保护。事实证明,这种做法比把流域内资源分割管理的策略更有效<sup>[156]</sup>。针对流域适应气候变化的管理,Hannah 等<sup>[157]</sup>提出了适应气候变化的集成性保护策略(climate change - integrated conservation strategies, CCS),包括模拟区域生物多样性对气候变化响应,把气候变化作为区域适应性管理中的集成性选择因子和管理目标参数,设立行政区域或国家边界的协调机制,从资源丰富的国家向气候变化对生物多样性影响脆弱的国家提供资源等。这种集成性保护策略有利于提高流域整体对气候变化的适应能力。当前,在世界上许多流域开展了适应气候变化的流域生态系统综合管理实践,如澳大利亚的 Murray-Darling Basin 模式、加拿大的 Okanagan 流域模式等<sup>[156]</sup>。在全球气候变化背景下,我国长江流域森林生态系统的敏感性和脆弱性都会增加,需要全面提高长江流域森林生态系统对气候变化的适应能力<sup>[158]</sup>。从脆弱性和敏感性分析结果来看,长江流域分布面积最大的地带性森林植被(常绿阔叶林和落叶阔叶林)的敏感性和脆弱性较低,在全球气候变化背景下,这些地带性森林类型适应极端气候事件的能力较强,因此,应加大保护天然林,恢复地带性森林植被,并在生态恢复过程中适度考虑因气候变暖引起的树种分布范围向高纬度或高海拔迁移。在造林时,既要发挥南方树种的速生优势,又要充分考虑极端气候波动可能带来的风险<sup>[158]</sup>。同时,对整个流域森林生态系统的主体功能进行区划,建立和完善流域内生态补偿机制,切实提高流域尺度的森林经营水平,提高流域整体适应气候变化的能力。

### 3.5 生物圈的适应性管理

全球气候变化是人类迄今为止面临的影响最为深远、规模最大、范围最广、持续时间最长的环境问题,需要全人类的共同努力,提高生物圈对气候变化的适应能力。生物圈的适应性管理主要是全面提高全球范围内各国政府及公众的气候变化认同意识、建立全球生物圈保护区网络、完善碳排放交易市场、开发并推广碳替代产品、实施清洁生产机制和可持续发

展战略等。虽然森林在调节全球气候变化、维持陆地碳循环与碳平衡方面的重要作用已得到国际学术界的普遍认同,但是,一方面,一些经济欠发达国家和地区仍然将森林作为维系生存与发展的主要来源,过度开发利用,造成大面积森林的退化甚至消亡,从而引起碳排放恶化和全球变暖加剧;另一方面,一些发达国家如美国,布什政府以减少温室气体排放将会影响美国经济发展及发展中国家也应该承担减排和限排温室气体的义务为借口,宣布拒绝签署《京都议定书》,美国的一些地方政府相继宣布停止碳交易或退出区域温室气体减排倡议,致使部分国家和地方层面的减排行动陷入倒退局面。因此,国际社会应该加强应对气候变化的合作,提高各国及其各级政府和公众对气候变化以及森林对减缓气候变化作用的认同意识,特别是决策者对气候变化的认识,从政策、资金、机构等方面提高应对气候变化的能力建设<sup>[15]</sup>。

建立全球生物圈保护区是全球尺度应对气候变化的重要内容。当前,由 109 个国家的 564 个生物圈保护区所构成的全球生物圈保护区网络,除了保护生物多样性外,对缓解和适应气候变化也发挥了重要作用,尤其是土地的可持续利用、绿色经济、维护生态系统服务、节能和可再生能源利用等领域。此外,还应加强整合各国自然保护区网络建设,其在应对全球气候变化方面的作用不可小视。总之,在气候变化背景下,需要更加注重生物圈保护区在减缓和适应气候变化影响方面的能力建设,让其在生物圈应对气候变化中发挥更大的作用。

开发和推广碳替代产品,建立和完善国际碳排放交易市场。替代式管理,就是把森林作为可再生资源,通过提高和增强森林碳吸收速率或生物量向产品转移,主要包括扩展森林作为燃料和林产品供应者的用途,以减少碳排放或增加长期封存碳<sup>[15]</sup>。当用森林生产锯材、胶合板和其他工业木材产品时,碳就被长期封存。提高森林产品在长期碳封存方面的作用,可以减少森林生态系统向大气中的碳排放。从长远来看,为了达到减少碳排放的目的,直接取代或以生产低能源密集度的木材新产品取代矿物燃料可能要比在森林或林产品中储存碳更为有效<sup>[15]</sup>。薪柴是当今世界特别是发展中国家的重要能源,世界上几乎一半人口把薪柴当成主要的能源消耗。薪炭林是无污染的优良能源,薪柴含硫量较低,在燃烧时排放的 CO<sub>2</sub> 与薪炭林生长期固定的 CO<sub>2</sub> 相当,发展薪炭林有利于大气 CO<sub>2</sub> 浓度的稳定,是森林管理适应并减缓气候变化的重要措施之一<sup>[15]</sup>。此外,在大力发展薪炭林,替代矿物燃料的同时,要积极开发和推广太阳



能、风能、水能等可再生替代能源。《京都议定书》提出的碳排放权交易是实现减缓气候变化国际合作的重要机制。通过规范自愿减排交易和排放权交易试点,完善碳排放交易价格形成机制,逐步建立跨国、跨区域的碳排放权交易体系,充分发挥市场机制在温室气体减排中的重要作用。

发挥政府组织和非政府组织在气候变化减缓中的作用,全面推进生物圈可持续发展。国际组织作为国际社会的一个不同于主权国家的机构,开展了应对全球气候变化的一系列工作,发挥作越来越重要的作用。联合国是全球最大的政府间组织机构,面对全球气候变化所带来的危机和挑战,联合国积极推动国际谈判、召开国际会议、制定国际公约和提供相应的经济支持,为全球气候变化提供了科学的政策指导,减少了国际社会在气候变化问题上的分歧,加强了国际社会的国际气候合作,形成了《联合国气候变化框架公约》、《京都议定书》等具有里程碑意义的国际公约,为世界各国应对全球气候变化指明了方向。此外,要重视和发挥非政府组织的作用(如世界气象组织和绿色和平组织等)。各种非政府组织以其自身的特殊性,在应对气候变化挑战中发挥的作用越来越大<sup>[159]</sup>。可持续发展已成为全人类的普遍共识。在可持续发展和森林可持续经营的框架下,统筹考虑经济发展、消除贫困、保护气候,积极推动绿色、低碳发展,实现经济社会发展和应对气候变化的双赢。通过加强政府和非政府组织的全球合作,研究生物圈结构与功能变化,建立生物圈脆弱性评价指标体系与模型,评估未来气候变化背景下生物圈脆弱性及自适应程度,构建典型脆弱生态系统的适应技术体系,阐明生物圈对未来气候变化的适应对策,全面推进生物圈的可持续发展。

## 4 展望

在漫长的地质历史时期中,森林不断受到环境变化的影响,并能不断地适应变化的环境。但是面对当前全球气候变化的速度与复杂程度所带来的新挑战,森林更难以应对。树木本身较慢的进化速率和较弱的表型可塑性,以及森林生态系统较弱的适应能力和较迟缓的响应速率,显示出森林及树木成功应对迅速发生的气候变化和由此引发的其他环境变化的能力都较低。最近的研究表明,生命周期长的物种可能无法应对急剧的气候变化<sup>[139,160,161]</sup>,森林应对干旱脆弱表现的全球趋同性将导致全球森林的毁灭性破坏<sup>[126]</sup>。虽然我们正逐渐对全球气候变化的影响和森林对单个环境因子变化的响应有所了解,但是全球

气候变化的机理和影响错综复杂,很多环境因子是同时发生变化且共同产生影响的,而且对环境变化具有不同敏感性和不同响应的许多物种会共存并相互作用,从而形成了复杂的物种响应网络<sup>[16]</sup>。诚然,我们目前掌握的知识并不足以让我们清晰的了解全球变暖及其他的气候因子变化的驱动力,也不能真正的了解基因、物种、森林生态系统、流域和生物圈等不同生命系统对全球气候变化的响应速率、适应能力和范围。只有填补了这些基础知识的空白,我们才能够在变化的世界中了解各生命系统的发展趋势,才有能力解读各生命系统应对气候变化影响所发生的更多生态现象和过程。在全球气候变化加剧的背景下,我们不能等到对生态系统变化格局和过程中所有不确定性因素全面了解后,才去减缓和应对气候变化所带来的日益增加的社会、生态和经济威胁。我们相信,对森林减缓气候变化原理和方法的科学理解足以让我们在《可持续发展》、《联合国气候变化框架公约》、《京都议定书》的指导下迅速及时地实施林业减缓行动<sup>[162]</sup>,把气候变化给森林和林业所带来的消极影响降低到最小,实现森林的可持续经营和生物圈的可持续发展。

### 参考文献:

- [1] IPCC. Climate Change 2007: Summary for Policymakers [M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2007.
- [2] Meehl G A, Stocker T F, Collins W D, et al. Global climate projections. Contribution of working group I to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change[R]// Solomon S, Qin D, Manning M, et al(eds.). Climate change, 2007: The physical science basis. Cambridge, New York: Cambridge University Press, pp. 747-847.
- [3] Christensen J H, Hewitson B, Busuioc A, et al. Global climate projections. Contribution of working group I to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change[R]// Solomon S, Qin D, Manning M, et al(eds.). Climate change, 2007: The physical science basis. Cambridge, New York: Cambridge University Press, pp. 847-943.
- [4] Norby R J, Rustad L E, Dukes J S, et al. Ecosystem responses to warming and interacting global change factors. Chapter 3[M]// Canadell J G, Pataki E E, Pitelka L F (eds.). Terrestrial Ecosystems in a Changing World. Heidelberg: The IGBP Series, Springer, 2007.
- [5] Raupach M R, Marland G, Ciais P, et al. Global and regional drivers of accelerating CO<sub>2</sub> emissions[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, USA,

- 2007,104(24):10288-10293.
- [6] Sanz-Ros A V, Pajares J A, Diez J J. 气候变量对西班牙北部松林冠层状况的影响[M]//王小平, 杨晓晖, 刘晶岚, 等译. 气候变化挑战下的森林生态系统经营管理. 北京: 高等教育出版社, 2013:99-112.
- Sanz-Ros A V, Pajares J A, Diez J J. Impacts of climatic variability on pinery canopy conditions in the northern Spain[M]//Translated by Wang X P, Yang X H, Liu J L, et al. Management Forest Ecosystems: The Challenge of Climate Change. Beijing: Higher Education Press, 2013:99-112.
- [7] Buchmann N. Plant ecophysiology and forest response to global change[J]. Tree Physiology, 2002, 22: 1177-1184.
- [8] Camarero J J, Gutiérrez E. Pace and pattern of recent treeline dynamics: Response of ecotones to climatic variability in the Spanish Pyrenees [J]. Climatic Change, 2004, 63: 181-200.
- [9] Allen C D, Macalady A K, Chenchouni H, et al. A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests[J]. Forest Ecology and Management, 2010, 259: 660-684.
- [10] 尹伟伦, 翟明普. 南方低温雨雪冰冻的林业灾害与防治对策的研究[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2010.
- Yin W L, Zhai M P. Forestry Disaster of Freezing Rain and Ice Storm in Southern China and Control Countermeasures [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2010.
- [11] FAO. 2010 年全球森林资源评估报告[R/OL]. [2014-01-10]. <http://www.doc88.com/p-85822406885.html>.
- FAO. Global forest resources assessment 2010 [R/OL]. [2014-01-10]. <http://www.doc88.com/p-85822406885.html>.
- [12] 李坚, 郭明辉, 赵西平. 木材品质与营林环境[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- Li J, Guo M H, Zhao X P. Wood Quality and Forest Management Environment [M]. Beijing: Science Press, 2012.
- [13] Ciais P, Cramer W, Jarvis P. Land-use, Land Use Change and Forestry: Summary for Policymakers[M]. Cambridge: Cambridge University, 2001: 23-51.
- [14] 许明, 李坚. 木材的碳素储存与科学保护[M]. 北京: 科学出版社, 2013.
- Xu M, Li J. Wood Carbon Storage and Protection[M]. Beijing: Science Press, 2013.
- [15] 刘世荣. 气候变化对森林影响与适应性管理[M]//现代生态学讲座(VI)——全球气候变化与生态格局和过程. 北京: 高等教育出版社, 2013: 1-24.
- Liu S R. Impacts of climate change on forests and adaptive forest management[M]//Lectures in Modern Ecology (VI): Global Climate Change and Ecological Patterns and Processes. Beijing: Higher Education Press, 2013: 1-24.
- [16] Bravo F, Lemay V, Jandl R, et al. 引言[M]//王小平, 杨晓晖, 刘晶岚, 等译. 气候变化挑战下的森林生态系统经营管理. 北京: 高等教育出版社, 2013: 3-11.
- Bravo F, Lemay V, Jandl R, et al. Introduction[M]//Translated by Wang X P, Yang X H, Liu J L, et al. Management Forest Ecosystems: The Challenge of Climate Change. Beijing: Higher Education Press, 2013: 3-11.
- [17] Bravo F, Lemay V, Jandl R, et al. 气候变化挑战下的森林生态系统经营管理[M]. 王小平, 杨晓晖, 刘晶岚, 等译. 北京: 高等教育出版社, 2013.
- Bravo F, Lemay V, Jandl R, et al. Management of Forest Ecosystems: The Challenge of Climate Change[M]. Translated by Wang X P, Yang X H, Liu J L, et al. Beijing: Higher Education Press, 2013.
- [18] Lindner M. Developing adaptive forest management strategies to cope with climate change[J]. Tree Physiology, 2000, 20: 299-307.
- [19] 温远光, 元昌安, 刘世荣, 等. 全球气候变化与中国森林的水文效应[G]//中国科学技术协会第二届青年学术年会论文集. 北京: 中国科学技术出版社, 1995: 579-583.
- Wen Y G, Yuan C A, Liu S R, et al. Global climate change and forest hydrological effects in China[G]//Proceedings of the second academic conference of young scientists. Beijing: China Science & Technology Press, 1995: 579-583.
- [20] 温远光, 元昌安, 刘世荣, 等. 中国杉木林现实生产力的分布及模拟[J]. 广西科学, 1995, 2(2): 52-62.
- Wen Y G, Yuan C A, Liu S R, et al. Distribution and simulation of actual productivity of *Cunninghamia lanceolata* plantation in China[J]. Guangxi Sciences, 1995, 2(2): 52-62.
- [21] 刘世荣, 徐德应, 王兵. 气候变化对中国森林生产力的影响 II. 中国森林第一性生产力的模拟[J]. 林业科学研究, 1994, 7(4): 425-430.
- Liu S R, Xu D Y, Wang B. Impacts of climate change on productivity of forests in China II. Geographic distribution of actual productivity of forests of China[J]. Forest Research, 1994, 7(4): 425-430.
- [22] 刘世荣, 郭泉水, 王兵. 中国森林生产力对气候变化响应的预测研究[J]. 生态学报, 1998, 18: 478-483.
- Liu S R, Guo Q S, Wang B. Prediction of net primary productivity of forests in China in response to climate change[J]. Acta Ecologica Sinica, 1998, 18: 478-483.

- [23] 张雷,刘世荣,孙鹏森,等. 基于 DOMAIN 和 NeuralEnsembles 模型预测中国毛竹潜在分布[J]. 林业科学,2011,7:20-26.  
Zhang L,Liu S R,Sun P S,et al. Predicting the potential distribution of *phyllostachys edulis* with DOMAIN and Neural Ensembles Models[J]. Scientia Silvae Sinicae,2011,7:20-26.
- [24] 张雷,刘世荣,孙鹏森,等. 气候变化对物种分布影响模拟中的不确定性组分分割与制图——以油松为例[J]. 生态学报,2011,31(19):5749-5761.  
Zhang L,Liu S R,Sun P S,et al. Partitioning and mapping the sources of variations in the ensemble forecasting of species distribution under climate change: A case study of *Pinus tabulaeformis* [J]. Acta Ecologica Sinica,2011,31(19):5749-5761.
- [25] 张雷,刘世荣,孙鹏森,等. 气候变化对马尾松潜在分布影响预估的多模型比较[J]. 植物生态学报,2011,35:1091-1105.  
Zhang L,Liu S R,Sun P S,et al. Comparative evaluation of multiple models of the effects of climate change on the potential distribution of *Pinus massoniana* [J]. Chinese Journal of Plant Ecology,2011,35:1091-1105.
- [26] 刘世荣,郭泉水,史作民. 气候变化对中国森林的影响及其适应策略[M]//《生物多样性与气候变化》编委会. 生物多样性与气候变化. 北京:中国环境科学出版社,2011:50-54.  
Liu S R,Guo Q S,Shi Z M. Impacts of climate change on forests in China and adaptation strategies [M]//《Biodiversity and Climate Change》Editorial Board. Biodiversity and Climate Change. Beijing:China Environmental Science Press,2011:50-54.
- [27] Liu S R,Guo Q S,Chen L,et al. Adaptation strategy of forestry in China to global change[J]. Journal of Beijing Forestry University,1996,5(6):45-55.
- [28] 栾军伟,刘世荣. 土壤呼吸的温度敏感性——全球变暖正负反馈的不确定因素[J]. 生态学报,2012,32(15):4902-4913.  
Luan J W,Liu S R. Temperature sensitivity of soil respiration:Uncertainties of global warming positive or negative feedback[J]. Acta Ecologica Sinica,2012,32(15):4902-4913.
- [29] 刘世荣,温远光,王兵,等. 中国森林生态系统水文生态功能规律[M]. 北京:中国林业出版社,1996.  
Liu S R,Wen Y G,Wang B,et al. Ecohydrological Functions of Forest Ecosystems in China[M]. Beijing:China Forestry Publishing House,1996.
- [30] 朱宏光,李燕群,温远光,等. 特大冰冻灾害后大明山常绿阔叶林结构及物种多样性动态[J]. 生态学报,2011,31(19):5571-5577.  
Zhu H G,Li Y Q,Wen Y G,et al. The dynamics of the structure and plant species diversity of evergreen broadleaved forests in Damingshan National Nature Reserve after a severe ice storm damage in 2008,China[J]. Acta Ecologica Sinica,2011,31(19):5571-5577.
- [31] 中国科技馆. 温室效应与全球气候变暖[EB/OL]. (2008-3-30)[2014-03-10]. <http://news.xinhuanet.com/tech/2008.03/30/content-7885371.htm>. Chinese Science and Technology Museum. Greenhouse effect and global warming [EB/OL]. (2008-3-30)[2014-03-10]. <http://news.xinhuanet.com/tech/2008.03/30/content-7885371.htm>.
- [32] IPCC. Climate change 2001. The scientific basis [R]. Cambridge,UK:Cambridge University Press,2001.
- [33] de Graaff M, van Groenigen K J, Six J, et al. Interactions between plant growth and soil nutrient cycling under elevated CO<sub>2</sub>: A meta-analysis [J]. Global Change Biology,2006,12(11):2077-2091.
- [34] IPCC. Climate change 2007. Working group I report: The physical basis of climate change, 2007 [R/OL]. [2014-01-10]. <http://ipcc-wg1.ucar.edu/wg1/wg1-report.html>.
- [35] Aranjuelo I,Pardo A,Biel C,et al. Leaf carbon management in slow-growing plants exposed to elevated CO<sub>2</sub> [J]. Global Change Biology,2009,15(1):97-109.
- [36] 万师强. 气候变化与中国生物多样性的科学基础 [M]//《生物多样性与气候变化》编委会. 生物多样性与气候变化. 北京:中国环境科学出版社,2011:12-18.  
Wan S Q. Scientific base of climate change and biodiversity in China [M]//《Biodiversity and Climate Change》Editorial Board. Biodiversity and Climate Change. Beijing:China Environmental Science Press,2011:12-18.
- [37] 孙阁. 气候变化-森林-水资源相互作用[R]//现代生态学讲座(VI)——全球气候变化与生态格局和过程. 北京:高等教育出版社,2013:25-46.  
Sun G. Climate change-forest-water resource interactions [R]//Lectures in modern ecology (VI): Global climate change and ecological patterns and processes. Beijing:Higher Education Press,2013:25-46.
- [38] Houghton J T,Ding Y,Griggs D J,et al. Intergovernmental panel on climate change (IPCC): Climate change 2001a: The scientific basis; Contribution of working group I to the third assessment report of the intergovernmental panel on climate change (IPCC) [R]. Cambridge,UK:Cambridge University Press,2001:944.
- [39] Watson T,Zinyowera M C,Moss R H,et al. Intergovernmental panel on climate change (IPCC): Climate

- change 2001b: Impacts, adaptation and vulnerability: A report of Working Group II of the intergovernmental panel on climate change (IPCC) [R]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2001.
- [40] Lean J, Warrilow A D. Simulation of the regional climatic impact of Amazon deforestation [J]. *Nature*, 1989, 342: 411-413.
- [41] Bonan G B. Effects of land use on the climate of the United States [J]. *Climate Change*, 1997, 37: 449-486.
- [42] Liu Y Q. A numerical study on hydrological impacts of forest restoration in the southern United States [J]. *Ecohydrology*, 2010, 4: 299-314.
- [43] Shukla J, Nobre C A, Sellers P J. Amazonia deforestation and climate change [J]. *Science*, 1990, 247: 1322-1325.
- [44] Pielke R A, Pitman A, Niyogi D, et al. Land use/land cover changes and climate: Modeling analysis and observational evidence [J]. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 2011, 2: 828-850.
- [45] Dickinson R E, Durbudge T B, Kennedy P J, et al. Tropical deforestation: Modeling local-to regional-scale climate change [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1993, 98 (D4): 7289-7315.
- [46] Bonan G B. Forests and climate change: Forcings, feedbacks, and the climate benefits of forests [J]. *Science*, 2008, 320: 1444-1449.
- [47] Liu Y Q, Stanturf J, Lu H. Modeling the potential of the Northern China forest shelterbelt in improving hydroclimate conditions [J]. *Journal of the American Water Resources Association*, 2008, 44 (5): 1176-1192.
- [48] Jackson R B, Jobbagey E G, Avissar R, et al. Trading water for carbon with biological carbon sequestration [J]. *Science*, 2005, 310: 1944-1947.
- [49] Pan Y, Birdsey R A, Fang J, et al. A large and persistent carbon sink in the world's forests [J]. *Science*, 2011, 333: 988-993.
- [50] Root T L, Price J T, Hall K R, et al. Fingerprints of global warming on wild animals and plants [J]. *Nature*, 2003, 421: 57-60.
- [51] Parmesan C, Yohe G. A globally coherent fingerprint of climate change impacts across natural systems [J]. *Nature*, 2003, 421: 37-42.
- [52] Chen I C, Hill J K, Ohlemüller R, et al. Rapid range shifts of species associated with high levels of climate warming [J]. *Science*, 2011, 333: 1024-1026.
- [53] Lenoir J, Gégout J C, Marquet P A, et al. A significant upward shift in plant species optimum elevation during the 20<sup>th</sup> century [J]. *Science*, 2008, 32: 1768-1771.
- [54] Crimmins S M, Dobrowski S Z, Greenberg J A, et al. Change in climatic water balance drive downhill shifts in plant species' optimum elevations [J]. *Science*, 2011, 331: 324-327.
- [55] Lenoir J, Gégout J C, Pierrat J C, et al. Different between tree species seedling and adult altitudinal distribution in mountain forests during the recent warm period (1986~2006) [J]. *Ecography*, 2009, 32: 765-777.
- [56] 郝建锋, 金森, 马钦彦, 等. 气候变化对暖温带典型森林生态系统结构、生产力的影响 [J]. *干旱区资源与环境*, 2008, 22(3): 63-69.
- Hao J F, Jin S, Ma Q Y, et al. The influence of climate change on the structure and productivity of the typical forest ecosystem in the warm temperate zone [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2008, 22 (3): 63-69.
- [57] 韩梅, 吉成均, 左闻韵, 等. CO<sub>2</sub> 浓度和温度升高对 11 种植物叶片解剖特征的影响 [J]. *生态学报*, 2006, 26 (2): 326-333.
- Han M, Ji C J, Zuo W Y, et al. Interactive effects of elevated CO<sub>2</sub> and temperature on the leaf anatomical characteristics of eleven species [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(2): 326-333.
- [58] Lin J, Jach M E, Ceulemans R. Stomatal density and needle anatomy of Scots pine (*Pinus sylvestris*) are affected by elevated CO<sub>2</sub> [J]. *New Phytologist*, 2001, 150 (3): 665-674.
- [59] Woodward F I. Potential impacts of global elevated CO<sub>2</sub> concentrations on plants [J]. *Current Opinion in Plant Biology*, 2002, 5(3): 207-211.
- [60] 贺新强, 林月惠, 林金星, 等. 气孔密度与近一个世纪大气 CO<sub>2</sub> 浓度变化的相关性研究 [J]. *科学通报*, 1998, 43 (8): 860-862.
- He X Q, Lin Y H, Lin J X, et al. Relationship between stomatal density and the changes of atmospheric CO<sub>2</sub> concentrations [J]. *Chinese Science Bulletin*, 1998, 43 (8): 860-862.
- [61] 方精云. 中国森林生产力及其对全球气候变化的响应 [J]. *植物生态学报*, 2000, 24(5): 513-517.
- Fang J Y. Forest productivity in China and response to global climate change [J]. *Acta Phytocologica Sinica*, 2000, 24(5): 513-517.
- [62] Aranda X, Agusti C, Joffre R, et al. Photosynthesis, growth and structural characteristics of holm oak resprouts originated from plants grown under elevated CO<sub>2</sub> [J]. *Physiologia Plantarum*, 2006, 128 (2): 302-312.
- [63] 蒋高明, 渠春梅. 北京山区辽东栎林中几种木本植物光合作用对 CO<sub>2</sub> 浓度升高的响应 [J]. *植物生态学报*, 2000, 24(2): 204-208.

- Jiang G M, Qu C M. Photosynthetic response of six woody species to elevated CO<sub>2</sub> in *Quercus Liaotungensis* forest in the Beijing mountainous areas [J]. Acta Phytoecologica Sinica, 2000, 24(2): 204-208.
- [64] 谢会成, 姜志林, 尹建道. 杉木的光合特性及其对 CO<sub>2</sub> 倍增的响应[J]. 西北林学院学报, 2002, 17(2): 1-3.
- Xie H C, Jiang Z L, Yin J D. Photosynthetic characteristics of 13-year-old Chinese fir current shoots and its responses to elevated CO<sub>2</sub> [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2002, 17(2): 1-3.
- [65] 王淼, 代力民, 韩士杰, 等. 高 CO<sub>2</sub> 浓度对长白山阔叶红松林主要树种的影响[J]. 应用生态学报, 2000, 11(5): 675-679.
- Wang M, Dai L M, Han S J, et al. Effect of elevated CO<sub>2</sub> concentration on growth of dominant tree species in pine broadleaf forest of Changbai Mountain [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2000, 11(5): 675-679.
- [66] 王淼, 郝占庆, 姬兰柱, 等. 高 CO<sub>2</sub> 浓度对温带三种针叶树光合光响应特性的影响[J]. 应用生态学报, 2002, 13(6): 646-650.
- Wang M, Hao Z Q, Ji L Z, et al. Effect of elevated atmospheric CO<sub>2</sub> concentration on photosynthesis light response characteristics of three coniferous tree species seedlings [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2002, 13(6): 646-650.
- [67] Ceulemans R, Janssens I A, Jach M E. Effects of CO<sub>2</sub> enrichments on trees and forests: Lessons to be learned in view of future ecosystem studies [J]. Annals of Botany, 1999, 84(5): 577-590.
- [68] Drake B G, Azcon-Bieto J, Berry J, et al. Does elevated atmospheric CO<sub>2</sub> concentration inhibit mitochondrial respiration in green plants [J]. Plant, Cell and Environment, 1999, 22(6): 649-657.
- [69] 徐胜, 陈伟, 何兴元, 等. 高浓度 CO<sub>2</sub> 对树木生理生态影响研究进展 [J]. 生态学报: 优先出版, 2015.
- Xu S, Chen W, He X Y, et al. Research advance in effect of elevated CO<sub>2</sub> on eco-physiology of Trees [J]. Acta Ecologica Sinica, 2015 (in press).
- [70] 彭晓邦, 张硕新. 大气 CO<sub>2</sub> 浓度升高对植物某些生理过程影响的研究进展 [J]. 西北林学院学报, 2006, 21(1): 68-71.
- Peng X B, Zhang S X. Research progress in effects of increased atmospheric CO<sub>2</sub> concentration on certain physiological process of plants [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2006, 21(1): 68-71.
- [71] Chmielewski F M, Rötzer T. Response of tree phenology to climate change across Europe [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2001, 108: 101-112.
- [72] Peñuelas J, Filella I. Responses to a warming world [J]. Science, 2001, 294: 793.
- [73] Schwartz M D, Reiter B E. Changes in North American spring [J]. International Journal of Climatology, 2000, 20(8): 929-932.
- [74] Matsumoto K, Ohta T, Irasawa M, et al. Climate change and extension of the *Ginkgo biloba* L. growing season in Japan [J]. Global Change Biology, 2003, 9(11): 1634-1642.
- [75] Medlyn B E, Duursma R A, Zeppel M J B. Forest productivity under climate change: A checklist for evaluating model studies [J]. Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change, 2011, 2: 332-355.
- [76] 朱建华, 侯振宏, 张治军, 等. 气候变化与森林生态系统: 影响、脆弱性与适应性 [J]. 林业科学, 2007, 43: 138-145.
- Zhu J H, Hou Z H, Zhang Z J, et al. Climate change and forest ecosystem: Impacts, vulnerability and adaptation [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2007, 43: 138-145.
- [77] Kellomäki S, Väisänen H. Modeling the dynamics of the forest ecosystem for climate change studies in the boreal conditions [J]. Ecological Modelling, 1997, 97: 121-140.
- [78] Olsson P. Effects of fertilisation on rhizospheric and heterotrophic soil CO<sub>2</sub> efflux in boreal Norway spruce stands [D]. Licentiate thesis, Swedish University of Agricultural Science, Faculty of Forest Science, Department of Forest Ecology, Umeå. Stencilserie No. 113, 29pp. ISSN 1104-1870, ISRN SLU-SEKOL-STL-113-SE.
- [79] Carter T, Bärlund I, Fronzek S, et al. The FINSKEN global change scenarios [M] // Translated by Käyhkö, J, Talve L. Understanding the Global System, The Finnish Perspective. Painosalama, Turku, Finland, 2002, 232p.
- [80] Melillo J M, McGuire A D, Kicklighter D W, et al. Global climate change and terrestrial net primary production [J]. Nature, 1993, 363: 234-239.
- [81] Lloyd J, Taylor J A. On the temperature dependence of soil respiration [J]. Functional Ecology, 1994, 8: 315-323.
- [82] Jarvis P G, Linder S. Botany-Constraints to growth of boreal forests [J]. Nature, 2000, 405: 904-905.
- [83] Luo Y Q, Wan S Q, Hui D F, et al. Acclimatization of soil respiration to warming in a tall grass prairie [J]. Nature, 2001, 413: 622-625.
- [84] Strömberg M. Soil-surface CO<sub>2</sub> flux and growth in a boreal Norway spruce stands [D]. Doctoral Thesis. Swedish University of Agricultural Sciences. Acta Universitatis Agriculturae Sueciae, Silvestria, 2001, 220,

- [85] Nemani R R, Keeling C D, Hashimoto H, et al. Climate-driven increases in global terrestrial net primary production from 1982 to 1999 [J]. *Science*, 2003, 300:1560.
- [86] 周广胜, 郑元润, 陈四清, 等. 自然植被净第一性生产力模型及应用[J]. *林业科学*, 1998, 5:2-11.  
Zhou G S, Zheng Y Y, Chen S Q, et al. NPP model of natural vegetation and its application in China [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 1998, 5:2-11.
- [87] Su H, Sang W, Wang Y, et al. Simulating *Picea schrenkiana* forest productivity under climatic changes and atmospheric CO<sub>2</sub> increase in Tianshan Mountains, Xinjiang Autonomous Region, China [J]. *Forest Ecology and Management*, 2007, 246:273-284.
- [88] Ren W, Tian H, Tao B, et al. Impacts of tropospheric ozone and climate change on net primary productivity and net carbon exchange of China's forest ecosystems [J]. *Global Ecology and Biogeography*, 2011, 20:391-406.
- [89] Zhao M S, Running S W. Drought-induced reduction in global terrestrial net primary production from 2000 through 2009 [J]. *Science*, 2010, 329:940-943.
- [90] Nabuurs G J, Pussinen A, Karjalainen T, et al. Stemwood volume increment changes in European forests due to climate change - A simulation study with the EFISCEN model [J]. *Global Change Biology*, 2002, 8:304-316.
- [91] Brando P M, Nepstad D C, Davison E A, et al. Drought effects of litterfall, wood production and belowground carbon cycling in an Amazon forest: Results of a throughfall reduction experiment [J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2008, 363:1839-1848.
- [92] 周晓宇, 张称意, 郭广芬. 气候变化对森林土壤有机碳储量影响的研究进展 [J]. *应用生态学报*, 2010, 21:1867-1874.  
Zhou X Y, Zhang C Y, Guo G F. Effects of climate change on forest soil organic carbon storage: A review [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, 21:1867-1874.
- [93] Sotta E D, Veldkamp E, Schwendenmann L, et al. Effects of an induced drought on soil carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) efflux and soil CO<sub>2</sub> production in an Eastern Amazonian rainforest, Brazil [J]. *Global Change Biology*, 2007, 13:2218-2229.
- [94] Jackson R B, Cook C W, Pippen J S, et al. Increased belowground biomass and soil CO<sub>2</sub> fluxes after a decade of carbon dioxide enrichment in a warm-temperate forest [J]. *Ecology*, 2011, 90:3352-3366.
- [95] Bellard C, Bertelsmeier C, Leadley P, et al. Impacts of climate change on the future of biodiversity [J]. *Ecology Letters*, 2012, 15(4):365-377.
- [96] Rafferty N E, Ives A R. Effects of experimental shifts in flowering phenology plant - pollinator interactions [J]. *Ecology Letters*, 2011, 14:69-74.
- [97] Walther G R. Community and ecosystem responses to recent climate change [J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2010, 365:2019-2024.
- [98] Lafferty K D. The ecology of climate change and infectious diseases [J]. *Ecology*, 2009, 90:888-900.
- [99] Klein J A, Harte J, Zhao X Q. An Experimental warming causes large and rapid species loss, dampened by simulated grazing, on the Tibetan Plateau [J]. *Ecology Letters*, 2004, 7:1170-1179.
- [100] 苏宏新, 马克平. 森林植物多样性与生态系统固碳: 减缓和适应气候变化 [R] // 现代生态学讲座 (VI) —— 全球气候变化与生态格局和过程. 北京: 高等教育出版社, 2013:133-154.  
Su H X, Ma K P. Forest plant diversity and ecosystem carbon sequestration: Mitigation and adaptation to climate change [R] // Lectures in Modern Ecology (VI): Global climate change and ecological patterns and processes. Beijing: Higher Education Press, 2013:133-154.
- [101] Tewksbury J J, Huey R B, Deutsch C A. Putting the heat on tropical animals [J]. *Science*, 2008, 320:1296.
- [102] Wilson R J, Thomas C D, Fox R, et al. Spatiol patterns in species distributions reveal biodiversity change [J]. *Nature*, 2004, 432:393-396.
- [103] Kullman L. 20<sup>th</sup> century climate warming and treeline rise in the southern Scandes of Sweden [J]. *Ambio*, 2001, 30:72-80.
- [104] Sturm M, Racine C, Tape K. Increasing shrub abundance in the Arctic [J]. *Nature*, 2001, 411:546-547.
- [105] Backage B, Osborne B, Gavin D G, et al. A rapid upward shift of a forest ecotone during 40 years of warming in the Green Mountains of Vermont [J]. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2008, 105:4197-4202.
- [106] Massot M, Clobert J, Ferriere R. Climate warming, dispersal inhibition and extinction risk [J]. *Global Change Biology*, 2008, 14:461-469.
- [107] Bradley B A, Blumenthal D M, Wilcove D S, et al. Predicting plant invasions in an era of global change [J]. *Trends in Ecology and Evolution*, 2010, 25:310-318.
- [108] Leemans R, Eickhout B. Another reason for concern: Regional and global impacts on ecosystems for differ-

- ent levels of climate change[J]. *Global Environmental Change*, 2004, 14(3): 219-228.
- [109] Reusch T B H, Ehlers A, Hammerli A, et al. An other reason for concern: Regional and global impacts on ecosystems for different levels of climate change[J]. *Global Environmental Change*, 2004, 34(7): 1369-1378.
- [110] Millennium Ecosystem Assessment (MA). *Ecosystems and Human Well-being: Synthesis*[M]. Washington: Island Press, 2005.
- [111] Leadley P, Pereira H M, Alkemade R, et al. *Biodiversity scenarios: Projections of 21st century change in biodiversity and associated ecosystem services*[C]. Secretariat of the Convention on Biological Diversity, Montreal, 2010.
- [112] Easterling D R, Meehl G A, Parmesan C, et al. Climate extremes: Observations, modeling, and impacts[J]. *Science*, 2000, 289: 2068-2074.
- [113] Jackson R B, Carpenter S R, Dahm C N. Water in the changing world[J]. *Ecological Applications*, 2001, 11: 1027-1045.
- [114] Piao S L, Ciais P, Huang Y. The impacts of climate change on water resources and agriculture in China[J]. *Nature*, 2010, 467: 43-51.
- [115] 刘昌明, 刘小莽, 郑红星. 气候变化对水文水资源影响问题的探讨[J]. *科学对社会的影响*, 2008(2): 21-27.  
Liu C M, Liu X M, Zheng H X. Impacts of climate change on water resources[J]. *Impact of Science on Society*, 2008(2): 21-27.
- [116] 周国逸, 刘效东. 森林小流域水文过程对全球气候变化响应的定量化研究[R]//现代生态学讲座(VI)——全球气候变化与生态格局和过程. 北京: 高等教育出版社, 2013: 174-192.  
Zhou G Y, Liu X D. Quantifying the hydrological responses to climate change in an intact forested small watershed in Southern China[R]//Lectures in Modern Ecology (VI): Global Climate Change and Ecological Patterns and Processes. Beijing: Higher Education Press, 2013: 174-192.
- [117] Wei X H, Zhang M F. Quantifying stream flow change caused by forest disturbance at a large spatial scale: A single watershed study[J]. *Water Resource Research*, 2010, 46: w12525.
- [118] Montenegro S, Ragab R. Impacts of possible climate and land use changes in the semi arid regions: A case study from North Eastern Brazil[J]. *Journal of Hydrology*, 2012, 434-435: 55-68.
- [119] 魏晓华, 刘文飞, 周培聪. 定量评价气候和土地利用变化对大流域水文的相对影响: 研究进展[R]//现代生态学讲座(VI)——全球气候变化与生态格局和过程. 北京: 高等教育出版社, 2013: 193-213.  
Wei X H, Liu W F, Zhou P C. Quantifying the relative contribution of climate variability and land use change to watershed hydrology: Recent research advances[R]//Lectures in Modern Ecology (VI): Global Climate Change and Ecological Patterns and Processes. Beijing: Higher Education Press, 2013: 193-213.
- [120] Williams A A, Karoly D J, Tapper N. The sensitivity of Australian fire danger to climate change[J]. *Climatic Change*, 2001, 49: 171-191.
- [121] Nave L E, Vance E D, Swanston C W, et al. Fire effects on temperate forest soil C and N storage[J]. *Ecological Applications*, 2011, 21: 1189-1201.
- [122] Bond W J, Woodward F I, Midgley G F. The global distribution of ecosystems in a world without fire[J]. *New Phytologist*, 2005, 165: 525-538.
- [123] De Bono A, Peduzzi P, Giuliani G, et al. Impacts of Summer 2003 Heat Wave in Europe[M]. Nairobi: Kenya, 2004.
- [124] 谢晨, 赵萱, 王赛, 等. 气候变化对森林和林业的影响及适应性政策选择——基于全球和我国的相关研究进展[J]. *林业经济*, 2010(6): 94-104.  
Xie C, Zhao X, Wang S, et al. Effects of climate change on forests and forestry and adaptation policy options: Based on global and China's related research[J]. *Forestry Economics*, 2010(6): 94-104.
- [125] Sturrock R N, Frankel S J, Brown A V, et al. Climate change and forest diseases[J]. *Plant Pathology*, 2011, 60: 133-149.
- [126] Brendan C, Steven J, Tim J B, et al. Global convergence in the vulnerability of forests to drought[J]. *Nature*, 2012, 491: 751-756.
- [127] Futuyama D J. *Evolutionary Biology*[M]. Sunderland: Sunderland, 1979.
- [128] Winterhalder G. Environmental analysis in human evolution and adaptation research[J]. *Human Ecology*, 1980, 8(2): 135-170.
- [129] Kitano H. Systems biology: A brief overview[J]. *Science*, 2002, 295(5560): 1662-1664.
- [130] 崔胜辉, 李旋旗, 李扬, 等. 全球变化背景下的适应性研究综述[J]. *地理科学进展*, 2011, 30(9): 1088-1098.  
Cui S H, Li X Q, Li Y, et al. Review on adaptation in the perspective of global change[J]. *Progress in Geography*, 2011, 30(9): 1088-1098.
- [131] Valladares F, Sanchez D, Zavala M. Quantitative estimation of phenotypic plasticity: Bridging the gap between the evolutionary concept and its ecological applications[J]. *Journal of Ecology*, 2006, 94: 1103-

- [132] 蒋桂娟,郑小贤. 森林生态系统适应性经营研究[J]. 林业调查规划,2011,36(6):52-56.  
Jiang G J, Zheng X X. Adaptability management of forest eco-system[J]. Forest Inventory and Planning, 2011,36(6):52-56.
- [133] Benioff R,Guill S,Lee J. Vulnerability and Adaptation Assessments. An International Handbook[M]. Norwell, Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 1996.
- [134] Chapin F S,Zavaleta E S,Evimer V T, et al. Consequences of changing biodiversity[J]. Nature, 2000, 405:234-242.
- [135] Thomas C D,Cameron A,Green R E, et al. Extinction risk from climate change[J]. Nature,2004,427:145-148.
- [136] Bradshaw W E, Holzapfel C M. Genetic response to rapid climate change: It's seasonal timing that matters [J]. Molecular Ecology,2008,17(1):157-166.
- [137] Gienapp P,Teplitsky C,Alho J S, et al. Climate change and evolution: Disentangling environmental and genetic responses[J]. Molecular Ecology, 2008, 17(1): 167-178.
- [138] Truong C,Palme A E, Felber F. Recent invasion of the mountain birch *Betula pubescens* ssp. *tortuosa* above the treeline due to climate change: Genetic and ecological study in northern Sweden[J]. Journal of Evolutionary Biology,2007,20(1):369-380.
- [139] Parmesan C. Ecological and evolutionary responses to recent climate change[J]. Annual Review of Ecology, Evolution and Systematics,2006,37:637-669.
- [140] Valladares F. 森林应对气候变化能力的机械论观点[M]//王小平,杨晓晖,刘晶岚,等译. 气候变化挑战下的森林生态系统经营管理. 北京:高等教育出版社, 2013:15-40.  
Valladares F. A mechanical view of forest response to climate change[M]//Translated by Wang X P, Yang X H, Liu J L, et al. Management Forest Ecosystems: The Challenge of Climate Change. Beijing: Higher Education Press,2013:15-40.
- [141] Bellard C, Bertelsmeier C, Leadley, et al. Impacts of climate change on the future of biodiversity[J]. Ecology Letters,2012,15(4):365-377.
- [142] Sang W, Bai F. Vascular diversity patterns of forest ecosystem before and after a 43-year interval under changing climate condition in the Changbaishan Nature Reserve, northeastern China[J]. Plant Ecology, 2009,201:115-130.
- [143] Yang L H, Rudolf V H W. Phenology, ontogeny and the effects of climate change on the timing of species interactions[J]. Ecology Letters,2010,13:1-10.
- [144] 牛书丽,万师强,马克平. 陆地生态系统及生物多样性对气候变化的适应与减缓[J]. 中国科学院院刊, 2009,24:421-427.  
Niu S L, Wan S Q, Ma K P. Acclimation and mitigation of terrestrial ecosystem and biodiversity to climate change[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences,2009,24:421-427.
- [145] Hannah L, Midgley G, Anelman S, et al. Protected area needs in a changing climate[J]. Frontiers in Ecology and the Environment,2007,5(3):131-138.
- [146] Williams P, Hannah L, Anelman S, et al. Planning for climate change: Identifying minimum-dispersal corridor for the *Cape Proteaceae* [J]. Conservation Biology,2005,19(4):1063-1074.
- [147] Hannah L, Midgley G F, Millar D. Climate change-integrated conservation strategies[J]. Global Ecology & Biogeography,2002,11(6):485-495
- [148] Hannah L, Midgley G F, Hughes G, et al. The view from the cape: Extinction risk, protected areas and climate change[J]. Bioscience,2005,55:231-42.
- [149] Hulme P E. Adapting to climate change: Is there scope for ecological management in the face of a global threat? [J]. Journal of Applied Ecology,2005,42: 784-794.
- [150] Bardsley D K, Edwards-Jones G. Invasive species policy and climate change: Social perceptions of environmental change in the Mediterranean[J]. Environmental Science & Policy,2007,10:230-242.
- [151] FAO. Global forest resources assessment 2000 in global forest resources assessment 2000 main report[R]. FAO Forestry Paper,2001.
- [152] Brove F, Bravo-Oviedo A, Diaz-Balteiro L. Carbon sequestration in Spanish Mediterranean forests under two management alternatives: A modeling approach [J]. European Journal of Forest Research, 2008, 127(3):225-234.
- [153] Kaipainen T, Liski J, Pussinen A, et al. Managing carbon sinks by changing rotation length in European forests[J]. Environmental Science and Policy,2004,7: 205-219.
- [154] Moreno F H, Oberbauer S F. 哥伦比亚热带原始和次生林的土壤碳动态[M]//王小平,杨晓晖,刘晶岚,等译. 气候变化挑战下的森林生态系统经营管理. 北京:高等教育出版社,2013:266-279.  
Moreno F H, Oberbauer S F. Soil carbon dynamics in primary and secondary tropical Forests in Colombia [M]//Translated by Wang X P, Yang X H, Liu J L,



- et al. Management Forest Ecosystems; The Challenge of Climate Change. Beijing: Higher Education Press, 2013, 266-279.
- [155] Williams D W, Liebhold A M. Climate change and the outbreak range of two North American bark beetles [J]. Agricultural and Forest Entomology, 2002, 4: 87-99.
- [156] 魏晓华, 孙阁. 流域生态系统过程与管理[M]. 北京: 高等教育出版社, 2009.  
Wei X H, Sun G. Watershed Ecosystem Processes and Management [M]. Beijing: Higher Education Press, 2009.
- [157] Hannah L, Midgley G F, Lovejoy T, et al. Conservation of biodiversity in a changing climate[J]. Conservation Biology, 2002, 16(1): 264-268.
- [158] 徐明, 马超德. 长江流域气候变化脆弱性与适应性研究[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2009.  
Xu M, Ma C D. Study on Vulnerability and Adaptation to Climate Change in the Yangtze River Basin [M]. Beijing: China Water Power Press, 2009.
- [159] WMO 2008 年温室气体公报. 主要温室气体达到自工业革命时期以来的最高值 [EB/OL]. [2011-5-7]. www.wmo.int/gaw/.  
World Meteorological Organization (WMO) Greenhouse Gas Bulletin in 2008. The main greenhouse gas reached the highest value since the industrial revolution period [EB/OL]. [2011-5-7]. http://www.wmo.int/gaw/.
- [160] Savolainen O, Bokma F, Garcia-Gil R, et al. Genetic variation in cessation of growth and forest hardiness and consequences for adaptation of *Pinus sylvestris* to climate changes [J]. Forest Ecology and Management, 2004, 197: 79-89.
- [161] Franks S J, Sim S, Weis A E. Rapid evolution of flowering time by an annual plant in response to a climate fluctuation [J]. Proceedings of the National Academy of Science USA, 2007, 104: 1278-1282.
- [162] Nabuurs G J, Masera O, Andrasko K, et al. Forests impacts, adaptation and vulnerability. Contribution of Working Group III to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change [R]// Translated by Parry M L, Canziani O F, Palutikof J P, et al. Climate change, 2007. Cambridge: Cambridge University Press, pp. 1-73.

(责任编辑: 尹 闯)