

DOI: 10.5846/stxb201212091770

魏书精, 罗碧珍, 孙龙, 胡海清. 黑龙江省温带森林火灾碳排放的计量估算. 生态学报 2014, 34(11): 3048–3063.

Wei S J, Luo B Z, Sun L, Hu H Q. Estimates of carbon emissions caused by forest fires in the temperate climate of Heilongjiang Province, China, from 1953 to 2012. Acta Ecologica Sinica 2014, 34(11): 3048–3063.

黑龙江省温带森林火灾碳排放的计量估算

魏书精, 罗碧珍, 孙龙, 胡海清*

(东北林业大学 林学院, 哈尔滨 150040)

摘要: 森林火灾干扰作为森林生态系统重要的干扰因子, 剧烈地改变着森林生态系统的结构、功能、格局与过程, 对区域乃至全球的碳循环与碳平衡产生重要影响。随着全球气候变暖, 森林火灾干扰的频率和强度进一步加剧, 其排放的含碳气体对大气中温室气体浓度的贡献率更大, 进而加快气候变暖的速率。科学有效地对森林火灾碳排放及含碳气体排放量进行计量估算, 对了解区域乃至全球的碳循环及碳平衡具有重要的理论价值和实践意义。根据黑龙江省温带森林 1953—2012 年火灾统计资料和森林调查数据, 结合地理信息系统 GIS 技术, 通过野外火烧迹地调查以及实验室的控制环境实验来确定森林火灾碳排放计量中的各种参数, 在林分水平上, 利用排放因子的方法, 估算了黑龙江省温带森林 60 年间火灾碳排放量和含碳气体排放量。结果表明: 黑龙江省温带森林 60 年间火灾碳排放量为 5.88×10^7 t, 年均排放量为 9.80×10^5 t, 约占全国年均森林火灾碳排放量的 8.66%; 含碳气体 CO_2 、 CO 、 CH_4 和非甲烷烷烃 (nonmethane hydrocarbons, NMHC) 的排放量分别为 1.89×10^8 、 1.06×10^7 、 6.33×10^5 和 4.43×10^5 t, 含碳气体 CO_2 、 CO 、 CH_4 和 NMHC 的年均排放量分别为 3.15×10^6 、 1.77×10^5 、 1.05×10^4 和 7.38×10^3 t, 分别占全国年均森林火灾各含碳气体排放量的 7.74%、6.52%、9.42% 和 6.53%。研究发现针阔混交林型的森林火灾面积占总过火林地面积的 57.54%, 由于其燃烧效率较低, 在森林火灾中的碳排放量仅占排放总量的 38.57%; 尤其是针阔混交林森林火灾面积占总过火林地面积的 20.71%, 而碳排放量仅占总排放量的 9.67%; 且 CO_2 的排放因子较低, 其 CO_2 排放量仅占总排放量的 8.95%。同时研究表明, 黑龙江省温带森林年均的碳排放对该区域的碳循环与碳平衡产生重要影响, 并针对研究结果提出了应对气候变化的森林经营可持续管理策略, 亦提出了科学的林火管理策略及其合理化的林火管理路径。

关键词: 碳排放; 含碳气体排放; 森林火灾; 林火管理路径; 黑龙江省

Estimates of carbon emissions caused by forest fires in the temperate climate of Heilongjiang Province, China, from 1953 to 2012

WEI Shujing, LUO Bizhen, SUN Long, HU Haiqing*

College of Forestry, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China

Abstract: As global climate change continues to accelerate, the frequency and intensity of forest fires continue to grow. Forest fires, which play an important ecological role in forest ecosystems, have a very significant effect on carbon emissions and carbon sinks, and also play an important role in the carbon cycle. Although the impact of forest fires on carbon emissions has been analyzed in detail, studies that scientifically and accurately measure carbon and carbonaceous gas emissions from forest fires are lacking. Carbon dioxide (CO_2) emissions from temperate forest fires are usually calculated based on Intergovernmental Panel on Climate Change guidelines (IPCC 1997) and only include direct effects of burning. Forest fires have been shown to release significant amounts of carbon into the atmosphere and play a significant role in the

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2011BAD37B01); 973 项目(2011CB403203); 国家自然科学基金项目(31070544, 51208244); 黑龙江省科技攻关重点项目(GA09B201-06); 林业公益性行业科研专项(201004003-6); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(DL12CA07); 霍英东基金基础项目(131029) 资助

收稿日期: 2012-12-09; 网络出版日期: 2013-07-16

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: weishujing2003@163.com

<http://www.ecologica.cn>

global carbon cycle and carbon balance. In this study, we estimated the level of emissions from forest fires for carbon and carbonaceous gases including CO_2 , carbon monoxide (CO), methane (CH_4), and non-methane hydrocarbons (NMHC) from 1953 to 2012 in Heilongjiang Province, China. We used a geographic information system based modeling approach to simulate emissions using a two-step procedure. First, we calculated total carbon released from forest fires in Heilongjiang for selected years between 1953 and 2012 by merging and analyzing measurements of several parameters. Second, we calculated the amounts of four carbonaceous gases released during the burn, CO_2 , CO, CH_4 , and NMHC, using several different experimentally derived emission factors. The origin of each of the inputs used in our models was based on a combination of analysis of forest fire inventory, forest resources inventory, field research, and laboratory experiments. Direct total carbon emissions from forest fires in Heilongjiang during 1953—2012 were about 5.88×10^7 t, and mean annual carbon emissions were about 9.80×10^5 t per year, accounting for 8.66% of the direct total carbon emissions from forest fires in China. Carbon emissions of four trace gases, CO_2 , CO, CH_4 and NMHC, from forest fires were 1.89×10^8 , 1.06×10^7 , 6.33×10^5 and 4.43×10^5 t, respectively; mean annual emissions of CO_2 , CO, CH_4 and NMHC were 3.15×10^6 , 1.77×10^5 , 1.05×10^4 and 7.38×10^3 t, respectively, accounting for 7.74%, 6.52%, 9.42% and 6.53% of the amounts of CO_2 , CO, CH_4 and NMHC released from forest fires in China, respectively, during that period. Our results indicate that combustion efficiency of coniferous broad-leaved mixed forest is lower than other forest types. The mean annual burned area for this type of forest accounts for 57.54% of China's total burn area, while this area's fires account for only 38.57% of carbon total emissions from forest fires. We propose the following forest fire management strategy. First, our studies show that the area's mean annual forest fire carbon emissions have an important impact on the regional carbon balance. So, we suggest strengthening the management of forest fuels (fine fuels, heavy fuels, etc.) as part of the regional forest fire management strategy. Fuels on the ground do not decompose easily in Heilongjiang's cold and dry temperate forests. Land managers should implement a reasonable prescribed burning plan designed to reduce the accumulation of combustible fuels. A policy for conducting periodic prescribed burning will reduce the incidence of forest fires. Prescribed burning should help land managers to control and limit the incidence and intensity of wildfires while allowing them to improve the condition of the ecosystem. Finally, we should give full consideration to the role of forest fires in maintaining the ecological balance of forest ecosystems.

Key Words: carbon emissions; carbonaceous gases emissions; forest fire; forest fire management path; Heilongjiang Province

全球变化是人类共同面临的一个复杂系统的科学问题,气候变暖已成为国际社会日益广泛关注的热点问题^[1-2]。工业革命以来,由于人类大量使用煤炭、石油和天然气等化石燃料,以及加速毁林等活动,导致向大气中排放 CO_2 的平均浓度从过去 42 万年中的 $180\text{—}300 \mu\text{mol/L}$ ^[3],上升到 2011 年的 $390 \mu\text{mol/L}$ ^[4]。在过去的几十年里,大气 CO_2 浓度增加的 70%—90% 来自化石燃料的燃烧,其余 10%—30% 主要由于土地利用的变化所致,特别是森林的破坏。由于大气 CO_2 浓度增加导致了明显的温室效应,并影响到全球碳循环,特别是森林生态系统碳循环,因此相关研究已经引起了学者们的极大关注^[5]。森林火灾干扰作为森林生态系统重要的生态过程,

是森林生态系统碳减排增汇效应的重要影响因子,在生态系统碳循环中发挥重要作用。各种预测模型显示,未来气候变暖将不断加剧,必将使森林火灾干扰发生的频率和强度增加^[1,6-8]。为此加强气候变暖背景下森林火灾干扰对森林生态系统碳循环的影响研究,科学有效地对森林火灾碳排放及含碳气体排放量进行计量估算,对了解区域和全球的碳循环及碳平衡具有重要的意义。同时对正确理解气候变暖、火干扰与森林生态系统碳循环之间的交互作用关系,在气候变暖的背景下,科学制定减缓气候变化速率的林火管理策略,并有利于发挥火因子在碳汇效应中的作用,实现森林生态系统碳平衡,促进森林生态系统碳循环的优化和碳汇效应的最大化,实现

森林生态系统的可持续发展等方面均有重要意义。

国外学者较早就开始研究森林火灾碳排放以及气体排放量的问题^[9]。随着大气中温室气体浓度剧增,温室效应造成的全球气候变暖越来越引起学者们的广泛关注,森林火灾作为温室气体的主要来源之一,作为温室效应的重要驱动力之一,加拿大、美国、俄罗斯等国的研究者估测了森林火灾直接气体排放,并估算了全球森林火灾碳排放^[10]。国外学者采用不同方法估算了森林火灾排放的碳量及含碳气体量。通过室内模拟试验和野外观测,Aulair和Carter^[11]对加拿大、俄罗斯和阿拉斯加北方森林因森林火灾的碳排放量进行了估算。Amiro等^[12]对1959—1999年加拿大森林火灾碳排放进行了估算。利用统计数据及相关参数,Choi等^[13]研究了韩国森林火灾气体排放量;Kasischke和Bruhwiler^[14]通过大量实验研究了北方森林的森林火灾气体排放量;Lavoue和Stocks^[15]估算了加拿大森林火灾痕量气体排放量;French等^[16]研究了阿拉斯加的森林火灾碳排放计量问题;French等^[17]对林火干扰中所排放的痕量气体进行了估算。随着遥感技术的发展,用遥感估测计量森林火灾碳排放的各计量参数取得较大进展^[18-19]。Isaev^[20]应用多光谱高分辨率卫星图像、大尺度航空摄影和从国家安全系统空间站获得的解密图像估算了俄罗斯森林火灾碳排放量。Zhang^[21]应用SPOT卫星图像估算了每月燃烧区域和碳排放。Kasischke等^[22]采用遥感影像对阿拉斯加林火面积;Cahoon等^[18]通过遥感影像估算了我国东北及西伯利亚的森林火灾碳排放。国外计量森林火灾碳排放的研究,促进人们了解森林火灾与生态系统碳平衡之间的关系,但许多研究不经过实验测定,导致碳排放计量结果存在较大的不确定性。

近年来,随着对气候变化问题的普遍关注,国内学者们亦研究了我国森林火灾气体排放问题。通过借鉴国外相关排放参数及森林火灾统计数据的方法,王效科等^[23]研究了我国森林火灾排放的CO₂、CO和CH₄量。田晓瑞等^[24]根据森林火灾统计资料对火灾碳排放进行了估测。吕爱锋等^[1,25]对森林火灾干扰过程中含碳痕量气体排放问题进行了全面阐述。Lü等^[26]根据森林火灾统计资料对火灾碳排放进行了估测。采用国外碳排放参数的方法,胡海清和孙龙^[27]对大兴安岭林区1980—1999年间主要森

林类型中灌木、草本和地被物因森林火灾排放的碳量及主要含碳温室气体量进行了估算。孙龙等^[28]对1987年大兴安岭的森林火灾气体排放进行了估算;胡海清和李敖彬^[29]对黑龙江省主要乔灌木燃烧过程的烟气释放特征进行了测定。杨国福等^[30]研究了浙江省1991—2006森林火灾气体排放问题。田晓瑞等^[31]估算了2005—2007年大兴安岭森林火灾碳排放。Sun等^[32]对大兴安岭1980—1999年森林火灾碳排放进行了估测。黄麟等^[33]对1950—2008年江西省森林火灾的碳排放进行了估算。胡海清等^[4]对气候变暖背景下森林火灾干扰对森林生态系统碳循环的影响进行了全面阐述。胡海清等^[19]对森林火灾碳排放计量模型、计量森林火灾碳排放中的不确定性因子进行了论述。胡海清等^[5,34-35]在不同时间尺度(长期、中期和短期)上对我国大兴安岭的森林火灾碳排放及含碳气体排放进行了计量估算。

综上所述,关于森林火灾碳排放的研究对我们进一步了解林火干扰对大气碳平衡的影响有积极意义,然而由于参数来源的多样性及不确定性,许多研究不经过实验测定而仅仅通过模型手段进行外推,导致碳排放计量结果存在不确定性。采用遥感影像估测森林火灾碳排放,虽可减少地面调查的工作量,但由于各种原因,其精度需进一步提高^[18-19]。因此,为了使森林火灾碳排放的计量更加定量化,减少森林火灾碳排放计量的不确定性,就需要我们利用大量小尺度的野外火烧迹地调查以及室内的控制环境实验来确定各种计量参数,通过实际测量值,进一步量化森林火灾排放的碳量,为减少全球变化研究中碳平衡测算的不确定性提供科学依据。王效科等^[14]根据多年的平均森林火灾面积估算了我国各省市年均向大气中释放的CO₂、CO和CH₄量,结果表明黑龙江省分别占全国年均CO₂、CO和CH₄排放量的44.13%、43.53%和44.03%,从中可看出黑龙江省的森林火灾干扰在生态系统碳平衡中的作用尤为明显,对区域碳平衡产生重要影响。因此对该区的森林火灾碳排放进行准确计量,对定量评价森林火灾在区域碳平衡和碳循环中的贡献具有重要意义。为此,本文根据1953—2012年黑龙江省温带森林火灾实际统计数据,结合野外实际测量数据和森林资源调查中各林型可燃物载量,采用地理信息系

统(GIS)技术,通过大量小尺度的野外火烧迹地调查以及室内的控制环境实验来确定各种计量参数,利用排放因子方法,在林分水平上,计量估算黑龙江省1953—2012年60年间森林火灾碳排放和含碳气体排放量,这对评价森林火灾对该区域的碳平衡和碳循环的作用以及对全球气候变化的影响均有重要理论价值和实践意义。

1 材料和方法

1.1 研究地区概况

黑龙江省地处我国东北边疆,是森林资源大省,拥有我国最大的国有重点林区,亦是我国纬度最高且面积又最大的林区(43°25′—53°33′N,121°11′—135°5′E),全省有林地面积2 080.3万 hm^2 ,森林覆盖率45.76%,活立木蓄积量17.7亿 m^3 ,约占全国总蓄积量的1/10,森林面积和森林总蓄积均居全国前列。主要分布在大、小兴安岭和长白山山脉及部分半山区。该区地势较为平缓,山地海拔高度在300—1600 m,平原地区海拔高度在35—200 m。树种达100余种,利用价值较高的有30余种。该区的主要乔木树种为红松(*Pinus koraiensis*)、兴安落叶松(*Larix gmelinii*)、樟子松(*P. sylvestris* var. *mongolica*)、白桦(*Betula platyphylla*)、山杨(*Populus davidiana*)、云杉(*Picea asperata*)、臭冷杉(*Abies nephrolepis*)珍贵树种有水曲柳(*Fraxinus mandshurica*)、黄波罗(*Phellodendron amurense*)、胡桃楸(*Juglans mandshurica*)、蒙古栎(*Quercus mongolica*)、山杨(*P. davidiana*)、毛赤杨(*Alnus sibirica*)、大青杨(*P. ussuriensis*)、榆树(*Ulmus pumila*)、色木槭(*Acer mono*)、紫椴(*Tilia amurensis*)等亦分布广泛。该区属大陆性季风气候,冬季寒冷干燥且漫长,春秋季节干旱大风,干燥,夏季较为炎热多雨,较湿润。年均气温为-5—5℃,全年降水量400—650 mm,且集中于生长季,达全年降水量的83%—94%。土壤主要以暗棕壤为地带性土壤。该研究区为我国森林火灾高发区且危害较为严重,1953—2012年60年间平均过火林地面积为 $6.33 \times 10^4 \text{hm}^2$,其年均森林过火面积居全国之首^[36]。

1.2 研究资料

1.2.1 森林火灾统计资料

森林火灾统计资料作为林火管理的基础数据,

对森林火灾碳排放的研究具有重要作用。本文利用的黑龙江省温带森林1953—2012年火灾统计资料(资料来自于黑龙江省人民政府森林草原防火指挥部办公室)。统计数据主要包括起火点地理坐标、过火林地面积、行政区域、林型、扑救信息、起火原因和森林火灾损失等内容。1953—2012年黑龙江省温带森林(由于大兴安岭是黑龙江省的寒温带针叶林区,而黑龙江省的其他地区均为温带林区,在气候类型和林型上有较大的区别,在森林火灾碳排放的计量参数测定中亦存在较大区别,因此本文的研究范围为黑龙江省12个市的温带林区)60年间共发生森林火灾9 450次,年均约157.50次,森林过火林地总面积达3 797 482.40 hm^2 ,年均过火林地面积约为 $6.33 \times 10^4 \text{hm}^2$ 。通过1953—2012年黑龙江省森林火灾历史资料的研究表明,该区的森林火灾分布具有明显的时空分布规律,年际之间森林火灾面积与火灾次数波动较大,火灾面积与火灾次数基本上成正相关关系。

1.2.2 森林可燃物载量调查

结合森林火灾资料、森林资源调查资料、林分生长状况、林相图、植被分布图、土壤类型图和黑龙江省行政区划图,选择森林火灾的易发多发区与典型分布区,在黑龙江省东北部的黑河市孙吴县、逊克县,在黑龙江省东北部的伊春市五营林业局、带岭林业局,黑龙江省南部的哈尔滨市尚志市,黑龙江省东部的七台河市茄子河区,黑龙江省东南部的牡丹江市林口县,选择森林防火期,于2011年6月、10月,2012年5月、6月、9月、10月,进行外业调查和样品采集。由于黑龙江省温带林面积较大,在采样时充分考虑到区域差异及所选采样点的代表性,在黑龙江省的重点火险区,如伊春市、黑河市等地进行分别采样。同时为了更为有效地获得不同林型不同组分的森林可燃物载量,根据森林火灾所烧林型的分布特征,结合采样时林分生长状况及可获得状况,选择有代表性的12种林型进行调查采样。12种林型分别为阔叶红松林、落叶松林、白桦林、落叶松-白桦林、樟子松林、云冷杉林、杨桦林、硬阔林、蒙古栎林、针叶林、阔叶林、针阔混交林,把各林型的乔木、林下的灌木、草本、凋落物、腐殖质和粗木质残体组分为研究对象,采用随机布点法,在每种林型随机设置20 m × 20 m的3个重复样地作为标准样地(相对火

烧迹地就是对照样地)。同时在当年火烧迹地上根据 3 种不同火强度(重度、中度和轻度)等级分别设置重复样地 3 个,每种林型的火烧迹地上设置 9 个标准样地。共设置对照标准样地 144 块样地(12 种林型×3 个重复×4 次采样)。共设置火烧迹地标准样地 432 块样地(12 种林型×3 种火强度等级×3 个重复×4 次采样)。

1.3 研究方法

根据 1953—2012 年黑龙江省温带森林火灾碳排放的各计量参数,分两步对该区林火碳排放及含碳气体排放进行计量估算:(1)通过各种实验来获得计量森林火灾碳排放的各种计量参数,估算森林火灾的碳排放量;(2)从林分水平上,采用排放因子法,通过实验室控制环境实验得出排放因子,估算黑河市 41 年间森林火灾所排放的 4 种含碳气体(CO_2 、 CO 、 CH_4 和非甲烷烃(nonmethane hydrocarbons, NMHC))量。森林可燃物载量调查方法和可燃物含碳率的测定方法参照胡海清等^[5, 34-35]的方法,火强度的确定方法参照胡海清等^[35]的方法。燃烧效率的测定参照胡海清等^[5, 34-35]的方法,排放因子的测定参照胡海清等^[5, 34-35]的方法。森林火灾碳排放计量方法采用胡海清等^[1, 5, 8-19, 25, 34-35]的方法,其表达式为:

$$C_t = A(B_a f_{ca} \beta_a + C_l \beta_l + C_d \beta_d + C_c \beta_c) \quad (1)$$

式中, C_t 表示森林火灾过程中碳排放量(t); A 为森林的过火面积(hm^2); B_a 为未燃烧前某一单位面积内平均的可燃物载量(t/hm^2); f_{ca} 森林可燃物含碳率; β_a 森林燃烧过程的燃烧效率; C_l 地表凋落物碳

密度(t/hm^2); β_l 凋落物的燃烧效率; C_d 腐殖质的碳密度(t/hm^2); β_d 腐殖质的燃烧效率; C_c 粗木质残体的碳密度(t/hm^2); β_c 粗木质残体的燃烧效率。

森林火灾含碳气体排放量计量方法采用胡海清等^[1, 5, 8-19, 25, 34-35]的方法,其表达式为:

$$E_s = E_{fs} \times C_l \quad (2)$$

式中, E_s 表示某种含碳气体的排放量(g); E_{fs} 表示某种含碳气体排放因子(g/kg); C_l 表示火灾过程中碳排放量(kg)。

2 结果和分析

2.1 各林型火灾面积

根据黑龙江省森林资源调查资料,结合 1953—2012 年黑龙江省森林火灾统计资料以及外业实际调查数据,黑龙江省 60 年间温带森林总过火林地面积达 3 797 482.40 hm^2 ,年均过火林地面积约为 6.33×10⁴ hm^2 。从图 1 可看出,各林型森林火灾总面积的排列顺序由大到小为阔叶红松林>针阔混交林>落叶松-白桦混交林>阔叶林>白桦林>针叶林>落叶松林>杨桦林>硬阔林>云冷杉林>樟子松林>蒙古栎林。其中过火面积最大的阔叶红松林为 963 041.54 hm^2 ,占总过火面积的 25.36%,其次为针阔混交林,其面积为 786 458.61 hm^2 ,占总过火面积的 20.71%,再次为落叶松-白桦混交林,其面积为 435 571.23 hm^2 ,占总过火面积的 11.47%,过火面积最小的蒙古栎林为 78 987.63 hm^2 ,只占总过火面积的 2.08%。同时研究发现针阔混交林(包括阔叶红松林和落叶松-白桦

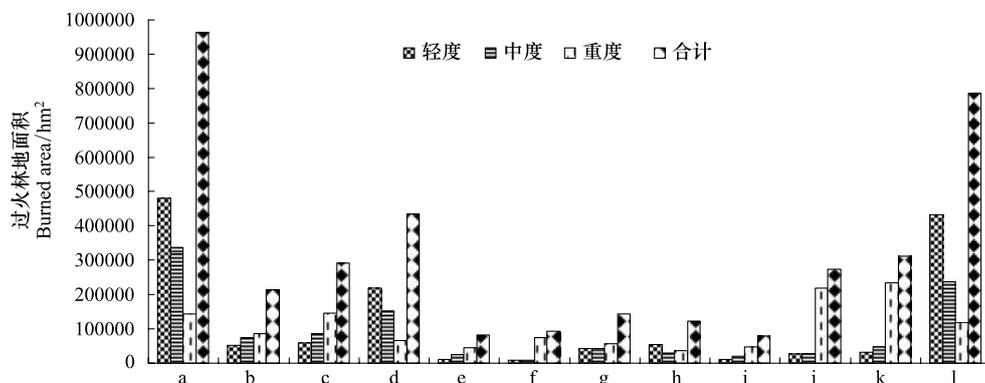


图 1 1953—2012 年黑龙江省各林型过火面积及火强度等级分布

Fig. 1 Burned area and fire intensity rank distribution of forest types of Heilongjiang Province from 1953 to 2012

a: 阔叶红松林 broad-leaved *Pinus koraiensis* forests; b: 落叶松林 *Larix gmelinii* forests; c: 白桦林 *Betula platyphylla* forests; d: 落叶松-白桦林 *Betula platyphylla-Larix gmelinii* forests; e: 樟子松林 *Pinus sylvestris* var. *mongolica* forests; f: 云冷杉林 *Abies nephrolepis-Picea asperata* forests; g: 杨桦林 *Betula platyphylla-Populus davidiana* forests; h: 硬阔林 Hardwood forests; i: 蒙古栎林 *Quercus mongolica* forests; j: 针叶林 Coniferous forests; k: 阔叶林 Broad-leaved forests; l: 针阔混交林 Coniferous broad-leaved mixed forests

混交林) 的过火林地面积达 2 185 071.37 hm², 占森林火灾总过火面积的 57.54%, 而阔叶林(包括白桦林、杨桦林、蒙古栎林和硬阔林) 的过火林地面积为 949 750.34 hm², 占森林火灾总过火面积的 25.01%, 针叶林(包括落叶松林、樟子松林、云冷杉林) 的过火林地面积为 662 660.68 hm², 占森林火灾总过火面积的 17.45%。其结果通过单因素方差分析表明, 虽然各林型之间过火面积的差异较大, 然而林型对过火面积的影响并不明显。

2.2 单位面积可燃物载量

单位面积可燃物载量主要包括地上植被部分(乔木、灌木和草本) 和地表有机质部分(凋落物、腐

殖质和粗木质残体)。1.2.2 节森林可燃物的调查所获得的各种林型不同组分的样本数乔木是 432 个样本, 灌木、草本、凋落物、腐殖质的样本数均为 432 个, 粗木质残体的样本数为 864 个。对测定结果进行统计分析, 不同林型单位面积可燃物载量见图 2, 从图 2 中可看出, 阔叶红松林可燃物载量最大, 达到 184.88 t/hm², 其次为落叶松-白桦混交林, 可燃物载量为 170.22 t/hm², 再次为针阔混交林, 可燃物载量为 157.79 t/hm², 落叶松林的可燃物载量亦达到 155.70 t/hm², 可燃物载量最小的为蒙古栎林, 可燃物载量仅为 93.37 t/hm², 其次为针叶林, 可燃物载量仅为 132.84 t/hm²。

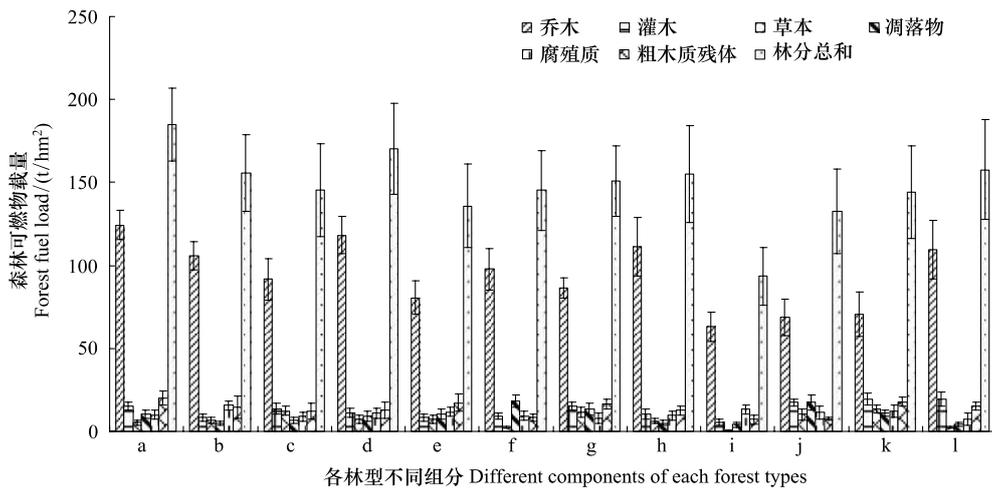


图 2 黑龙江省各林型不同组分单位面积可燃物载量(平均值±标准偏差)

Fig. 2 Fuel load of per unit area from different components of forest types in Heilongjiang Province (mean±SD)

2.3 各林型可燃物含碳率

按照一个比率(可燃物中的干物质中碳所占的比重) 可将可燃物载量转换为碳储量。对于森林碳储量换算, 一般通过测定可燃物载量, 然后通过可燃物载量乘以可燃物中的含碳率进行换算^[19]。根据 MultiN/C3000 的测定结果(用于可燃物含碳率测定的样本数与 2.2 节的样本数相同), 各种林型不同组分可燃物含碳率见表 1。从表 1 可知, 乔木层的含碳率高于其他组分, 各林型乔木层的平均含碳率为 49.53%, 其次为灌木层的平均含碳率为 48.49%, 腐殖质层的平均含碳率最低, 为 45.12%。各林型中不同组分含碳率从大到小的排列顺序为: 乔木层>灌木层>粗木质残体>凋落物层>草本层>腐殖质。同时针叶林型各组分及林分水平上的含碳率普遍高于阔叶林型。国际上通常采用 0.5 作为含碳率的平均

值, 而对凋落物、草本和腐殖质等非木质部分采用 0.45 这一数值作为平均含碳率^[10, 37-40]。从表 2 可知, 木质部分的平均含碳率比较接近 0.5, 非木质部分的平均含碳率与 0.45 较为接近, 凋落物和粗木质残体由于受外部环境的影响较大, 不同林型中的平均含碳率波动较大。在林型上含碳率从大到小的依次排列顺序为: 针叶林>针阔混交林>阔叶林, 其中落叶松林的平均含碳率达到 48.47%, 其次为阔叶红松林, 平均含碳率为 48.16%, 含碳率最低的是阔叶林, 为 45.70%。

2.4 各林型的燃烧效率

根据当年火烧迹地标准样地实际调查测定, 各种林型不同组分的燃烧效率见表 2(用于可燃物含碳率测定的样本数与 2.2 节的样本数相同)。国内外研究者认为在温带森林中生物量的燃烧效率一般是 0.09—0.16, 均值是 0.105, 地表有机质的燃烧效率

表 1 黑龙江省温带林各林型不同组分的森林可燃物含碳率(平均值±标准偏差,%)

	组分 Forest component														平均值 Mean
	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l	l	l	
乔木 Tree	50.95±0.62	52.15±0.51	48.33±0.83	50.24±0.99	50.18±0.57	51.12±0.81	47.56±0.68	47.45±0.88	47.84±0.44	51.34±0.43	47.14±0.41	50.02±0.89	49.53±1.76		
灌木 Shrub	49.75±0.55	49.23±0.29	48.12±0.45	49.24±0.39	49.12±0.32	48.11±0.39	48.48±0.25	46.37±0.40	48.33±0.26	49.21±0.33	46.87±0.49	49.03±0.28	48.49±1.01		
草本 Herb	46.23±0.27	47.12±0.27	45.32±0.25	47.33±0.30	46.18±0.72	45.41±0.42	45.86±0.42	45.37±0.26	46.57±0.43	46.65±0.56	45.66±0.35	46.12±0.37	46.15±0.67		
凋落物 Litter	48.63±0.24	48.34±0.66	47.17±0.47	46.25±0.23	47.46±0.32	46.49±0.40	46.48±0.26	44.84±0.27	45.48±0.28	47.34±0.22	44.95±0.48	48.15±0.36	46.80±1.27		
腐殖质 Duff	45.50±0.30	46.31±0.28	45.41±0.29	45.23±0.15	45.24±0.24	45.42±0.25	44.55±0.22	44.43±0.26	44.79±0.10	45.13±0.54	44.35±0.21	45.11±0.23	45.12±0.54		
粗木质残体 Course woody debris	48.16±0.34	47.67±0.29	46.29±0.19	47.31±0.57	47.33±0.38	47.24±0.32	45.34±0.48	45.71±0.49	46.81±0.40	47.02±0.49	45.42±0.34	46.51±0.27	46.74±0.90		
林分平均 Forest stand mean	48.16±0.34	48.47±0.29	46.29±0.19	47.31±0.57	47.33±0.38	47.24±0.32	45.34±0.48	45.70±0.49	46.81±0.40	47.02±0.49	45.42±0.34	46.51±0.27	46.74±0.90		

表 2 黑龙江省温带林各林型不同组分的可燃物在不同火强度下的燃烧效率(平均值±标准偏差,%)

	组分 Forest component													
	Fire intensity	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l	l
乔木 Tree	轻度 Low	0.03±0.014	0.05±0.013	0.10±0.046	0.04±0.013	0.10±0.045	0.09±0.013	0.10±0.023	0.06±0.011	0.10±0.029	0.14±0.014	0.09±0.026	0.02±0.010	
	中度 Moderate	0.06±0.014	0.07±0.022	0.14±0.027	0.08±0.032	0.13±0.022	0.14±0.025	0.18±0.016	0.10±0.029	0.18±0.018	0.20±0.025	0.14±0.013	0.05±0.013	
	重度 High	0.09±0.016	0.13±0.017	0.18±0.027	0.12±0.033	0.18±0.021	0.21±0.029	0.28±0.013	0.14±0.019	0.25±0.018	0.27±0.019	0.22±0.022	0.07±0.014	
	平均 Mean	0.06±0.027	0.08±0.039	0.14±0.046	0.08±0.042	0.14±0.044	0.15±0.052	0.19±0.076	0.10±0.038	0.18±0.066	0.20±0.056	0.15±0.056	0.05±0.024	
灌木 Shrub	轻度 Low	0.10±0.027	0.10±0.014	0.09±0.017	0.10±0.032	0.11±0.016	0.14±0.042	0.16±0.012	0.10±0.016	0.10±0.013	0.17±0.013	0.12±0.008	0.06±0.008	
	中度 Moderate	0.14±0.008	0.15±0.008	0.17±0.008	0.15±0.009	0.17±0.008	0.19±0.011	0.21±0.013	0.14±0.007	0.15±0.008	0.23±0.009	0.15±0.009	0.13±0.007	
	重度 High	0.20±0.030	0.21±0.039	0.22±0.018	0.19±0.021	0.24±0.016	0.27±0.014	0.25±0.013	0.19±0.019	0.27±0.010	0.30±0.032	0.23±0.014	0.21±0.019	
	平均 Mean	0.15±0.051	0.15±0.051	0.16±0.055	0.15±0.044	0.17±0.057	0.20±0.059	0.21±0.039	0.14±0.039	0.17±0.074	0.24±0.058	0.17±0.049	0.13±0.063	
草本 Herb	轻度 Low	0.42±0.017	0.56±0.012	0.62±0.019	0.54±0.113	0.64±0.009	0.53±0.009	0.63±0.010	0.45±0.010	0.61±0.013	0.66±0.009	0.61±0.011	0.18±0.009	
	中度 Moderate	0.72±0.017	0.82±0.013	0.82±0.013	0.83±0.008	0.86±0.009	0.79±0.011	0.91±0.012	0.75±0.009	0.86±0.086	0.93±0.008	0.90±0.010	0.37±0.007	
	重度 High	1.00±0	1.00±0	1.00±0	1.00±0	1.00±0	1.00±0	1.00±0	1.00±0	1.00±0	1.00±0	1.00±0	1.00±0	
	平均 Mean	0.71±0.237	0.80±0.180	0.81±0.159	0.79±0.191	0.83±0.148	0.77±0.192	0.85±0.160	0.73±0.227	0.82±0.164	0.86±0.147	0.84±0.167	0.52±0.354	
凋落物 Litter	轻度 Low	0.36±0.007	0.31±0.010	0.53±0.009	0.30±0.010	0.36±0.008	0.42±0.011	0.52±0.011	0.47±0.008	0.51±0.010	0.41±0.012	0.49±0.009	0.37±0.008	
	中度 Moderate	0.63±0.038	0.45±0.032	0.83±0.033	0.59±0.013	0.64±0.025	0.75±0.019	0.84±0.023	0.72±0.031	0.72±0.029	0.64±0.022	0.75±0.025	0.66±0.031	
	重度 High	1.00±0	1.00±0	1.00±0	1.00±0	1.00±0	1.00±0	1.00±0	1.00±0	1.00±0	1.00±0	1.00±0	1.00±0	
	平均 Mean	0.66±0.265	0.58±0.301	0.79±0.196	0.63±0.289	0.67±0.264	0.72±0.239	0.79±0.202	0.73±0.219	0.74±0.204	0.68±0.246	0.75±0.210	0.68±0.260	
腐殖质 Duff	轻度 Low	0.24±0.023	0.19±0.025	0.14±0.020	0.21±0.016	0.33±0.019	0.36±0.019	0.33±0.019	0.25±0.017	0.28±0.013	0.40±0.012	0.33±0.019	0.10±0.017	
	中度 Moderate	0.47±0.022	0.38±0.019	0.39±0.021	0.52±0.036	0.55±0.014	0.71±0.026	0.64±0.025	0.38±0.023	0.41±0.026	0.72±0.039	0.39±0.016	0.25±0.015	
	重度 High	0.87±0.020	0.85±0.020	0.79±0.047	0.83±0.023	0.83±0.020	0.95±0.026	0.89±0.036	0.79±0.030	0.83±0.019	0.89±0.029	0.88±0.023	0.69±0.027	
	平均 Mean	0.53±0.260	0.47±0.280	0.44±0.270	0.52±0.256	0.57±0.210	0.67±0.248	0.62±0.230	0.47±0.230	0.51±0.237	0.67±0.203	0.53±0.247	0.35±0.250	
粗木质残体 Course woody debris	轻度 Low	0.13±0.021	0.35±0.012	0.19±0.019	0.14±0.019	0.32±0.021	0.23±0.016	0.21±0.011	0.18±0.035	0.14±0.017	0.34±0.018	0.27±0.016	0.17±0.019	
	中度 Moderate	0.32±0.022	0.47±0.022	0.38±0.016	0.34±0.014	0.47±0.022	0.54±0.021	0.33±0.013	0.34±0.013	0.28±0.015	0.55±0.014	0.42±0.031	0.34±0.017	
	重度 High	0.44±0.032	0.63±0.021	0.55±0.024	0.47±0.034	0.61±0.026	0.69±0.030	0.44±0.020	0.41±0.032	0.41±0.033	0.69±0.042	0.49±0.037	0.42±0.023	
	平均 Mean	0.30±0.129	0.48±0.117	0.37±0.146	0.31±0.138	0.47±0.120	0.48±0.193	0.33±0.095	0.31±0.103	0.28±0.115	0.53±0.149	0.39±0.096	0.31±0.109	

是 0.03—0.90, 均值是 0.50^[11 26 41]。从表 3 中可知, 不同组分燃烧效率的范围是乔木层为 0.02—0.28, 灌木层为 0.06—0.30, 草本层为 0.18—1.00, 凋落物层为 0.30—1.00, 腐殖质层为 0.10—0.95, 粗木质残体层为 0.13—0.69。把本文的研究结果和国外相比^[26], 各组分的燃烧效率较为一致。从表 1 可知, 从林型各组分来看, 燃烧效率从小到大的顺序为乔木层<灌木层<粗木质残体层<腐殖质<草本层<凋落物层; 从林型的林分水平来看, 燃烧效率从大到小的顺序为纯针叶林>云杉林>杨桦松林>阔叶红松林>针阔混交林。在同一组分中, 不同林型的燃烧效率相差较大, 如在凋落物层中, 针叶林型和针阔混交林型的燃烧效率比较低, 而阔叶林型树种的燃烧效率比较高。

2.5 各林型的碳排放量

根据式(1)计算各林型不同组分在不同火强度下森林可燃物的碳排放量。从表 3 可知, 黑龙江省 1953—2012 年 60 年间碳排放量为 58 795 120.14 t, 年均排放量为 9.80×10^5 t, 其中阔叶红松林的碳排放量最多, 达 11 288 656.38 t, 占总碳排放量的 19.20%; 其次是阔叶林, 达 8 227 459.73 t, 占总碳排放量的 14.00%; 再次是针叶林排放量达 8 147 611.00 t, 占总碳排放量的 13.86%; 蒙古栎林的碳排放量最少, 为 1072033.45 t, 只占总碳排放量的 1.82%; 其次是硬阔林排放量仅为 1 565 045.69 t, 占总碳排放量的 2.66%。同时研究发现针阔混交林型(包括阔叶红松林和落叶松-白桦混交林)的过火林地面积占森林火灾总过火面积的 57.54%, 由于针阔混交林燃烧效率较低, 森林火灾中总碳排放量为 22 675 610.98 t, 仅占总碳排放量的 38.57%; 尤其是针阔混交林森林火灾占总过火面积的 20.71%, 而碳排放量仅占总碳排放量的 9.67%; 而阔叶林型(包括白桦林、杨桦林、蒙古栎林和硬阔林)的过火林地面积占森林火灾总过火面积的 25.01%, 而森林火灾中所排放的碳量为 20172464.40 t, 却占 34.31%; 针叶林型(包括落叶松林、樟子松林、云冷杉林)的过火林地面积占森林火灾总过火面积的 17.45%, 而森林火灾中所排放的碳量为 15947044.76 t, 却占 27.12%。

2.6 各林型含碳气体的排放因子

根据室内控制环境实验的实际测定结果, 通过公式计算得出各林型不同组分含碳气体的排放因子见表 4(排放因子测定的样本数与 2.2 节相同)。把

实验测定的排放因子与其他研究者对温带森林含碳痕量气体排放因子的测定结果进行比较^[26], CO、CH₄ 和 NMHC 的排放因子较为相似, CO₂ 的排放因子较低, 是因为在实验室的控制环境实验的排放因子测定过程中, 氧气供应相对不足, 容易造成部分森林可燃物的不完全燃烧。从表 4 中可知, 相对干燥立地类型的林型(如针叶林、蒙古栎林、落叶松林)的 CO₂ 排放因子相对较高, CO、CH₄ 和 NMHC 排放因子相对较低, 然而较湿润立地类型的林型(如针阔混交林、硬阔林和阔叶红松林)的 CO₂ 排放因子相对较低, CO、CH₄ 和 NMHC 的排放因子较高, 这是因为 CO₂ 是森林可燃物的有焰燃烧, 森林可燃物在燃烧时氧气供应较为充分, 是完全燃烧的产物; 而氧气供应较为不充分时, 即森林可燃物不完全燃烧时, 就易产生较多的 CO、CH₄ 和 NMHC, 从而导致其排放因子较高。在各组分之间, 比较干燥和较易着火组分(草本层和凋落物层)的 CO₂ 排放因子相对较高。

2.7 各林型可燃物载量所排放含碳气体量

根据式(2)计量黑龙江省温带森林 1953—2012 年火灾中各林型不同组分排放的含碳气体量见表 5。从表 5 可知, 各林型不同组分的森林可燃物排放的含碳气体量以及各种含碳气体的总量。从图 3 可看出黑龙江省 1953—2012 年共排放 CO₂ 为 188915783.50 t, 排放 CO 为 10 596 410.96 t, 排放 CH₄ 为 632763.37 t, 排放 NMHC 为 443 067.59 t, 含碳气体 CO₂、CO、CH₄ 和 NMHC 的年均排放量分别为 3.15×10^6 、 1.77×10^5 、 1.05×10^4 和 7.38×10^3 t, 分别占全国年均森林火灾各含碳气体排放量^[26]的 7.74%、6.52%、9.42% 和 6.53%。同时研究发现针阔混交林(包括阔叶红松林和落叶松-白桦混交林)的过火林地面积占森林火灾总过火面积的 57.54%, 由于针阔混交林燃烧效率较低, 且 CO₂ 的排放因子较低, 森林火灾中 CO₂ 排放量为 7.27×10^7 t, 仅占总 CO₂ 排放量的 38.48%, 尤其是针阔混交林森林火灾占总过火面积的 20.71%, 而 CO₂ 排放量仅占总 CO₂ 排放量的 8.95%; 而阔叶林(包括白桦林、杨桦林、蒙古栎林和硬阔林)的过火林地面积占森林火灾总过火面积的 22.93%, 而森林火灾中所排放的 CO₂ 为 6.42×10^7 t, 却占 34.00%; 针叶林(包括落叶松林、樟子松林、云冷杉林)的过火林地面积占森林火灾总过火面积的 19.53%, 而森林火灾中所排放的 CO₂ 为 5.20×10^7 t, 却占 27.52%。

表 3 1953—2012 年黑龙江省温带森林各林型不同组分的森林可燃物在不同火强度下的碳排放量(平均值±标准偏差, t)

火强度	组分 Forest component											
	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l
乔木 Trees	1042447.46±422166.54	154813.65±39126.42	271300.61±119036.10	540365.49±166675.54	51704.01±22374.14	42741.59±6092.94	181526.48±39926.25	181142.51±30543.31	36702.36±10385.06	134364.41±13424.75	93077.06±26645.45	575934.57±244028.75
中度	1278599.95±309434.62	301921.02±92444.93	535134.62±106556.70	754701.85±289959.74	132863.84±21493.98	63276.13±11577.91	320372.11±28599.31	163995.35±46920.77	108688.10±10822.84	196343.95±24078.02	225121.05±19713.94	651562.35±169872.83
重度	831110.31±145984.86	630814.02±78551.24	1165090.65±172222.03	458147.20±128374.73	326849.88±38737.64	764516.87±108994.51	665420.01±30840.26	268567.26±36658.55	364114.09±25421.45	2076928.65±144769.10	1681260.75±168192.29	472942.91±91666.66
灌木 Shrubs	345346.16±99340.42	21217.73±3285.17	33660.32±6776.14	119848.71±3828.51	5438.87±824.48	5600.35±1725.00	50779.86±3774.84	26392.43±4188.72	2993.84±404.47	40935.78±2967.39	34372.70±2402.17	253341.44±34052.21
中度	362996.91±19258.86	47452.99±2453.92	97185.12±4460.68	124996.58±7475.52	17186.09±830.82	7651.22±467.60	64980.48±4087.37	20271.34±1056.30	7837.27±419.34	55151.68±2100.79	62964.29±3630.13	289893.93±14407.93
重度	223385.52±32423.63	73163.37±13762.98	205147.39±16719.81	68965.29±7470.59	44862.93±3041.28	86922.02±4560.40	105983.33±5350.23	32581.97±3200.08	33957.33±1291.20	576840.32±59886.03	495606.44±30585.63	236736.81±21019.80
草本 Herbs	490599.81±19704.54	91864.66±1961.00	202245.36±6366.19	416721.55±9796.12	27500.86±374.71	5588.21±96.05	143257.96±2319.22	71576.82±1583.81	1117.13±23.86	85876.77±1125.11	116838.91±2081.63	85849.34±4278.78
中度	580778.43±13964.99	187422.57±2948.13	405000.44±6645.25	446786.30±4318.72	73646.41±771.81	8267.87±120.03	208139.11±2701.09	66606.43±806.20	2639.82±26.25	120732.10±1089.82	259002.52±3151.57	99216.36±1877.93
重度	347934.82±0	260316.66±0	821870.91±0	230997.65±0	156773.50±0	84159.41±0	304659.67±0	106351.23±0	7283.34±0	1040628.12±0	1439117.20±0	133841.73±0
凋落物 Litter	855149.64±17139.83	37870.86±1192.37	99027.07±1692.30	280306.21±10117.12	21599.83±500.08	33158.10±837.78	137989.43±2963.37	59664.43±987.68	11411.40±225.10	92191.81±2752.34	74824.75±1420.08	319239.46±6853.95
中度	1046008.64±62401.51	77135.07±5605.58	232951.77±9096.65	382974.16±8289.82	77072.58±2974.73	59293.18±1512.43	223955.14±6005.84	51218.68±2203.93	27129.13±1104.22	144587.44±4892.41	171081.44±5708.30	308273.93±14686.36
重度	711623.03±0	197605.35±0	464902.37±0	280118.58±0	219940.07±0	631155.29±0	354147.85±0	84876.64±0	89880.79±0	1816105.26±0	1148793.11±0	235160.17±0
腐殖质 Duff	516877.73±49313.86	73822.95±9482.69	33030.56±4687.12	234446.40±17926.18	21423.06±1218.67	14035.26±745.30	50079.46±2895.85	59155.01±4022.08	19887.96±906.36	56484.17±1717.05	55932.28±3174.09	141270.00±23251.25
中度	695927.24±32968.79	204169.79±10083.05	137468.75±7552.97	401217.74±27636.43	72123.71±1851.61	28253.63±1031.54	98308.05±3766.16	48673.98±2970.76	48161.00±3006.60	100739.51±5430.32	98255.14±4180.35	191522.57±11572.64
重度	554679.12±12761.10	527232.16±12131.96	464912.35±27481.34	273917.14±7401.85	200890.07±4740.07	301350.98±8126.65	178571.36±7317.60	122041.22±4614.59	233241.48±5284.49	992350.75±32059.75	1111651.87±29684.30	264590.03±10465.71
粗木质残体 Coarse woody debris	629790.38±99990.87	130938.62±4607.36	62238.20±6280.97	183983.83±26042.99	32533.66±2076.13	8303.07±568.12	68777.45±3638.83	55550.29±10906.28	5337.40±667.97	32405.30±1684.64	68607.45±4109.52	502567.87±59061.53
中度	1057086.86±70450.29	241818.92±11539.53	184126.75±7715.07	318213.16±13255.97	93401.14±4496.81	19625.44±751.29	104847.59±4037.96	59604.44±2329.00	18225.03±983.74	52751.10±1345.87	161870.56±11985.40	572068.99±29379.34
重度	618339.65±44414.37	374889.62±12202.15	440961.78±19413.57	187067.31±13602.76	225377.57±9751.15	199827.05±8716.18	189875.17±8580.04	86775.66±6708.17	64837.36±5178.36	532193.88±32116.65	929082.21±71550.42	349166.99±19303.92
林分总碳排放量 Total carbon emissions of forest stand	11288656.38	3634470.01	5856255.02	5703775.15	1801238.08	2363725.67	3451670.51	1565045.69	1072033.45	8147611	8227459.73	5683179.45

http://www.ecologica.cn

表 4 黑龙江省温带森林火灾主要含碳气体的排放因子(平均值±标准偏差, g/kg C)

		组分 Forest component											
气体类型 Gas type		a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l
乔木 Trees	CO ₂	3124.58 ± 5.26	3168.34 ± 3.50	3283.61 ± 6.40	3152.21 ± 5.87	3233.25 ± 3.82	3346.18 ± 2.82	3154.33 ± 2.60	3254.17 ± 2.82	3318.16 ± 4.13	3321.22 ± 3.52	3333.15 ± 5.57	3045.34 ± 2.77
	CO	255.34 ± 3.05	211.21 ± 1.80	188.54 ± 1.68	145.34 ± 1.47	200.67 ± 3.66	134.18 ± 1.35	204.66 ± 2.34	173.64 ± 2.32	228.16 ± 2.42	146.19 ± 2.69	134.26 ± 1.99	228.64 ± 1.78
	CH ₄	11.54 ± 0.66	10.62 ± 1.30	13.56 ± 0.76	9.47 ± 0.42	8.18 ± 0.61	9.54 ± 1.03	12.15 ± 0.86	12.53 ± 1.43	12.45 ± 0.92	10.45 ± 0.96	11.36 ± 1.21	8.38 ± 1.19
	NMHC	7.26 ± 0.24	8.36 ± 1.15	6.34 ± 1.27	5.45 ± 0.75	9.34 ± 1.02	7.17 ± 0.88	8.25 ± 1.56	8.46 ± 1.19	8.43 ± 1.40	7.45 ± 1.06	8.16 ± 1.05	6.36 ± 1.22
灌木 Shrubs	CO ₂	3082.21 ± 3.55	3186.59 ± 2.42	3330.44 ± 3.63	3237.67 ± 1.18	3336.18 ± 3.27	3366.57 ± 2.71	3144.44 ± 2.66	3224.08 ± 2.21	3287.16 ± 2.23	3345.34 ± 2.17	3336.26 ± 3.49	3012.39 ± 3.32
	CO	213.35 ± 2.53	183.22 ± 1.65	165.12 ± 1.70	185.65 ± 2.25	155.37 ± 3.28	129.27 ± 2.19	192.64 ± 1.47	134.35 ± 4.04	147.37 ± 1.78	162.22 ± 3.49	113.21 ± 5.56	206.46 ± 4.86
	CH ₄	12.35 ± 0.92	11.21 ± 0.27	9.24 ± 0.18	10.52 ± 0.12	10.57 ± 0.13	10.07 ± 0.02	11.32 ± 0.13	11.81 ± 0.51	11.24 ± 0.29	10.12 ± 0.47	12.29 ± 0.18	8.35 ± 0.20
	NMHC	8.23 ± 0.34	6.93 ± 0.37	6.52 ± 0.22	9.53 ± 0.17	9.51 ± 0.28	8.34 ± 0.20	8.54 ± 0.28	8.81 ± 0.32	9.31 ± 0.23	8.13 ± 0.26	8.29 ± 0.28	6.59 ± 0.28
草本 Herbs	CO ₂	3161.47 ± 20.91	3163.57 ± 18.94	3315.41 ± 19.80	3182.34 ± 11.31	3294.34 ± 20.83	3359.17 ± 15.07	3254.64 ± 34.14	3249.64 ± 22.50	3135.12 ± 25.39	3305.15 ± 33.49	3356.81 ± 28.84	3126.46 ± 27.54
	CO	187.51 ± 16.67	193.16 ± 2.07	168.32 ± 5.60	155.64 ± 3.20	157.35 ± 7.29	128.34 ± 6.26	176.58 ± 6.67	152.57 ± 5.81	142.15 ± 5.24	156.32 ± 4.28	149.21 ± 3.31	192.56 ± 2.81
	CH ₄	10.36 ± 0.31	9.47 ± 0.41	11.42 ± 0.17	9.95 ± 0.24	9.41 ± 0.42	8.11 ± 0.38	10.48 ± 0.16	11.34 ± 0.16	12.15 ± 0.83	7.23 ± 0.24	11.32 ± 0.13	9.45 ± 0.40
	NMHC	6.35 ± 0.49	7.87 ± 0.17	9.62 ± 0.40	6.45 ± 0.21	7.54 ± 0.96	6.47 ± 0.76	8.21 ± 0.32	8.29 ± 0.28	8.57 ± 0.28	8.51 ± 0.29	7.15 ± 0.74	6.39 ± 1.18
凋落物 Litter	CO ₂	3223.32 ± 22.25	3183.43 ± 12.25	3361.22 ± 10.17	3223.24 ± 22.35	3305.14 ± 33.49	3336.23 ± 7.99	3246.64 ± 22.98	3301.21 ± 27.93	3186.38 ± 17.26	3248.34 ± 29.46	3312.39 ± 19.00	3014.67 ± 5.82
	CO	178.16 ± 6.08	174.56 ± 7.65	179.23 ± 8.34	165.12 ± 4.76	165.75 ± 2.82	149.25 ± 3.29	165.32 ± 3.75	159.54 ± 5.15	151.57 ± 5.24	149.38 ± 3.45	139.85 ± 6.73	160.25 ± 7.41
	CH ₄	11.48 ± 0.21	10.24 ± 0.22	10.63 ± 1.05	10.16 ± 0.31	9.45 ± 0.41	9.17 ± 0.10	11.45 ± 0.17	10.57 ± 0.13	11.15 ± 0.06	9.18 ± 0.06	12.64 ± 0.33	9.28 ± 0.14
	NMHC	7.45 ± 0.19	6.91 ± 0.18	8.24 ± 0.28	7.24 ± 0.23	6.64 ± 0.25	8.27 ± 0.26	7.54 ± 0.67	7.96 ± 0.10	7.14 ± 0.52	7.52 ± 0.45	6.64 ± 0.26	6.34 ± 0.36
腐殖质 Duff	CO ₂	3125.04 ± 23.81	3162.54 ± 17.82	3289.17 ± 6.68	3251.44 ± 29.23	3334.34 ± 12.93	3355.58 ± 10.45	3224.58 ± 6.55	3227.19 ± 22.30	3125.18 ± 20.92	3287.15 ± 14.58	3313.34 ± 18.78	3116.38 ± 7.25
	CO	163.54 ± 4.33	195.34 ± 4.07	178.71 ± 5.79	195.24 ± 3.96	147.67 ± 4.34	154.57 ± 3.80	184.64 ± 2.98	164.24 ± 4.24	134.59 ± 3.62	125.24 ± 5.24	134.42 ± 3.49	175.61 ± 6.93
	CH ₄	11.10 ± 0.19	10.34 ± 0.29	10.30 ± 0.19	9.75 ± 0.33	9.18 ± 0.06	11.47 ± 0.20	11.34 ± 0.12	10.38 ± 0.28	10.22 ± 0.14	10.32 ± 0.03	11.35 ± 0.11	9.27 ± 0.14
	NMHC	7.014 ± 0.06	7.65 ± 0.06	7.21 ± 0.21	6.45 ± 0.20	7.34 ± 0.05	8.89 ± 0.28	8.11 ± 0.06	9.56 ± 0.24	8.73 ± 0.16	8.56 ± 0.28	7.38 ± 0.14	7.36 ± 0.11
粗木质残体 Coarse woody debris	CO ₂	3008.20 ± 39.25	3032.34 ± 14.26	3161.12 ± 14.54	3331.51 ± 4.79	3191.16 ± 14.26	3299.16 ± 38.12	3112.34 ± 15.72	3153.27 ± 10.45	3187.29 ± 12.30	3143.47 ± 11.96	3276.15 ± 16.01	3036.12 ± 3.70
	CO	239.34 ± 9.06	215.34 ± 3.59	194.24 ± 3.41	186.54 ± 2.46	210.52 ± 2.38	175.57 ± 6.27	184.24 ± 3.22	168.28 ± 5.56	211.67 ± 5.75	197.18 ± 5.58	191.45 ± 4.00	221.56 ± 3.29
	CH ₄	11.32 ± 0.13	11.35 ± 0.10	12.32 ± 0.74	11.02 ± 0.03	9.37 ± 0.22	11.15 ± 0.06	9.29 ± 0.13	12.49 ± 0.62	9.12 ± 0.05	9.14 ± 0.07	12.29 ± 0.18	8.57 ± 0.20
	NMHC	6.87 ± 0.16	7.22 ± 0.18	7.37 ± 0.13	6.67 ± 0.22	8.34 ± 0.16	8.79 ± 0.24	8.59 ± 0.24	8.15 ± 0.48	8.16 ± 1.05	8.04 ± 0.02	9.03 ± 0.01	6.34 ± 0.31

NMHC: 非甲烷烃 Nonmethane hydrocarbons

表 5 黑龙江省温带森林 1953-2012 年不同强度各林型不同组分森林火灾含碳气体排放量统计表(平均值±标准偏差, t)

火强度 Fire intensity	气体类型 Gas type	组分 Forest component												
		a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l	
轻度 Low	CO ₂	11709927.04	1574359.60	2274609.87	5617233.08	520650.98	363814.35	2006125.42	1448294.72	247745.54	1458263.02	1477875.70	5432478.34	
	CO	784528.84	101814.35	124306.19	287729.54	28895.48	15679.95	115923.16	73353.95	14320.50	67147.21	65086.63	366669.17	
	CH ₄	42498.48	5303.63	8301.49	17451.73	1441.35	1062.11	7009.24	5249.13	872.18	4177.24	5237.42	15562.16	
	NMHC	26880.13	3868.23	5329.65	11408.08	1304.49	857.69	5102.20	3793.19	637.95	3510.87	3416.47	11540.32	
中度 Moderate	CO ₂	15676125.86	3294732.12	5265151.56	7713603.13	1531003.47	628099.42	3258371.16	1320631.30	683841.28	2195372.99	3235905.01	6402184.98	
	CO	1065331.09	212051.92	288625.26	398370.53	84180.44	27416.23	189089.93	67089.43	40419.93	100834.19	143391.67	435414.30	
	CH ₄	56938.27	11058.35	19044.80	23946.49	4253.94	1849.64	11444.11	4805.89	2412.37	6308.93	11477.63	18279.65	
	NMHC	35883.68	8085.62	12233.49	15520.94	3789.82	1496.41	8284.33	3454.48	1759.55	5297.02	7491.34	13620.66	
重度 High	CO ₂	10243418.94	6434587.45	11750747.76	4841411.32	3885232.79	6967918.92	5725089.71	228154.13	2538683.58	23138214.07	22761391.09	5064533.76	
	CO	688124.71	411468.17	645654.85	250403.57	212748.54	302834.52	335912.56	115906.84	146178.95	1061655.74	990936.64	336915.98	
	CH ₄	37166.87	21532.79	42345.84	15008.42	10786.31	20490.08	20265.36	8237.42	8885.67	66963.38	80540.56	14554.43	
	NMHC	23448.63	15791.07	27129.77	9724.14	9575.38	16532.57	14604.66	6015.42	6588.04	55530.02	52699.88	10861.41	

http://www.ecologica.cn

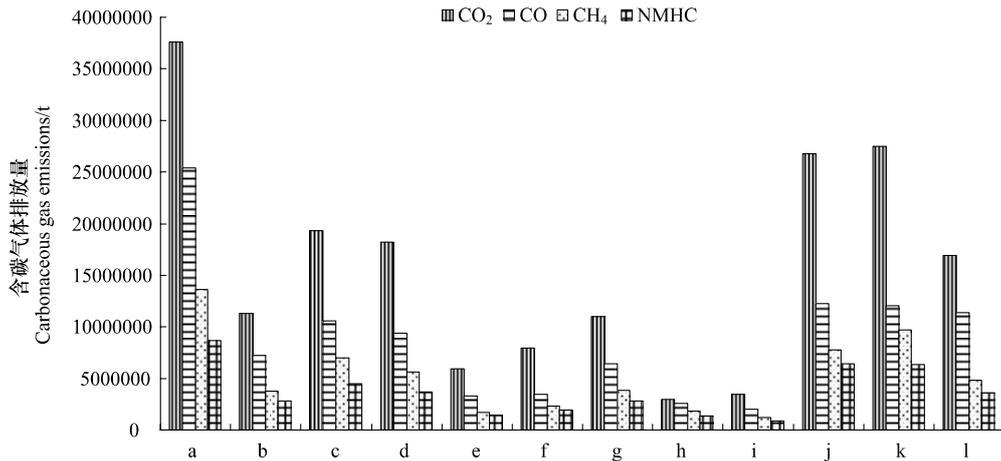


图3 黑龙江省温带林 1953—2012 年各林型不同强度森林火灾含碳气体排放量统计表(平均值±标准偏差, t)

Fig.3 Main carbonaceous gases emissions of forest types from forest fire in Heilongjiang Province temperate forest during 1953 to 2012 (mean±SD t)

图中 CO 的排放量扩大了 10 倍, CH₄ 和 NMHC 的排放量扩大了 100 倍

3 讨论与结论

森林火灾干扰作为森林生态系统重要的干扰因子, 剧烈地改变着森林生态系统的结构、功能、格局与过程, 对区域乃至全球的碳循环与碳平衡产生重要影响。黑龙江省温带林区在 1953—2012 年的 60 年间森林火灾碳排放量为 5.88×10^7 t, 年均碳排放量为 9.80×10^5 t, 约占全国年均森林火灾碳排放量^[26] 的 8.66%; 含碳气体 CO₂、CO、CH₄ 和 NMHC 的排放量分别为 1.89×10^8 、 1.06×10^7 、 6.33×10^5 和 4.43×10^5 t, 含碳气体 CO₂、CO、CH₄ 和 NMHC 的年均排放量分别为 3.15×10^6 、 1.77×10^5 、 1.05×10^4 和 7.38×10^3 t, 分别约占全国年均森林火灾各含碳气体排放量^[26] 的 7.74%、6.52%、9.42% 和 6.53%; 其年均 CO₂、CO、CH₄ 的排放总量分别占我国各生物质燃烧年均排放量^[42] 的 0.67%、0.65% 和 1.15%。由此可见, 黑龙江省森林火灾直接碳排放量及含碳气体排放量对该区域的碳平衡和碳循环产生一定的影响。各种预测模型显示, 未来气候变暖情景下将使森林火灾干扰发生的频率和强度增加^[4, 43]。通过以上的研究发现, 森林火灾干扰造成大量的碳排放和含碳气体排放, 对该区域的碳循环和碳平衡具有重要影响。为此, 加强气候变暖背景下森林火灾干扰对森林生态系统碳循环的影响研究, 增进气候变暖、林火干扰与生态系统碳循环之间的交互作用关系的了解, 对正确评价火干扰在全球碳循环和碳平衡中的

地位, 加深火干扰对碳循环影响的认识, 提高森林生态系统可持续管理的水平, 以更有效的方式干预生态系统的碳平衡等方面均有重要意义。

气候变暖是不可否认的事实^[4], 气候变暖不仅为森林火灾干扰的发生发展提供了直接的气象条件等火环境, 而且为其提供了间接的可燃物条件和火源条件。研究表明随着全球气候变暖, 森林火灾干扰的频率和强度将随之升高, 各种预测模型显示, 未来气候变暖情景下将使森林火灾干扰发生的频率和强度增加^[4, 43]。通过以上的研究发现, 森林火灾干扰造成大量的碳排放和含碳气体排放, 对该区域的碳循环和碳平衡具有重要影响。在全球气候变暖背景下, 探讨应对气候变化的森林经营可持续管理策略, 提出科学有效的林火管理策略和合理的林火管理路径, 减少森林火灾的次数, 降低森林火灾的强度, 减少森林火灾碳排放, 进而减缓全球气候变化, 是科研工作者必须考虑的问题。

森林可燃物是森林生态系统的基本组成部分, 是林火发生发展的基本条件, 是森林燃烧的物质基础^[2], 是影响林火发生及蔓延的重要因素之一^[8, 44]。森林燃烧理论认为任何森林燃烧现象的发生必须具备 3 个基本条件, 即森林可燃物、火源、火环境(气象条件), 其构成森林燃烧三要素^[4]。但由于火环境, 特别是气象条件是人类不可控制的因子, 在火源因子中, 虽然人为火源是可以控制的, 但由于存在大量天然火源(如雷击火)的存在, 火源因子亦处于不可

控制的状态,因此在森林燃烧三要素之中,唯一人类可严格控制调节的就是森林可燃物。因此,在气候变暖背景下,加强森林可燃物的调控,实现森林可燃物的可持续管理具有重要的理论与现实意义。森林可燃物可持续管理是指为了某种目的对可燃物进行处理、调控和改造的所有过程和方法,主要目的是降低火险等级、清除易燃可燃物、提高森林质量,优化林分条件,完善森林功能,维持森林生态系统平衡与稳定,从而增加森林碳汇。可燃物可持续管理是解决林火安全问题和恢复森林健康的根本途径,是决定火强度的重要因素^[43-45-47]。国内外学者早就认识到森林可燃物调控技术在林火生态管理中的重要性^[2],因此,加强森林可燃物调控,减少森林火灾,对增加森林碳吸收,减少碳排放,实现森林防火的碳减排增汇效应具有实践意义。

在全球气候变暖背景下,优化森林管理,提高森林质量,完善森林功能,探讨与丰富森林可持续经营与管理的先进理念与技术措施,进一步提高森林可持续经营的科学研究水平,提高森林的碳减排增汇效应,减缓气候变化具有重要意义^[48]。通过本文的研究结果可知,由于森林生态系统的复杂性与异质性,不同林型间的燃烧效率及排放因子均有较大的差异,同种林型不同组分之间的燃烧效率及排放因子亦存在较大的区别,这对森林生态系统的可持续经营与管理,即在森林的经营管理中,应注重基于碳减排效应与碳增汇效应,营造既能有效增加森林碳汇,又能有效减少森林火灾碳排放的碳减排效应的林分结构与类型。同时研究发现针阔混交林型(包括阔叶红松林和落叶松-白桦混交林)的过火林地面积占森林火灾总过火面积的57.54%,由于针阔混交林燃烧效率较低,森林火灾中总碳排放量为22675610.98t,仅占总碳排放量的38.57%;尤其是针阔混交林森林火灾占总过火面积的20.71%,而碳排放量仅占总碳排放量的9.67%;而阔叶林型(包括白桦林、杨桦林、蒙古栎林和硬阔林)的过火林地面积占森林火灾总过火面积的25.01%,而森林火灾中所排放的碳量为20172464.40t,却占34.31%;针叶林型(包括落叶松林、樟子松林、云冷杉林)的过火林地面积占森林火灾总过火面积的17.45%,而森林火灾中所排放的碳量为15947044.76t,却占27.12%。因此,在森林的经营管理中需更加注重该区

地带性植被类型的营造,较好地恢复地带性植被,充分发挥地带性植被在碳减排增汇中的作用,抑制先锋树种的生长(如白桦),从而实现碳增汇效应。同时研究中发现针阔混交林的燃烧效率较低,森林火灾中所排放的碳量和含碳气体量较少,而针叶纯林其所排放的碳量及含碳气体最多,为此在森林生态系统的可持续经营管理中,应充分考虑森林碳汇效应,积极营造针阔混交林,尤其是该区的地带性植被类型阔叶红松林,避免营造纯林,特别是针叶纯林。

火强度对燃烧效率具有显著影响。各火强度对燃烧效率影响显著($P < 0.05$)。然而,随着火强度加大,其燃烧效率亦随之增大。火强度影响燃烧效率,从而影响计量森林火灾碳排放的计量参数,进而影响森林火灾排放的碳量。燃烧效率是估计森林火灾碳排放和含碳气体排放量的关键,亦是一个争议较大的参数。比较可靠的燃烧效率应来自于大量的实际调查资料,而目前有关林下植被森林火灾燃烧效率的数据尚未见报道^[27]。森林火灾过程中,由于受各种条件的影响,进而影响火灾过程中的火强度和火烈度,从而影响燃烧效率,对森林火灾碳排放起重要作用。研究结果表明,在各林型中针阔混交林型(包括阔叶红松林和落叶松-白桦混交林)的过火林地面积占森林火灾总过火面积的57.54%,由于针阔混交林燃烧效率较低,森林火灾中总碳排放量为22675610.98t,仅占总碳排放量的38.57%;尤其是针阔混交林森林火灾占总过火面积的20.71%,而碳排放量仅占总碳排放量的9.67%;而阔叶林型(包括白桦林、杨桦林、蒙古栎林和硬阔林)的过火林地面积占森林火灾总过火面积的25.01%,而森林火灾中所排放的碳量为20172464.40t,却占34.31%;针叶林型(包括落叶松林、樟子松林、云冷杉林)的过火林地面积占森林火灾总过火面积的17.45%,而森林火灾中所排放的碳量为15947044.76t,却占27.12%。通过以上分析可知,火强度对森林火灾的碳排放具有重要影响。因此,为了控制及降低火强度,减少森林火灾碳排放,就必须加强森林可燃物的调控管理(如计划烧除与可燃物生态调控),调控森林可燃物的燃烧性,特别是对于黑龙江省温带森林,气候寒冷干燥,防火期较长,地表可燃物不易被分解,只有实施科学合理的计划烧除,减少地表可燃物的积累,降低发生森林大火的可燃物条件,充分发挥火因子在

生态系统生态过程中的有效调节作用,通过科学的林火管理措施使森林生态系统达到可持续发展的水平,维持生态系统可持续发展的动态平衡和状态,才是森林防火工作的治本之策^[34],从而使森林防火工作走上现代林火生态系统管理的正确路径。

火强度对 4 种含碳气体排放因子具有显著影响。各火强度对 CO₂ 的排放因子影响显著 ($P < 0.05$)。然而,随着火强度加大,其 CO₂ 的排放因子亦随之增大。各火强度对 CO、CH₄ 和 NMHC 的排放因子影响显著 ($P < 0.05$)。随着火强度的不断加大,其 CO、CH₄ 和 NMHC 的排放因子随之减小。火强度是影响排放因子的重要因子,从而影响着森林火灾各排放气体的种类及比例。通过以上研究可知,比较干燥立地类型的林型(如针叶林、云杉林、蒙古栎林)的 CO₂ 排放因子较高,而其他含碳气体的排放因子相对较低;相反 CO₂ 排放因子在较湿润立地类型的林型(如针阔混交林、阔叶红松林、硬阔林)相对较低,而其他含碳气体的排放因子反而较高,这是因为 CO₂ 是森林可燃物的有焰燃烧,森林可燃物燃烧时氧气供应较为充分,是完全燃烧的产物;而氧气供应较为不充分时,导致森林可燃物不完全燃烧,就易产生较多的 CO、CH₄ 和 NMHC,从而导致其排放因子较高。在各组分之间,比较干燥和较易着火组分(草本层和凋落物层)的 CO₂ 排放因子较高,反之则反。同时研究发现针阔混交林(包括阔叶红松林和落叶松-白桦混交林)的过火林地面积占森林火灾总过火面积的 57.54%,由于针阔混交林燃烧效率较低,且 CO₂ 的排放因子较低,森林火灾中 CO₂ 排放量为 7.27×10^7 t,仅占总 CO₂ 排放量的 38.48%,而针叶林的燃烧效率较高,且 CO₂ 的排放因子较高,森林火灾中 CO₂ 排放量较多。有焰燃烧是氧气供给较为充分的表现,高强度火灾中有焰燃烧所占的比重较大,从而使 CO₂ 所占比重大。同时在低强度的火灾中,无焰燃烧所占的比重较大,从而使其他含碳气体的排放因子较高(见表 4)。为此,为了减少含碳气体排放,就需控制火强度。火强度主要受森林可燃物状况的影响,因而要加强森林可燃物的科学有效管理,合理调控森林可燃物,优化森林可燃物^[49-50]。对于黑龙江省温带林区需积极营造针阔混交林,尤其是该区的地带性植被类型阔叶红松林、硬阔林,避免营造纯林,特别是针叶纯林,真正实现绿色防火与林分防火

紧密结合的林火生态系统管理的科学路径。

References:

- [1] Lü A F , Tian H Q , Liu Y Q . State-of-the-Art in quantifying fire disturbance and ecosystem carbon cycle. *Acta Ecologica Sinica* , 2005 , 25(10) : 2734-2743 .
- [2] Wei S J , Hu H Q , Sun L , Wei S W , Li S Y . Situation on our country' s sustainable management of forest fuel under the background of climate and its countermeasures. *Forest Fire Prevention* , 2012 , (2) : 22-25 .
- [3] Petit J R , Jouzel J , Raynaud D , Barkov N I , Barnola J M , Basile I , Bender M , Chappellaz J , Davis M , Delaygue G , Delmotte M , Kotlyakov V M , Legrand M , Lipenkov V Y , Lorius C , Pépin L , Ritz C , Saltzman E , Stievenard M . Climate and atmospheric history of the past 420 000 years from the Vostok ice core , Antarctic. *Nature* , 1999 , 399(6735) : 429-436 .
- [4] Hu H Q , Wei S J , Wei S W , Sun L . Effect of fire disturbance on forest ecosystem carbon cycle under the background of climate warming. *Journal of Catastrophology* , 2012 , 27(4) : 37-41 .
- [5] Hu H Q , Wei S J , Sun L . Estimating carbon emissions from forest fires during 2001 to 2010 in Daxing'anling Mountain. *Acta Ecologica Sinica* , 2012 , 32(17) : 5373-5386 .
- [6] Clark J S . Effect of climate change on fire regimes in northwestern Minnesota. *Nature* , 1988 , 334(6179) : 233-235 .
- [7] Neary D G , Klopatek C C , DeBano L F , Ffolliott P F . Fire effects on belowground sustainability: a review and synthesis. *Forest Ecology and Management* , 1999 , 122(1/2) : 51-71 .
- [8] Wei S J , Hu H Q , Sun L , Zhou R L . Situation on our country' s forest fire prevention under the background of climate and its countermeasures. *Forest Fire Prevention* , 2011 , (2) : 1-4 .
- [9] Robinson J M . On uncertainty in the computation of global emissions from biomass burning. *Climatic Change* , 1989 , 14(3) : 243-262 .
- [10] Levine J S , Cofer W R III , Cahoon D R Jr . Biomass burning: a driver for global change. *Environmental Science and Technology* , 1995 , 29(3) : 120-125 .
- [11] Aulair A N D , Carter T B . Forest wildfire as a recent source of CO₂ at northern latitudes. *Canadian Journal of Forest Research* , 1993 , 23(8) : 1528-1536 .
- [12] Amiro B D , Todd J B , Wotton B M . Direct carbon emissions from Canadian forest fires 1959-1999. *Canadian Journal of Forest Research* , 2001 , 31(3) : 512-525 .
- [13] Choi S D , Chang Y S , Park B K . Increase in carbon emissions from forest fires after intensive reforestation and forest management programs. *Science of the Total Environment* , 2006 , 372(1) : 225-235 .
- [14] Kasischke E S , Bruhwiler L P . Emissions of carbon dioxide , carbon monoxide , and methane from boreal forest fires in 1998 .

- Journal of Geophysical Research , 2003 , 107 (D1) , doi: 10.1029/2001JD000461.
- [15] Lavoue D , Stocks B J. Emissions of air pollutants by Canadian wildfires from 2000 to 2004. *International Journal of Wildland Fire* , 2011 , 20(1) : 17–34.
- [16] French N H F , Kasischke E S , Williams D G. Variability in the emission of carbon-based trace gases from wildfire in the Alaskan boreal forest. *Journal of Geophysical Research* , 2003 , 108 , doi: 10.1029/2001JD000480.
- [17] French N H F , Goovaerts P , Kasischke E S. Uncertainty in estimating carbon emissions from boreal forest fires. *Journal of Geophysics Research* , 2004 , 109 , doi: 10.1029/2003JD003635.
- [18] Cahoon D R Jr , Stocks B J , Levine J S , Cofer W R III , Pierson J M. Satellite analysis of the severe 1987 forest fires in northern China and southeastern Siberia. *Journal of Geophysics Research* , 1994 , 99(D9) : 18627–18638.
- [19] Hu H Q , Wei S J , Jin S , Sun L. Measurement model of carbon emission from forest fire: A review. *Chinese Journal of Applied Ecology* , 2012 , 23(5) : 1423–1434.
- [20] Isaev A S , Korovin G N , Bartalev S A , Ershov D V , Janetos A , Kasischke E S , Shugart H H , French N H F , Orlick B E , Murphy T L. Using remote sensing to assess Russian forest fire carbon emissions. *Climatic Change* , 2002 , 55(1/2) : 235–249.
- [21] Zhang Y H , Wooster M J , Tutubalina O , Perry G LW. Monthly burned area and forest fire carbon emission Estimates for the Russian Federation from SPOTVGT. *Remote Sensing of Environment* , 2003 , 87(1) : 1–15.
- [22] Kasischke E S , French N H F , Bourgeau-Chavez L L , Christensen N L. Estimating release of carbon from 1990 and 1991 forest fires in Alaska. *Journal of Geophysics Research* , 1995 , 100 (D2) : 2941–2951.
- [23] Wang X K , Feng Z W , Zhuang Y H. CO₂ , CO and CH₄ emissions from forest fires in China. *Scientia Silvae Sinicae* , 2001 , 37(1) : 90–95.
- [24] Tian X R , Shu L F , Wang M Y. Direct carbon emissions from Chinese forest fires , 1991—2000. *Fire Safety Science* , 2003 , 12 (1) : 7–10.
- [25] Lü A F , Tian H Q. Interaction among climatic change , fire disturbance and ecosystem productivity. *Journal of Plant Ecology* , 2007 , 31(2) : 242–251.
- [26] Lü A F , Tian H Q , Liu M L , Liu J Y , Melillo J M. Spatial and temporal patterns of carbon emissions from forest fires in China from 1950 to 2000. *Journal of Geophysics Research* , 2006 , 111 (D5) : doi: 10.1029/2005JD006198.
- [27] Hu H Q , Sun L. Estimation of carbon release from shrubs , herbage and litters in Daxing'an Mountains by forest fires in 1980—1999. *Chinese Journal of Applied Ecology* , 2007 , 18 (12) : 2647–2653.
- [28] Sun L , Zhang Y , Guo Q X , Hu H Q. Carbon emission and dynamic of NPP post forest fires in 1987 in Daxing'an Mountains. *Scientia Silvae Sinicae* , 2009 , 45(12) : 101–104.
- [29] Hu H Q , Li A B. Characteristics of gas release during combustion of main arbor and shrub species in Xiaoxing'an Mountain. *Chinese Journal of Applied Ecology* , 2008 , 19(7) : 1431–1436.
- [30] Yang G F , Jiang H , Yu S Q , Zhou G M , Jia W J. Estimation of carbon emission from forest fires in Zhejiang Province of China in 1991—2006. *Chinese Journal of Applied Ecology* , 2009 , 20(5) : 1038–1043.
- [31] Tian X R , Yin L , Shu L F , Wang M Y. Carbon emission from forest fires in Daxing'anling region in 2005—2007. *Chinese Journal of Applied Ecology* , 2009 , 20(12) : 2877–2883.
- [32] Sun L , Hu H Q , Guo Q X , Lü X S. Estimating carbon emissions from forest fires during 1980 to 1999 in Daxing'an Mountain , China. *African Journal of Biotechnology* , 2011 , 10 (41) : 8046–8053.
- [33] Huang L , Shao Q Q , Liu J Y. Carbon losses from forest fire in Jiangxi Province , China in 1950—2008. *Chinese Journal of Applied Ecology* , 2010 , 21(9) : 2241–2248.
- [34] Hu H Q , Wei S J , Sun L. Estimation of carbon emissions due to forest fire in Daxing'an Mountains from 1965 to 2010. *Chinese Journal of Plant Ecology* , 2012 , 36(7) : 629–644.
- [35] Hu H Q , Wei S J , Sun L. Estimation of carbon emissions from forest fires in 2010 in Huzhong of Daxing'anling mountain. *Scientia Silvae Sinicae* , 2012 , 48(10) : 109–119.
- [36] Jiao Y , Hu H Q. Estimation of Carbon Emission from Forest Fires in Heilongjiang Province during 1980—1999. *Scientia Silvae Sinicae* , 2005 , 41(6) : 109–113.
- [37] Houghton R A , Skole D L , Nobre C A , Hackler L , Lawrence I K T , Chomentowski W H. Annual fluxes of carbon from deforestation and regrowth in the Brazilian Amazon. *Nature* , 2000 , 403(6767) : 301–304.
- [38] Crutzen P J , Andreae M O. Biomass burning in the tropics: impact on atmospheric chemistry and biogeochemical cycles. *Science* , 1990 , 250(4988) : 1669–1678.
- [39] Dixon R K , Solomon A M , Brown S , Houghton R A , Trexler M C , Wisniewski J. Carbon pools and flux of global forest ecosystems. *Science* , 1994 , 263(5144) : 185–190.
- [40] Fang J Y , Chen A P , Peng C H , Zhao S Q , Ci L J. Changes in forest biomass carbon storage in China between 1949 and 1998. *Science* , 2001 , 292(5525) : 2320–2322.
- [41] Kasischke E S , Stocks B J. Fire , Climate change , and carbon cycling in the boreal forest. New York: Springer Verlag , 2000 , 377–389.
- [42] Streets D G , Yarber K F , Woo J H , Carmichael G R. Biomass burning in Asia: annual and seasonal estimates and atmospheric Emissions. *Global Biogeochemical Cycles* , 2003 , 17 (4) : 1099–1119.

- [43] Wiedinmyer C, Hurteau M D. Prescribed fire as a means of reducing forest carbon emissions in the western United States. *Environmental Science and Technology*, 2010, 44 (6): 1926-1932.
- [44] Lu B, Kong S F, Han B, Wang X Y, Bai Z P. Inventory of atmospheric pollutants discharged from biomass burning in China continent in 2007. *China Environmental Science*, 2011, 31(2): 186-194.
- [45] Shan Y L, Wang S Q, Zeng C, Zhai C G, Zhang J. Carbon emission from forest fires of main forest types in Jilin Province. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(9): 2254-2260.
- [46] Qiu Y, Li Z D, Zhang Y J, Xu H C, Yu R Y. The effects of fire disturbance on the biodiversity of understory plant in virginal forest, northern region of Daxing'anling Mountains, China. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(9): 2863-2869.
- [47] Hu H Q, Zhao Z K, Wang X C, Zhang Y D. Fire history of Mongolian pine (*Pinus sylvestris* var. *mongolica*) forests in Mengkeshan of Tahe, China. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(23): 6372-6379.
- [48] Liu Z H, Yang J, He H S, Chang Y. Spatial point analysis of fire occurrence and its influence factor in Huzhong forest area of the Great Xing'an Mountains in Heilongjiang Province, China. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(6): 1669-1677.
- [49] Hu H Q, Wei S J, Sun L, Wang M Y. Interaction among climate change, fire disturbance and ecosystem carbon cycle. *Arid Land Geography*, 2013, 36(1): 57-75.
- [50] Hu H Q, Luo B Z, Wei S J, Sun L, Wei S W, Wen Z M. Estimation of carbonaceous gases emission from forest fires in Xiao Xing'an Mountains of Northeast China in 1953-2011. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2013, 24(11): 3065-3076.
- [23] 王效科, 冯宗炜, 庄亚辉. 中国森林火灾释放的 CO₂、CO 和 CH₄ 研究. *林业科学*, 2001, 37(1): 90-95.
- [24] 田晓瑞, 舒立福, 王明玉. 1991—2000 年中国森林火灾直接释放碳量估算. *火灾科学*, 2003, 12(1): 7-10.
- [25] 吕爱锋, 田汉勤. 气候变化、火干扰与生态系统生产力. *植物生态学报*, 2007, 31(2): 242-251.
- [27] 胡海清, 孙龙. 1980—1999 年大兴安岭灌木、草本和地被物林火碳释放估算. *应用生态学报*, 2007, 18(12): 2647-2653.
- [28] 孙龙, 张瑶, 国庆喜, 胡海清. 1987 年大兴安岭林火碳释放及火后 NPP 恢复. *林业科学*, 2009, 45(12): 100-104.
- [29] 胡海清, 李敖彬. 小兴安岭主要乔、灌木燃烧过程的烟气释放特征. *应用生态学报*, 2008, 19(7): 1431-1436.
- [30] 杨国福, 江洪, 余树全, 周国模, 贾伟江. 浙江省 1991—2006 森林火灾直接碳释放量的估算. *应用生态学报*, 2009, 20(5): 1038-1043.
- [31] 田晓瑞, 殷丽, 舒立福, 王明玉. 2005—2007 年大兴安岭林火释放碳量. *应用生态学报*, 2009, 20(12): 2877-2883.
- [33] 黄麟, 邵全琴, 刘纪远. 1950—2008 年江西省森林火灾的碳损失估算. *应用生态学报*, 2010, 21(9): 2241-2248.
- [34] 胡海清, 魏书精, 孙龙. 1965—2010 年大兴安岭森林火灾碳排放的估算研究. *植物生态学报*, 2012, 36(7): 629-644.
- [35] 胡海清, 魏书精, 孙龙. 大兴安岭呼中区 2010 年森林火灾碳排放的计量估算. *林业科学*, 2012, 48(10): 109-119.
- [36] 焦燕, 胡海清. 黑龙江省 1980—1999 年森林火灾释放碳量的估算. *林业科学*, 2005, 41(6): 109-113.
- [44] 陆炳, 孔少飞, 韩斌, 王秀艳, 王志鹏. 2007 年中国大陆地区生物质燃烧排放污染物清单. *中国环境科学*, 2011, 31(2): 186-194.
- [45] 单延龙, 王淑群, 曾超, 翟成刚, 张姣. 吉林省主要林型森林火灾的碳量释放. *生态学报*, 2010, 30(9): 2254-2260.
- [46] 邱扬, 李湛东, 张玉钧, 徐化成, 于汝元. 火干扰对大兴安岭北部原始林下层植物多样性的影响. *生态学报*, 2006, 26(9): 2863-2869.
- [47] 胡海清, 赵致奎, 王晓春, 张远东. 基于树轮火疤塔河蒙克山樟子松林火灾的频度分析. *生态学报*, 2010, 30(23): 6372-6379.
- [48] 刘志华, 杨健, 贺红士, 常禹. 黑龙江大兴安岭呼中林区火烧点格局分析及影响因素. *生态学报*, 2011, 31(6): 1669-1677.
- [49] 胡海清, 魏书精, 孙龙, 王明玉. 气候变化、火干扰与生态系统碳循环. *干旱区地理*, 2013, 36(1): 57-75.
- [50] 胡海清, 罗碧珍, 魏书精, 孙龙, 魏书威, 文正敏. 1953—2011 年小兴安岭森林火灾含碳气体排放的估算. *应用生态学报*, 2013, 24(11): 3065-3076.

参考文献:

- [1] 吕爱锋, 田汉勤, 刘永强. 火干扰与生态系统的碳循环. *生态学报*, 2005, 25(10): 2734-2743.
- [2] 魏书精, 胡海清, 孙龙, 魏书威, 李世友. 气候变化背景下我国森林可燃物可持续管理的形势及对策. *森林防火*, 2012, (2): 22-25.
- [4] 胡海清, 魏书精, 魏书威, 孙龙. 气候变暖背景下火干扰对森林生态系统碳循环的影响. *灾害学*, 2012, 27(4): 37-41.
- [5] 胡海清, 魏书精, 孙龙. 大兴安岭 2001—2010 年森林火灾碳排放的计量估算. *生态学报*, 2012, 32(17): 5373-5386.
- [8] 魏书精, 胡海清, 孙龙, 周汝良. 气候变化背景下我国森林防火工作的形势及对策. *森林防火*, 2011, (2): 1-4.
- [19] 胡海清, 魏书精, 金森, 孙龙. 森林火灾碳排放计量模型研究进展. *应用生态学报*, 2012, 23(5): 1423-1434.