

火干扰对森林碳库影响的量化研究进展*

杨 达^{1,2} 吴志伟¹ 梁 宇¹ 贺红士¹

(1 中国科学院沈阳应用生态研究所森林与土壤生态国家重点实验室, 沈阳 110016;

2 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 火干扰是森林生态系统的主要干扰因子之一, 会对森林碳储量和碳动态产生重要影响。准确量化火干扰对森林中各碳库的影响程度, 对国家及全球碳预算具有重要意义。文中对国内外火干扰下森林碳储量的研究现状、研究方法和研究内容进行了综述。大量研究表明, 燃烧效率、火烧烈度等关键因子的准确量化是精确估算火干扰对森林碳储量影响的基础, 火烧样地调查与遥感反演法和模型模拟法的综合运用有利于精确量化火干扰下的森林碳库, 各种火烧数据源的同化处理是准确揭示火干扰对森林碳库影响的重要保证。在此基础上, 提出一些更加准确量化火干扰对森林碳储量影响的研究途径, 并对未来的研究方向进行了展望。

关键词: 火干扰 碳排放 森林碳库 碳储量 碳动态

中图分类号: Q149 S762

文献标识码: A

文章编号: 1001-4241(2015)01-0037-06

DOI: 10.13348/j.cnki.sjlyyj.2015.01.006

Research Progress on Quantifying the Influence of Fire Disturbance on Forest Carbon Sink

Yang Da^{1,2} Wu Zhiwei¹ Liang Yu¹ He Hongshi¹

(1 State Key Laboratory of Forest and Soil Ecology, Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Science, Shenyang 110016, China;

2 University of Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China)

Abstract: Fire disturbance, one of the principal interferential factors to forest ecosystem, has a significant impact on forest carbon storage and dynamics. Accurate quantification of the influence of fire disturbance on forest carbon sinks is of great importance to national and global carbon budget. This article reviewed the research state, methods and contents at home and abroad of forest carbon storage under fire disturbance advances. The numerous researches indicated that the accurate quantification of key factors including combustion efficiency and fire severity is fundamental to estimate precisely the influence of fire disturbance on forest carbon storage; the comprehensive utilization of fire sample plot survey, remote sensing inversion method and model simulation method help quantify precisely forest carbon sinks under the interference of fire; assimilation processing of various fire data is an important guarantee to indicate fire disturbance influence on forest carbon sinks. Based on the above results, some research approaches were proposed for more accurate quantification of the effect of fire disturbance on forest carbon storage, and the future research direction were prospected.

Key words: fire disturbance, carbon emissions, forest carbon sink, carbon storage, carbon dynamics

火干扰是自然界普遍存在的干扰之一, 是地球上许多森林生态系统得以维持和发展的原始动

力^[1]。火干扰会严重影响森林碳储量和碳分配格局, 且不同火烧烈度对森林碳储量的影响不同。同

* 收稿日期: 2014-08-05; 修回日期: 2014-09-17

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(41371199); 国家自然科学基金面上项目(31370483); 国家自然科学基金青年基金项目(31200362)

作者简介: 杨达(1986-), 男, 硕士研究生, E-mail: yangda12@mails.ucas.ac.cn

通信作者: 贺红士(1962-), 男, 研究员, 博士生导师, E-mail: HeH@missouri.edu

时,火烧与植被类型、林分年龄、林分密度和景观结构等交互作用,共同控制着碳库动态^[2]。林火发生时,林分中大量的碳被释放到大气中,直接造成森林碳库的重大损失;林火发生后,林分结构和功能均发生改变,从而影响了森林碳循环,改变森林碳动态,促进林分碳源和碳汇互相转化。因此,揭示林火干扰特征对森林碳库的影响机制能为火烧迹地碳恢复和提高森林碳储量估算精度提供科学支持。

目前,国内外关于火干扰对森林碳库影响的研究已有大量报道。国外研究主要包括对森林火干扰下碳释放^[3]、碳储量^[4-5]、碳分布^[6]、碳动态^[7]、碳平衡^[8]、碳循环^[9]等研究。国内学者研究了火干扰对生态系统碳储量^[10]、碳素分布^[11]和碳循环^[12]的影响,探讨了火干扰对森林碳汇^[13]、森林土壤碳储量^[14]、土壤有机碳含量及其空间分布^[11]、森林碳排放^[15]以及碳动态^[16]的影响。同时,在我国东北地区开展了林火特征分析^[17-19]、火灾发生的驱动力和空间格局及其在气候变化下的趋势分析^[20]、火干扰的长期模拟^[21-23]、火烧迹地植被恢复^[24-25]、可燃物载量及可燃物模型^[26-28]、火烧烈度调查提取^[29-31]等方面的基础研究工作。这些研究都在一定程度上直接或间接地揭示了火干扰对森林碳库的影响,为以后火干扰下森林碳储量的精确量化研究奠定了基础。

1 研究方法

适合的研究方法是准确量化火干扰对森林碳库影响的重要保证。目前探究火干扰对森林碳库影响的方法主要包括样地调查法^[11,14]、遥感反演法^[32-34]和模型模拟法^[9,16,22,35-36]等。

火烧样地调查主要是通过选择典型的火烧迹地,同时尽可能消除林分状况、立地条件等重要非实验因素的影响,再结合未火烧林分碳储量状况进行对比分析,来揭示火干扰对森林碳储量的影响程度。样地调查法得到的研究结果精度较高,但只适用于小尺度(样点和林分水平)上的研究。Seedre等^[37]探讨了火干扰和采伐后北方幼龄林的生态系统碳储量恢复情况;周文昌等^[14]分析了火干扰对小兴安岭白桦沼泽和落叶松-苔草沼泽凋落物及土壤碳储量的影响;邵帅等^[38]研究了大兴安岭天然针叶林不同强度火干扰10年后土壤有机碳含量的变化情况。通过火烧样地调查,能为大尺度上的研究提供可靠的数据和验证基础。

遥感反演火干扰下的森林碳储量是指根据遥感影像信息,借鉴遥感指数对森林中火烧面积和火烧烈度进行提取,再结合野外取样验证来定量探讨火干扰下的森林碳储量状况。遥感方法可应用于大尺度(景观、区域及全球尺度)上林火对碳储量的影响研究,且能够排除调查方式不同和人为因素造成的不确定性,但在遥感信息解译和反演精度方面有待进一步提高。王晓莉等^[30]基于TM影像和3S技术手段,利用NBR指数对1986—2010年大兴安岭呼中林区森林过火区林火烈度进行了定量评价;毛学刚^[32]以遥感过程机理模型为主要研究手段,对2007年黑龙江省森林生产力进行了定量估算;吴志伟等^[2]通过陆地资源卫星(LANDSAT)影像数据,研究了植被地形对火烧烈度的相对贡献;Hicke等^[34]运用遥观测分析了北美北方森林净初级生产力的火后响应机制;Amiro等^[39]结合遥感和通量塔数据对加拿大西部北方森林过火后的CO₂通量进行了研究。遥感反演法十分有利于大尺度上的林火研究,已经成为研究和评价林火干扰对森林碳库影响的重要方法。

模型模拟是依据野外观测试验数据,构建出适用于动态分析观测数据以及在此基础上实现对生态过程和功能的定性描述或定量模拟的模型,来预测火烧下的森林碳动态变化规律,揭示过去、现在或未来的碳储量变化状况。常用于碳循环和碳动态序列分析的模型主要有基于林分发展演替的碳循环模拟^[16,22,40]、基于遥感反演的碳循环模拟^[32,34,39]和基于火干扰引起的生态系统功能变化的生物地球化学模拟^[41-43]等,如空间直观景观模型(LANDIS)^[22]、碳循环日步长模型和遥感过程机理模型^[32]等。这些模型模拟的优势在于其强大的预测能力,其能够揭示火干扰对森林碳库的长期影响状况,从而为林火管理提供指导;不足之处是模型的构建及其参数化比较复杂,参数调整不当可能会造成模拟结果的不确定性。

2 研究内容

火干扰会对森林碳库产生重要影响,其研究内容主要包括火灾发生时的碳排放量研究,火干扰对森林各碳库(活植被碳库、死植被碳库、凋落物和有机土壤碳库)的影响研究和火干扰下的森林碳动态分析研究等。

2.1 火灾碳排放量估算

火干扰作为森林生态系统碳循环的重要影响因

子,改变了整个森林生态系统的格局与过程,对全球的碳循环产生重要影响。全球平均每年大约有 1% 的森林遭受火干扰^[44],火灾发生时排放大量含碳气体是对森林生态系统碳库的最直接影响,造成森林碳的净损失^[12]。火灾发生时排放的主要含碳气体包括 CO₂、CO 和 CH₄^[45]。全球森林火灾排放的 CO₂、CO 和 CH₄ 的总量分别占全球所有排放量的 45%、21% 和 44%^[46]。因此,火干扰会造成大量的碳排放。

Kukavskaya 等^[47]估算了西伯利亚火灾的碳排放,并分析了火烧面积和可燃物消耗估算的不确定性;魏书精^[15]探讨了黑龙江省森林火灾碳排放定量评价方法,估算了黑龙江省温带林森林火灾碳排放量及单位面积碳排放量,结果表明,1953—2012 年的 60 年间森林火灾碳排放量为 5 880 万 t,年均排放量为 98 万 t,约占全国年均森林火灾碳排放量的 8.66%。此外,Vasconcelos 等^[3]对巴西西南部森林火烧面积及其潜在碳排放进行了估算;French 等^[36]采用 6 种模型对北美林火碳释放量进行了比较分析。这些研究都有助于揭示火灾对森林碳库的直接影响,也为全球碳排放估算提供了数据支持。

2.2 火干扰对森林各碳库分配格局的影响

林火干扰是影响和破坏森林碳库最为激烈的因子,能瞬间造成陆地碳库(活植被物、死植被物、凋落物和有机土壤碳库)的碳释放,并直接向大气中释放大量的温室气体^[48],可改变整个生态系统的碳循环过程和分布格局。一些学者还探讨了火干扰对森林碳储量和碳汇的影响^[4]以及火干扰对碳分布格局的影响^[6,49]。

火干扰会对森林植被碳库产生重要影响。王长龙等^[50]对森林火灾后蒙古栎林碳素分布及储量进行了分析,结果表明,森林火灾发生后蒙古栎林地上部分的碳储量表现为减少;闫平和王景升^[51]分析了森林火灾对兴安落叶松林生态系统碳素分布及储量的影响,结果表明,火干扰后森林植被部分的干、枝、叶和根的碳储量都减少,其他组分因林分类型而异;张瑶^[52]分析了大兴安岭 26 年间林火对森林植被碳收支的影响,结果表明,26 年间大兴安岭地区的森林在林火影响下向大气释放的碳大于其生长恢复过程中所固定的碳;Seedre 和 Chen^[53]对火后和采伐后地上活植被碳动态进行了比较分析。

地上死木质残体由掉落的木质碎片、枯立木和树

桩组成,它是森林生态系统的重要组成部分^[54-55],在森林结构和功能上起着重要作用。同时森林粗木质残体也是生态系统中不可或缺的重要碳库^[56],其储量占到全球森林生物量的 10% 以上。林火能在林木生长的各个时期影响火烧前后粗木质残体的储量^[57],导致其碳储量的变化^[51]。近年来,王文娟等^[58]研究了大兴安岭呼中林区火烧迹地的粗木质残体特征,结果表明,呼中林区火烧迹地粗木质残体贮量在 24.87~180.98 m³/hm²,且不同年份火烧迹地之间差异显著;刘会锋等^[59]比较了 2 种火烧强度对大兴安岭林区偃松—落叶松林中粗木质残体的影响,结果表明,未火烧原始林和火烧林的粗木质残体材积之间有差异,火烧林分的粗木质残体蓄积量增加明显,说明火烧可以增加森林粗木质残体的输入量。

北方森林储存着大量的有机碳,尤其是土壤碳库^[60],对火干扰十分敏感^[61]。研究表明,土壤是陆地生态系统最大的碳库,是森林生态系统碳循环的重要组成部分^[11];火干扰对森林生态系统土壤碳库的主要影响是增加土壤有机质分解、增强土壤呼吸碳释放和增加黑碳(生物质或化石燃料不完全燃烧所形成的碳物质)碳汇以及减少地上植被输入土壤的碳素^[45]。周文昌等^[14]对小兴安岭白桦(*Betula platyphylla*)沼泽和落叶松(*Larix gmelinii*)—苔草(*Carex schmidtii*)典型地段进行土壤取样,研究了火干扰对土壤碳储量(0~50 cm 土层)的影响,表明火干扰对 2 种森林沼泽土壤碳储量的影响并不显著;张懿晗^[11]探讨了火干扰对兴安落叶松林土壤有机碳储量及空间分布格局的影响程度,结果表明,0~10 cm 土层有机碳密度和储量表现为火烧后增加,10~20 cm 土层有机碳密度和储量表现为火烧后减少;闫平和王景升^[51]分析了森林火灾对兴安落叶松林生态系统碳素分布及储量的影响,结果表明,火干扰后土壤碳储量明显减少,但各层的碳储量空间分布变化不一致。

这些研究都在一定程度上量化了火干扰对森林碳库的影响程度,为进一步精确量化火干扰对森林碳储量的影响提供了基础。

2.3 火烧林分碳动态时间序列分析

火干扰会深刻影响森林的重要生态过程和功能,改变森林碳动态。Kashian 等^[4]对火后 300 年的碳储量时间序列进行了分析,Kukavskaya 等^[62]研究了不同火烧烈度下西伯利亚中部赤松林的生物量动态。通过这些研究,能比较深入地了解火干扰对森林碳的

长期影响。同时,由于火干扰对森林生态系统碳循环影响的长期性和复杂性,目前还难以对其作出定量评价。为了定量揭示火干扰对森林生态系统碳循环的影响,预测模型已渐渐成为重要的研究工具,如火灾碳排放计量模型^[63]、碳循环日步长模型和遥感过程机理模型^[32]、CENTURY 模型^[16]等。方东明等^[16]基于 CENTURY 模型模拟了火烧对大兴安岭兴安落叶松林碳动态的影响,结果表明,在不同强度火烧后,土壤总碳库呈现先升后降再逐渐恢复的变化趋势,而林分生物碳库则先降后升;轻微火烧后,兴安落叶松林仍表现为弱碳汇,并很快恢复到火烧前水平;高强度火烧对土壤和林木碳库造成严重损失,使林分在较长时间内表现为碳源。通过对火干扰下的森林碳动态时间序列分析,有助于较准确地揭示森林碳储量的长期变化情况,明确森林碳源和碳汇,从而为森林的固碳增汇和经营管理提供参考依据。

3 研究展望

1) 多种方法综合使用。由于样地调查、遥感反演和模型模拟各有优缺点,为了精确量化火干扰对森林碳储量的影响程度,需要综合使用多种研究方法,以减少研究的不确定性及提高估算精度。毛学刚^[32]把碳循环日步长模型与遥感结合起来,对中国东北森林碳循环进行了分析,初步形成了采用遥感机理模型定量估算东北森林碳循环的方法体系;Yi 等^[33]运用基于遥感的陆地碳通量模型对当前气候和火干扰下的北方生态系统生产力进行了评估。通过多种方法的综合使用,可以集成各种方法的优势,弥补单一研究方法的缺陷,使研究结果更加准确。

2) 对火烧数据进行同化处理。数据同化是在考虑数据时空分布和对模型、观测做出误差估计的基础上,在数值模型的动态运行过程中融合新的观测数据的方法,其目的是生成具有时间、空间和物理一致性的数据集^[64]。数据同化是连接观测数据和陆面过程模型的桥梁,有助于多源地理空间数据综合集成、改善环境模型模拟精度和提高遥感数据产品质量。常用的同化数据算法有三维变分算法、四维变分算法和集合卡尔曼滤波算法等经典数据同化算法,粒子滤波和层状贝叶斯网络算法等智能数据同化算法^[65]。数据同化处理能够对不同来源、不同时空尺度的火烧数据集进行优化融合,实现各火烧数据源的互相校正,减少研究结果的不确定性。

3) 精确量化火烧关键因子和参数。火烧烈度与火烧面积提取、可燃物载量调查估算和可燃物含碳率及燃烧效率测定等均是影响研究结果的关键因子。只有精确量化这些因子,才有可能实现火干扰下森林碳储量的准确估算。但是这些因子的调查与测定比较复杂,再加上这些因子与气象因子、地形因子和林分因子相互影响,使得这些因子的量化十分困难。当前火灾面积数据来源不规范、可燃物载量数据不准确、燃烧效率的确定缺乏标准^[35],而且火烧烈度的调查主要是通过综合火烧指数的定性描述进行划分,这都给研究结果带来了一些不确定性。因此,在以后的研究中要找到合适的方法来测定和量化这些关键火烧因子。此外,预测模型在研究碳库动态和碳循环中具有重要作用,但是每个模型的构建和参数化都是一个复杂的过程,其中的参数选择与调整都存在一定的不确定性,准确量化模型中各关键参数并对参数进行恰当调整将直接关系到模拟结果的准确性。所以,要不断地在模型中融入新数据并对模型进行改进和完善,使模型中各重要参数得到精确量化,这对提高研究精度十分重要。

总之,随着研究的不断深入以及研究技术和研究方法的不断完善,火干扰下森林碳储量估算的尺度推绎^[66]和最适尺度探讨,样地和景观尺度上火烧烈度^[29]和燃烧效率的量化指标构建,传统的火烧迹地野外调查与遥感反演以及模型模拟的深度耦合及综合运用,多源时空火烧数据的同化处理和同化算法研发等问题的解决,将是未来更加准确量化火干扰对森林碳库影响的关键所在。

参 考 文 献

- [1] Wallenius T H, Kuuluvainen T, Vanha - Majamaa I. Fire history in relation to site type and vegetation in Vienansalo wilderness in eastern Fennoscandia, Russia [J]. Canadian Journal of Forest Research, 2004, 34(7): 1400 - 1409.
- [2] Wu Z, He H S, Liang Y, et al. Determining relative contributions of vegetation and topography to burn severity from LANDSAT imagery [J]. Environmental Management, 2013, 52(4): 821 - 836.
- [3] Vasconcelos S S d, Fearnside P M, Graça P M L d A, et al. Forest fires in southwestern Brazilian Amazonia: estimates of area and potential carbon emissions [J]. Forest Ecology and Management, 2013, 291: 199 - 208.
- [4] Kashian D M, Romme W H, Tinker D B, et al. Postfire changes in forest carbon storage over a 300 - year chronosequence of *Pinus contorta* - dominated forests [J]. Ecological Monographs, 2013, 83

- (1): 49 - 66.
- [5] Gough C M, Vogel C S, Schmid H P, et al. Controls on annual forest carbon storage: lessons from the past and predictions for the future [J]. *Bioscience*, 2008, 58(7): 609 - 622.
- [6] Wang C K, Bond - Lambert B, Gower S T. Carbon distribution of a well - and poorly - drained black spruce fire chronosequence [J]. *Global Change Biology*, 2003, 9(7): 1066 - 1079.
- [7] Nalder I A, Wein R W. Long - term forest floor carbon dynamics after fire in upland boreal forests of western Canada [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 1999, 13(4): 951 - 968.
- [8] Chen J, Chen W J, Liu J, et al. Annual carbon balance of Canada's forests during 1895 - 1996 [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2000, 14(3): 839 - 849.
- [9] Ito A. Modelling of carbon cycle and fire regime in an east Siberian larch forest [J]. *Ecological Modelling*, 2005, 187(2/3): 121 - 139.
- [10] 牟长城, 包旭, 卢慧翠, 等. 火干扰对大兴安岭兴安落叶松瘤囊苔草湿地生态系统碳储量的短期影响 [J]. *林业科学*, 2013, 49(2): 8 - 14.
- [11] 张懿晗. 火干扰对兴安落叶松林土壤有机碳储量及空间分布格局的影响 [D]. 哈尔滨: 东北林业大学 2011.
- [12] 吕爱锋, 田汉勤, 刘永强. 火干扰与生态系统的碳循环 [J]. *生态学报*, 2005, 25(10): 2734 - 2743.
- [13] 高仲亮, 周汝良, 王军国, 等. 计划烧除对森林碳汇的影响分析 [J]. *森林防火*, 2010(2): 35 - 38.
- [14] 周文昌, 牟长城, 刘夏, 等. 火干扰对小兴安岭白桦沼泽和落叶松 - 苔草沼泽凋落物和土壤碳储量的影响 [J]. *生态学报*, 2012, 32(20): 6387 - 6395.
- [15] 魏书精. 黑龙江省森林火灾碳排放定量评价方法研究 [D]. 哈尔滨: 东北林业大学 2013.
- [16] 方东明, 周广胜, 蒋延玲, 等. 基于 CENTURY 模型模拟火烧对大兴安岭兴安落叶松林碳动态的影响 [J]. *应用生态学报*, 2012, 23(9): 2411 - 2421.
- [17] 刘志华, 杨健, 贺红士, 等. 黑龙江大兴安岭呼中林区火烧点格局分析及影响因素 [J]. *生态学报*, 2011, 31(6): 1669 - 1677.
- [18] 吴志伟, 常禹, 贺红士, 等. 大兴安岭呼中林区林火时空分布特征分析 [J]. *广东农业科学*, 2011(5): 189 - 193.
- [19] Tao J, Zhang Y J, Yuan X Y, et al. Analysis of forest fires in Northeast China from 2003 to 2011 [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2013, 34(22): 8235 - 8251.
- [20] Liu Z, Yang J, Chang Y, et al. Spatial patterns and drivers of fire occurrence and its future trend under climate change in a boreal forest of Northeast China [J]. *Global Change Biology*, 2012, 18(6): 2041 - 2056.
- [21] Chen H, Hu Y, Chang Y, et al. Simulating forest landscape change under larch caterpillar and fire disturbance in Great Xing'an Mountains, Northeastern China [C]. IEEE 10th International Conference on Computer - Aided Industrial Design & Conceptual Design 26 - 29 November 2009: 2173 - 2179.
- [22] He H S, Mladenoff D J. Spatially explicit and stochastic simulation of forest - landscape fire disturbance and succession [J]. *Ecology*, 1999, 80(1): 81 - 99.
- [23] 陈宏伟, 胡远满, 常禹, 等. 呼中林区不同森林采伐方式对林火的长期影响模拟 [J]. *北京林业大学学报*, 2011, 33(5): 13 - 19.
- [24] 王绪高, 李秀珍, 贺红士, 等. 大兴安岭北坡落叶松林火后植被演替过程研究 [J]. *生态学杂志*, 2004, 23(5): 35 - 41.
- [25] 杨健, 孔健健, 刘波. 林火干扰对北方针叶林下植被的影响 [J]. *植物生态学报*, 2013, 37(5): 474 - 480.
- [26] Wu Z W, He H S, Chang Y, et al. Development of customized fire behavior fuel models for boreal forests of Northeastern China [J]. *Environmental Management*, 2011, 48(6): 1148 - 1157.
- [27] 刘志华, 常禹, 陈宏伟, 等. 大兴安岭呼中林区地表死可燃物载荷量空间格局 [J]. *应用生态学报*, 2008, 19(3): 487 - 493.
- [28] 王文娟, 常禹, 刘志华, 等. 大兴安岭呼中林区地表死可燃物含水量及其环境梯度分析 [J]. *生态学杂志*, 2009, 28(2): 209 - 215.
- [29] Wu Z, He H S, Bobryk C W, et al. Scale effects of vegetation and topography on burn severity under prevailing fire weather conditions in boreal forest landscapes of Northeastern China [J]. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 2014, 29(1): 60 - 70.
- [30] 王晓莉, 王文娟, 常禹, 等. 基于 NBR 指数分析大兴安岭呼中森林过火区的林火烈度 [J]. *应用生态学报*, 2013, 24(4): 967 - 974.
- [31] 常禹, 陈宏伟, 胡远满, 等. 林火烈度评价及其空间异质性研究进展 [J]. *自然灾害学报*, 2012, 21(2): 28 - 34.
- [32] 毛学刚. 东北森林碳循环日步长模型与遥感综合应用研究 [D]. 哈尔滨: 东北林业大学 2011.
- [33] Yi Y H, Kimball J S, Jones L A, et al. Recent climate and fire disturbance impacts on boreal and arctic ecosystem productivity estimated using a satellite - based terrestrial carbon flux model [J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2013, 118(2): 606 - 622.
- [34] Hicke J A, Asner G P, Kasichke E S, et al. Postfire response of North American boreal forest net primary productivity analyzed with satellite observations [J]. *Global Change Biology*, 2003, 9(8): 1145 - 1157.
- [35] 胡海清, 魏书精, 金森, 等. 森林火灾碳排放计量模型研究进展 [J]. *应用生态学报*, 2012, 23(5): 1423 - 1434.
- [36] French N H F, de Groot W J, Jenkins L K, et al. Model comparisons for estimating carbon emissions from North American wildland fire [J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2011, 116(G4): 1 - 21.
- [37] Seedre M, Taylor A R, Brassard B W, et al. Recovery of ecosystem carbon stocks in young boreal forests: a comparison of harvesting and wildfire disturbance [J]. *Ecosystems*, 2014, 17(5): 851 - 863.
- [38] 邵帅, 韩春兰, 王秋兵, 等. 大兴安岭天然针叶林不同强度火干扰 10 年后土壤有机碳含量变化 [J]. *水土保持学报*, 2012, 26(5): 201 - 205 210.
- [39] Amiro B D, Ian MacPherson J, Desjardins R L, et al. Post - fire

- carbon dioxide fluxes in the western Canadian boreal forest: evidence from towers, aircraft and remote sensing[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2003, 115(1): 91-107.
- [40] Kurz W A, Apps M J. A 70-year retrospective analysis of carbon fluxes in the Canadian forest sector[J]. *Ecological Applications*, 1999, 9(2): 526-547.
- [41] Zhuang Q, McGuire A D, O'Neill K P, et al. Modeling soil thermal and carbon dynamics of a fire chronosequence in interior Alaska[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres (1984 - 2012)*, 2002, 107(D1): FFR 3: 1-26.
- [42] McGuire A, Sitch S, Clein J, et al. Carbon balance of the terrestrial biosphere in the twentieth century: analyses of CO₂, climate and land use effects with four process-based ecosystem models[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2001, 15(1): 183-206.
- [43] O'Neill K P, Kasischke E S, Richter D D. Seasonal and decadal patterns of soil carbon uptake and emission along an age sequence of burned black spruce stands in interior Alaska[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres (1984 - 2012)*, 2003, 108(D1): FFR 11: 11-15.
- [44] Crutzen P J, Heidt L E, Krasnec J P, et al. Biomass burning as a source of atmospheric gases CO, H₂, N₂O, NO, CH₃Cl and COS[J]. *Nature*, 1979, 282: 253-256.
- [45] 胡海清, 魏书精, 孙龙, 等. 气候变化、火干扰与生态系统碳循环[J]. *干旱区地理*, 2013, 36(1): 57-75.
- [46] 王效科, 庄亚辉, 冯宗炜. 森林火灾释放的含碳温室气体量的估计[J]. *环境科学进展*, 1998, 6(4): 2-16.
- [47] Kukavskaya E A, Soja A J, Petkov A P, et al. Fire emissions estimates in Siberia: evaluation of uncertainties in area burned, land cover, and fuel consumption[J]. *Canadian Journal of Forest Research - Revue Canadienne De Recherche Forestiere*, 2013, 43(5): 493-506.
- [48] Kasischke E S, Hoy E E. Controls on carbon consumption during Alaskan wildland fires[J]. *Global Change Biology*, 2012, 18(2): 685-699.
- [49] Berner L T, Beck P S A, Lorant M M, et al. *Cajander larch (Larix cajanderi)* biomass distribution, fire regime and post-fire recovery in northeastern Siberia[J]. *Biogeosciences*, 2012, 9(10): 3943-3959.
- [50] 王长龙, 任生, 陈晓才. 森林火灾后蒙古栎林碳素分布及储量的分析[J]. *吉林林业科技*, 2010, 39(1): 1-4, 7.
- [51] 闫平, 王景升. 森林火灾对兴安落叶松林生态系统碳素分布及储量的影响[J]. *东北林业大学学报*, 2006, 34(4): 46-48.
- [52] 张瑶. 大兴安岭26年间林火对森林植被碳收支的影响[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2009.
- [53] Seedre M, Chen H Y H. Carbon dynamics of aboveground live vegetation of boreal mixedwoods after wildfire and clear-cutting[J]. *Canadian Journal of Forest Research - Revue Canadienne De Recherche Forestiere*, 2010, 40(9): 1862-1869.
- [54] Brassard B W, Chen H Y. Stand structural dynamics of North American boreal forests[J]. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 2006, 25(2): 115-137.
- [55] Seedre M, Taylor A R, Chen H Y H, et al. Deadwood density of five boreal tree species in relation to field-assigned decay class[J]. *Forest Science*, 2013, 59(3): 261-266.
- [56] Liu W H, Bryant D M, Hutyra L R, et al. Woody debris contribution to the carbon budget of selectively logged and maturing mid-latitude forests[J]. *Oecologia*, 2006, 148(1): 108-117.
- [57] Seedre M, Shrestha B M, Chen H Y H, et al. Carbon dynamics of North American boreal forest after stand replacing wildfire and clearcut logging[J]. *Journal of Forest Research*, 2011, 16(3): 168-183.
- [58] 王文娟, 常禹, 刘志华, 等. 大兴安岭呼中林区火烧迹地粗木质残体特征[J]. *应用生态学报*, 2009, 20(8): 1805-1810.
- [59] 刘会锋, 陈冰, 周翠鸣, 等. 2种火烧强度对大兴安岭偃松落叶松林粗木质残体的影响[J]. *林业资源管理*, 2011(1): 72-77.
- [60] McGuire A D, Anderson L G, Christensen T R, et al. Sensitivity of the carbon cycle in the Arctic to climate change[J]. *Ecological Monographs*, 2009, 79(4): 523-555.
- [61] Rogers B, Veraverbeke S, Azzari G, et al. Quantifying fire-wide carbon emissions in interior Alaska using field measurements and landsat imagery[J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2014, 119(8): 1608-1629.
- [62] Kukavskaya E A, Ivanova G A, Conard S G, et al. Biomass dynamics of central Siberian Scots pine forests following surface fires of varying severity[J]. *International Journal of Wildland Fire*, 2014, 23(6): 872-886.
- [63] 刘斌, 田晓瑞. 林火碳排放模型研究进展[J]. *世界林业研究*, 2010, 23(6): 35-39.
- [64] 宫鹏. 遥感科学与技术中的一些前沿问题[J]. *遥感学报*, 2009, 13(1): 13-23.
- [65] 马建文, 秦思娴. 数据同化算法研究现状综述[J]. *地球科学进展*, 2012, 27(7): 747-757.
- [66] 梁宇, 贺红士, 胡远满, 等. 空间异质性对样地数据空间外推的影响[J]. *应用生态学报*, 2012, 23(1): 185-192.