

Review of English Literatures on Climate Change and Forests

Fengmin Li¹, Guoming Du^{1*}, Wei Zhou²

¹School of Humanities and Law, South China Agricultural University, Guangzhou Guangdong

²College of Economics & Management, South China Agricultural University, Guangzhou Guangdong

Email: ^{*}d_g_m@scau.edu.cn

Received: Sep. 25th, 2016; accepted: Oct. 9th, 2016; published: Oct. 12th, 2016

Copyright © 2016 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

By collecting 1743 English papers in the last 20 years, the paper sorts out the international research progress of influence on global climate change and forest ecosystems from literature overview, purpose, research methods, research findings and other aspects of literatures. Based on several perspectives of forests, forest management and forest carbon sequestration, the paper studies research points, different research ideas and methods and differences research findings. Ultimately, the future research directions on English literatures on climate change and forests are proposed according to the study.

Keywords

Climate Change, Forest, English Papers

气候变化对森林生态系统影响英文文献综述

李凤敏¹, 杜国明^{1*}, 周伟²

¹华南农业大学人文与法学院, 广东 广州

²华南农业大学经济管理学院, 广东 广州

Email: ^{*}d_g_m@scau.edu.cn

收稿日期: 2016年9月25日; 录用日期: 2016年10月9日; 发布日期: 2016年10月12日

*通讯作者。

文章引用: 李凤敏, 杜国明, 周伟. 气候变化对森林生态系统影响英文文献综述[J]. 林业世界, 2016, 5(4): 87-101.
<http://dx.doi.org/10.12677/wjf.2016.54011>

摘要

通过收集最近20年间的1743篇英文文献，从文献概述、研究目的、研究方法、研究结论等几方面全面梳理了全球气候变化对森林生态系统影响的国际研究进展，基于气候变化对森林、森林管理、森林固碳影响等几个视角，考察了学者们的关注热点和重点、不同研究思路和研究方法、研究结论的差异，最终基于对比分析，提出相关研究的未来发展趋势和方向。

关键词

气候变化，森林，英文文献

1. 文献概况

1.1. 发表时间

本文通过“Web of Science”，以“forest”和“climate change”为标题关键词，经检索在1995~2014年期间共有英文期刊论文1743篇。这些论文呈现出以下特征：1) 森林和气候变化相关论文整体上有逐步增加的趋势。从1995年的30篇到2014年的214篇，增加7倍多，预示着相关领域越来越受到学者的关注。2) 2009年后相关研究论文大幅增加。2007年后相关论文增加明显，尤其2009年后论文的数目都在150篇以上，是2006年前论文的3倍以上。见图1。

1.2. 研究区域

相关文献关注了不同区域不同类型的森林。一方面，相当一部分论文并未确定具体区域，有542篇，占总数的31.1%；如果确定了研究区域，更多论文关注了北美洲和欧洲，分别有458篇和436篇，分别占确定研究区域论文总数的38.1%和36.3%；相反，涉及亚洲、非洲、南美洲和大洋洲的论文较少，关于南极洲的论文只有1篇，见图2。另一方面，对于不同气候带的森林，一些论文并未明确气候带，共有557篇，占总数的31.9%；热带和寒带的森林更引起研究者重视，分别有486篇和439篇，分别占已明确气候带论文的41.0%和37.0%；涉及温带森林的论文较少，有261篇，占已明确气候带论文的22.0%。见图3。

2. 研究目的

分析论文的研究目的可以更好地了解学者们的关注热点。在1743篇论文中，研究目的主要集中在气候变化对森林的影响、气候变化对森林管理的影响、气候变化对森林固碳的影响等几个方面，分别占总共论文的37.2%、34.7%和9.5%，交叉或者其他研究目的的论文占18.5%，见表1。其中，以森林固碳为主要研究目的的论文与全部论文数量的对比显示：伴随着气候变化对森林影响论文数量的增加，关于森林固碳的论文整体上也呈现出逐步增加的趋势，由2006年前的不足10篇，逐步增加致20篇左右，2009年达到22篇的最高值，其后又有所减少，见图4。森林固碳相关论文的占比维持在6%~14%之间，占比最高的是1999年，达到16.0%；占比最低为2014年，仅占6.5%；占比未呈现出明显的长期增加或者减少趋势，见图5。

2.1. 气候变化对森林的影响

在气候变化中，更多学者关注了气候对森林本身的影响，主要研究了气候变化对森林生长、森林多

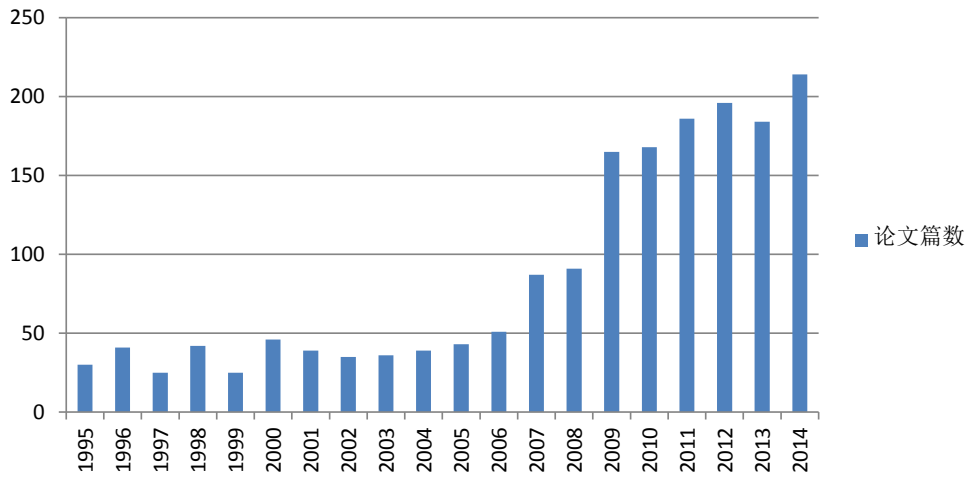


Figure 1. The number of related papers from 1995 to 2014

图 1. 1995~2014 年相关论文数量

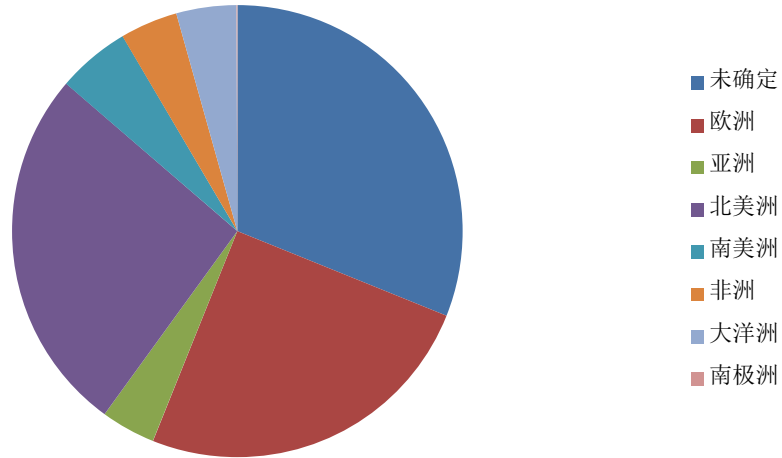


Figure 2. The research areas of the paper

图 2. 论文涉及的研究区域

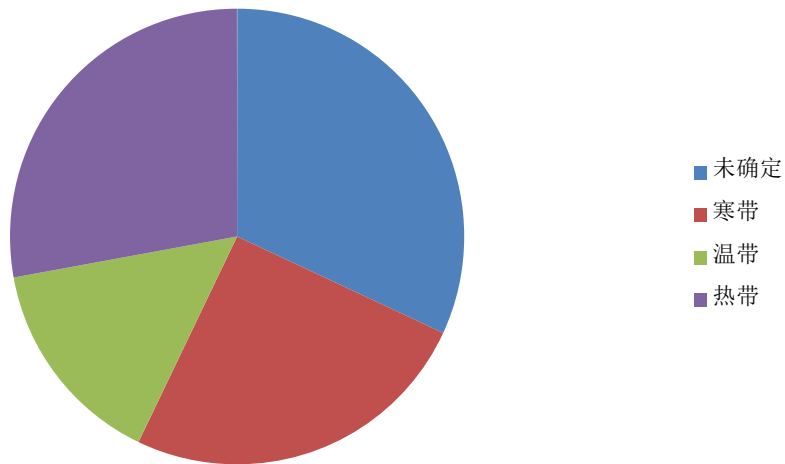


Figure 3. The climate zones of the paper

图 3. 论文关注的气候带

Table 1. The main research purposetypes of papers
表 1. 论文主要研究目的类型

森林	森林管理	森林固碳	其他	总计
649	605	166	323	1743
37.2%	34.7%	9.5%	18.5%	100%

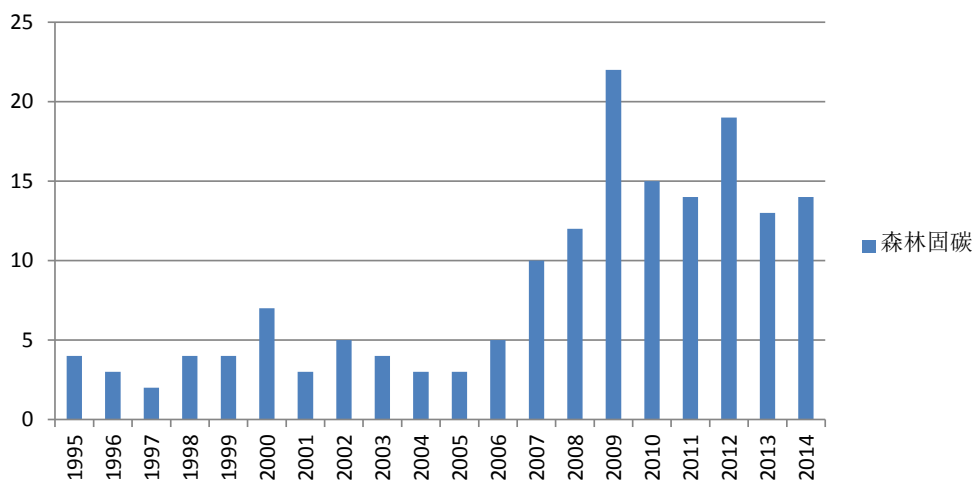


Figure 4. The paper number of forest carbon sequestration

图 4. 森林固碳论文数量

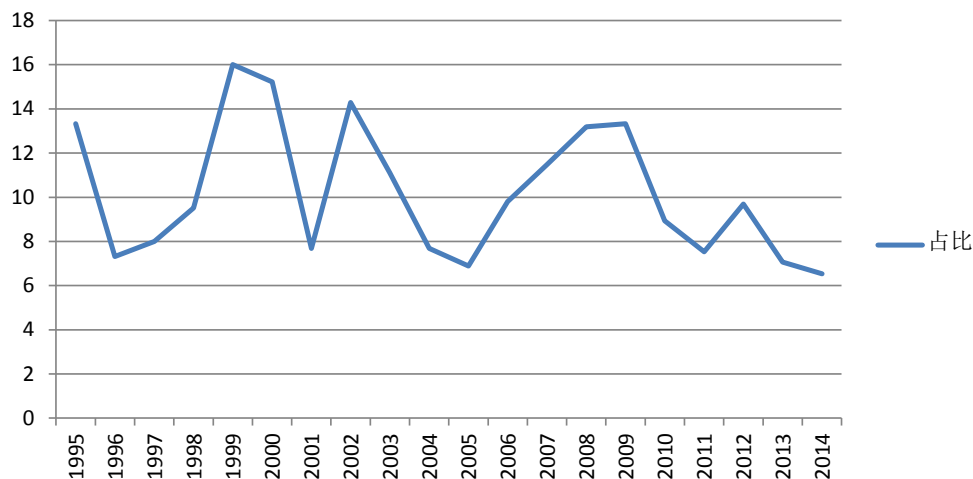


Figure 5. The proportion of papers concerning forest carbon sequestration

图 5. 以森林固碳为主要研究目的的论文占比

样性、森林分布的影响。其中，森林生长主要涉及 NPP (net primary production)和 DR (decomposition rate) 两个指标。气候对森林的影响既有直接因素，也有间接因素。直接因素包括温度、降水(湿度)、云层覆盖、灾难风等方面；间接因素包括二氧化碳积聚、氮循环变化、臭氧层变化、气候变化引发的火灾、干旱、外来物种、昆虫等食草动物等等。研究所涉森林既有高纬度森林也有低纬度森林，既有寒带森林也有温带、热带森林。其中，热带云雾森林特别受到一些作者的关注，有多篇论文探讨了气候变化中热带云雾森林的脆弱性和改变。

2.2. 气候变化对森林管理的影响

在 605 篇研究气候变化对森林管理论文中, 有近一半论文着重关注了气候变化中的火灾问题, 一方面研究火灾对森林的危害趋势, 另一方面探讨如何加强森林火灾的管理决策。其他涉及森林管理的问题, 基本上都是综合管理文章。

2.3. 气候变化对森林固碳的影响

关注气候变化对森林固碳影响, 实质上是关注森林在应对气候变化中的作用。影响森林固碳或者碳循环的主要研究因素包括温度、二氧化碳、臭氧、氮循环等, 也有论文探讨了森林砍伐等管理因素对森林固碳的影响。也有论文同时研究了林业和农业的土地利用问题或者森林碳汇价格影响因素。

2.4. 其他

除以上研究目的论文外, 其他论文不是研究综述论文, 就是关注了气候变化、森林、土地利用等多种因素相互作用, 或者是木产品价格等其他问题的论文。

3. 研究方法

为了研究森林和气候变化的相互作用, 学者们使用了多种方法, 主要包括历史资料研究、生物地理模型、生物地化模型、全球环流模型、统计模型等方法。

3.1. 历史资料研究

利用生物历史数据, 研究生物伴随着气候变化而发生的改变。众所周知, 气候变化是植物生长的重要因素, 在过去, 物种的分布随着气候变化而改变, 可以预期随着温度的持续变暖植物在区域分布和多样性方面不断改变。根据对新热带低位山林 48,000 年持续的跟踪记录, 可以揭示出森林的持续变化与冰期之间的关系。经过 30,000 年相对稳定后, 物种正经历着一个从冰期到新世纪元长达 8000 年的转变期。尽管这些转变是直接的, 但这一时期的转变率与之前 30,000 年的稳定状态相比没有特别大的差异。到 21 世纪, 温度变暖导致的物种改变将加剧[1]。历史上, 气候变化已经对新热带区植物的分布和生长产生了重要影响[2]。Thomas Zumbrunnen 等重新梳理了瑞士阿尔皮斯山林过去 100 年火灾的书面记录, 调查了火灾管理和当地气候变化之间的关系。比较了温度、降水、干旱、干焚风对火灾发生频率的影响。调查显示温度和降水对森林火灾的发生起到了重要作用, 但在 20 世纪后半叶, 与人类活动、森林植物可适性相比, 温度已经没有那么重要[3]。

3.2. 生物地理模型

生物地理模型是将一些生物地理因素, 如经度、纬度、海拔等等因素, 整合到模型之中, 用于模拟森林应对气候变化的改变。最主要的生物地理模型主要有 BIOME4、BIOME3、MAPSS 等模型。这些模型通过限定当地植物、水文循环和植物生理特性来预测植物的物种和区域分布。例如, BIOME3 模型, 它是一个基于过程平衡的陆地生物圈模型, 主要基于生态物理限制、资源的可获得性和植物功能类型 (PFTs, 即 plant functional types) 竞争而建立, 主要用于模拟植物的分布和 NPP。BIOME3 模型是在 BIOME1 模型和 BIOME2 模型基础上建立起来。BIOME1 模型主要是模拟大范围内植物的分布, BIOME2 模型把碳循环和水循环加入到模型中[4]。基于土壤地质类型和每月天气(温度、降水和日照)等数据录入, BIOME3 可以显示出每个生态格的 NPP, LAI (leaf area index) 和主要的 PFT。以上这些结果和一些亚变量(如增长的日均气温、土壤湿度等等)可以被用于绘制生物类型图。这些图包括了天然植物、NPP 度量等内容, 因

此 BIOME3 模型已经被证实是成功的, 并已被广泛应用于不同区域的气候变化和 CO₂ 积聚对生态结构和功能影响领域[5]-[7]。N. H. Ravindranath 等使用 BIOME4 模型, 把森林空间区域分布、当前气候变化、未来气候模拟、表土和底土的含水量等数据录入, 预测了未来印度森林的物种类型变化[8]。

3.3. 生物地化模型

目前, 有 20 多个生物地化模型用于森林对气候变化的影响研究。生物地化模型可以预测生态体系中的碳循环和氮循环, 但不能用于预测给定地区植物的类型。主要的生物地化模型有 TEM、CENTURY、BIOME-BGC、PnET 等等。这些模型是在对植物动力模型进行比较的基础上, 预测植物的反馈[9]。其中, CENTURY 模型是由 Parton 等人上世纪八十年代发展起来, 是一个植物土壤生态模型, 用于估计不同类型土壤(如草地、农地、林地等)的碳循环和氮循环。联系碳的吸收、周转、分解等关键过程, 此模型可以模拟放牧、种植、施肥、灌溉、野火控制等许多管理措施。CENTURY 模型有三个亚模型: 其一, 计算水和温度变化的生理亚模型; 其二, 模拟地上地下植物的植物生长模型; 其三, 计算土壤和枯落物中碳流和氮流土壤功能亚模型。模型主要输入的变量包括: 月平均最高和最低气温、月降水量、土壤质地、大气和土壤氮输入、植物木质素含量以及初始土壤碳和营养水平。例如, Changhui Peng 等利用 CENTURY 模型分析了在改变施肥方式和火灾干扰决策下 NPP 水平的变化[10]。M. Chiesi 等为了估计地中海森林三个物种季节性光合作用和蒸腾作用, 使用了 BIOME-BGC 模型[11]。使用基于卫星和辅助数据的简单参数模型 C-Fix 调整每月十个森林地块的总初级生产力(GPP), 进而对 BIOME-BGC 模型来验证。验证之后, 评估蒸腾和 GPP 测量。BIOME-BGC 模型是由 Montana 大学建立, 目的是估计陆地生态系统内的水、氮和碳的存量和流量[12] [13]。模型需要每天气候数据、一般环境的信息(即土壤, 植被和现场条件)和参数描述植物的生理生态特性。BIOME-BGC 的作用有: 1) 建立植物碳的数量和分布。2) 预测不同生态系统下, 空气中二氧化碳浓度的变化。3) 探索缺水和干旱对植物碳平衡的控制。4) 探索气候对生长期的年际影响。5) 建立生态系统和森林特别重要的参数。

3.4. 全球环流模型

全球环流模型, 简称 GCM (Global Circulation Model)模型, 它是典型的动力学模型。该模型的物理基础是从气候系统的热力学、流体运动学特征出发, 建立气候系统方程。根据所构造模式的复杂程度, 气候模式分为简单气候模式、复杂耦合气候系统模式和中等复杂程度的气候模式。简单气候模式常与综合评估模型联系, 并用于分析温室气体的减排成本和气候变化响应。复杂耦合气候系统模式包括了发展成熟的大气模式、海洋模式、陆面模式, 甚至包括海冰和碳循环等模块, 用以研究包括海洋状况、冰雪过程、土壤温湿等在内的气候系统变化规律, 是目前研究大气、海洋及陆地之间复杂相互作用的主要工具。由于 GCM 模式仅是一个气候模型, 故在研究森林与气候变化关系时, 一般需要与其他模型或者数据资料等结合起来发挥作用[14]-[20]。例如, 在 B. M. Wotton 等的论文中, HadCM3 模型和 GCM 模型共同模拟未来天气的变化[21]。在 N. H. Ravindranath 等的论文中, BIOME4 模型和 GCM 模型共同预测了未来印度森林的物种类型[22]。

3.5. 统计模型

统计模型以展示气候变化的潜在影响为目的, 界定了当前物种分布和环境的关系。气候主要由不同 GCM 模型决定, 通过数据关系反应新的可能物种的分布。使用地理信息系统, 通过地图显示未来植物的分布。该模型是一个以气候变化为变量的多回归方程。统计模型有回归、一般线性模型、一般加性模型、多变量可适性回归模型等。统计模型更多适用于目前和未来物种分布的预测, 而较少生物群落的预测,

许多统计模型最终形成展示性地图。例如,伴随着气候变化, Martin T. Sykes 等评估了北欧 19 种森林物种[23], Richard C. Box 评估了佛罗里达 125 种森林物种[24]。Ralph J. Alig 等建立了一个多时期、区域性的线性模型(FASOM),用于评价气候变化对美国森林的影响,优化林业和农业用地的使用[25]。V. M. Mccoy 等建立了加拿大 Yukon 地区森林火灾和气候之间的多元回归方程。森林火灾资料包括每年发生火灾数量,火灾面积和季节性防火严重等级等,气候因素包括平均气温、总降水量、平均相对湿度、平均风速等。其中,气候数据由 GCM 模型获得[26]。

3.6. 其他模型

由于各篇论文研究的目的不同,虽然许多论文都探讨了森林和气候变化的关系,但论文的着重点有所差异,所以使用的方法不仅仅局限于上面的方法。

3.6.1. 森林碳循环模型

有些论文以探求气候变化中森林碳循环为目的,故建立了森林碳循环模型。例如,在 A. O. Kokorin 等的论文中,使用了 CCBF (Climate and Carbon in Boreal Forests)模型,这个模型是由莫斯科的全球气候和生态研究所建立,主要用于预测寒带森林固碳作用。这个模型是一个多箱模型,虽与 IMAGE 2.0、ARP 2 等模型类似,但更侧重于深入描述森林林龄和枯木树枝、土壤等生物体,并且也详细模拟森林火灾的未来影响。该模型把所有俄罗斯 30 个区域,每个区域按照林龄的不同、树木生长的情况进行分类,所有区域又被分为 6 个地理气候区。这个模型建立了不同的方程,使用了不同类别的长期数据,如生态系统、碳转移、森林生长以及分解、火灾等等。通过实验数据和不同模型得出的结论来决定气候变化引起树木生长率。夏季平均气温每上升 1°C 会导致中北部和南部 Taiga 地区树木生长率分别增加 10%~15% 和 3%~8%。气候变化也会引起植物分解率增加 7%~15%。降雨对森林有负面影响但很微弱。CO₂、O₃ 对森林增长有正面影响。森林管理、林龄变化和气候变暖对森林碳库的作用不一样,气候变暖对森林碳库的影响更小[27]。

3.6.2. 欧洲森林信息场景模型

欧洲森林信息场景模型(European Forest Information Scenario Model,简称 EFISCEN)是一个以区域为基础的矩阵森林资源模型。该模型首先是由瑞典农业大学 Sallnas 教授在 20 世纪 80 年代后期使用起来。通过录入树种、区域、地点等信息,一个矩阵就建立起来,特别适用于预测大范围(超过 10,000 ha)、长周期(20~70 年)的森林应对气候变化的影响。该模型可以洞悉了每个树种的生长、不同林龄分布以及确定砍伐周期。其作用主要体现在几个方面:1) 可持续的森林管理。2) 木产品的可能性。3) 天然方向的管理。4) 天气改变的影响。5) 自然的干扰。6) 碳循环。在 Timo Karjalainen 等人的论文中,分析了气候变化和森林管理对欧洲森林碳预算的影响,碳预算还被扩展到森林土壤和木材产品。主要研究了两种森林管理和气候变化模式下,预测未来森林生长、可获得的木材、碳贮藏的变化状况[28]。在 Marc Hanewinkel 等人的论文中,通过使用 EFISCEN 模型预测气候变化对森林土地价值的影响,到 2100 年,欧洲(包括俄罗斯)林地的价值下降 21%~60%,平均 34% [29]。

3.6.3. 人造神经网络模型

人工神经网络(Artificial Neural Network,即 ANN),是 20 世纪 80 年代以来人工智能领域兴起的研究热点,从信息处理角度对人脑神经元网络进行抽象,神经网络是一种运算模型,由大量的节点(或称神经元)之间相互联接构成。每个节点代表一种特定的输出函数,称为激励函数(activation function)。每两个节点间的连接都代表一个对于通过该连接信号的加权值,称之为权重,这相当于人工神经网络的记忆。最

近十多年来, 神经网络的研究工作不断深入, 已经在模式识别、智能机器人、自动控制、预测估计、生物、医学、经济等领域取得了很大的进展。在 David W. Hilbert 等的论文中, 建立了三层前馈网络, 形成由 14 个独立的数字变量、9 个自变量、15 非线性回归方程。这种神经网络更趋向是一个算法而非简单的数学功能, 每个独立变量被用作为一个隐藏功能的节点, 每个节点内需要乘以一个参数。气温、降水、土壤水、坡度等因素被作为模型的参数, 通过对气候变化的敏感性进行了详细的空间分析表明, 最主要的气候变化影响将体现在热带雨林和开阔林地之间的交错生态脆弱边界[30]。

4. 研究结论

4.1. 气候变化对森林影响方面

4.1.1. 对森林生长影响

无论是采用模拟方法还是资料数据分析, 无论是热带森林、寒带森林还是温带森林, 大部分论文都认为气候变暖会导致森林生长加速[31]-[34]。A. R. Keyser 等(2000)利用统计数据分析了北美森林 13 地点、过去 82 年的气温上升趋势, 并且以此为基础通过 BIOME-BGC 模型模拟了未来森林生长状况, 最终得出森林净初始生长率 NPP、分解率 DR 上升的结论[35]。Ernst-Detlef Schulze 等探讨了京都议定书后的森林管理, 不仅认为森林净初始生长率会 NPP 会上升, 而且认为净生态生长率也会上升, 而且上升幅度大于不仅认为森林净初始生长率会 NPP [36]。Serge Payette 等也认为气候变暖会导致森林生物增长[37]。但是, 有一些论文认为森林生长下降。例如, 在中国既有在特定地区 NPP 上升 31%, 也有一些城市化地区森林 NPP 下降[38]。在 Celine Boisvenue 等人的论文中, 认为温度上升、降水、CO₂ 积聚和 N 积累对森林生长有促进作用, 相反 O₃ 和其他污染物有负面作用, 这些因素的合并和相互作用很难通过实验来模拟[39]。Wei Ren 等人模拟了 1961~2005 年间 O₃、气候变化、CO₂ 和 N 积聚对中国森林的影响, 结果显示 O₃ 污染和气候变暖对 NPP 的负面作用可以被 N 积聚和 CO₂ 的正面作用所抵消[40]。Christopher Reyer 等人通过模型模拟认为未来天气变化和 CO₂ 的影响会导致北欧森林生长率增加, 中欧增长或者降低, 南欧下降[41]。

除温度因素影响外, 许多论文还关注了气候对森林生长有影响的其他直接和间接因素, 如降水、飓风、干旱、火灾、CO₂ 积累、昆虫等食草动物、冰山融化等等。例如, Virginia H. Dale 等把温度、降水、飓风、CO₂ 积累等作为分析气候变化和森林相互作用的因素[42]。W. Jan A. Volneya 等重点研究了在气候变化中昆虫对森林生长的负面影响。除了气温上升因素外, CO₂ 积聚已经作为最重要影响森林生长的因素, 或者成为与温度上升、降水增加等共同作用的因素, 成为促进森林增长的重要因素[43]。例如, Changhui Peng 等利用 CENTURY4.0 模型了气候变化对加拿大寒带森林结构和功能的影响, 认为 CO₂ 积聚与气温上升会使森林净初始生长率、分解率 DR 上升[44]。

一些论文特别关注了气候变暖对热带云雾森林的负面影响。例如, Lloyd L. Loope 等利用历史数据分析了位于夏威夷的热带云雾森林, 认为温度、降雨, 云层覆盖和湿度方面的小变化就将引起对热带云雾森林的巨大改变, 强调了热带云雾森林应对气候变化的脆弱性[45]。Octavio R. Rojas-Soto 等利用 ENMs (ecological niche models)模型预测到 2050 年气候变化对墨西哥东南部森林影响, 结果显示云雾森林将大面积减少, 达到 54%~76% [46]。

4.1.2. 对森林分布影响

气候变化会引起森林分布的改变。Lera Miles 等利用模型预测了亚马逊热带森林分布的长期变化趋势, 认为 43% 森林分布会发生改变, 但是大多数区域的改变并不明显[47]。Jian Ni 研究了气候变化对森林分布影响的不同因素, 认为 CO₂ 积聚可以非线性地影响森林分布, 但气候变暖对森林分布影响更大[48]。Craig Loehle 利用 SORTIE 系列模型分析了气候变暖对森林分布的变化, 认为随着气候变暖导致群落交错

区北移[49]。Andreas Hamann 等人认为基于生态系统调查,气候变化对森林生态系统空间再分配的程度是相当可观的,同时亚寒带和山区森林也逐步消失[50]。

气候变化对不同区域森林分布的影响不一致。Martin T. Sykes 等人利用模型模拟了未来气候变化对北欧森林分布的影响,认为气候变暖会引起森林区域分布变化,一些地区增加,一些地区下降[51]。Denis Loustau 等和 Changhui Peng 等的论文认为气候变化对高纬度地区森林的影响更大, A. O. Kokorin 等认为气候变化对寒带森林影响更大,温度上升主要对寒冷地区森林有作用,而南部地区森林主要受降水影响[10] [27] [52]。

4.1.3. 对森林多样性影响

多数相关文献都肯定气候变化对森林多样性会起作用。例如, Phyllis D. Coley 和 Riciard T. Corlett 等人的论文都认为气候变暖会引起森林物种的改变。但不同论文对该作用的方向存在不同认识[53] [54]。Richard Condit 等人认为干旱会导致巴拿马森林多样性的改变,一些物种减少甚至灭亡[55]; Pru Foster 的论文使用历史资料、数据认为气候变暖会导致森林多样性下降[56]; Robert M. Scheller 等人利用模型模拟了气候变暖对森林多样性的影响,会导致美国森林多样性的下降[57]。相反, H. Tommervik 等人认为气候变暖会引起北欧森林多样性增加[58]; Louis R. Iverson 等人利用模型模拟认为气候变暖会导致森林多样性的轻微增长[59]。另外,也有学者认为气候变暖不一定导致森林多样性的改变[60]。

4.2. 气候变化对森林管理影响方面

4.2.1. 森林火灾与森林管理

多篇论文分析了气候变化引发的火灾对北美、俄罗斯等地森林的影响,基本认为森林火灾风险会增加。例如, B.M. Wotton 等人利用 GCM 数据和火灾预测模型,得出到 2020~2040 年加拿大森林火灾风险大约会增加 18%,最终到 21 世纪末会增加 50%。按照目前气候变化趋势,寒带森林火灾会更加严重。针对火灾风险的增加,多篇论文提出了相应管理对策[20] [21]。例如, Hong S. He 等人分析了森林物种对于增长的森林火灾风险的反应,认为尤其对于贫瘠地区的森林,不是仅仅考虑减少砍伐计划,而是应当强化森林管理措施,预防森林火灾[61]。Mike Flannigan 等人认为,森林火灾是寒带森林管理的基本的、重要的组成部分,这个世纪末火灾将增加 50%,再过一二十年,目前消防管理机构无法维持现有火灾成效水平[62]。

4.2.2. 对森林综合管理

为了应对气候变化对森林的影响,许多论文提出了综合管理对策。Daniel A. Spring 等人认为,为了应对气候变化,最优的策略选择是停止砍伐,至于是否这样做,取决于火灾风险的增加和水价值的改变[63]。Ralph Alig 等人认为,为了应当气候变化,应当重视林业的发展,更多的农业用地转变为林业用地,同时要强化森林管理措施[64]。B. J. Stocks 等人认为气候变化主要是通过温度和降水的改变来影响俄罗斯和加拿大的森林,所以应当有针对性地调整原有管理策略[14]。Marcus Lindner 分析了最大化木材产量、最好天气适应和最大化树木多样性三种管理目标下森林管理策略的选择,强调了森林管理的重要性,针对不同的管理目标管理措施应当有所区别[65]。William F. Laurance 不仅分析了气候变暖、CO₂ 积聚对亚马逊森林的影响,而且也分析了森林过度砍伐、采矿、过度捕猎的影响,强调为了为了亚马逊森林的发展,应当采取综合性措施来应对,特别要减少人的行为对森林的干扰[66]。Per Bodin 等人认为,为了适应未来气候变化,特别是极端天气事件,需要加强森林管理,探寻适合实践的理论和方法,最大限度地满足森林管理的各种需求[67]。

4.3. 气候变化对森林固碳影响方面

4.3.1. 对森林固碳的总体影响

森林被认为是应对气候变化的潜在碳库[68]。对于影响森林固碳的因素,不同学者采用了不同的影响因素。有与气候变化紧密相关的温度、降水、CO₂ 积聚、O₃ 积聚、N 积累等;也有与森林管理相关的因子,如林龄的变化、砍伐决策等。森林砍伐和退化是影响森林碳排放的关键因素[69]。在应对气候变化中,土壤解冻和地下水位深度之间的相互作用是控制北方森林碳汇的关键[70]。土地利用变化,特别是转化成农业生态系统会耗尽土壤碳库[71]。S. Hashimoto 等人利用 CENTURY 模型分析后,预测认为气候变化导致 SOC (soil organic carbon)下降 5% [72]。Vladimir N. Shanin 等人利用 EFIMOD (individual-based stand-level model)模型分析了俄罗斯中部的森林,结果显示森林管理,尤其砍伐或者收割,对森林碳库有重要作用。由于采用的指标不同,加之方法上的差异,所以得出的结论也有较大差异。其一,多数学者认为在气候变暖状况下森林碳库会增加[73]。F. A. Bazzaz 综合分析了温度、CO₂ 积聚和 N 积累三种因素,得出热带森林碳库增加的结论[74]。Limin Dai 等人分析了中国长白山森林对气候变化的影响,认为会导致立木碳库增加[75]。其二,一些学者认为气候变化对森林碳库影响不大。A.R. Keyser 等通过模拟未来北美森林碳库的变化,认为气候变化对北美森林碳库没有大的影响。其三,个别学者认为气候变化会引起森林碳库的下降[35]。Raisa Mäkipää 等人通过模型分析了芬兰森林的碳库变化,在气候变暖和 N 积累的共同作用下,总碳库是减少的[76]。

另外,一些学者也比较了不同因素在森林固碳的作用。A. O. Kokorin,等认为林龄变化对森林碳库的作用要大于气候变暖的作用,随着森林龄结构的老化,森林植被碳库也会下降[27]。Jian Ni 在分析 CO₂ 积聚和温度上升对森林碳库影响时,认为温度上升的作用大于 CO₂ 积聚的作用[48]。Zhao Junfang 等人通过 FORCCHN 模型分析中国东北的森林,认为气候变暖比降水对碳预算的影响更大[77]。

4.3.2. 对森林固碳的作用趋势

有的学者也预测了气候变化对森林固碳的作用趋势。Timo Karjalainen 等人利用 EFISCEN (European Forest Information Scenario Model)分析了 1990~2050 年期间森林管理在森林固碳中的作用,认为森林管理大于森林固碳有作用,但作用不大,森林碳库开始增长快,但到 2020 年后增速减慢[78]。Allen M. Solomon 通过模型分析了伴随着气候变暖寒带森林碳库的变化趋势,森林碳库开始增长,未来将下降[79]。

4.3.3. 对植物固碳和土壤固碳的不同影响

森林碳库主要分为植物碳库和土壤碳库两部分,有些学者研究了气候变化中两种碳库的不同变化趋势。一方面,大多数认为在气候变化中森林植物碳库上升,土壤碳库下降。Changhui Peng 等利用 CENTURY4.0 模型了气候变化对加拿大寒带森林结构和功能的影响,认为气候变暖造成植物碳库上升、土壤碳库下降;CO₂ 积聚上升导致植物碳库上升、土壤碳库上升[44]。Raisa Mäkipää 等人认为在气候变暖和 N 积累的共同作用下,植物碳库上升、土壤碳库下降[76]。另一方面,也有学者认为在气候变化中森林植物碳库和土壤碳库都会下降。Jian Ni 认为在 CO₂ 积聚和气候变暖共同作用下,植被碳库和土壤碳库都将下降[48]。

5. 小结与启示

5.1. 研究结论存在差异性

关于气候变化对森林的生长、分布、多样性、管理、固碳的影响,各篇论文的研究结论存在着较多趋同结论,同时也有较大差异性。在对森林生长影响方面,大多数文献认可气候变化会促进森林生长,

但影响因素作用不同,有的认为温度上升是主要因素,有的认为 CO₂ 积累的作用更大,也有认为降水、飓风、干旱等因素会起作用。在对森林分布影响方面,有的认为气候变化影响很大,有的认为影响不大;有的认为对高纬度寒带森林影响更大,有的认为对热带森林影响也很大。在对森林多样性影响方面,多数文献认为气候变暖会导致森林多样性下降,也有学者认为气候变暖会导致森林多样性的轻微增长,亦有学者认为气候变暖不一定导致森林多样性的改变。在对森林固碳影响方面,多数论文认为在气候变暖状况下森林碳库会增加,但也有一些学者认为气候变化对森林碳库影响不大,甚至认为森林碳库会下降。多数学者认可在气候变化中森林植物碳库上升,但对土壤碳库上升还是下降存在分歧。

5.2. 森林固碳作用研究未受到特别重视

森林应对气候变化的作用主要体现在森林固碳作用上面。发展碳汇林已作为重要措施纳入到《中国应对气候变化国家方案》,大力发展林业,合理扩大森林面积、加强森林管理和保护已成为保障国家气候和生态安全、促进可持续发展的战略措施[80]。正如前文所述,涉及森林固碳的论文虽然数量在增加,但与气候变化对森林的影响全部论文相比,比例上并未有明显的增长,体现出学者们对森林在应对气候变化中的作用相关研究仍然重视不够。因此,学界应当更加关注气候变化对森林固碳影响的研究。今后,研究重点应当注意以下几方面:1) 继续完善研究方法,进而评估森林碳库(包括植物碳库和土壤碳库)。2) 把森林产品碳库作为研究的重要方面,因为林产品碳库也是减少 CO₂ 排放,减缓气候变暖的重要措施。3) 在进行碳循环研究时要注意森林产品的能源替代作用。

5.3. 模型方法存在局限性

目前大多数研究气候变化对森林生态潜在影响的模型主要有以下几个假设:1) 气候将继续变暖,温度将继续快速上升;2) 由于蒸发的作用导致气候越来越干燥;3) 气候是唯一影响树木物种变化的因素。由于假设或者其他因素的限制,模型方法或多或少存在着以下弊端:

5.3.1. 夸大了气候变化对森林的作用

由于把气候变化作为影响森林的唯一因素,忽略了其他因素的影响,这样就会造成无论气候变化引起的正面效果还是负面效果都会被放大,常常夸大了气候变化带来的灾难性后果。因此,模型方法应当进一步完善,不仅要考虑温度、湿度、CO₂ 积聚等气候因素,也要考虑经纬度、海拔等其他直接或者间接影响森林及其管理、固碳的因素。

5.3.2. 研究结论存在一定的不确定性

一方面,研究结果往往以气候继续变暖和越发干燥为前提,而未来气候的演变本身存在着不确定性,历史上还曾出现过冬天气候越来越冷,而夏天温度越来越高等不同温度变化轨迹[1]。另一方面,许多研究往往被限定在一定区域、特定树种,因此,研究结论仅局限于特定环境,而不能被广泛适用。

基金项目

2013 年广东省普通高校人文社会科学研究项目“广东碳汇交易立法及配套政策研究”(编号:2013WYXM0018);广东省科技创新治理体系建设与实践领域项目(2015A080804017);广东省软科学项目(2015A070704044);广东省自然科学基金项目(2015A030313417)。

参考文献 (References)

- [1] Bush, M.B., Silman, M.R. and Urrego, D.H. (2004) 48,000 Years of Climate and Forest Change in a Biodiversity Hot Spot. *Science*, **303**, 827-831. <http://dx.doi.org/10.1126/science.1090795>

- [2] Pennington, R.T., Lavin, M., Prado, D.E., *et al.* (2004) Historical Climate Change and Speciation: Neotropical Seasonally Dry Forest Plants Show Patterns of Both Tertiary and Quaternary Diversification. *Philosophical Transactions on the Royal Society*, **359**, 515-537. <http://dx.doi.org/10.1098/rstb.2003.1435>
- [3] Zumbunnen, T., Bugmann, H., Conedera, M. and Bürgi, M. (2006) Linking Forest Fire Regimes and Climate—A Historical Analysis in a Dry Inner Alpine Valley. *Ecosystems*, **12**, 73-86.
- [4] Haxeltine, A. and Colin Prentice, I. (1996) BIOME3: An Equilibrium Terrestrial Biosphere Model Based on Ecophysiological Constraints, Resource Availability, and Competition among Plant Functional Types. *Global Biogeochemical Cycles*, **10**, 693-709. <http://dx.doi.org/10.1029/96GB02344>
- [5] Cowling, S.A. and Field, C.B. (2003) Environmental Control of Leaf Area Production: Implications for Vegetation and Land-Surface Modeling. *Global Biogeochemical Cycles*, **17**, 7-17-14. <http://dx.doi.org/10.1029/2002GB001915>
- [6] Cramer, W., Kicklighter, D.W., Bondeau, A., *et al.* (1999) Comparing Global Models of Terrestrial Net Primary Productivity (NPP): Overview and Key Results. *Global Change Biology*, **5**, 1-15. <http://dx.doi.org/10.1046/j.1365-2486.1999.00009.x>
- [7] Rathgeber, C., Nicault, A., Guiot, J., Keller, T., Guibal, F. and Roche, P. (2000) Simulated Responses of *Pinus halepensis* Forest Productivity to climatic Change and CO₂ Increase Using a Statistical Model. *Global and Planetary Change*, **26**, 405-421. [http://dx.doi.org/10.1016/S0921-8181\(00\)00053-9](http://dx.doi.org/10.1016/S0921-8181(00)00053-9)
- [8] Ravindranath, N.H., Joshi, N.V., Sukumar, R. and Saxena, A. (2006) Impact of Climate Change on Forests in India. *Current Science*, **90**, 354-361.
- [9] Neilson, R.P. and Running, S.W. (1996) Global Dynamic Vegetation Modelling: Coupling Biogeochemistry and Biogeography Models. In: Walker, B.H. and Steffen, W.L., Eds., *Global Change and Terrestrial Ecosystems*, Cambridge University Press, Cambridge, 451-465.
- [10] Peng, C.H. and Apps, M.J. (1999) Modelling the Response of Net Primary Productivity (NPP) of Boreal Forest Ecosystems to Changes in Climate and Fire Disturbance Regimes. *Ecological Modelling*, **122**, 175-193. [http://dx.doi.org/10.1016/S0304-3800\(99\)00137-4](http://dx.doi.org/10.1016/S0304-3800(99)00137-4)
- [11] Chiesi, M., Maselli, F., Moriondo, M., *et al.* (2007) Application of BIOME-BGC to Simulate Mediterranean Forest Processes. *Ecological Modelling*, **206**, 179-190. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2007.03.032>
- [12] Band, L.E., Patterson, P., Nemani, R. and Running, S.W. (1993) Forest Ecosystem Processes at the Watershed Scale: Incorporating Hillslope Hydrology. *Agricultural and Forest Meteorology*, **36**, 93-126. [http://dx.doi.org/10.1016/0168-1923\(93\)90024-C](http://dx.doi.org/10.1016/0168-1923(93)90024-C)
- [13] White, M.A., Thornton, P.E., Running, S.W., *et al.* (2000) Parameterization and Sensitivity Analysis of the BIOME-BGC Terrestrial Ecosystem Model: Net Primary Production Controls. *American Meteorology Society*, **4**, 1-85.
- [14] Stosks, B.J., Fosberg, M.A., Lynham, T.J., *et al.* (1998) Climate Change and Forest Fire Potential in Russian and Canadian Boreal Forests. *Climatic Change*, **38**, 1-13. <http://dx.doi.org/10.1023/A:1005306001055>
- [15] Sabate, S., Gracia, C.A. and Sanchez, A. (2002) Likely Effects of Climate Change on Growth of *Quercus ilex*, *Pinus halepensis*, *Pinus pinaster*, *Pinus sylvestris* and *Fagus sylvatica* Forests in the Mediterranean Region. *Forest Ecology and Management*, **162**, 23-37. [http://dx.doi.org/10.1016/S0378-1127\(02\)00048-8](http://dx.doi.org/10.1016/S0378-1127(02)00048-8)
- [16] Honnay, O., Verheyen, K., Butaye, J., *et al.* (2002) Possible Effects of Habitat Fragmentation and Climate Change on the Range of Forest Plant Species. *Ecology Letters*, **5**, 525-530. <http://dx.doi.org/10.1046/j.1461-0248.2002.00346.x>
- [17] Scheller, R.M. and Mladenoff, D.J. (2005) A Spatially Interactive Simulation of Climate Change, Harvesting, Wind, and Tree Species Migration and Projected Changes to Forest Composition and Biomass in Northern Wisconsin, USA. *Global Change Biology*, **11**, 307-321. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2486.2005.00906.x>
- [18] Flannigan, M.D., Amiro, B.D., Logan, K.A., Stocks, B.J. and Wotton, B.M. (2006) Forest Fires and Climate Change in the 21ST Century. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, **11**, 847-859. <http://dx.doi.org/10.1007/s11027-005-9020-7>
- [19] Soja, A.J., Tchepakova, N.M., French, N.H.F., *et al.* (2007) Climate-Induced Boreal Forest Change: Predictions versus Current Observations. *Global and Planetary Change*, **56**, 274-296. <http://dx.doi.org/10.1016/j.gloplacha.2006.07.028>
- [20] Wotton, B.M., Nock, C.A. and Flannigan, M.D. (2010) Forest Fire Occurrence and Climate Change in Canada. *International Journal of Wildland Fire*, **19**, 253-271. <http://dx.doi.org/10.1071/WF09002>
- [21] Wotton, B.M., Martell, D.L. and Logan, K.A. (2003) Climate Change and People-Caused Forest Fire Occurrence in Ontario. *Climatic Change*, **60**, 275-295. <http://dx.doi.org/10.1023/A:1026075919710>
- [22] Ravindranath, N.H., Joshi, N.V., Sukumar, R., *et al.* (2006) Impact of Climate Change on Forests in India. *Current Science*, **90**, 354-361.
- [23] Sykes, M.T., Prentice, C. and Cramer, W. (1996) A Bioclimatic Model for the Potential Distributions of North European Tree Species under Present and Future Climates. *Journal of Biogeography*, **23**, 203-233.

- [24] Box, R.C. (1999) Running Government like a Business Implications for Public Administration Theory and Practice. *The American Review of Public Administration*, **29**, 19-43. <http://dx.doi.org/10.1177/02750749922064256>
- [25] Alig, R.J., Adams, D.M. and McCarl, B.A. (2002) Projecting Impacts of Global Climate Change on the US Forest and Agriculture Sectors and Carbon Budgets. *Forest Ecology and Management*, **169**, 3-14. [http://dx.doi.org/10.1016/S0378-1127\(02\)00290-6](http://dx.doi.org/10.1016/S0378-1127(02)00290-6)
- [26] McCoy, V.M. and BurnArctic, C.R. (2005) Potential Alteration by Climate Change of the Forest-Fire Regime in the Boreal Forest of Central Yukon Territory. *Arctic*, **58**, 276-285.
- [27] Kokorin, A.O., Lelakin, A.L. and Nazarov, I.M. (1996) Influence of Climate Changes on Carbon Cycle in the Russian Forests. Prognostic Modeling of CO₂ Exchange with the Atmosphere. *Physics and Chemistry of the Earth*, **21**, 219-223. [http://dx.doi.org/10.1016/S0079-1946\(97\)85588-7](http://dx.doi.org/10.1016/S0079-1946(97)85588-7)
- [28] Karjalainen, T., Pussinen, A., Liski, J., *et al.* (2003) Scenario Analysis of the Impacts of Forest Management and Climate Change on the European Forest Sector Carbon Budget. *Forest Policy and Economics*, **5**, 141-155. [http://dx.doi.org/10.1016/S1389-9341\(03\)00021-2](http://dx.doi.org/10.1016/S1389-9341(03)00021-2)
- [29] Hanewinkel, M., Cullmann, D.A., Schelhaas, M.-J., *et al.* (2013) Climate Change May Cause Severe Loss in the Economic Value of European Forest Land. *Nature Climate Change*, **3**, 203-207. <http://dx.doi.org/10.1038/nclimate1687>
- [30] Hilbert, D.W., Ostendorf, B. and Hopkins, M.S. (2001) Sensitivity of Tropical Forests to Climate Change in the Humid Tropics of North Queensland. *Austral Ecology*, **26**, 590-603. <http://dx.doi.org/10.1046/j.1442-9993.2001.01137.x>
- [31] Churkina, G. and Running, S.W. (1998) Contrasting Climatic Controls on the Estimated Productivity of Global Terrestrial Biomes. *Ecosystems*, **1**, 206-215. <http://dx.doi.org/10.1007/s100219900016>
- [32] Schulze, W.S., Lubatkin, M.H. and Dino, R.N. (2002) Altruism, Agency, and the Competitiveness of Family Firms. *Managerial and Decision Economics*, **23**, 247-259. <http://dx.doi.org/10.1002/mde.1064>
- [33] Nemani, R.R., Keeling, C.D., Hashimoto, H., *et al.* (2003) Climate-Driven Increases in Global Terrestrial Net Primary Production from 1982 to 1999. *Science*, **300**, 1560-1563. <http://dx.doi.org/10.1126/science.1082750>
- [34] Running, S.W., Nemani, R.R., Heinsch, F.A., *et al.* (2004) Impacts of Climate Change on Natural Forest Productivity—Evidence since the Middle of the 20th Century. *Global Change Biology*, **12**, 862-882.
- [35] Keyser, A.R., Kimball, J.S., Nemani, R.R. and Running, S.W. (2000) Simulating the Effects of Climate Change on the Carbon Balance of North American High-Latitude Forests. *Global Change Biology*, **6**, 185-195. <http://dx.doi.org/10.1046/j.1365-2486.2000.06020.x>
- [36] Schulze, E.-D., Wirth, C. and Heimann, M. (2006) Managing Forests after Kyoto. *Science*, **289**, 2058-2061. <http://dx.doi.org/10.1126/science.289.5487.2058>
- [37] Payette, S., Fortin, M. and Gamache, I. (2001) The Subarctic Forest-Tundra: The Structure of a Biome in a Changing Climate. *BioScience*, **51**, 709-718. [http://dx.doi.org/10.1641/0006-3568\(2001\)051\[0709:TSFTTS\]2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1641/0006-3568(2001)051[0709:TSFTTS]2.0.CO;2)
- [38] Fang, J., Lin, Y., Zhu, S. and Chen, X. (2003) Probabilistic Teleportation of a Three-Particle State via Three Pairs of Entangled Particles. *Physical Review A*, **67**, 43-48. <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevA.67.014305>
- [39] Boisvenue, C. and Running, S.W. (2010) Simulations Show Decreasing Carbon Stocks and Potential for Carbon Emissions in Rocky Mountain Forests over the Next Century. *Ecological Applications*, **20**, 1302-1319. <http://dx.doi.org/10.1890/09-0504.1>
- [40] Ren, W., Tian, H., Tao, B., *et al.* (2011) Impacts of Tropospheric Ozone and Climate Change on Net Primary Productivity and Net Carbon Exchange of China's Forest Ecosystems. *Global Ecology and Biogeography*, **20**, 391-406. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1466-8238.2010.00606.x>
- [41] Reyer, C., Lasch-Born, P., Suckow, F., *et al.* (2014) Projections of Regional Changes in Forest Net Primary Productivity for Different Tree Species in Europe Driven by Climate Change and Carbon Dioxide. *Annals of Forest Science*, **71**, 211-225. <http://dx.doi.org/10.1007/s13595-013-0306-8>
- [42] Dale, V.H., Joyce, L.A., McNulty, S. and Neilson, R.P. (2000) The Interplay between Climate Change, Forests, and Disturbances. *The Science of the Total Environment*, **262**, 201-204. [http://dx.doi.org/10.1016/S0048-9697\(00\)00522-2](http://dx.doi.org/10.1016/S0048-9697(00)00522-2)
- [43] Jan, W.A. and Volney, R.A. (2000) Fleming. Climate Change and Impacts of Boreal Forest Insects. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, **82**, 283-294. [http://dx.doi.org/10.1016/S0167-8809\(00\)00232-2](http://dx.doi.org/10.1016/S0167-8809(00)00232-2)
- [44] Peng, C. and Apps, M.J. (1998) Modelling the Response of Net Primary Productivity (NPP) of Boreal Forest Ecosystems to Changes in Climate and Fire Disturbance Regimes. *Ecological Modelling*, **122**, 175-193. [http://dx.doi.org/10.1016/S0304-3800\(99\)00137-4](http://dx.doi.org/10.1016/S0304-3800(99)00137-4)
- [45] Loope, L.L. and Giambelluca, T. (1998) Vulnerability of island Tropical Montane Cloud Forests to Climate Change, with Special Reference to East Maui, Hawaii. *Climatic Change*, **39**, 503-517. <http://dx.doi.org/10.1023/A:1005372118420>

- [46] Rojas-Soto, O.R., Sosa, V. and Ornelas, J.F. (2012) Forecasting Cloud Forest in Eastern and Southern Mexico: Conservation Insights under Future Climate Change Scenarios. *Biodiversity and Conservation*, **21**, 2671-2690. <http://dx.doi.org/10.1007/s10531-012-0327-x>
- [47] Miles, L., Grainger, A. and Phillips, O. (2004) The Impact of Global Climate Change on Tropical Forest Biodiversity in Amazonia. *Global Ecology and Biogeography*, **13**, 553-565. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1466-822X.2004.00105.x>
- [48] Ni, J. (2002) Effects of Climate Change on Carbon Storage in Boreal Forests of China: A Local Perspective. *Climatic Change*, **55**, 61-75. <http://dx.doi.org/10.1023/A:1020291220673>
- [49] Loehle, C. (2000) Forest Ecotone Response to Climate Change: Sensitivity to Temperature Response Functional Forms. *Canadian Journal of Forest Research*, **30**, 1632-1645. <http://dx.doi.org/10.1139/x00-088>
- [50] Hamann, A., Gylander, T. and Chen, P. (2006) Developing Seed Ones and Transfer Guidelines with Multivariate Regression Trees. *Tree Genetics & Genomes*, **7**, 399-408. <http://dx.doi.org/10.1007/s11295-010-0341-7>
- [51] Sykes, M.T. and Colin Prentice, I. (1996) Climate Change, Tree Species Distributions and Forest Dynamics: A Case Study in the Mixed Conifer/Northern Hardwoods Zone of Northern Europe. *Climatic Change*, **34**, 161-177. <http://dx.doi.org/10.1007/BF00224628>
- [52] Loustau, D., Bosc, A., Colin, A., *et al.* (2006) Modeling Climate Change Effects on the Potential Production of French Plains Forests at the Sub-Regional Level. *Tree Physiology*, **25**, 813-823. <http://dx.doi.org/10.1093/treephys/25.7.813>
- [53] Coley, P.D. (1998) Possible Effects of Climate Change on Plant/Herbivore Interactions in Moist Tropical Forests. *Climatic Change*, **39**, 315-332. http://dx.doi.org/10.1007/978-94-017-2730-3_15
- [54] Corlett, R.T. and Lafrankie Jr., J.V. (1998) Potential Impacts of Climate Change on Tropical Asian Forests through an Influence on Phenology. In: Markham, A., Ed., *Potential Impacts of Climate Change on Tropical Forest Ecosystems*, Springer, Berlin, 299-313. http://dx.doi.org/10.1007/978-94-017-2730-3_14
- [55] Condit, R., Hubbell, S.P. and Foster, R.B. (1996) Impacts of Climate Change on Natural Forest Productivity—Evidence since the Middle of the 20th Century. *Journal of Tropical Ecology*, **12**, 231-256. <http://dx.doi.org/10.1017/S0266467400009433>
- [56] Foster, P. (2001) The Potential Negative Impacts of Global Climate Change on Tropical Montane Cloud Forests. *Earth-Science Reviews*, **55**, 73-106. [http://dx.doi.org/10.1016/S0012-8252\(01\)00056-3](http://dx.doi.org/10.1016/S0012-8252(01)00056-3)
- [57] Scheller, R.M. and Mladenoff, D.J. (2005) A Spatially Interactive Simulation of Climate Change, Harvesting, Wind, and Tree Species Migration and Projected Changes to Forest Composition and Biomass in Northern Wisconsin, USA. *Global Change Biology*, **11**, 307-321. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2486.2005.00906.x>
- [58] Tommervik, H., Johansen, B., Tombre, I., *et al.* (2004) Vegetation Changes in the Nordic Mountain Birch Forest: The Influence of Grazing and Climate Change. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, **36**, 323-332. [http://dx.doi.org/10.1657/1523-0430\(2004\)036\[0323:VCITNM\]2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1657/1523-0430(2004)036[0323:VCITNM]2.0.CO;2)
- [59] Louis, R. and Prasad, A.M. (2001) Potential Changes in Tree Species Richness and Forest Community Types following Climate Change. *Ecosystems*, **4**, 186-199. <http://dx.doi.org/10.1007/s10021-001-0003-6>
- [60] Hemp, A. (2005) Climate Change-Driven Forest Fires Marginalize the Impact of Ice Cap Wasting on Kilimanjaro. *Global Change Biology*, **11**, 1013-1023. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2486.2005.00968.x>
- [61] He, H.S., Mladenoff, D.J. and Gustafson, E.J. (2002) Study of Landscape Change under Forest Harvesting and Climate Warming-Induced Fire Disturbance. *Forest Ecology and Management*, **55**, 257-270. [http://dx.doi.org/10.1016/S0378-1127\(01\)00563-1](http://dx.doi.org/10.1016/S0378-1127(01)00563-1)
- [62] Flannigan, M., Stocks, B., Turetsky, M. and Wotton, M. (2009) Impacts of Climate Change on Fire Activity and Fire Management in the Circumboreal Forest. *Global Change Biology*, **15**, 549-560. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2486.2008.01660.x>
- [63] Spring, D., Kennedy, J.O.S. and Nally, R.M. (2005) Optimal Management of a Forested Catchment Providing Timber and Carbon Sequestration Benefits: Climate Change Effects. *Global Environmental Change*, **15**, 281-292. <http://dx.doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2005.04.002>
- [64] Alig, R., Adams, D., McCarl, B., Callaway, J.M. and Winnett, S. (1997) Assessing Effects of Mitigation Strategies for Global Climate Change with an Intertemporal Model of the US Forest and Agriculture Sectors. *Environmental and Resource Economics*, **9**, 259-274. <http://dx.doi.org/10.1007/BF02441399>
- [65] Lindner, M. (2000) Developing Adaptive Forest Management Strategies to Cope with Climate Change. *Tree Physiology*, **20**, 299-307. <http://dx.doi.org/10.1093/treephys/20.5-6.299>
- [66] Laurance, W.F. (1998) A Crisis in the Making: Responses of Amazonian Forests to Land Use and Climate Change. *Tree*, **13**, 411-415. [http://dx.doi.org/10.1016/s0169-5347\(98\)01433-5](http://dx.doi.org/10.1016/s0169-5347(98)01433-5)
- [67] Bodin, P. and Wiman, B.L.B. (2007) The Usefulness of Stability Concepts in Forest Management When Coping with Increasing Climate Uncertainties. *Forest Ecology and Management*, **242**, 541-552.

- <http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2007.01.066>
- [68] Hurteau, M.D., Hungate, B.A. and Koch, G.W. (2009) Accounting for Risk in Valuing Forest Carbon Offsets. *Carbon Balance and Management*, **4**, 1-5. <http://dx.doi.org/10.1186/1750-0680-4-1>
- [69] Canadell, J.G. and Raupach, M.R. (2008) Managing Forests for Climate Change Mitigation. *Science*, **320**, 1456-1457. <http://dx.doi.org/10.1126/science.1155458>
- [70] Dunn, A.L., Barford, C.C., Wofsy, S.C., *et al.* (2006) A Long-Term Record of Carbon Exchange in a Boreal Black Spruce Forest: Means, Responses to Interannual Variability, and Decadal Trends. *Global Change Biology*, **13**, 577-590. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2486.2006.01221.x>
- [71] Lal, R. (2005) Forest Soils and Carbon Sequestration. *Forest Ecology and Management*, **220**, 242-258. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2005.08.015>
- [72] Hashimoto, S., Ugawa, S., Nanko, K. and Shichi, K. (2012) The Total Amounts of Radioactively Contaminated Materials in Forests in Fukushima, Japan. *Scientific Reports*, **22**, 416-420. <http://dx.doi.org/10.1038/srep00416>
- [73] Shanin, V.N., Komarov, A.S., Mikhailov, A.V. and Bykhovets, S.S. (2011) Modelling Carbon and Nitrogen Dynamics in Forest Ecosystems of Central Russia under Different Climate Change Scenarios and Forest Management Regimes. *Ecological Modelling*, **222**, 2262-2275. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2010.11.009>
- [74] Bazzaz, F.A. (1998) Tropical Forests in a Future Climate: Changes in Biological Diversity and Impact on the Global Carbon Cycle. *Climatic Change*, **39**, 317-336. <http://dx.doi.org/10.1023/A:1005359605003>
- [75] Dai, L., Jia, J., Yu, D., *et al.* (2013) Effects of Climate Change on Biomass Carbon Sequestration in Old-Growth Forest Ecosystems on Changbai Mountain in Northeast China. *Forest Ecology and Management*, **300**, 106-116. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2012.06.046>
- [76] Mäkipää, R., Karjalainen, T., Pussinen, A. and Kellomäki, S. (1999) Effects of Climate Change and Nitrogen Deposition on the Carbon Sequestration of a Forest Ecosystem in the Boreal Zone. *Canadian Journal of Forest Research*, **29**, 1490-1501. <http://dx.doi.org/10.1139/x99-123>
- [77] Zhao, J., Yan, X., Jia, G. (2012) Simulating Net Carbon Budget of Forest Ecosystems and Its Response to Climate Change in Northeastern China Using Improved FORCCHN. *Chinese Geographical Science*, **22**, 29-41. <http://dx.doi.org/10.1007/s11769-012-0512-6>
- [78] Karjalainen, T., LiskiJari, P.A., *et al.* (2003) Scenario Analysis of the Impacts of Forest Management and Climate Change on the European Forest Sector Carbon Budget. *Forest Policy and Economics*, **5**, 141-155. [http://dx.doi.org/10.1016/S1389-9341\(03\)00021-2](http://dx.doi.org/10.1016/S1389-9341(03)00021-2)
- [79] Solomon, A.M. and Leemans, R. (1997) Boreal Forest Carbon Stocks and Wood Supply: Past, Present and Future Responses to Changing Climate, Agriculture and Species Availability. *Agricultural and Forest Meteorology*, **84**, 137-151. [http://dx.doi.org/10.1016/S0168-1923\(96\)02382-9](http://dx.doi.org/10.1016/S0168-1923(96)02382-9)
- [80] 颜廷武, 尤文忠. 森林生态系统应对气候变化响应研究综述[J]. 环境保护与循环经济, 2010, 30(12): 70-73.

期刊投稿者将享受如下服务:

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: wjf@hanspub.org