

专题论述

全球气候变化及森林生态系统的适应性管理*

叶功富^{1,2} 尤龙辉¹ 卢昌义² 林武星¹ 罗美娟¹ 谭芳林¹

(1 福建省林业科学研究院,福州 350012; 2 厦门大学环境与生态学院,福建厦门 361005)

摘要: 人类活动所引起的温室效应及由此造成的全球气候变化对全球生态环境的影响正越来越引起人们的关注。森林作为全球陆地生态系统的一个重要组分,对全球气候变化的响应较为敏感。文中系统总结了全球气候变化对物种和森林类型分布、森林生态系统结构和物种组成、森林生产力、森林土壤碳氮循环和森林灾害等几个方面的影响,以及森林生态系统管理面临的挑战,在此基础上提出了适应未来气候变化的森林生态系统管理策略。

关键词: 森林生态系统, 适应性管理, 气候变化, 挑战

中图分类号: S718.5

文献标识码: A

文章编号: 1001-4241(2015)01-0001-06

DOI: 10.13348/j.cnki.sjlyyj.2015.0002.y

Global Climate Change and Adaptive Management of Forest Ecosystem

Ye Gongfu^{1,2} You Longhui¹ Lu Changyi² Lin Wuxing¹ Luo Meijuan¹ Tan Fanglin¹

(1 Fujian Provincial Academy of Forestry Science, Fuzhou 350012, China;

2 School of Environment & Ecology, Xiamen University, Xiamen 361005, Fujian, China)

Abstract: Human-induced greenhouse effects and their impacts on global climate change and eco-environments, especially the responses of forests to global climate change, have increasingly aroused the concerns worldwide. The forest, as an important component of global terrestrial ecosystem, is more sensitive to the response of global climate change. This paper systematically summarized the existing impact of global climate change on the distribution of species and forest types, forest ecosystem structure and species composition, forest productivity, forest soil carbon and nitrogen cycle and forest disasters, and concluded the challenges which the forest ecosystem management is facing. Based on the review, the forest ecosystems management strategies adaptable to the future climate change were proposed.

Key words: forest ecosystem, adaptive management, climate change

从工业革命至今,化石燃料的大量开采和使用造成大气中“温室气体”剧增,改变了地球原有的大气组分和生物化学循环,产生了以气候变暖为主要特征的气候变化^[1]。2013年9月27日联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)公布了最新的气候变化研究结果:1880—2012年全球海陆表面平均温

度升高了0.85℃,呈线性上升趋势;1901—2010年冰川融化和海水温度升高引发的热膨胀导致海平面上升,使全球平均海平面上升了0.19m,平均每年上升1.7mm;2011年大气中CO₂浓度达到11.505μmol/L,比工业化前增加了40%,CH₄和N₂O浓度分别达到145.890nmol/L和9.533nmol/L,分别比

* 收稿日期:2014-05-04;修回日期:2014-08-25

基金项目:国家自然科学基金项目海陆交界带的土地利用变化对典型植被碳吸收影响的宏微观尺度研究(41176092);“十一五”国家科技支撑项目南亚热带防风防护林体系研究与示范(2009BADB2B0302);国家林业局南方山地用材林培育重点实验室、福建省森林培育与林产品加工利用重点实验室资助项目

作者简介:叶功富(1966-),男,福建省林科院教授级高工,厦门大学兼职教授,研究方向为沿海防护林生态管理,E-mail: yegongfu@126.com

通信作者:尤龙辉(1987-),男,福建泉州人,助理工程师,主要从事沿海防护林生态恢复研究,E-mail: m378384996@126.com

工业化前提高了 150% 和 20%^[2-3]。

研究气候变化与全球各个生态系统相互间的反馈影响机理,是关乎人类生存的重大科研课题^[4]。森林生态系统是陆地生态系统的主体,它不仅为陆地生物提供生命支持,还是“温室气体”中 CO₂ 最重要的“汇”,对减缓全球气候变化及维护陆地生态系统的生存和可持续发展意义重大。本文总结分析前人关于气候变化对森林生态系统影响的研究进展,提出对森林生态系统应采取的适应性管理对策,以期为保护生态环境和生物多样性、实现林业和森林资源的可持续发展提供参考。

1 全球气候变化对森林生态系统的影响

全球 30% 的陆地为森林所覆盖^[1]。由于森林对气候变化的适应性比较迟缓^[1],因而可能是最易受到气候变化不利影响的生态系统。气候变化对森林的影响主要表现在对物种和森林类型分布、森林生态系统结构和物种组成、森林生产力、森林土壤碳氮循环和森林灾害等方面。

1.1 对全球森林类型分布格局的影响

气温和降水量是反映各地区气候差异的基本气候要素,各地区的气候差异将决定森林类型的分布格局。以气候变暖为主要特征的气候变化将对森林类型的分布格局产生重大影响^[5-6]。目前研究气候变化对森林分布格局的影响,主要是通过构建数学模型来实现^[7],包括森林生长演替模拟研究^[8]和植被—气候分类研究 2 种^[9]。模型预测结果表明,未来由气候变化引发的气候带迁移,将使全球各森林类型分布范围发生位移。Smith 等^[10]利用 Holdridge 模型预测未来植被分布状况表明,北方寒带、寒温带、温带、暖温带、亚热带及热带地区森林类型将发生位移,其中,热带及寒温带森林面积趋于增加,其他类型将减少。李峰等^[11]研究表明,至 2020 年,我国兴安落叶松林的适宜分布区将减少 58.1%,2050 年将减少 99.7%,2100 年将从我国灭迹。冷文芳等^[12]研究也表明,未来气候若趋向“暖干化”(即气温升高 5℃,降水减少 30%),华北落叶松林将向东北方扩展约 800 km,长白落叶松将向西北扩展约 100 km,而兴安落叶松将向西北方退缩约 100 km;若趋向“暖湿化”(即气温升高 5℃,降水增加 30%),华北落叶松林将向东北扩展约 320 km,长白落叶松将向西北扩展约 550 km,而兴安落叶松将向西北

方退缩约 400 km。因此,气候变化将对森林类型分布格局产生深远影响。

1.2 对森林生态系统物种组成和结构的影响

生物多样性是森林生态系统的基本属性之一。系统中每个物种的生存都依赖于适宜的温度、水分、节候、日照和光强等气候要素,而不同物种对气候变化的响应不同^[13]。其中,能够适应气候变化的物种被保存下来,不能适应的物种则会被淘汰,被有较强适应能力的新物种入驻替代,直至形成能够适应当地气候变化的新的森林生态系统^[14]。于海英等^[15]研究总结了近 40 年来我国青藏高原植被对气候变化的响应情况,结果表明高原植物群落的物种组成、结构和生态功能均随气温和降水量的增加发生显著变化。其中,气候变化所引发的冰川退缩和冻土消融等使高原植被退化,荒漠化加剧,进一步使高原生态环境恶化。气候变化对森林物种组成和结构的影响,很大原因是由气候变暖导致植物物候改变所致,进而影响群落内物种间的竞争依赖关系^[13]。郑景云等^[16]研究表明,近 40 年来我国木本植物春季物候期有逐渐提前的趋势。另外,气候变化影响植物的生理生态特性(包括植物的抗逆性、繁殖力、迁移能力和生产力等)也会改变森林物种的组成和结构^[17-19]。因此,森林生态系统结构越简单,种类越单调(包括对外界环境变化较敏感的生态脆弱区),其受气候变化影响将越大。

1.3 对森林生产力的影响

森林生产力是森林与环境之间本质联系的重要标志,是森林生态系统植物群落结构与功能的综合体现;因此,全球森林生产力格局的变化能够反映气候变化的影响程度^[20]。刘世荣等^[21]利用 7 个 GC-Ms 大气环流模型预测 2030 年中国气候变化情景,并结合构建的气候—森林生产力模型,模拟未来气候情境下中国森林第一性生产力的地理分布格局。结果显示,森林第一性生产力从东南向西北虽与当前的下降趋势一致,但其生产力变化率呈现上升的趋势,最大上升幅度可达 10%。根据森林生产力变化率的地理格局结合我国主要造林树种的地理分布现状可以预测,中国主要造林树种马尾松和杉木生产力增益最小,为 1%~2%;油松较高,为 2%~6%,局部地区可达 8%~10%;红松增益则达到 6%~8%;兴安落叶松增益最高,达到 8%~10%。但也有研究表明,气候变化将对森林生产力产生负面

影响,这是因为:1) 受高温和高 CO_2 浓度胁迫,植物叶片和冠层间的气孔传导率会显著下降,植物生长受到抑制^[22-24];2) 温室效应使夜晚气温增幅高于白天,植物的暗呼吸作用抵消了白天森林第一性生产力所累积的有机物质^[25-26];3) 温室效应使植株的蒸腾作用加快,土壤蒸发量上升,当土壤水分含量低于植株所需最低阈值时,植株受水分胁迫引发“生理干旱”,从而影响植物的光合作用及其生长过程^[27];4) 温室效应使土壤温度上升,虽在短时期内刺激了土壤微生物的生长与活性,使土壤有机质矿化速率增加,但随着土壤碳浓度的不断增加,土壤碳氮比上升,抑制了土壤微生物的呼吸,森林凋落物的分解速率变缓,养分得不到及时归还,影响植物的正常生长^[28-31]。因此,要准确评估气候变暖及 CO_2 浓度升高对森林生产力及生物量的影响,还需全面考虑其他的可能影响因素,进行长期的人工气候室盆栽控制实验和野外监测实验。

1.4 对森林土壤碳氮循环过程的影响

影响森林土壤的碳氮循环过程主要有内因和外因 2 个方面。内因主要源于各森林生态系统本身物质循环和能量流动的差异^[32],外因则与影响森林生态系统的外界气候环境息息相关^[33]。近年来,以温室效应为主要特征的气候变化对森林土壤的碳氮循环产生剧烈影响,主要表现在对土壤 C 库和 N 库、土壤 CO_2 、 CH_4 和 N_2O 排放等方面^[34]。

参与森林土壤碳氮循环过程的对象主要是森林植被和土壤动物及微生物,外界气候因子则对这个过程起催化或抑制的作用。有研究表明,森林土壤每年向大气释放约 71.5 Pg 的碳和氮氧化物,但是随着气温的上升和降雨量的增加,将提高森林土壤碳氮的排放量。主要原因是:首先,气温上升和降雨量增加可能提高森林生产力,使森林的物质周转速率相应加快,凋落物量增加;其次,气温上升和降雨量增加将改变土壤动物和微生物的活跃程度,使凋落物分解速率、土壤呼吸作用和土壤有机物矿质化速率加快^[35-37],增加森林土壤的碳氮排放量。另外, CH_4 也是温室气体的主要成分之一。地球表面每年向大气释放 CH_4 约 5.15 亿 t,其中 12% 来自水稻田。随着人口剧增,为了解决粮食安全问题,水稻种植面积不降反升,气候变暖又为水稻扩种创造了有利条件^[38]。因此,控制水稻种植面积将成为减缓气候变暖的有效措施之一。

1.5 对森林自然灾害的影响

当前以温室效应为主要特征的气候变化对森林自然灾害发生频率、程度、种类的影响范围越来越大^[39-41],主要包括森林火灾、森林病虫鼠害及极端气候事件对森林资源的破坏等方面^[42]。其中,造成森林火险指数上升的原因主要是:1) 夏季高温干旱天气发生的频率增加和持续时间延长;2) 气候变化或极端气候事件使森林生态系统内某些耐受性较差的植物物种枯枝断梢或死亡,林地地表可燃物载量大大增加^[43]。造成森林病虫鼠害发生的种类、分布范围和危害程度增加的原因主要是:1) 气候变化改变了原有森林病虫鼠害的分布区域。随着气温的上升和暖冬的频繁出现,不仅使森林植物的物候提前,枯黄期推迟,而且使森林有害生物的越冬存活率上升、活跃期增加、种群繁殖能力提高,这些都为森林病虫鼠害的暴发创造了有利条件。2) 极端灾害天气频发,使森林植被长势衰弱,抗逆性降低,生态系统抵御病虫鼠害的能力下降^[44-45]。极端气候事件对森林资源的破坏主要是由于其发生频率的增加所致。极端气候事件包括高温干旱、持续强降雨、台风、风暴、冰霜冻害、暴雪和沙尘暴等,这些将对我国森林资源造成严重威胁^[46]。例如 2008 年 1 月袭击我国南方 19 个省(区、市)的冰雪灾害和 10 月份波及我国 15 个省区的高温干旱灾害,致使我国森林受损面积达到 2 520 万 hm^2 。

2 全球气候变化对森林生态系统管理的挑战

许多研究者认为,通过对森林生态系统的气候变化适应性管理,能够有效减缓气候变化对全球生态环境的负面影响^[47-48]。森林生态系统的适应性管理是指以气候变化情境下维护森林生态系统的健康和活力、保护生态系统生物多样性、防止森林景观破碎化为目标,研究气候变化对树木生理生态特性、物种的分布和迁移、森林生态系统的结构和功能等的影响机理,构建气候—森林植被响应模型,规划和制定森林经营管理方案,配套相应政策法规,以应对或减缓气候变化的森林经营管理模式^[49-50]。但目前由于对森林与气候之间反馈影响机理的研究尚未深入详尽,使森林生态系统的适应性管理还面临诸多挑战。

2.1 对生态系统中各物种间的竞争机制研究不深入

物种间的竞争是森林生态系统重要的生态过程。但是,现有的气候变化预测模型往往忽略物种

间的内在竞争机制,主观认为只要某地不存在限制条件,该树种就可以在该地分布,其结果必定是难以真实模拟预测未来树木和森林类型的分布状况。

2.2 忽略了森林响应气候变化后对气候的反馈作用

森林生态系统与其他生态系统一样,是一个开放的系统,必须不断地与外界环境进行物质和能量交流,才能避免系统崩解。气候和森林之间存在紧密的物质和能量交换活动,彼此相互影响、相互制约,处于动态平衡的关系。但是,现有的气候变化预测模型为了简化计算,并没有考虑森林与气候间相互作用的复杂关系。

2.3 对物种迁移的评估不足

现有模型预测认为,气候变化能立即导致物种迁移和森林类型发生位移。但是,这忽略了其他非气候限制因素的影响。首先,森林生态系统中不同物种应对气候变化的耐性、迁移能力和迁移速率各异;其次,森林景观破碎化、地形地貌、土壤、水文等环境因素会限制物种的迁移范围;再次,假设物种顺利完成迁移,但迁移后与其他物种之间相互作用(包括互惠、种子扩散、授粉、竞争、捕食、疾病等)的改变,会导致物种的适应能力发生变化。

2.4 忽略了极端气候事件的影响

当前的气候变化预测模型主要是基于长时间尺度展开的研究(一般以年作为基本单位),而持续时间较短的极端气候事件往往被忽略。相较于其他因素,极端气候事件对森林生态系统和人类生存环境的危害更为严重。极端气候事件往往会在短时间内直接改变森林原有的景观格局,使森林生态系统进行偏途演替或退化,降低森林生态系统的生态功能。

3 应对气候变化的森林生态系统适应性管理

应对气候变化的森林生态系统适应性管理,关键是掌握气候变化对树木生理生态特性、物种的分布和迁移、森林生态系统的结构和功能等的影响机理,构建科学合理的气候—森林植被响应模型。鉴于此,提出如下森林生态系统的适应性管理对策。

3.1 加强森林生态系统各层次水平应对气候变化的基础研究

深入开展气候变化对各典型森林植被类型区优势树种生理生态特性影响的研究,模拟研究暖干化或暖湿化气候条件下各典型生态过渡带主要树种生理生态特性变化规律,掌握珍稀濒危树种的遗传变

异规律、生理生态特性、致濒机制及对气候变化的响应机制。

加强各植被类型区典型森林群落不同时空尺度上生物多样性及其物质循环和能量流动应对气候变化的基础研究,并对其进行尺度推绎,探索其结构和功能变化对物种或森林景观等不同层次的影响规律。同时,还要研究探索极端气候事件对典型森林群落属性的影响机制。

构建完善的全球森林生态系统定位研究网络,特别是要加强具有指示意义的森林边缘带、森林过渡带和特殊生态系统(如农林牧交错带、湿地森林、极端气候区域森林植被等)定位研究站点的建设;加强定位研究网络内各植被类型森林生态系统碳氮循环对气候变化反馈响应机制的研究,为减缓气候变化的森林生态系统适应性管理提供理论依据。

加强森林景观生态过程和生态格局演变等对气候变化响应的研究,揭示森林物种的迁移机制,为景观生态适宜性评价、景观生态安全格局的构建、森林分布变迁缓冲区及物种迁移通道和自然保护区的建设和管理等提供理论依据,维持森林景观的完整性和连续性,增强景观内物种的迁移扩散和基因交流能力,维护森林生态系统的生物多样性和可持续发展。

3.2 制定适应气候变化的林业政策和营林措施

首先,要在生态敏感区实施退耕还林,增加森林面积。选择抗逆性强的乡土树种或耐干瘠、抗病虫害和生产力高的造林树种,封造人工林,提高森林覆盖率;营造多树种混交异龄复层林,优化人工林结构,提高人工林应对气候变化的能力。其次,加强天然林的保护力度。增加自然保护区和国家公园的面积和数量;维护和建立各典型森林群落间的生物廊道,以保证物种的迁移和基因交流;维持和恢复天然林景观生态过程及格局的连续性和完整性,确保其生物多样性和生态系统的稳定性。再者,制定科学合理的森林经营对策。加大商品林及生态公益林的经营管理力度,特别是生态公益林,应辅以适当的经营手段(如可适当发展林下经济等),以提高林农营林护林的积极性;制订适应气候变化的轮伐、间伐制度方案,控制合理的林分密度。除此之外,还应大力发展碳汇造林项目。封造森林生产力较高的碳汇林,加强抚育管理,提高其固碳能力;深入开展各碳汇林类型的植被承载力理论研究,为发挥碳汇林最大的碳汇能力和增加碳汇量提供经营对策依据。

3.3 加强森林土壤固碳机理研究

研究表明, 森林土壤碳汇潜力巨大, 但不同森林类型的土壤碳汇能力各异。因此, 必须加强各典型森林类型土壤碳汇的机理研究, 通过造林树种的选择, 大力营造土壤碳汇能力强的人工林, 对减缓全球气候变暖具有积极的意义。对人工林土壤碳汇机理的研究主要有以下几方面: 1) 加强不同人工林类型土壤矿物特性吸附有机碳机理的研究; 2) 加强不同人工林类型深层土壤有机碳转移封存机制的研究; 3) 加强不同人工林类型合成耐分解有机物质种类和数量及其对土壤碳储量格局影响的研究; 4) 加强不同人工林类型土壤团聚体结构及其对碳的物理性保护的研究; 5) 加强营林措施对人工林土壤碳汇功能影响的研究, 因为土壤翻耕、人工林轮伐收获及树种改造、凋落物管理等均会对人工林土壤有机碳储量及其物理化学特性产生显著影响。

3.4 增加基础设施投资 构建综合监测平台

积极整合现有林业监测平台, 建立完善的森林资源与生态状况综合监测体系。利用全球环境监测系统、森林资源监测体系、林业重点工程社会效益监测系统、林业碳汇计量监测体系和自然保护区与国家公园生物多样性监测系统等多个监测平台, 开展森林植被与气候变化的动态监测, 为气候—森林植被响应宏观模型的构建及制定森林适应气候变化的经营措施和制度政策等提供全面详实的基础数据信息。此外, 还应加强林业基础设施建设。例如, 加强现有森林病虫害及火灾监测系统的预警能力; 加密建设森林火灾及病虫害监测站, 配备现代化监测预警设备(如可视化监测通讯网络、瞭望塔等); 加强对树木健康的检验检疫, 推行生物防治和生态林业, 提高森林的生态功能。

参 考 文 献

- [1] 周广胜, 王玉辉. 全球生态学[M]. 北京: 气象出版社, 2003: 78, 82-153.
- [2] Blunden J, Arndt D S. State of the climate in 2011[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2012, 93(7): S1-S282.
- [3] Bernstein L, Bosch P, Canziani O, et al. Climate change: synthesis report[R]// Fourth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2007: 1-20.
- [4] 郑新奇, 姚慧, 王筱明, 等. 20世纪90年代以来《Science》关于全球气候变化研究述评[J]. 生态环境, 2005, 14(3): 422-428.
- [5] Bell G, Collins S. Adaptation, extinction and global change [J]. Evolutionary Applications, 2008, 1(1): 3-16.
- [6] Visser M E. Keeping up with a warming world: assessing the rate of adaptation to climate change[J]. Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences, 2008, 275(1635): 649-659.
- [7] Dyer J M. Assessment of climate warming using a model of forest species migration [J]. Ecological Modelling, 1995, 79(1/2/3): 199-219.
- [8] 程肖侠, 延晓冬. 气候变化对中国大兴安岭森林演替动态的影响[J]. 生态学杂志, 2007, 26(8): 1277-1284.
- [9] 赵茂盛, Ronald P N, 延晓冬, 等. 气候变化对中国植被可能影响的模拟[J]. 地理学报, 2002, 57(1): 28-38.
- [10] Smith T M, Halpin P N, Shugart H H, et al. Global forest [M]// Strzepek K M, Smith J B. As climate change: international impacts and implications. Cambridge: Cambridge University Press, 1995: 59-78.
- [11] 李峰, 周广胜, 曹铭昌. 兴安落叶松地理分布对气候变化响应的模拟[J]. 应用生态学报, 2006, 17(12): 2255-2260.
- [12] 冷文芳, 贺红土, 布仁仓, 等. 中国东北落叶松属3种植物潜在分布对气候变化的敏感性分析[J]. 植物生态学报, 2007, 31(5): 825-833.
- [13] Neilson R P. Vegetation redistribution: a possible biosphere source of CO₂ during climate change[J]. Water, Air and Soil Pollution, 1993, 70(4): 659-673.
- [14] 吴建国, 吕佳佳, 艾丽. 气候变化对生物多样性的影响: 脆弱性和适应[J]. 生态环境学报, 2009, 18(2): 693-703.
- [15] 于海英, 许建初. 气候变化对青藏高原植被影响研究综述[J]. 生态学杂志, 2009, 28(4): 747-754.
- [16] 郑景云, 葛全胜. 近40年中国植物物候对气候变化的响应研究[J]. 中国农业气象, 2003, 24(3): 28-32.
- [17] 徐胜, 何兴元, 陈玮, 等. 高浓度O₃对树木生理生态的影响[J]. 生态学报, 2009, 29(1): 368-377.
- [18] 李明财, 罗天祥, 朱教君, 等. 高山林线形成机理及植物相关生理生态学特性研究进展[J]. 生态学报, 2008, 28(11): 5583-5591.
- [19] 陈力. 气候变化对中国中温带针阔混交林优势树种生长影响研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2011.
- [20] 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.
- [21] 刘世荣, 郭泉水, 王兵, 等. 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(5): 478-483.
- [22] Kimball B A, Mauney J R, Nakayama F S, et al. Effects of increasing atmospheric CO₂ on vegetation [J]. Vegetatio, 1993, 104/105(1): 65-75.
- [23] Morison J I L, Gifford R M. Plant growth and water use with limited water supply in high CO₂ concentrations: I. leaf area, water use and transpiration [J]. Australian Journal of Plant Physiology, 1984, 11(4): 361-374.
- [24] Surano K A, Daley P F, Houppis J L J, et al. Growth and physiological responses of *Pinus ponderosa* Dougl ex P. Laws to long-term

- elevated CO₂ concentrations [J]. *Tree Physiology*, 1986, 2(1/2/3): 243 - 259.
- [25] Kramer P T, Kozlowski T T. 木本植物生理学[M]. 汪振儒, 译. 北京: 中国林业出版社, 1985.
- [26] 汤章城. 植物干旱生理生态研究[J]. *生态学报*, 1983, 3(3): 196 - 204.
- [27] Wisley B J. Plant responses to elevated atmospheric CO₂ among terrestrial biomes[J]. *Oikos*, 1996, 76(1): 201 - 206.
- [28] Diaz S, Grime J P, Harris J, et al. Evidence of feedback mechanism limiting plant response to elevated carbon dioxide[J]. *Nature*, 1993, 364: 616 - 617.
- [29] Norby R J, Pastor J, Melillo J M. Carbon - nitrogen interactions in CO₂ - enriched white oak: physiological and long - term perspectives[J]. *Tree Physiology*, 1986, 2(1/2/3): 233 - 241.
- [30] Rogers H H, Runion G B. Plant responses to atmospheric CO₂ enrichment with emphasis on roots and the rhizosphere [J]. *Environmental Pollution*, 1994, 83(1/2): 155 - 189.
- [31] Egli P, Korner C. Growth responses to elevated CO₂ and soil quality in beech - spruce model ecosystems [J]. *Acta Oecologica*, 1997, 18(3): 343 - 349.
- [32] 路翔, 项文化, 刘聪, 等. 中亚热带4种森林类型土壤有机碳氮贮量及分布特征[J]. *水土保持学报*, 2012, 26(3): 169 - 173.
- [33] 吴建国, 吕佳佳. 土壤有机碳和氮分解对温度变化的响应机制[J]. *生态学杂志*, 2008, 27(9): 1601 - 1611.
- [34] 荣兴民, 陈玉成, 王开运, 等. 森林土壤碳氮过程研究现状和展望[J]. *内蒙古林业科技*, 2004(1): 30 - 35.
- [35] 肖兴威. 中国森林生物量与生产力的研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2005.
- [36] 徐振锋, 尹华军, 赵春章, 等. 陆地生态系统凋落物分解对全球气候变暖的响应[J]. *植物生态学报*, 2009, 33(6): 1208 - 1219.
- [37] 冯瑞芳, 杨万勤, 张健, 等. 森林土壤有机层生化特性及其对气候变化的响应研究进展[J]. *应用与环境生物学报*, 2006, 12(5): 734 - 739.
- [38] 李祎君, 王春乙. 气候变化对我国农作物种植结构的影响[J]. *气候变化研究进展*, 2010, 6(2): 123 - 129.
- [39] van Aalst M K. The impacts of climate change on the risk of natural disasters[J]. *Disasters* 2006, 30(1): 5 - 18.
- [40] Emanuel K. Increasing destructiveness of tropical cyclones over the past 30 years[J]. *Nature* 2005 436: 686 - 688.
- [41] 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[J]. *林业经济*, 2010(6): 94 - 104.
- [42] 丁文广, 肖俊豪, 汪霞, 等. 气候变化对我国森林自然灾害的影响[J]. *西北林学院学报*, 2010, 25(5): 117 - 120.
- [43] 魏书精, 胡海清, 孙龙. 气候变化对我国林火发生规律的影响[J]. *森林防火*, 2011(1): 30 - 34.
- [44] 赵铁良, 耿海东, 张旭东, 等. 气温变化对我国森林病虫害的影响[J]. *中国森林病虫*, 2003, 22(3): 29 - 32.
- [45] 马生玉, 时兴合, 杨英莲. 河湟谷地气候变化对高原鼠害的影响[J]. *青海科技*, 2009(1): 35 - 39.
- [46] 陈新云, 刘承芳, 程志楚. 我国森林灾害及影响分析研究[J]. *河北林业科技*, 2010(2): 41 - 42.
- [47] 王邵军, 阮宏华. 全球变化背景下森林生态系统碳循环及其管理[J]. *南京林业大学学报: 自然科学版*, 2011, 35(2): 113 - 116.
- [48] 鲜骏仁. 川西亚高山森林生态系统管理研究: 以王朗国家级自然保护区为例[D]. 四川雅安: 四川农业大学, 2007.
- [49] 赵士洞, 旺业勤. 生态系统管理的基本问题[J]. *生态学杂志*, 1997, 16(4): 35 - 38.
- [50] 汪思龙, 赵士洞. 生态系统途径: 生态系统管理的一种新理念[J]. *应用生态学报*, 2004, 15(12): 2364 - 2368.