

1953—2011 年小兴安岭森林火灾含碳 气体排放的估算*

胡海清¹ 罗碧珍¹ 魏书精^{1,2**} 孙 龙¹ 魏书威³ 文正敏²

(¹东北林业大学林学院, 哈尔滨 150040; ²桂林理工大学, 广西桂林 541004; ³兰州理工大学, 兰州 730050)

摘 要 根据 1953—2011 年小兴安岭森林调查数据和森林火灾统计资料, 结合野外火烧迹地调查与室内控制试验数据, 估算了小兴安岭 1953—2011 年森林火灾的碳排放量和含碳气体排放量。结果表明: 1953—2011 年小兴安岭森林火灾的总碳排放量为 1.12×10^7 t, 年均排放量为 1.90×10^5 t, 约占全国年均森林火灾碳排放量的 1.7%; 其中, 含碳气体 CO_2 、 CO 、 CH_4 和非甲烷烃 (NMHC) 的排放量分别为 3.39×10^7 、 1.94×10^5 、 1.09×10^5 和 7.46×10^4 t, 相应年均排放量 5.74×10^5 、 3.29×10^4 、 1.85×10^3 、 1.27×10^3 t 分别占全国年均森林火灾含碳气体排放量的 1.4%、1.2%、1.7% 和 1.1%。不同林型的燃烧效率和单位过火面积的碳排放量均为针叶林 > 阔叶林 > 针阔混交林。最后提出了合理的林火管理措施。

关键词 森林火灾 碳排放 含碳气体排放 小兴安岭 林火管理措施

文章编号 1001-9332(2013)11-3065-12 **中图分类号** Q143; S762.1 **文献标识码** A

Estimation of carbonaceous gases emission from forest fires in Xiao Xing'an Mountains of Northeast China in 1953–2011. HU Hai-qing¹, LUO Bi-zhen¹, WEI Shu-jing^{1,2}, SUN Long¹, WEI Shu-wei³, WEN Zheng-min² (¹College of Forestry, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China; ²Guilin University of Technology, Guilin 541004, Guangxi, China; ³Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China). -Chin. J. Appl. Ecol., 2013, 24(11): 3065–3076.

Abstract: Based on the forest resources investigation data and the forest fire inventory in 1953–2011, in combining with our field research in burned areas and our laboratory experiments, this paper estimated the carbonaceous gases carbon dioxide (CO_2), carbon monoxide (CO), methane (CH_4), and nonmethane hydrocarbons (NMHC) emission from the forest fires in Xiao Xing'an Mountains of Heilongjiang Province, Northeast China in 1953–2011. The total carbon emission from the forest fires in the Xiao Xing'an Mountains in 1953–2011 was 1.12×10^7 t, and the annual emission was averagely 1.90×10^5 t, accounting for 1.7% of the annual average total carbon emission from the forest fires in China. The emission of CO_2 , CO , CH_4 , and NMHC was 3.39×10^7 , 1.94×10^5 , 1.09×10^5 , and 7.46×10^4 t, respectively, and the corresponding annual average emission was 5.74×10^5 , 3.29×10^4 , 1.85×10^3 , and 1.27×10^3 t, accounting for 1.4%, 1.2%, 1.7%, and 1.1% of the annual carbonaceous gases emitted from the forest fires in China, respectively. The combustion efficiency and the carbon emission per unit burned area of different forest types decreased in order of coniferous forest > broad-leaved forest > coniferous broadleaved mixed forest. Some rational forest fire management measures were put forward.

Key words: forest fire; carbon emission; carbonaceous gases emission; Xiao Xing'an Mountain; forest fire management measure.

* 国家自然科学基金项目(51208244, 31070544)、黑龙江省科技攻关重点项目(GA09B201-06)、国家基础研究发展计划项目(2011CB403203)、林业公益性行业科研专项(201004003-6)和霍英东基金基础项目(131029)资助。

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

2012-10-29 收稿, 2013-08-20 接受。

人类活动引起的温室效应, 以及由此造成的气候变化和对全球生态环境的影响已受到国际社会的普遍关注^[1]。《联合国气候变化框架公约》和《京都议定书》的签订使得政府决策层、科研工作者及社会公众越来越关注全球气候变化问题^[2]。作为森林

生态系统重要的干扰因子,森林火灾对森林生态系统碳循环和碳平衡产生的重要影响,以及对未来气候变化的响应更是人们关注的重点^[1]。近年来,人类活动引起的温室气体增加,使全球气温明显升高,由此造成森林火灾频发、火灾强度加剧,过火面积扩大,碳排放增加,对大气碳平衡产生重要影响^[3]。森林火灾产生的各种含碳气体作为影响温室效应的重要因子,亦越来越受到国内外学者的广泛关注。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,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,减缓全球气候变化,是科研工作者必须考虑的问题。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,了解气候变暖、森林火灾干扰与森林生态系统碳循环之间的交互作用关系,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具有重要意义。

国内外有关森林火灾含碳气体排放的研究已大量开展。早在 20 世纪 60 年代,Robinson^[4]就开始探索计量森林火灾气体排放量的问题。随后,美国、加拿大和俄罗斯等国的学者通过野外采样试验估算了森林火灾排放的温室气体^[5]。通过室内模拟试验和野外观测,Aulahr 和 Carter^[6]对加拿大、俄罗斯和阿拉斯加北方森林因森林火灾而排放的碳量进行了计算。Amiro 等^[7]对 1959—1999 年加拿大森林火灾碳排放进行估算。French 等^[8]对北方森林碳排放中的不确定性进行分析。遥感平台与算法也不断应用到森林火灾碳排放的估算中,对火灾面积、可燃物载量、燃烧效率等进行估测^[9-10]。Isaev 等^[11]应用多光谱高分辨率卫星图像来估算俄罗斯森林火灾碳排放量。Zhang 等^[12]应用 SPOT 卫星图像估算每月燃烧区域和森林火灾碳排放量。Kasischke 等^[13]利用遥感影像估测了阿拉斯加 1990—1991 年的森林火灾面积并估算碳排放量。Cahoon 等^[9]采用遥感影像估测 1987 年中国东北和西伯利亚的森林火灾碳排放。国内学者对森林火灾排放的温室气体亦进行了探讨。王效科等^[14]用排放因子法和排放比法计算了我国森林火灾排放的 CO₂、CO 和 CH₄ 量。吕爱锋等^[15]对森林火灾含碳痕量气体排放进行了全面阐述。Lü 等^[16]估算了 1950—2000 年我国森林火灾排放的碳量和含碳气体量。胡海清和孙龙^[17]对大兴安岭林区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。胡海清和郭福涛^[18]进行了大兴安岭森林火灾中主要乔木树种含碳气体释放总量的估算。杨国福等^[19]估算了浙江省 1991—2006 年间年均森林火灾温室气体排放量。田晓瑞等^[20]估算了 2005—2007 年大兴安岭森林火灾碳排放。黄麟等^[21]对 1950—2008 年江西省森林火灾的碳排放进行估算。胡海清等^[1]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全面阐述。胡海清等^[10,22-24]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,并在不同时间尺度(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进行了计量估算。国内外有关森林火灾含碳气体排放的研究工作,有利于人们进一步了解森林火灾对大气碳平衡的影响,但各种计量参数的来源存在多样性及不确定性,且许多研究不经过试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,但其精度需进一步提高^[9-10]。小兴安岭作为重点火险区之一,在森林火灾的含碳气体排放计量方面缺乏必要的计量参数,为此,加强小兴安岭森林火灾含碳气体排放的研究具有重要意义。本文根据小兴安岭森林资源调查中各林型可燃物载量数据和实际测量数据,结合 1953—2011 年森林火灾统计资料,利用地理信息系统 GIS(geographic information systems)技术,通过野外火烧迹地调查与室内控制试验相结合的方法确定各种计量森林火灾碳排放的参数,采用排放因子法,从林分水平上估算了小兴安岭 1953—2011 年 59 年间森林火灾碳排放和含碳气体排放量。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

位于我国黑龙江省东北部的小兴安岭林区(46°28′—49°21′ N, 127°42′—130°14′ E),是我国少有的原始红松林区,有林地面积 3.10×10^6 hm²,森林覆盖率为 80.6%,素有“红松故乡”的美誉,是松嫩平原和三江平原的天然屏障。该区属于温带大陆性季风气候,冬季寒冷漫长,夏季炎热多雨,春秋季节大风干燥,年均气温为 -1 ~ 1 °C,全年降水量 550 ~ 670 mm,降水多集中于 7—8 月,占年降水量的 85% 以上^[25]。土壤类型主要为棕色针叶林土、暗棕壤、灰色森林土、草甸土和沼泽土等。全区地势比较平缓,海拔 400 ~ 1000 m。该区地带性植被以红松(*Pinus*

koraiensis) 为主的温带针叶、阔叶混交林,其次是落叶松(*Larix gmelinii*)、白桦(*Betula platyphylla*)、云杉(*Picea asperata*)、臭冷杉(*Abies nephrolepis*),此外,水曲柳(*Fraxinus mandshurica*)、黄波罗(*Phellodendron amurense*)、胡桃楸(*Juglans mandshurica*)、蒙古栎(*Quercus mongolica*)、山杨(*Populus davidiana*)、毛赤杨(*Alnus sibirica*)、大青杨(*Populus ussuriensis*)、色木槭(*Acer mono*)、紫椴(*Tilia amurensis*)等亦广泛分布.小兴安岭作为国家的重点林区,亦是全国重点火险区、森林火灾的高发区之一,是我国森林火灾危害较为严重的地区.

1.2 研究方法

1.2.1 森林火灾统计资料 本文采用的 1953—2011 年小兴安岭森林火灾统计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.统计数据包括:每次森林火灾起火点的地理坐标、行政区域、过火林地面积、起火原因、林型、扑救信息和森林火灾损失等内容.1953—2011 年小兴安岭森林火灾次数与过火面积见图 1.1953—2011 年间,小兴安岭共发生森林火灾 2426 次,年均 41.12 次,总过火林地面积达 821219.78 hm²,年均过火林地面积为 1.39 × 10⁴ hm².该区的森林火灾分布特点是:森林火灾面积与火灾次数年际间波动较大,二者基本上呈正相关关系.

1.2.2 样地设置及森林可燃物载量调查 结合森林资源清查资料和林分生长状况,选择森林火灾的典型分布区域,在小兴安岭中部的五营林业局、南部的带岭林业局,分别于 2011 年 6 月、10 月和 2012 年 5 月、9 月的森林防火期进行外业调查和采样.为了更有效地获得森林可燃物载量,根据森林火灾所烧林型的分布特征,结合林分生长状况,选择有代表性的阔叶红松林、落叶松林、白桦林、落叶松-白桦混交

林、樟子松林、针叶林、阔叶林和针阔混交林 8 种林型进行调查采样.根据林分生长状况及森林火灾历史资料,采用随机布点法,每次在每种林型内设置 20 m×20 m 的 3 块重复样地作为标准样地(相对火烧迹地是对照样地),即每次设置 24 块样地,4 次共 96 块样地,调查各林型中乔木、灌木、草本、凋落物、腐殖质和粗木质残体(coarse woody debris,CWD)等组分.同时在当年火烧迹地上,分别设置重度火烧、中度火烧、轻度火烧的重复样地 3 块,每次设置 72 块标准样地(8 种林型×3 种火强度等级×3 个重复),4 次共设置 288 块样地.

1) 乔木层生物量调查:在标准样地内,以 5 cm 为起测胸径,调查样木的胸径、树高、树种、郁闭度、林龄、枝下高、冠幅和林分生长状况等信息,并分树种统计各径级的平均值,在每个对照样地内选取各径级的标准木 3 株,每个采样重复 3 次.主要采集乔木的干、枝、叶和皮,其中干和皮分别从树干基部、胸径和梢头 3 个部位进行取样,枝带皮从粗枝到小枝按比例取样,叶亦分别从不同部位取样.采集的样品野外称取鲜质量,标记好,带回实验室备测.

2) 灌木层生物量调查:根据灌木分布的均匀程度沿标准样地的对角线设置小样方.当分布较为均匀时设置 2 m×2 m 重复样方 5 个;当分布不均匀时设置 5 m×5 m 重复样方 5 个.调查灌木层的盖度、株数和平均高度,各树种数量、地径、高度等,然后按灌木种类齐地面收割样方内的所有灌木,称量并取样.

3) 草本层、凋落物层和腐殖质层可燃物载量调查:在标准样地内沿另一对角线设置 1 m×1 m 的重复样方 5 个,调查草本层的种类、盖度和平均高度,然后全部齐地面收割、称量并取样.并在草本层样方旁设置 1 m×1 m 的重复样方 5 个,分别收集小样方

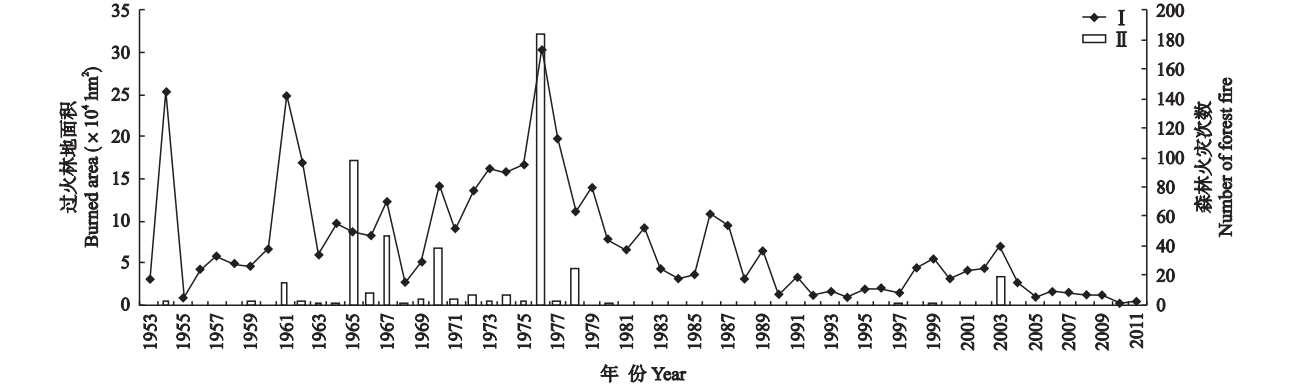


图 1 1953—2011 年小兴安岭森林火灾次数 (I) 与过火林地面积 (II)
Fig. 1 Forest fire number (I) and burned area (II) in Xiao Xing'an Mountain from 1953 to 2011.

内的枯枝和落叶(针叶和阔叶分开),记录其鲜质量并取样.收集完枯枝和落叶后,分别收集小样方内的腐殖质(包括分解层和半分解层)的样品,记录其鲜质量并取样.

4)粗木质残体可燃物载量调查:在标准样地内进行粗木质残体调查,记录倒木、枯立木、树桩、腐朽木等的长度和直径,取样方法与乔木层生物量调查相同,但由于其异质性较强,每次在样地内取 10 根不同径级较有代表性的粗木质残体.粗木质残体的定义为直径>7.62 cm 死木物质^[26].

用相对生长法测定乔木层生物量.根据小兴安岭树种的生物量回归方程测定树种各部位的生物量,根据林龄等因子估算单位面积生物量,并利用调查样地的单位面积生物量外推到林分水平(粗木质残体当作没有枝和叶的乔木进行载量估算).灌木、草本的生物量,以及凋落物和腐殖质载量的测定方法:采集到的样品经 80 ℃ 恒温烘干至恒量,粉碎、研磨,过 60 目筛,然后取 50 g 样品在 105 ℃ 下连续烘干 24 h 至恒量,用精度 0.01 g 的电子天平称量,计算可燃物含水率:(湿质量-干质量)/干质量×100%,并以此计算出单位面积的可燃物载量.

1.3 研究方法

1.3.1 可燃物含碳率的测定 按照一个比率(可燃物的干质量中碳所占的比重)可将森林可燃物载量转换为森林碳储量.对森林碳储量的计量,一般用直接或间接测定植被生物量的现存量乘以生物量中含碳率进行推算^[10].本文通过直接方法测定森林可燃物的含碳率.对采集的各种森林可燃物样品进行 3 次粉碎、制样,并用四分法进行取样,样品碳含量的测定采用干烧法.用 Multi N/C3000 分析仪(Analytik Jena AG, Germany)测定含碳率,每次测 3 个平行样,取平均值作为一个样本数,测量精度为 0.01%,误差为±0.2%^[24].用公式(样品含碳率=样品碳含量/样品干质量×100%)计算样品的含碳率.

1.3.2 火强度的确定 火烧强度是林火行为的重要标志之一,通常划分为 3 个等级:350 ~ 750 kW·m⁻²为低强度火;750 ~ 3500 kW·m⁻²为中强度火;>3500 kW·m⁻²为高强度火.目前国外主要以火线强度、火焰长度、火焰高度、可燃物载量和燃烧性,以及火蔓延速度等指标对森林火灾的火烧强度及其等级进行估算^[27-28].国内关于森林火灾火强度的估算均来自于火烧迹地的实际调查.其中以森林生态系统不同层次在火灾中的受害程度判断火强度的方法较为准确,但仅限于对火后短时间内开展的研

究^[23-24].本文把火强度分为重度、中度、轻度 3 个等级,主要通过不同火强度消耗可燃物的不同,推算火强度等级.划分火强度的标准为:I:重度火烧:火灾烧死木≥70%,活立木(包括烧伤木)≤30%,乔木熏黑高度≥5 m,林下灌木全部烧毁,凋落物烧光,腐殖质层全被烧掉;II:中度火烧:火灾烧死木在 30% ~ 70%,活立木(包括烧伤木)在 30% ~ 70%,乔木熏黑高度在 2 ~ 5 m,林下灌木几乎被烧毁(>50%),凋落物几乎被烧毁(>50%),腐殖质层几乎被烧毁(>50%);III:轻度火烧:火灾烧死木≤30%,活立木(包括烧伤木)≥70%,乔木熏黑高度≤2 m,林下灌木部分被烧毁(≤50%),凋落物部分被烧毁(≤50%),腐殖质层部分被烧毁(≤50%).

1.3.3 燃烧效率的测定 燃烧效率是指可燃物被燃烧的部分占总干质量的比例,是可燃物燃烧时计量碳排放量的关键因子^[10,15].通过火烧迹地火后的残余可燃物载量进行采样,计算出不同火强度下可燃物消耗剩余量.同时,通过估测火烧迹地附近未烧样地的可燃物载量,将未烧样地的可燃物载量(M)减去不同火强度下可燃物消耗剩余的量,得到可燃物的消耗量(M_i),可燃物的燃烧效率(β)计算公式为:

$$\beta = M_i / M \tag{1}$$

式中: M_i 的*i*表示可燃物消耗中的不同样本(*t*).

1.3.4 排放因子的测定 近年来我国学者对森林火灾的研究中,所用的排放因子均系国外学者在不同地区的实测数据^[10].本文采用动态燃烧系统进行含碳气体排放的测定.该系统由燃烧室、恒温加热系统、电子秤、KM9106 综合烟气分析仪(KM9106, KANE, Welwyn Garden City, English)、烟气罩、计算机、红外分析模块和 FIREWORKS 烟气分析处理软件组成,应用 KM9106 综合烟气分析仪进行含碳气体的连续分析,然后通过可燃物所排放的某种含碳气体量和可燃物燃烧过程中碳排放量的比例,推算出不同含碳气体的排放因子(E_{fs})^[29-31].其计算公式为:

$$E_{fs} = E_s / C_t \tag{2}$$

式中: E_s 为森林火灾排放的某种含碳气体; C_t 为可燃物燃烧过程中碳消耗量.

1.4 碳排放计量方法

1.4.1 碳排放量计量模型 Seiler 和 Crutzen^[32]提出了森林火灾燃烧损失可燃物载量的计量方法.后来经过许多学者的发展^[3,7,13],并充分考虑到地上(乔木、灌木、草本)可燃物部分,以及地表凋落物、腐殖质和粗木质残体对碳排放量的贡献^[10,14,33].在小兴

安岭温带林,每次火灾燃烧损失的可燃物量平均有 2/3 来自地表^[17]. 本文充分考虑到地表可燃物中凋落物、腐殖质和粗木质残体不同的燃烧效率,森林火灾碳排放的表达式可表示为:

$$C_t = A(B_a f_{ca} \beta_a + C_l \beta_l + C_d \beta_d + C_c \beta_c) \quad (3)$$

式中: C_t 为可燃物燃烧过程中排放的总碳量(t); A 为森林火灾的燃烧面积(hm^2); B_a 为未燃烧前某一单位面积内平均的可燃物载量($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$); f_{ca} 为可燃物中的含碳率; β_a 为可燃物的燃烧效率; C_l 为地表凋落物的碳密度($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$); β_l 为地表凋落物的燃烧效率; C_d 为腐殖质的碳密度($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$); β_d 为腐殖质的燃烧效率; C_c 为粗木质残体的碳密度($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$); β_c 为粗木质残体的燃烧效率.

1.4.2 含碳气体排放量计量方法 森林火灾含碳气体排放量的计量是利用可燃物燃烧过程中碳排放量,再利用排放因子法进行含碳气体排放量的计量^[10]. 排放因子法是指单位质量干可燃物在燃烧过程中所排放的某种气体量. 森林火灾中某种含碳气体的排放量,为该气体的排放因子与燃烧过程中排放的碳量之积,某种含碳气体的排放量是基于式(3)提出的森林火灾燃烧损失可燃物载量的计量方法,其表达式^[34]为:

$$E_s = E_{fs} \times C_l \quad (4)$$

式中: E_s 为某种含碳气体的排放量(g); E_{fs} 为某种含碳气体的排放因子($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$); C_l 为可燃物燃烧所排放的碳量(kg).

把式(3)代入式(4):

$$E_s = A(B_a f_{ca} \beta_a + C_l \beta_l + C_d \beta_d + C_c \beta_c) E_{fs} \quad (5)$$

利用式(5)可对可燃物各组分的含碳气体排放量进行计量.

森林火灾碳排放量和含碳气体排放量计量估算模型流程图见图 2.

2 结果与分析

2.1 1953—2011 年小兴安岭林区不同林型的森林火灾面积分布

由表 1 可以看出,小兴安岭 1953—2011 年间森林火灾总面积为 821219 hm^2 . 各林型森林火灾总面积的大小顺序为:阔叶红松林>针阔混交林>落叶松-白桦混交林>白桦林>落叶松林>阔叶林>针叶林>樟子松林. 其中,阔叶红松林的过火面积最大,占总过火面积的 28.9%,其次为针阔混交林,占 21.7%,

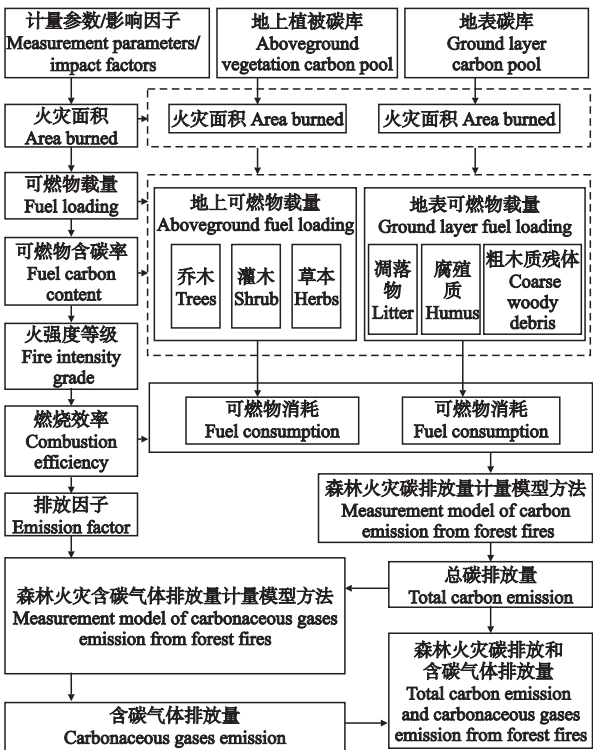


图 2 森林火灾碳排放量和含碳气体排放量估算模型流程图

Fig. 2 Flowchart of the estimation model of carbon emission and carbonaceous gases emission from forest fires.

樟子松林过火面积最小,只占总过火面积的 2.4%. 针阔混交林(包括阔叶红松林和落叶松-白桦混交林)的森林火灾面积占总过火面积的 66.4%,而阔叶林(包括白桦林)占 17.2%,针叶林(包括落叶松林、樟子松林)占 16.4%. 单因素方差分析结果表明,虽然 8 种林型过火面积之间差异较大,但在总体上林型对森林火灾面积的影响并不明显.

2.2 1953—2011 年小兴安岭林区不同林型的单位面积可燃物载量

单位面积可燃物载量地上部分主要包括乔木(干、枝、叶、皮)、灌木、草本、凋落物、腐殖质、粗木质残体等. 调查结果表明,不同林型各组分的森林可燃物样本数量为:乔木 96 个样本,灌木、草本、凋落物、腐殖质均为 288 个样本,粗木质残体 288 个样本. 由图 3 可以看出,阔叶红松林可燃物载量最大,达到 184.87 $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$,落叶松-白桦混交林其次,为 160.85 $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$,针叶林可燃物载量最小,仅有 129.69 $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$.

2.3 1953—2011 年小兴安岭林区各林型中森林可燃物的含碳率

由表 2 可以看出,不同林型各组分中的含碳率

表 1 1953—2011 年小兴安岭森林火灾的过火面积和火烧强度
Table 1 Burned area and fire intensity of forest fires in Xiao Xing'an Mountain from 1953 to 2011 (hm²)

| 火烧强度 Fire intensity | 林型 Forest type | | | | | | | | 总和 Total |
|------------------------|----------------|----------|----------|-----------|----------|----------|----------|-----------|-------------|
| | A | B | C | D | E | F | G | H | |
| I | 116618.07 | 19356.97 | 24145.59 | 59638.48 | 3880.96 | 8765.71 | 23319.59 | 95265.30 | 350990.67 |
| II | 85516.75 | 18033.25 | 24702.79 | 40210.85 | 1775.48 | 10275.35 | 11107.08 | 51417.56 | 243039.11 |
| III | 35279.82 | 29128.59 | 39596.99 | 29821.27 | 13642.22 | 29657.27 | 18213.52 | 31850.32 | 227190.00 |
| 总和 Total | 237414.64 | 66518.81 | 88445.37 | 129670.60 | 19298.66 | 48698.33 | 52640.19 | 178533.18 | 821219.78 |

I:轻度 Low; II:中度 Moderate; III:重度 High. A:阔叶红松林 *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:针叶林 Coniferous forests; G:阔叶林 Broad-leaved forests; H:针阔混交林 Coniferous broad-leaved mixed forests. 下同 The same below.

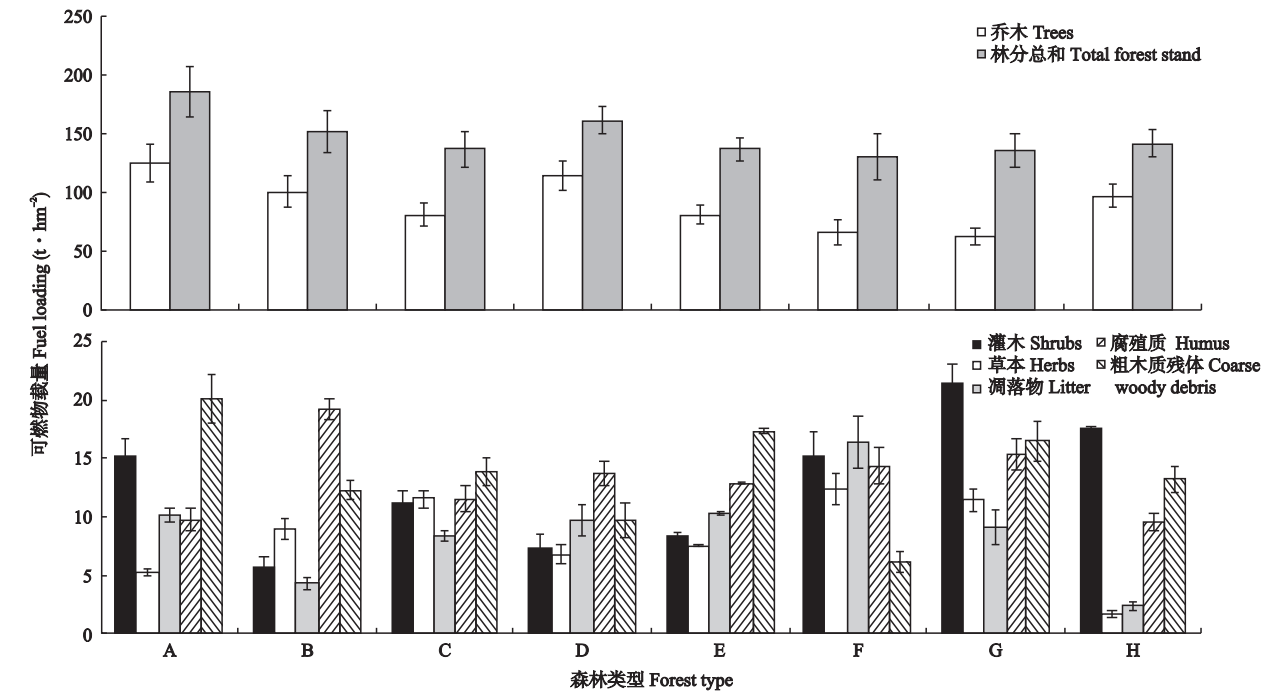


图 3 小兴安岭不同林型各组分单位面积可燃物载量
Fig. 3 Fuel load per unit area of different forest types in Xiao Xing'an Mountain (mean±SD, t · hm⁻²).

表 2 小兴安岭林区不同林型各组分可燃物含碳率
Table 2 Carbon content of fuel in different forest components in Xiao Xing'an Mountain (mean±SD, %)

| 组分 Component | 林型 Forest type | | | | | | | | 平均值 Mean |
|---------------------------|----------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|-------------|
| | A | B | C | D | E | F | G | H | |
| 乔木 Trees | 50.95±3.04 | 52.15±2.56 | 48.33±1.68 | 50.24±2.35 | 50.18±2.95 | 51.34±1.71 | 47.14±2.84 | 50.02±3.44 | 50.04±1.62 |
| 灌木 Shrubs | 49.75±1.14 | 49.23±1.48 | 48.12±3.13 | 49.24±0.96 | 49.12±2.38 | 49.21±1.99 | 46.87±1.46 | 49.03±2.59 | 48.82±0.91 |
| 草本 Herbs | 46.23±1.56 | 47.12±1.95 | 45.32±0.97 | 47.33±1.85 | 46.18±1.16 | 46.65±1.32 | 45.66±1.28 | 46.12±1.46 | 46.33±0.68 |
| 凋落物 Litter | 48.63±1.54 | 48.34±1.43 | 47.17±1.34 | 46.25±1.12 | 47.46±2.59 | 47.34±1.67 | 44.95±0.93 | 48.15±2.67 | 47.29±1.21 |
| 腐殖质 Humus | 45.50±0.94 | 46.31±0.97 | 45.41±0.98 | 45.23±0.46 | 45.24±1.34 | 45.13±0.54 | 44.35±1.24 | 45.11±0.83 | 45.29±0.54 |
| 粗木质残体 Coarse woody debris | 48.16±1.87 | 47.67±1.57 | 46.29±1.63 | 47.31±1.79 | 47.33±1.96 | 47.02±1.38 | 45.42±1.08 | 46.51±1.54 | 46.96±0.84 |
| 平均值 Mean | 48.20±2.09 | 48.47±2.06 | 46.77±1.31 | 47.60±1.86 | 47.58±1.82 | 47.78±2.18 | 45.73±1.08 | 47.49±1.88 | 47.45±0.86 |

从高到低的排列顺序依次为:乔木层>灌木层>凋落物层>粗木质残体层>草本层>腐殖质层. 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的含碳率. 各林型不同组分中的木质部分(乔木、灌木)的平均含碳率比较接近 0.5,而非木质部分(草本、腐殖质)的平均含碳率比较接近 0.45,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,针叶林的含碳率高于针阔混交林,针阔混交林高于阔叶林的含碳率,其中落叶松林的平均含碳率最高,其次为阔叶红松林,阔叶林含碳率最低. 国际上对各种树种常采用 0.5 作为平均的含碳率,国内外研究者大多也

采用 0.5 作为所有树种的平均含碳率,对凋落物、草本、腐殖质等非木质部分采用 0.45 这一数值作为平均含碳率^[5,35-38]. 本文通过实测,所得结果能更好地反映森林火灾的碳排放.

2.4 不同火强度下小兴安岭林区各林型的可燃物燃烧效率

由表 3 可以看出,在各林型不同组分中,乔木层的燃烧效率较低,为 0.02 ~ 0.26,其次为灌木层,在

0.07 ~ 0.26 之间,草本层在 0.21 ~ 1.00,凋落物层最高,在 0.30 ~ 1.00. 有研究表明,温带森林中地上部分生物量的燃烧效率为 0.09 ~ 0.16,地表部分可燃物的燃烧效率为 0.03 ~ 0.90^[6,16],各组分的燃烧效率与国外研究结果较相符^[16].

2.5 不同火强度下小兴安岭林区森林可燃物的碳排放量

由表 4 可以看出,小兴安岭 1953—2011 年

表 3 不同火烧强度下小兴安岭林区森林可燃物组分的燃烧效率
Table 3 Combustion efficiency of fuel in different forest components under different fire intensities in Xiao Xing'an Mountain (mean±SD, %)

| 组分 Component | 火烧强度 Fire intensity | 林型 Forest type | | | | | | | |
|------------------------------|------------------------|----------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| | | A | B | C | D | E | F | G | H |
| 乔木 Trees | I | 0.03±0.009 | 0.06±0.007 | 0.10±0.018 | 0.03±0.012 | 0.11±0.042 | 0.13±0.054 | 0.08±0.034 | 0.02±0.008 |
| | II | 0.05±0.016 | 0.08±0.009 | 0.13±0.034 | 0.09±0.013 | 0.13±0.049 | 0.19±0.033 | 0.12±0.034 | 0.04±0.015 |
| | III | 0.08±0.011 | 0.12±0.027 | 0.16±0.035 | 0.11±0.039 | 0.17±0.053 | 0.26±0.054 | 0.15±0.045 | 0.06±0.039 |
| 灌木 Shrubs | I | 0.09±0.021 | 0.09±0.014 | 0.08±0.008 | 0.09±0.013 | 0.10±0.016 | 0.15±0.015 | 0.11±0.017 | 0.07±0.014 |
| | II | 0.13±0.027 | 0.14±0.033 | 0.15±0.034 | 0.14±0.041 | 0.15±0.023 | 0.23±0.039 | 0.15±0.025 | 0.12±0.026 |
| | III | 0.18±0.042 | 0.19±0.046 | 0.20±0.022 | 0.18±0.034 | 0.23±0.045 | 0.26±0.057 | 0.21±0.051 | 0.21±0.044 |
| 草本 Herbs | I | 0.41±0.133 | 0.55±0.115 | 0.60±0.154 | 0.52±0.097 | 0.62±0.143 | 0.64±0.114 | 0.59±0.096 | 0.21±0.154 |
| | II | 0.73±0.245 | 0.83±0.132 | 0.85±0.084 | 0.81±0.123 | 0.85±0.103 | 0.89±0.098 | 0.88±0.094 | 0.45±0.145 |
| | III | 1.00±0.000 | 1.00±0.000 | 1.00±0.000 | 1.00±0.000 | 1.00±0.000 | 1.00±0.000 | 1.00±0.000 | 1.00±0.000 |
| 凋落物 Litter | I | 0.34±0.064 | 0.30±0.018 | 0.52±0.129 | 0.31±0.028 | 0.35±0.026 | 0.42±0.052 | 0.55±0.068 | 0.40±0.052 |
| | II | 0.61±0.019 | 0.44±0.036 | 0.78±0.164 | 0.55±0.064 | 0.65±0.054 | 0.61±0.046 | 0.81±0.123 | 0.62±0.095 |
| | III | 1.00±0.000 | 1.00±0.000 | 1.00±0.000 | 1.00±0.000 | 1.00±0.000 | 1.00±0.000 | 1.00±0.000 | 1.00±0.000 |
| 腐殖质 Humus | I | 0.22±0.029 | 0.18±0.035 | 0.13±0.041 | 0.23±0.062 | 0.32±0.027 | 0.36±0.023 | 0.28±0.021 | 0.12±0.013 |
| | II | 0.46±0.054 | 0.37±0.039 | 0.36±0.045 | 0.54±0.045 | 0.56±0.059 | 0.69±0.056 | 0.46±0.034 | 0.27±0.049 |
| | III | 0.85±0.064 | 0.84±0.095 | 0.77±0.154 | 0.87±0.134 | 0.82±0.039 | 0.96±0.085 | 0.85±0.065 | 0.75±0.098 |
| 粗木质残体 Coarse woody debris | I | 0.11±0.029 | 0.33±0.065 | 0.17±0.042 | 0.12±0.015 | 0.33±0.056 | 0.27±0.059 | 0.21±0.054 | 0.14±0.017 |
| | II | 0.30±0.064 | 0.45±0.074 | 0.35±0.044 | 0.29±0.035 | 0.46±0.059 | 0.58±0.092 | 0.33±0.032 | 0.25±0.023 |
| | III | 0.41±0.045 | 0.61±0.095 | 0.52±0.095 | 0.45±0.038 | 0.59±0.078 | 0.75±0.074 | 0.44±0.067 | 0.39±0.041 |

表 4 不同火强度下小兴安岭林区森林组分的可燃物总碳排放量
Table 4 Total carbon emission of fuel of different forest components under different fire intensities in Xiao Xing'an Mountain (10³ t)

| 组分 Component | 火烧强度 Fire intensity | 林型 Forest type | | | | | | | |
|------------------------------|------------------------|----------------|---------|---------|---------|--------|---------|---------|---------|
| | | A | B | C | D | E | F | G | H |
| 乔木 Trees | I | 221.67 | 60.68 | 93.74 | 102.06 | 17.21 | 38.23 | 53.89 | 92.03 |
| | II | 270.92 | 75.37 | 124.68 | 206.44 | 9.30 | 65.49 | 38.50 | 99.35 |
| | III | 178.83 | 182.61 | 245.97 | 187.12 | 93.49 | 258.67 | 78.92 | 92.31 |
| 灌木 Shrubs | I | 79.58 | 4.88 | 10.48 | 19.37 | 1.61 | 9.78 | 25.79 | 57.48 |
| | II | 84.29 | 7.07 | 20.09 | 20.32 | 1.11 | 17.58 | 16.75 | 53.18 |
| | III | 48.15 | 15.50 | 42.95 | 19.37 | 13.02 | 57.37 | 108.04 | 57.65 |
| 草本 Herbs | I | 115.16 | 45.05 | 75.90 | 99.08 | 8.40 | 32.29 | 71.93 | 16.15 |
| | II | 150.36 | 63.33 | 110.01 | 104.06 | 5.27 | 52.64 | 51.10 | 18.67 |
| | III | 84.97 | 123.25 | 207.45 | 95.27 | 47.63 | 170.73 | 95.22 | 25.71 |
| 凋落物 Litter | I | 195.33 | 12.13 | 49.57 | 83.71 | 6.65 | 28.53 | 52.75 | 43.12 |
| | II | 256.98 | 16.57 | 76.07 | 100.14 | 5.65 | 48.57 | 37.00 | 36.07 |
| | III | 173.80 | 60.83 | 156.33 | 135.03 | 66.82 | 229.83 | 74.91 | 36.04 |
| 腐殖质 Humus | I | 113.82 | 31.00 | 16.45 | 85.37 | 7.23 | 20.46 | 44.54 | 49.30 |
| | II | 174.51 | 59.36 | 46.60 | 135.14 | 5.78 | 45.98 | 34.85 | 59.87 |
| | III | 133.03 | 217.67 | 159.78 | 161.47 | 65.08 | 184.64 | 105.60 | 103.02 |
| 粗木质残体 Coarse woody debris | I | 124.67 | 37.33 | 26.39 | 32.77 | 10.50 | 6.84 | 36.68 | 82.25 |
| | II | 249.33 | 47.43 | 55.60 | 53.40 | 6.70 | 17.23 | 27.45 | 79.28 |
| | III | 140.58 | 103.84 | 132.39 | 61.46 | 65.98 | 64.32 | 60.02 | 76.61 |
| 总碳排放 Total carbon emission | | 2795.98 | 1163.91 | 1650.43 | 1701.57 | 437.42 | 1349.21 | 1013.95 | 1078.09 |

59 年间碳排放量为 1.12×10^7 t, 年均排放量为 1.90×10^5 t, 其中阔叶红松林的碳排放量最多, 占总碳排放量的 24.5%; 其次是落叶松-白桦林, 占总碳排放量的 15.2%; 樟子松林的碳排放量最少, 只占总碳排放量的 3.1%. 针阔混交林型(包括阔叶红松林和落叶松-白桦林)的燃烧效率较低, 其单位过火面积的碳排放量较少; 阔叶林型(包括白桦林)的燃烧效率高于针阔混交林型, 其单位过火面积的碳排放量较多; 针叶林型(包括落叶松林和樟子松林)的燃烧效率最高, 其单位过火面积的碳排放量亦最多.

2.6 1953—2011 年小兴安岭林区森林可燃物所排放含碳气体的排放因子

由表 5 可以看出, 比较干燥立地类型的林型(针叶林、阔叶林、落叶松林)的 CO_2 排放因子较高, 同时 CO 、 CH_4 和 NMHC 的排放因子较低, 较湿润立地类型的林型(针阔混交林、阔叶红松林)的 CO_2 排放因子较低, 而 CO 、 CH_4 和 NMHC 的排放因子较高. 这是因为 CO_2 是森林可燃物在氧气供应较为充分下

完全燃烧的产物; 当森林可燃物不完全燃烧时, 就易产生较多的 CO 、 CH_4 和 NMHC, 导致其排放因子较高. 在各组分之间, 干燥和较易着火组分(草本层和凋落物层)的 CO_2 排放因子较高, 而较湿润和难燃的组分(乔木层)的 CO_2 排放因子相对较低.

2.7 各林型可燃物载量所排放的含碳气体量

由表 6 可以看出, 1953—2011 年小兴安岭林区共排放 CO_2 3.39×10^7 t, 排放 CO 1.94×10^5 t, 排放 CH_4 1.09×10^5 t, 排放 NMHC 7.46×10^4 t, 含碳气体 CO_2 、 CO 、 CH_4 和 NMHC 的年均排放量分别为 5.74×10^5 、 3.29×10^4 、 1.85×10^3 和 1.27×10^3 t, 分别占全国年均森林火灾各含碳气体排放量的 1.4%、1.2%、1.7% 和 1.1%. 阔叶红松林的森林火灾面积占该区总过火面积的 28.9%, 但由于阔叶红松林是地带性植被类型, 轻度火烧强度所占的比例较大, 其 CO_2 排放量仅占总 CO_2 排放量的 25.8%. 而针叶林的过火面积虽只占总过火面积的 5.9%, 但其 CO_2 排放量却占该区总森林火灾 CO_2 排放量的 12.6%.

表 5 小兴安岭林区不同可燃物类型燃烧主要含碳气体的排放因子
Table 5 Emission factors for main carbonaceous gases emitted from various types of fuel burning in Xiao Xing'an Mountain (mean±SD, g · kg⁻¹ C)

| 组分 Component | 含碳气体类型 Carbonaceous gases type | 林 型 Forest type | | | | | | | |
|---------------------------------|--------------------------------------|-----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| | | A | B | C | D | E | F | G | H |
| 乔木 Trees | CO_2 | 3099.47±145.33 | 3145.64±91.15 | 3295.58±147.18 | 3149.23±177.24 | 3241.46±79.45 | 3335.30±84.57 | 3315.24±117.48 | 3048.56±188.14 |
| | CO | 254.49±29.34 | 208.87±41.46 | 187.49±38.24 | 144.28±27.87 | 198.36±45.34 | 129.34±47.94 | 142.56±39.68 | 231.45±49.62 |
| | CH_4 | 11.21±3.21 | 10.51±2.12 | 13.32±2.46 | 9.53±1.34 | 8.36±2.57 | 7.12±2.67 | 12.24±3.59 | 8.74±2.72 |
| | NMHC | 7.24±1.11 | 8.25±2.23 | 6.41±0.89 | 5.52±2.31 | 9.27±1.24 | 6.82±0.78 | 7.94±1.52 | 6.26±1.32 |
| 灌木 Shrubs | CO_2 | 3099.24±222.15 | 3165.48±245.46 | 3325.47±156.27 | 3241.75±137.57 | 3313.24±186.37 | 3363.18±89.46 | 3269.12±127.64 | 3014.48±159.46 |
| | CO | 211.24±23.42 | 189.33±34.24 | 163.45±12.45 | 184.43±25.34 | 156.26±19.67 | 156.31±25.99 | 110.22±34.90 | 201.23±15.30 |
| | CH_4 | 12.23±1.24 | 11.03±2.16 | 9.12±1.12 | 10.30±1.57 | 10.00±1.46 | 9.13±0.86 | 12.88±1.21 | 8.26±0.89 |
| | NMHC | 8.11±1.10 | 6.93±0.79 | 6.44±0.86 | 9.42±0.79 | 9.33±0.47 | 8.24±1.16 | 7.74±1.20 | 6.48±1.24 |
| 草本 Herbs | CO_2 | 3154.23±133.12 | 3168.61±114.25 | 3312.36±159.54 | 3178.28±124.64 | 3297.24±124.34 | 3346.17±184.56 | 3379.87±164.25 | 3112.12±135.35 |
| | CO | 189.33±26.31 | 199.32±33.32 | 169.25±26.46 | 154.55±19.56 | 155.24±29.16 | 134.33±35.36 | 143.79±34.46 | 186.67±42.16 |
| | CH_4 | 10.15±1.34 | 9.48±1.36 | 11.39±2.59 | 9.89±1.89 | 9.37±1.52 | 7.03±1.61 | 10.01±1.33 | 9.35±1.28 |
| | NMHC | 6.81±1.11 | 7.92±2.23 | 9.35±1.31 | 6.38±1.28 | 8.49±1.11 | 7.55±1.01 | 7.26±0.91 | 6.12±0.57 |
| 凋落物 Litter | CO_2 | 3211.15±159.65 | 3179.36±168.78 | 3359.15±129.51 | 3225.15±186.58 | 3300.01±100.35 | 3309.25±178.35 | 3329.87±139.18 | 3009.35±168.28 |
| | CO | 177.35±21.34 | 175.98±34.69 | 178.29±18.26 | 164.23±29.64 | 164.89±35.35 | 159.78±19.37 | 168.97±28.46 | 158.12±39.22 |
| | CH_4 | 11.36±1.57 | 10.59±1.68 | 10.87±2.24 | 10.29±2.33 | 9.31±0.98 | 8.04±1.25 | 11.24±1.27 | 9.05±1.24 |
| | NMHC | 7.33±1.02 | 6.84±0.78 | 8.16±1.14 | 7.18±1.11 | 6.59±1.47 | 7.21±1.24 | 6.70±0.48 | 6.29±0.67 |
| 腐殖质 Humus | CO_2 | 3111.21±145.42 | 3154.68±187.26 | 3298.28±167.34 | 3227.71±128.36 | 3357.21±189.46 | 3345.11±125.64 | 3297.10±134.48 | 3101.21±154.33 |
| | CO | 167.66±17.62 | 194.48±25.27 | 175.78±23.14 | 194.34±30.01 | 148.81±18.54 | 172.29±19.34 | 129.48±31.25 | 178.29±19.34 |
| | CH_4 | 11.47±0.57 | 10.28±1.09 | 10.47±0.97 | 9.69±1.21 | 9.09±0.95 | 10.35±1.29 | 11.24±1.48 | 9.11±1.42 |
| | NMHC | 7.06±0.31 | 7.65±0.84 | 7.25±0.71 | 6.21±0.49 | 7.28±0.52 | 8.11±1.01 | 8.27±1.14 | 7.23±1.18 |
| 粗木质残体 Coarse woody debris | CO_2 | 3015.21±213.45 | 3029.32±189.97 | 3159.57±248.27 | 3329.68±234.49 | 3187.29±145.27 | 3267.19±140.19 | 3287.19±234.12 | 3012.26±109.21 |
| | CO | 241.18±18.26 | 213.24±33.36 | 193.17±25.24 | 187.16±18.88 | 211.67±28.47 | 187.24±37.14 | 187.34±24.29 | 215.34±19.17 |
| | CH_4 | 11.39±1.18 | 11.24±1.79 | 12.12±1.47 | 10.19±1.10 | 9.12±1.49 | 8.09±1.19 | 11.31±2.46 | 8.14±1.24 |
| | NMHC | 6.76±1.04 | 7.46±1.17 | 7.24±0.48 | 6.59±0.74 | 8.16±0.79 | 7.26±0.84 | 8.15±0.97 | 6.21±1.01 |

NMHC: 非甲烷烃 Nonmethane hydrocarbons. 下同 The same below.

表 6 小兴安岭林区各林型不同组分的可燃物燃烧排放的主要含碳气体量
Table 6 Main carbonaceous gases emission of the fuel burning of different forest components in Xiao Xing' an Mountain (mean±SD, t)

| 组分 Component | 含碳气体类型 Carbonaceous gases type | 林 型 Forest type | | | | | | | |
|---------------------------------|--------------------------------------|--------------------------|------------------------|-------------------------|-------------------------|------------------------|-------------------------|------------------------|-------------------------|
| | | A | B | C | D | E | F | G | H |
| 乔木 Trees | CO ₂ | 2081065.02± 97578.35 | 765308.46± 22176.05 | 1119536.6± 49998.30 | 910683.61± 51253.66 | 358808.52± 8794.60 | 990226.15± 25108.21 | 440305.43± 15602.82 | 561986.70± 34682.66 |
| | | 170871.23± 19699.64 | 50816.36± 10086.88 | 63691.95± 12990.45 | 41722.40± 8059.35 | 21957.16± 5018.84 | 38400.10± 14233.04 | 18933.75± 5270.00 | 42666.64± 9147.20 |
| | CH ₄ | 7526.69± 2155.28 | 2557.00± 515.78 | 4524.92± 835.68 | 2755.85± 387.50 | 925.40± 284.48 | 2113.88± 792.70 | 1625.63± 476.80 | 1611.18± 501.42 |
| | | 4861.12± 745.28 | 2007.16± 542.54 | 2177.53± 302.34 | 1596.25± 668.00 | 1026.13± 137.26 | 2024.81± 231.58 | 1054.53± 201.88 | 1154.00± 243.34 |
| | NMHC | 657082.17± 47098.90 | 86908.36± 6739.11 | 244483.18± 11488.72 | 191475.20± 8125.62 | 52149.60± 2933.42 | 284999.31± 7580.93 | 492247.55± 19219.39 | 507380.95± ±26839.44 |
| | | 44785.83± 4965.37 | 5198.06± 940.06 | 12016.58± 915.30 | 10893.43± 1496.72 | 2459.49± 309.60 | 13245.87± 2202.42 | 16596.37± 5255.07 | 33869.94± 2575.21 |
| | CH ₄ | 2592.93± 262.90 | 302.83± 59.30 | 670.49± 82.34 | 608.37± 92.73 | 157.40± 22.98 | 773.69± 72.88 | 1939.41± 182.20 | 1390.28± 149.80 |
| | | 1719.43± 233.22 | 190.26± 21.69 | 473.46± 63.23 | 556.40± 46.66 | 146.85± 7.40 | 698.27± 98.30 | 1165.45± 180.69 | 1090.68± 208.71 |
| 灌木 Shrubs | CO ₂ | 1105551.61± 46658.31 | 733964.75± 26464.43 | 1302925.11± 62755.46 | 948414.58± 37193.20 | 202111.38± 7621.69 | 855497.83± 47185.49 | 737665.49± 35847.99 | 188369.17± 8192.41 |
| | | 66359.80± 9221.60 | 46169.73± 7718.12 | 66574.91± 10408.11 | 46118.49± 5836.80 | 9515.77± 1787.42 | 34343.45± 9040.31 | 31382.54± 7520.99 | 11298.69± 2551.84 |
| | CO | 3557.56± 469.67 | 2195.91± 315.03 | 4480.29± 1018.78 | 2951.23± 563.99 | 574.35± 93.17 | 1797.32± 411.62 | 2184.71± 290.28 | 565.93± 77.48 |
| | | 2386.89± 389.05 | 1834.56± 516.55 | 3677.85± 515.29 | 1903.82± 381.96 | 520.41± 68.04 | 1930.27± 258.22 | 1584.51± 198.61 | 370.43± 34.50 |
| | NMHC | 2010496.83± 99956.66 | 284633.97± 15110.12 | 947209.15± 36519.08 | 1028424.06± 59495.95 | 261107.52± 7940.02 | 1015726.10± 54741.94 | 548313.66± 22918.10 | 346765.05± 19390.77 |
| | | 111038.60± 13360.95 | 15754.71± 3105.64 | 50274.00± 5148.93 | 52369.06± 9451.50 | 13046.63± 2797.01 | 49042.14± 5945.34 | 27823.48± 4686.37 | 18220.04± 4519.29 |
| | CH ₄ | 7112.48± 982.97 | 948.08± 150.40 | 3065.11± 631.63 | 3281.24± 742.98 | 736.64± 77.54 | 2467.76± 383.67 | 1850.84± 209.12 | 1042.82± 142.88 |
| | | 4589.30± 638.62 | 612.35± 69.83 | 230.09± 321.46 | 2289.53± 353.95 | 521.42± 116.31 | 2213.00± 380.60 | 1103.26± 79.04 | 724.79± 77.20 |
| 凋落物 Litter | CO ₂ | 1310945.05± 61274.43 | 971721.65± 57680.84 | 734944.54± 37287.80 | 1232913.34± 49030.66 | 262171.26± 14795.31 | 839904.70± 31546.24 | 609923.70± 24877.18 | 658032.66± 32746.63 |
| | | 70645.52± 7424.39 | 59904.79± 7783.80 | 39168.46± 5156.21 | 74233.55± 11463.15 | 11620.87± 1447.83 | 43259.32± 4855.97 | 23952.24± 5780.87 | 37830.60± 4103.67 |
| | CO | 4833.02± 240.18 | 3166.50± 335.75 | 2332.99± 216.14 | 3701.36± 462.19 | 709.86± 74.19 | 2598.72± 323.90 | 2079.26± 273.78 | 1933.01± 301.30 |
| | | 2974.81± 130.62 | 2356.39± 258.74 | 1615.49± 158.21 | 2372.08± 187.17 | 568.51± 40.61 | 2036.29± 253.60 | 1529.85± 210.89 | 1534.10± 250.38 |
| | NMHC | 1551574.46± 109837.65 | 571341.70± 35829.09 | 677326.60± 53222.39 | 491575.18± 34618.78 | 265103.65± 12082.87 | 288814.51± 12392.58 | 408115.22± 29066.75 | 717327.74± 26006.84 |
| | | 124107.02± 9396.28 | 40217.91± 6291.83 | 41410.44± 5410.78 | 27631.25± 2787.34 | 17605.71± 2368.00 | 16551.72± 3283.12 | 23258.86± 3015.68 | 51280.22± 4565.07 |
| | CH ₄ | 5861.10± 607.21 | 2119.91± 337.60 | 2598.20± 315.13 | 1504.39± 162.40 | 758.56± 123.93 | 715.14± 105.19 | 1404.17± 305.42 | 1938.43± 295.29 |
| | | 3478.58± 535.17 | 1406.99± 220.67 | 1552.06± 102.91 | 972.91± 109.25 | 678.71± 65.71 | 641.77± 74.25 | 1011.85± 120.43 | 1478.82± 240.52 |
| 腐殖质 Humus | CO ₂ | 1551574.46± 109837.65 | 571341.70± 35829.09 | 677326.60± 53222.39 | 491575.18± 34618.78 | 265103.65± 12082.87 | 288814.51± 12392.58 | 408115.22± 29066.75 | 717327.74± 26006.84 |
| | | 124107.02± 9396.28 | 40217.91± 6291.83 | 41410.44± 5410.78 | 27631.25± 2787.34 | 17605.71± 2368.00 | 16551.72± 3283.12 | 23258.86± 3015.68 | 51280.22± 4565.07 |
| | CO | 5861.10± 607.21 | 2119.91± 337.60 | 2598.20± 315.13 | 1504.39± 162.40 | 758.56± 123.93 | 715.14± 105.19 | 1404.17± 305.42 | 1938.43± 295.29 |
| | | 3478.58± 535.17 | 1406.99± 220.67 | 1552.06± 102.91 | 972.91± 109.25 | 678.71± 65.71 | 641.77± 74.25 | 1011.85± 120.43 | 1478.82± 240.52 |
| | NMHC | 1551574.46± 109837.65 | 571341.70± 35829.09 | 677326.60± 53222.39 | 491575.18± 34618.78 | 265103.65± 12082.87 | 288814.51± 12392.58 | 408115.22± 29066.75 | 717327.74± 26006.84 |
| | | 124107.02± 9396.28 | 40217.91± 6291.83 | 41410.44± 5410.78 | 27631.25± 2787.34 | 17605.71± 2368.00 | 16551.72± 3283.12 | 23258.86± 3015.68 | 51280.22± 4565.07 |
| | CH ₄ | 5861.10± 607.21 | 2119.91± 337.60 | 2598.20± 315.13 | 1504.39± 162.40 | 758.56± 123.93 | 715.14± 105.19 | 1404.17± 305.42 | 1938.43± 295.29 |
| | | 3478.58± 535.17 | 1406.99± 220.67 | 1552.06± 102.91 | 972.91± 109.25 | 678.71± 65.71 | 641.77± 74.25 | 1011.85± 120.43 | 1478.82± 240.52 |
| 粗木质残体 Coarse woody debris | CO ₂ | 1551574.46± 109837.65 | 571341.70± 35829.09 | 677326.60± 53222.39 | 491575.18± 34618.78 | 265103.65± 12082.87 | 288814.51± 12392.58 | 408115.22± 29066.75 | 717327.74± 26006.84 |
| | | 124107.02± 9396.28 | 40217.91± 6291.83 | 41410.44± 5410.78 | 27631.25± 2787.34 | 17605.71± 2368.00 | 16551.72± 3283.12 | 23258.86± 3015.68 | 51280.22± 4565.07 |
| | CO | 5861.10± 607.21 | 2119.91± 337.60 | 2598.20± 315.13 | 1504.39± 162.40 | 758.56± 123.93 | 715.14± 105.19 | 1404.17± 305.42 | 1938.43± 295.29 |
| | | 3478.58± 535.17 | 1406.99± 220.67 | 1552.06± 102.91 | 972.91± 109.25 | 678.71± 65.71 | 641.77± 74.25 | 1011.85± 120.43 | 1478.82± 240.52 |
| | NMHC | 1551574.46± 109837.65 | 571341.70± 35829.09 | 677326.60± 53222.39 | 491575.18± 34618.78 | 265103.65± 12082.87 | 288814.51± 12392.58 | 408115.22± 29066.75 | 717327.74± 26006.84 |
| | | 124107.02± 9396.28 | 40217.91± 6291.83 | 41410.44± 5410.78 | 27631.25± 2787.34 | 17605.71± 2368.00 | 16551.72± 3283.12 | 23258.86± 3015.68 | 51280.22± 4565.07 |
| | CH ₄ | 5861.10± 607.21 | 2119.91± 337.60 | 2598.20± 315.13 | 1504.39± 162.40 | 758.56± 123.93 | 715.14± 105.19 | 1404.17± 305.42 | 1938.43± 295.29 |
| | | 3478.58± 535.17 | 1406.99± 220.67 | 1552.06± 102.91 | 972.91± 109.25 | 678.71± 65.71 | 641.77± 74.25 | 1011.85± 120.43 | 1478.82± 240.52 |

3 讨 论

在 1953—2011 年的 59 年间,小兴安岭林区森林火灾碳排放量为 1.12×10⁷ t,年均碳排放量为 1.90×10⁵ t,约占全国年均森林火灾碳排放量^[15]的 1.7%;含碳气体 CO₂、CO、CH₄和 NMHC 的排放量分别为 3.39×10⁷、1.94×10⁵、1.09×10⁵和 7.46×10⁴ t,含碳气体 CO₂、CO、CH₄和 NMHC 的年均排放量分

别为 5.74×10⁵、3.29×10⁴、1.85×10³和 1.27×10³ t,分别占全国年均森林火灾各含碳气体排放量^[15]的 1.4%、1.2%、1.7%和 1.1%;年均 CO₂、CO、CH₄的排放量分别占我国生物质燃烧年均排放的各污染物量^[39]的 0.2%、0.2%和 0.3%。由此可见,小兴安岭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.小兴安岭林区 59 年间森林火灾的碳排放量及含碳气体排放量占

全国的比例较大兴安岭林区小,主要是因为该区属于温带森林,年均森林火灾发生的次数比大兴安岭相对较少^[23],因而其所排放的碳量及含碳气体量较少。

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。在森林生态系统的可持续经营与管理中,应注重碳的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林分结构与类型。研究表明:从林型的各组分来看,乔木层的燃烧效率最低,灌木层和粗木质残体层其次,凋落物层燃烧效率最高;从林型的林分水平来看,纯针叶林的燃烧效率最高,樟子松林和白桦林其次,而阔叶红松林的燃烧效率最低。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。同时发现,针阔混交林型单位过火面积的碳排放量较少;阔叶林型单位过火面积的碳排放量较多;针叶林型的燃烧效率最高,其单位过火面积的碳排放量亦最多。因此,在森林的经营管理中,应注重该区地带性植被类型阔叶红松林的营造,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,从而实现碳增汇效应^[40-41]。同时,应充分考虑森林碳汇效应,积极营造针阔混交林,避免营造纯林,特别是针叶纯林。

火强度与燃烧效率密切相关。火强度是决定燃烧效率的重要因子,从而决定森林火灾的碳排放量。在森林火灾的发生、发展过程中,其火行为受可燃物类型、载量及燃烧性、天气条件、立地条件等的制约,影响了火强度和火烈度,进而影响燃烧效率,对森林火灾碳排放产生决定性的作用。本研究中,针阔混交林(包括阔叶红松林和落叶松-白桦林)的森林火灾面积占总过火面积的66.4%,但由于针阔混交林中轻度火烧强度所占的比重较大,导致燃烧效率较低,森林火灾中碳排放量仅占总碳排放量的49.3%;阔叶林(包括白桦林)中度火烧强度所占的比重较大,燃烧效率较针阔混交林高,森林火灾面积占总过火面积的17.2%,而森林火灾中所排放的碳量占23.8%;针叶林(包括落叶松林、樟子松林)重度火烧强度所占的比重较大,燃烧效率最高,虽然火烧面积仅占总过火面积的16.4%,但其排放的碳量占总碳排放量的26.9%。说明火强度对森林火灾的碳排放具有重要影响。为了控制及降低火强度,减少森林火灾碳排放,须加强森林可燃物的可持续管理,调控

森林可燃物的燃烧性^[42-43],特别是在气候寒冷干燥的小兴安岭温带森林,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,充分发挥火因子的有效调节作用,以维持生态系统可持续发展的动态平衡^[23],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。

火强度是影响排放因子的重要因子,影响着森林火灾各排放气体的种类及比例。本研究表明,在立地条件较干燥的林型(针叶林、阔叶林、落叶松林)中 CO_2 排放因子较高,而 CO 、 CH_4 和NMHC的排放因子较低;在较湿润的林型(针阔混交林、阔叶红松林)中 CO_2 排放因子较低,而 CO 、 CH_4 和NMHC的排放因子较高。这是因为森林可燃物燃烧时,氧气供应较为充分,完全燃烧产生 CO_2 ;而氧气供应不充分时,森林可燃物不完全燃烧,易产生较多的 CO 、 CH_4 和NMHC,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 CO_2 排放因子较高,而较湿润和难燃的组分(乔木层)的 CO_2 排放因子相对较低。其中,阔叶红松林的森林火灾面积占该区总森林火灾面积的28.9%,但由于阔叶红松林是地带性植被类型,林内湿润不易燃烧,因而轻度火烧强度所占的比例较大,其 CO_2 排放量仅占该区总森林火灾 CO_2 排放量的25.8%;针阔混交林的森林火灾面积占该区总森林火灾面积的21.7%,但其 CO_2 排放量仅占该区总森林火灾 CO_2 排放量的8.8%;针叶林的森林火灾面积占该区总森林火灾面积的5.9%,但其 CO_2 排放量却占该区总森林火灾 CO_2 排放量的12.6%。为了控制火强度、减少含碳气体排放,应加强森林可燃物的可持续管理,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。

由于森林生态系统的异质性和复杂性,在计量森林火灾碳排放和含碳气体排放量时,计量模型(图2)中涉及到林型、火灾面积、可燃物载量、可燃物性质及燃烧性、可燃物含碳率、燃烧效率、排放因子、火强度、火烈度等一系列的参数。本文从林分水平上充分考虑森林火灾碳排放的各种计量参数。森林火灾的燃烧是在林分水平上进行的,其所燃烧的可燃物载量在空间上包括乔木、灌木、草本、凋落物、腐殖质、粗木质残体6个层次,研究中把每种林型的森林可燃物分成6个组分分别计量,并分别测定各组分可燃物载量、可燃物含碳率、燃烧效率、排放因子,在理论上有助于更准确、有效地计量森林火灾的

碳排放量. 但由于森林生态系统的异质性, 火灾的发生、发展受多种因素的制约, 因而难以定量地进行火灾碳排放量的计量, 特别是对燃烧效率和排放因子的测定. 本文通过野外火烧迹地调查与室内控制环境试验相结合, 对燃烧效率和排放因子进行确定, 但在实际测定中未考虑森林火灾中实际的火行为, 以及地形等立地条件的影响. 今后仍需进一步发展和完善各种分析方法, 为更准确地计量森林火灾碳排放和含碳气体排放量奠定基础.

参考文献

- [1] Hu H-Q (胡海清), Wei S-J (魏书精), Wei S-W (魏书威), *et al.* Effect of fire disturbance on forest ecosystem carbon cycle under the background of climate warming. *Journal of Catastrophology* (灾害学), 2012, **27** (4): 37–41 (in Chinese)
- [2] Lü A-F (吕爱锋), Tian H-Q (田汉勤). Interaction among climatic change, fire disturbance and ecosystem productivity. *Chineses Journal of Plant Ecology* (植物生态学报), 2007, **31**(2): 242–251 (in Chinese)
- [3] Running SW. Is global warming causing more, larger wildfires? *Science*, 2006, **313**: 927–928
- [4] Robinson JM. On uncertainty in the computation of global emissions from biomass burning. *Climatic Change*, 1989, **14**: 243–262
- [5] Levine JS, Cofer WR III, Cahoon DR Jr, *et al.* Biomass burning: A driver for global change. *Environmental Science and Technology*, 1995, **29**: 120–125
- [6] Aulahr AND, Carter TB. Forest wildfire as a recent source of CO₂ at northern latitudes. *Canadian Journal of Forest Research*, 1993, **23**: 1528–1536
- [7] Amiro BD, Todd JB, Wotton BM, *et al.* Direct carbon emissions from Canadian forest fires, 1959–1999. *Canadian Journal of Forest Research*, 2001, **31**: 512–525
- [8] French NHF, Goovaerts P, Kasischke ES. Uncertainty in estimating carbon emissions from boreal forest fires. *Journal of Geophysics Research*, 2004, **109**: doi: 10.1029/2003JD003635
- [9] Cahoon DR Jr, Stocks BJ, Levine JS, *et al.* Satellite analysis of the severe 1987 forest fires in northern China and southeastern Siberia. *Journal of Geophysics Research*, 1994, **97**: 805–814
- [10] Hu H-Q (胡海清), Wei S-J (魏书精), Jin S (金森), *et al.* Measurement model of carbon emission from forest fire: A review. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2012, **23**(5): 1423–1434 (in Chinese)
- [11] Isaev AS, Korovin GN, Bartalev SA, *et al.* Using remote sensing to assess Russian forest fire carbon emissions. *Climatic Change*, 2002, **55**: 235–249
- [12] Zhang YH, Wooster MJ, Tutubalina O, *et al.* Monthly burned area and forest fire carbon emission estimates for the Russian Federation from SPOTVGT. *Remote Sensing of Environment*, 2003, **87**: 1–15
- [13] Kasischke ES, French NHF, Bourgeau C, *et al.* Estimating release of carbon from 1990 and 1991 forest fires in Alaska. *Journal of Geophysics Research*, 1995, **100**: 2941–2951
- [14] Wang X-K (王效科), Feng Z-W (冯宗炜), Zhuang Y-H (庄亚辉). CO₂, CO and CH₄ emissions from forest fires in China. *Scientia Silvae Sinicae* (林业科学), 2001, **37**(1): 90–95 (in Chinese)
- [15] Lü A-F (吕爱锋), Tian H-Q (田汉勤), Liu Y-Q (刘永强). State-of-the-art in quantifying fire disturbance and ecosystem carbon cycle. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2005, **25**(10): 2734–2743 (in Chinese)
- [16] Lü AF, Tian HQ, Liu ML, *et al.* Spatial and temporal patterns of carbon emissions from forest fires in China from 1950 to 2000. *Journal of Geophysics Research*, 2006, **111**: doi: 10.1029/2005JD006198
- [17] Hu H-Q (胡海清), Sun L (孙 龙). Estimation of carbon release from shrubs, herbages and litters in Daxing'an Mountains by forest fires in 1980–1999. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2007, **18** (12): 2647–2653 (in Chinese)
- [18] Hu H-Q (胡海清), Guo F-T (郭福涛). Estimation of total carbon-containing gas emission from main tree species in forest fires in Daxing'an Mountains. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2008, **19** (9): 1884–1890 (in Chinese)
- [19] Yang G-F (杨国福), Jiang H (江 洪), Yu S-Q (余树全), *et al.* Estimation of carbon emission from forest fires in Zhejiang Province of China in 1991–2006. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2009, **20**(5): 1038–1043 (in Chinese)
- [20] Tian X-R (田晓瑞), Yin L (殷 丽), Shu L-F (舒立福), *et al.* Carbon emission from forest fires in Daxing'anling region in 2005–2007. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2009, **20**(12): 2877–2883 (in Chinese)
- [21] Huang L (黄 麟), Shao Q-Q (邵全琴), Liu J-Y (刘纪远). Carbon losses from forest fire in Jiangxi Province, China in 1950–2008. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2010, **21**(9): 2241–2248 (in Chinese)
- [22] Hu H-Q (胡海清), Wei S-J (魏书精), Sun L (孙 龙). Estimation of carbon emissions due to forest fire in Daxing'an Mountains from 1965 to 2010. *Chinese Journal of Plant Ecology* (植物生态学报), 2012, **36**(7): 629–644 (in Chinese)
- [23] Hu H-Q (胡海清), Wei S-J (魏书精), Sun L (孙 龙). Estimating carbon emissions from forest fires during 2001 to 2010 in Daxing'anling Mountain. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2012, **32**(17): 5373–5386 (in Chinese)
- [24] Hu H-Q (胡海清), Wei S-J (魏书精), Sun L (孙 龙). Estimating of carbon emissions from forest fires in 2010 in Huzhong of Daxing'anling Mountain. *Scientia Silvae Sinicae* (林业科学), 2012, **48**(10): 109–119 (in Chinese)
- [25] Huang M-Z (黄茂祝), Hu H-Q (胡海清), Zhang J (张 杰), *et al.* Comprehensive evaluation of ecotourism resources in Yichun forest region of Northeast China. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2006, **17**(11): 2163–2169 (in Chinese)
- [26] Woodall CW, Liknes GC. Climatic regions as an indicator of forest coarse and fine woody debris carbon stocks in the United States. *Carbon Balance and Management*,

- 2008, **3**: 5, doi:10.1186/1750-0680-3-5
- [27] Wang Y (王岳). Calculation of the fire intensity in foreign. *Forest Fire Prevention* (森林防火), 1996(1): 43–44 (in Chinese)
- [28] Luo J-Y (骆介禹). Calculated on the case of forest fire intensity. *Forest Fire Prevention* (森林防火), 1988(4): 13–15 (in Chinese)
- [29] Andreae MO, Merlet P. Emission of trace gases and aerosols from biomass burning. *Global Biogeochemical Cycles*, 2001, **15**: 955–966
- [30] Kasischke ES, Bruhwiler LP. Emissions of carbon dioxide, carbon monoxide, and methane from boreal forest fires in 1998. *Journal of Geophysics Research*, 2002, **107**: doi: 10.1029/2001JD000461
- [31] Crutzen PJ, Heidt LE, Krasnec JP, *et al.* Biomass burning as a source of atmospheric gases CO, H₂, N₂O, NO, CH₃Cl, and COS. *Nature*, 1979, **282**: 253–256
- [32] Seiler W, Crutzen PJ. Estimates of gross and net fluxes of carbon between the biosphere and the atmosphere from biomass burning. *Climate Change*, 1980, **2**: 207–247
- [33] Choi SD, Chang YS, Park BK. Increase in carbon emissions from forest fires after intensive reforestation and forest management programs. *Science of the Total Environment*, 2006, **372**: 225–235
- [34] French NHF, Kasischke ES, Williams DG. Variability in the emission of carbon-based trace gases from wildfire in the Alaskan boreal forest. *Journal of Geophysics Research*, 2002, **107**: doi: 10.1029/2001JD000480
- [35] Houghton RA, Skole DL, Nobre CA, *et al.* Annual fluxes of carbon from deforestation and regrowth in the Brazilian Amazon. *Nature*, 2000, **403**: 301–304
- [36] Crutzen PJ, Andreae MO. Biomass burning in the tropics: Impact on atmospheric chemistry and biogeochemical cycles. *Science*, 1990, **250**: 1669–1678
- [37] Dixon RK, Solomon AM, Brown S, *et al.* Carbon pools and flux of global forest ecosystems. *Science*, 1994, **263**: 185–190
- [38] Fang JY, Chen AP, Peng CH, *et al.* Changes in forest biomass carbon storage in China between 1949 and 1998. *Science*, 2001, **292**: 2320–2322
- [39] Streets DG, Yarber KF, Woo JH, *et al.* Biomass burning in Asia: Annual and seasonal estimates and atmospheric emissions. *Global Biogeochemical Cycles*, 2003, **17**: 1099–1119
- [40] Arno SF, Fiedler CE. Mimicking Nature's Fire: Restoring Fire-prone Forests in the West. Washington DC: Island Press, 2005
- [41] Wiedinmyer C, Hurteau MD. Prescribed fire as a means of reducing forest carbon emissions in the western United States. *Environmental Science & Technology*, 2010, **44**: 1926–1932
- [42] Wei S-J (魏书精), Sun L (孙龙), Wei S-W (魏书威), *et al.* Effect of climate changes on forest disasters and the preventive measures. *Journal of Catastrophology* (灾害学), 2013, **28**(1): 36–40 (in Chinese)
- [43] Wei S-J (魏书精), Luo B-Z (罗碧珍), Sun L (孙龙), *et al.* Spatial and temporal heterogeneity and effect factors of soil respiration in forest ecosystems: A review. *Ecology and Environmental Sciences* (生态环境学报), 2013, **22**(4): 689–704 (in Chinese)

作者简介 胡海清,男,1961年生,博士,教授.主要从事森林生态学研究,发表论文 140 篇. E-mail: huhq-cf@nefu.edu.cn

责任编辑 李凤琴
