

DOI: 10.13332/j.1000-1522.20170307

森林燃烧主要排放物研究进展

刘晓东 王 博
(北京林业大学林学院)

摘要:林火是森林生态系统重要的干扰因子,森林燃烧时产生大量排放物,严重影响生态环境,危害人体健康。开展森林燃烧主要排放物及其影响因素研究,对科学制定林火管理措施具有重要意义。本文基于国内外森林燃烧主要排放物方面的研究文献,针对4种森林燃烧主要排放物(含碳气体、含氮气体、PM_{2.5}和气溶胶等)的研究内容、排放影响因素、排放量估算参数(火灾面积、可燃物载量、可燃物含碳率、燃烧效率、排放比和排放因子等)等方面进行综述。旨在介绍该领域的研究现状,存在的问题及发展趋势,以期为我国开展森林火灾排放物的定量研究提供参考。

关键词:森林燃烧;排放物;碳排放;排放因子;遥感

中图分类号:S762.1 文献标志码:A 文章编号:1000-1522(2017)12-0118-07

LIU Xiao-dong; WANG Bo. **Review on the main emission products released by forest combustion.** *Journal of Beijing Forestry University*(2017)**39**(12) 118-124 [Ch, 62 ref.] College of Forestry, Beijing Forestry University, Beijing, 100083, P. R. China.

Forest fire releases large amounts of emission products into the atmosphere, and this seriously damages the ecological environment, and affects human health. Therefore, it has great significance to conduct the study on forest fire emission products. In this paper, the publications related to the emission productions caused by forest combustion were collected and reviewed, mainly focus on the four emission products (including carbonaceous gas, nitrogen containing gas, PM_{2.5} and aerosol), including research contents, emission influencing factors, different estimating parameters of emission. The review indicated that the current researches on the emission products released by forest fire were mainly focus on the emission quantity, impact area, and the factors affecting emission. The main parameters of forest fire emission include burned area, fuel loading, fuel carbon content, combustible efficiency, emission ratio and emission factor, etc. These conclusions will provide good reference for the quantitative study of forest fire emissions.

Key words forest combustion; emission product; carbon emission; emission factor; remote sensing

森林火灾是一种突发性强、破坏性大、处置救助较为困难的自然灾害,被世界公认为八大自然灾害之一^[1]。世界范围内每年平均发生森林火灾的次数超过20余万次^[2]。随着全球气候变暖,厄尔尼诺现象的影响,森林火灾在全球呈多态势,发生频率和强度也在增加^[3]。森林燃烧会产生大量的烟雾及有毒物质,并释放到大气中,对全球变暖、生物地球化学循环、空气质量和人体健康都会产生严重的负面影响^[3]。研究数据显示,1997—1998年印尼森

林火灾,累计向大气层排放了约10亿t CO₂,造成严重的烟雾污染,引发国际社会广泛关注^[4];2010年俄罗斯大火释放了255.76 Tg CO₂(1 Tg = 10⁶ t)^[5]。森林火灾产生的烟雾不仅严重影响大气质量,而且对人体的呼吸系统产生不良影响^[6]。尤其是烟雾中的有毒物质,会对扑火队员的生命安全造成威胁^[7]。研究表明,西伯利亚火灾产生的烟雾,可以被远距离传输到韩国和日本等国家,甚至波及到北美西海岸,严重影响到达区域的空气质量^[8]。由此

收稿日期:2017-09-04 修回日期:2017-11-30

基金项目:国家重点研发计划课题(2017YFD0600106-1)、国家自然科学基金项目(31270696)。

第一作者:刘晓东,博士,副教授。主要研究方向:生态学。Email:xd_liu@bjfu.edu.cn 地址:100083北京市海淀区清华东路35号北京林业大学林学院。

本刊网址: <http://j.bjfu.edu.cn>; <http://journal.bjfu.edu.cn>

可见,开展森林燃烧排放物研究具有重要的现实意义。

森林火灾排放物的研究起步较晚,关于森林火灾碳排放的研究始于 20 世纪 60 年代^[3,9],随着遥感等新技术的应用,研究的内容和尺度不断深入。本文在广泛收集国内外相关文献的基础上,针对 4 种森林燃烧排放物(含碳气体、含氮气体、PM_{2.5}和 气溶胶),从研究内容、计算方法、排放量估算参数(火灾面积、可燃物载量、可燃物含碳率、燃烧效率、排放比和排放因子)等方面进行了综述,分析研究中存在的问题,对今后的发展趋势进行展望,以期 为制定科学合理的林火管理政策,开展森林燃烧排放物的定量研究提供参考。

1 森林火灾排放物

森林火灾在短时间内,释放出巨大的能量,产生火灾烟气羽流,受气流浮力的驱动,排放出大量的有毒有害气体,主要有无机类(CO、CO₂、NO_x、HCl、H₂S、HN₃、HCN、P₂O₅、HF、SO₂和 O₃等)和有机类(CH₄、CH₃Cl、NMHC等),以及悬浮颗粒物(炭黑粒子、灰分、PM_{2.5}和 PM₁₀等)^[10-11]。其中,含碳气体是森林火灾最主要的排放物,目前关于排放的研究也多集中在碳排放^[10,12-14]。森林火灾排放的含氮气体不多,但产生的影响不可忽视,因其可以造成长时间的污染^[8,15-17]。近年来,关于 PM_{2.5}与气溶胶的研究备受关注^[16,18-21]。因此,本文针对上述 4 种排放物的研究进展作综述。

1.1 森林火灾排放含碳气体

森林火灾排放的含碳气体是大气和环境污染的主要来源之一,全球每年源于自然火灾的直接碳排放量约为 2.0 × 10⁹ t^[22,41-42]。我国森林火灾年均消耗林地生物量 5.000 × 10⁶ ~ 7.000 × 10⁶ t,直接排放碳 2.024 × 10⁷ ~ 2.856 × 10⁷ t^[23]。森林火灾排放物中,主要为温室气体,大约 90% 的碳都是以 CO₂或 CO 的形式排放到大气中^[12],还有一小部分以甲烷、多碳烃和挥发性有机氧化物的形式排放到大气中^[13]。在全球范围内,虽然森林火灾排放量呈现出显著的年际变化,但总体而言,森林火灾对温室气体排放的贡献率大约是 23%^[15]。基于碳质量平衡方法开展的排放研究结果表明,碳汇中的 63% ~ 74% 是以 CO₂形式被排放到大气中,5.7% ~ 13% 以 CO 的形式被排放到大气中,0.36% ~ 0.53% 以 CH₄的形式被排放到大气中^[15]。CH₄是非常活跃的温室气体,对全球温室效应的贡献率仅次于 CO₂^[24]。

森林火灾排放的含碳气体危害严重且持续时间

长^[14]。森林火灾燃烧了林下植被和枯枝落叶层,是植被碳库的释放,对大气碳平衡及全球气候变化均具有重要影响^[16,25]。森林火灾是温室气体的重要来源,能够改变陆地和大气之间的碳交换,导致全球气候和大气组成在时间和空间上的剧烈变化^[10]。此外,森林火灾排放的 CO 和 CH₄还会对大气对流层臭氧浓度产生影响^[26]。火是对森林造成影响和破坏最为剧烈的因子,会造成森林生态系统几十年甚至上百年碳储存的损失^[14]。森林火灾排放的气体在大气中滞留时间很长,甚至长达数百年^[11]。但森林生态系统能够在火烧后得到恢复,大气中的 CO₂可通过植物的光合作用从大气中固定下来^[16,25]。

森林群落树种组成、林火强度、燃烧过程等因素均会导致温室气体排放量的不同^[27-28]。研究发现,中等强度火灾时单位面积碳释放量更大^[29]。燃烧的不同阶段,排放量也有所不同,阴燃阶段释放 CO、CH₄和 NMHC 较多,焰燃阶段的碳被氧化成 CO₂排出较多^[15]。李玉昆等^[30]对大兴安岭的枯枝、草本和半分解层的排放量进行了研究,结果发现相同林型的不同部位排放量也有差异。

1.2 森林火灾排放含氮气体

森林火灾排放的含氮气体量虽然较少,但危害较大^[15-16]。森林火灾会造成土壤氮释放,改变土壤蒸发与地表径流,影响水分循环,成为全球变化的一个驱动力^[16]。火干扰排放的 NO 作为主要含氮活性气体之一,经过化学反应产生的 HNO₃是酸雨的成分之一,加剧温室效应,改变自然演替的过程,产生一系列的负面影响。研究表明,氮的排放中 0.35% ~ 0.57% 是以 N₂O 的形式排放到大气中^[15]。不同森林类型释放的含氮气体也不相同。通过对大兴安岭 25 年间林火排放的研究发现,白桦(*Betula platyphylla*)—落叶松(*Larix gmelinii*)林、白桦(*Betula platyphylla*)—杜鹃(*Rhododendron simsii*)林和蒙古栎(*Quercus Mongolica*)—胡枝子(*Lespedeza bicolor*)林是气体释放量较多的林型,约占总排放量的 70% 以上^[31]。

在全球变暖条件下,林火排放物对氨浓度的贡献不断增大。2007 年美国东南部气温升高和广泛的干旱导致森林火灾,林火产生的排放物引起了氨的浓度异常升高^[18]。随着全球气候变化,在温暖的气候条件下,植被会向北扩展到以前冰雪覆盖的地区,林火排放物对氨浓度的影响将进一步增大^[32]。

1.3 森林火灾排放 PM_{2.5}

PM_{2.5}指的是空气动力学直径小于 2.5 μm 的大气颗粒物^[19],是一个复杂的混合物质,包含如碳质

组件, SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、 NH_4^+ 和一些金属^[8]。火干扰造成的颗粒物浓度的升高, 会对局部地区乃至全球范围内的气候系统产生影响^[16]。自《环境空气质量标准》增加细颗粒物 ($\text{PM}_{2.5}$) 浓度限值监测指标以来, 国内围绕 $\text{PM}_{2.5}$ 已经开展了一系列研究, 但关于森林火灾排放的颗粒物的研究报道较少^[20]。

森林火灾排放 $\text{PM}_{2.5}$ 的研究方法不多。NOAA/NESDIS 开发了一种基于遥感的火灾 $\text{PM}_{2.5}$ 排放检测方法, 即对 $\text{PM}_{2.5}$ 排放量进行建模, 使用多个卫星仪器反演其空间分布常数^[21]。在世界的许多地方, 森林可燃物燃烧是颗粒物质的主要来源。2008—2009 年, 美国北卡罗来纳州森林火灾的颗粒物残余对 $\text{PM}_{2.5}$ 质量的影响显著^[33]。研究表明, 森林火灾排放物对地表微量气体的混合比会产生影响, NO_2 混合比的增加与可吸入颗粒物 (PM) 具有相关性 ($R = 0.83$), NO_2 和 PM 之间紧密的相关性可以进一步提高统计回归模型的性能^[34]。

森林发生火灾后 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度变化明显。火灾后 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度与居民健康是北美国家研究的热点。2002 年 7 月加拿大魁北克森林火灾的烟雾波及到美国东海岸, 泊松回归分析的结果表明, 24 h 环境 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度与每日居民死亡率无相关性。在波士顿市区和纽约市, 森林火灾的烟雾导致短期内 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度大幅度提升, 但之后的居民死亡率没有明显增加^[35]。2013 年加利福尼亚森林火灾后, 在加利福尼亚和内华达州, 通过研究临时和永久空气监测点收集的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度数据, 评价了火灾烟雾中的 $\text{PM}_{2.5}$ 对空气质量的影响^[3,6]。

1.4 森林火灾排放气溶胶

气溶胶是指长时间悬浮在空气中能被观察或测量的液体或固体粒子^[18]。黑碳气溶胶一般是碳质燃料 (包括化石燃料、生物燃料等) 不完全燃烧过程中产生的^[37], 仅占大气气溶胶中的 0.2% ~ 1.0%。黑碳的直接辐射强迫作用超过 CH_4 , 能够吸收更多的太阳辐射, 成为影响全球变暖的仅次于 CO_2 的重要成分。气溶胶排放物危害严重, 特别是来自于生物质燃烧的烟雾微粒, 是空气质量预报不确定性的主要来源之一。研究表明, 林火烟气羽流中, 光化学活性会增强, 能够显著改变气溶胶的成分和微观物理学性质, 导致气溶胶的光学特性和辐射特性改变^[38]。随着节能减排的广泛开展以及森林火灾的不断加剧, 今后森林火灾排放的黑碳量, 在黑碳排放总量中的比例将进一步增大^[39]。

森林火灾排放气溶胶研究方法较多。Drooge 等^[40]运用有机分子的化学分析方法, 收集了来自 2012 年 7 月巴塞罗那森林火灾烟羽流到达城市的

大气气溶胶, 并进行光探测和激光雷达的光学测量。化学成分分析表明, 几个小时内生物质燃烧对城市空气质量影响巨大。典型的生物质燃烧的示踪剂, 如左旋葡聚糖, 脱氢枞酸和多环芳香烃 (PAH) 增强, 同时在边界层气溶胶浓度增加。之后的时间里, 虽然激光雷达在高空中探测到了粒子, 但在城市空气中, 没有发现显著的森林火灾烟雾的影响。

林火对大气中气溶胶的增加有显著影响, 但由于森林火灾发生时间和区域都很集中, 在短时间小范围内, 迅速大量释放排放物会对小区域的环境产生影响。研究发现, 持续 30 h 的烟羽流比持续 3 h 的烟羽流产生的气体和气溶胶的浓度更高^[39]。

2 森林火灾排放物估算的主要参数

由于森林可燃物和燃烧条件的不确定性, 估算森林火灾的排放物是非常复杂的, 使用单一的示踪剂评估其来源的准确性也是很复杂的。全球每年来自自然火灾的直接碳排放量约为 $2.0 \times 10^9 \text{ t}$ ^[22,41-42]。因此科学准确估算森林火灾排放物排放量, 对制定科学有效的林火管理措施具有重要的意义。森林火灾排放估算研究中的主要参数包括火灾面积、可燃物载量、可燃物含碳率、燃烧效率、排放比和排放因子等。火灾面积、可燃物载量、可燃物含碳率都可直接或间接测得, 国内外研究相对成熟; 而燃烧效率是一个争议较大的参数, 目前尚缺乏统一标准; 排放因子和排放比是目前研究碳排放的热点。

2.1 森林火灾面积

森林火灾面积是估算排放量的重要参数, 也是最不确定的因子, 单因素方差分析表明, 总体上森林类型对林火面积的影响并不明显^[31,43-45]。森林火灾面积获取方法主要包括小尺度范围的航空地图勾绘法和地面实地调查法, 以及大尺度范围的统计资料、经验公式和遥感估测法。地面实地调查精度高, 但成本也高。经验公式估算方便快捷, 但因地区差异存在一些误差, 且缺乏时空信息^[46]。随着遥感技术的发展, 因其分辨率较高, 覆盖范围广, 成本低等优势, 在林火领域得到了广泛的应用, 发展前景非常广阔。特别是对于森林火灾开放燃烧, 可以考虑结合卫星观测的火点数据, 估算森林火灾的受害面积和草原火灾的过火面积。目前使用较多的主要是 NOAA-AVHRR、SPOT、Landsat、MODIS、ATSR 数据和多光谱遥感影像等。

2.2 可燃物载量

森林可燃物是森林燃烧的物质基础^[47], 可燃物载量是计量火灾排放的基础。但由于森林生态系统其本身的多样性和复杂性, 加上地域差异和火行为

差异,导致各类型可燃物载量处在不断变化的状态^[48]。可燃物载量获取的方法主要是地面调查法和遥感图像法^[49]。遥感图像是目前运用最广泛的方法,研究中使用的遥感图像从航空照片、NOAA-AVHRR、LandsatTM,发展到 MSS、LISSII、LIDAR、SPOT、多光谱遥感影像等^[49]。

可燃物载量的数据受各种因素的交互作用,加之实测数据的获取尚缺乏统一标准,不同学者的研究方法差别较大。目前常见的可燃物载量研究多借助模型、回归方程或者先进的激光雷达等手段^[49-51]。

由于植被生产力、分解率和火灾发生时间和频率的变化,不同季节的可燃物载量不同。在很长的时间尺度上,CO₂的肥效作用影响着植被生产力,可利用 JSBACH 模型作为一个工具,来监测可燃物载量的季节性变化,相关研究表明,在较长的时间尺度上,CO₂的肥效作用是不可忽略的,它间接影响着可燃物载量的变化^[52]。

2.3 可燃物含碳率

可燃物含碳率是可燃物的干质量中碳所占的比重^[43]。更为精确可靠的可燃物含碳率估算,应来自不同林型条件下所开展的实验测定。植被类型和植物部位不同,其含碳量也会不同^[28],凋落物和粗木质残体由于受外部环境的影响较大,在不同林型中的平均含碳率波动较大^[42]。目前关于不同区域森林群落组成树种的含碳率研究较多,大多采用 45% 或 50% 作为所有森林类型的平均含碳率^[31,43,45]。如果在借鉴以往研究结果的基础上,能够再开展一些针对性的室内实验,将会明显减少在尺度转换过程中形成的误差^[28]。

2.4 燃烧效率

燃烧效率于 1979 年由 Wong^[43] 提出,是指燃烧消耗的可燃物占总可燃物载量的比例,它是影响可燃物消耗量和火灾排放量的重要因子^[53-54],对准确估算森林火灾排放量具有重要作用,但也是一个争议较大的参数^[14],目前普遍采用 IPCC 的经验估计值 45%。更为准确的燃烧效率应基于大量的室内外实验数据^[44],但由于室内控制环境下的燃烧实验和野外燃烧实验难度大、费用高,且实验环境和野外实际环境存在差异较大,因此这方面研究文献较少。

燃烧效率受火灾强度、火灾类型、植被类型以及气候条件等因素的影响。众多研究表明,不同的生态环境不同森林类型的燃烧效率不同^[17,28,43,55-56],不同的火灾面积燃烧效率也不同^[57],不同的燃烧程度燃烧效率不同^[28],不连续燃烧面积的燃烧效率比连续燃烧面积的燃烧效率低^[58],北方林中树叶和小

枝的燃烧效率比树干高,可燃物载量与燃烧效率呈负相关^[48,50]。目前燃烧效率缺乏确定标准,许多学者采用平均燃烧效率与燃烧物质总量之间的回归方程进行研究^[51]。应用遥感技术,将野外调查和表征林火烈度的 dNBR(differenced normalized burn ratio, 差分归一化燃烧率)指数相结合的方法,可以更准确的估算森林火灾可燃物的消耗量,进而推算出燃烧效率。在利用高分辨率遥感影像估测森林火灾燃烧效率方面:Lambin 等^[58]研究了中非地区森林火灾的燃烧效率;French 等^[59]建立了火灾面积与燃烧效率的相关关系。由于遥感数据的客观性、宏观性和实效性等优点,基于遥感估测森林火灾排放物是未来发展方向,但由于空间分辨率等问题,其精度需进一步提高^[50,60]。

2.5 排放比和排放因子

排放比是指森林火灾排放气体中扣除相应气体背景浓度的某种含碳气体量与 CO₂ 释放量的比值^[14]。排放因子指单位干可燃物在燃烧过程中所排放的某种气体量^[9]。排放比法和排放因子法是森林火灾排放物估算中最常用,也是最简便的两种方法,在国内已经广泛应用。从理论上讲,排放因子法的估算较为可靠,而排放比法估算误差较大^[44]。目前应用排放比法估算温室气体释放量的报道较多^[61],主要因为排放因子一般只能在实验中获取,但在野外和大规模火灾发生时,排放比法因容易测定,因此应用更为广泛。

排放比的计算,通常选取 CO₂、CO、CH₄ 作为参考气体。CO₂ 作为一个参考气体,因为它是烟羽流中的主要含碳化合物,也是一个测量相对简单的气体^[46]。排放比也会因火灾发生区域、燃烧阶段和燃烧组分的不同而有差异^[3,14]。目前用于测定含碳气体排放比的主要方法有微型燃烧实验、受控环境燃烧实验、地面采样实验、空中采样实验、卫星遥感技术等^[60,62]。

3 展 望

基于森林燃烧排放物研究现状及存在问题,今后研究建议围绕以下方向:1)森林火灾间接排放的估算将是今后研究热点,应当加强火烧迹地的调查和观测,掌握火烧后森林中碳库转化规律和枯死木分解速率,把间接排放因子设置成参数进行估算,为森林燃烧间接排放的研究提供支持。2)结合遥感等技术,对不同尺度森林燃烧排放物进行深入研究。3)研究森林燃烧排放物与气候变化的相互作用机制。4)研究如何提高森林燃烧排放物估算精度。借助新的遥感平台,提高分辨率,改进算法,发挥

“3S”集成技术的作用。随着高分辨率卫星传感器的应用,以及技术处理和估算方法的改进和提高,估算准确度将大大提高。

参 考 文 献

- [1] 唐伟. 北京西山林场生物防火隔离带规划与布局[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2012.
TANG W. Biological fire break forest belt planning and layout in Beijing Xishan Forest Farm [D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2012.
- [2] 舒立福, 田晓瑞, 李红. 世界森林火灾状况综述[J]. 世界林业研究, 1998(6): 41-47.
SHU L F, TIAN X R, LI H. Status of international forest fire in last decade[J]. World Forestry Research, 1998(6): 41-47.
- [3] 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.
HU H Q, WEI S J, JIN S, et al. Measurement model of carbon emission from forest fire: a review[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2012, 23(5): 1423-1434.
- [4] 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[J]. 火灾科学, 2003, 12(1): 6-10.
TIAN X R, SHU L F, WANG M Y. Direct carbon emissions from Chinese forest fires, 1991-2000[J]. Fire Safety Science, 2003, 12(1): 6-10.
- [5] GUO M, LI J, XU J W, et al. CO₂ emissions from the 2010 Russian wildfires using GOSAT data. [J]. Environmental Pollution, 2017, 226: 60-68.
- [6] YAO J Y, EYAMIE J, HENDERSON S B. Evaluation of a spatially resolved forest fire smoke model for population-based epidemiologic exposure assessment [J]. Journal of Exposure Science and Environmental Epidemiology, 2016, 26(3): 233-240.
- [7] 刘畅. 中美森林火灾中人员伤亡特征研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2015.
LIU C. Study on the characteristics of forest fire casualties between China and America [D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2015.
- [8] IKEMORI F, HONJYO K, YAMAGAMI M, et al. Influence of contemporary carbon originating from the 2003 Siberian forest fire on organic carbon in PM_{2.5}, in Nagoya, Japan[J]. Science of the Total Environment, 2015, 530/531: 403-410.
- [9] 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[J]. 林业科学, 2012, 48(10): 109-119.
HU H Q, WEI S J, SUN L. Estimation of carbon emissions from forest fires in 2010 in Huzhong of Daxing'anling Mountain[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2012, 48(10): 109-119.
- [10] BERTOLIN M L, URRETAVIZCAYA M F, DEFOSSÉ G E. Fire emissions and carbon uptake in severely burned lengabeech (NothofagusPumilio) forests of Patagonia, Argentina[J]. Fire Ecology, 2015, 11(1): 32-54.
- [11] 邓光瑞, 胡海清. 森林火灾烟气的危害[J]. 林业科技, 2006, 31(3): 38-39.
DENG G R, HU H Q. The endangers of smoke of forest fire disaster[J]. Forestry Science & Technology, 2006, 31(3): 38-39.
- [12] 王志红, 关山, 单延龙, 等. 白山地区森林火灾释放碳量的估算[J]. 北华大学学报(自然科学版), 2011, 12(2): 199-203.
WANG Z H, GUAN S, SHAN Y L, et al. Estimation of carbon emission from forest fires in Baishan Region[J]. Journal of Beihua University(Natural Science), 2011, 12(2): 199-203.
- [13] 田晓瑞, 殷丽, 舒立福, 等. 2005—2007 年大兴安岭林火释放碳量[J]. 应用生态学报, 2009, 20(12): 2877-2883.
TIAN X R, YIN L, SHU L F, et al. Carbon emission from forest fires in Daxing'anling Region in 2005-2007[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2009, 20(12): 2877-2883.
- [14] 黄麟, 邵全琴, 刘纪远. 1950—2008 年江西省森林火灾的碳损失估算[J]. 应用生态学报, 2010, 21(9): 2241-2248.
HUANG L, SHAO Q Q, LIU J Y. Carbon losses from forest fire in Jiangxi Province, China in 1950-2008[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2010, 21(9): 2241-2248.
- [15] SURAWSKI N C, SULLIVAN A L, MEYER C P, et al. Greenhouse gas emissions from laboratory-scale fires in wildland fuels depend on fire spread mode and phase of combustion[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2014, 14(16): 23125-23160.
- [16] 张玉红, 覃炳醒, 孙铭隆, 等. 林火对大兴安岭典型林型林下植被与土壤的影响[J]. 北京林业大学学报, 2012, 34(2): 7-13.
ZHANG Y H, QIN B X, SUN M L, et al. Impact of forest fire on understory vegetation and soil in typical forest type of Daxing'an Mountains, Northeastern China[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2012, 34(2): 7-13.
- [17] 杨国福, 江洪, 余树全, 等. 浙江省 1991—2006 森林火灾直接碳释放量的估算[J]. 应用生态学报, 2009, 20(5): 1038-1043.
YANG G F, JIANG H, YU S Q, et al. Estimation of carbon emission from forest fires in Zhejiang Province of China in 1991-2006[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2009, 20(5): 1038-1043.
- [18] SAYLOR R, MYLES L, SIBBLE D, et al. Recent trends in gas-phase ammonia and PM_{2.5} ammonium in the Southeast United States[J]. Journal of the Air & Waste Management Association, 2015, 65(3): 347-357.
- [19] 陈媛, 岑况, NORRA S. 等. 北京市区大气气溶胶 PM_{2.5} 污染特征及颗粒物溯源与追踪分析[J]. 现代地质, 2010, 24(2): 345-354.
CHEN Y, CEN K, NORRA S, et al. Study on pollution characteristics of PM_{2.5} in the aerosol, tracing and tracking atmospheric particulates in Beijing City[J]. Geoscience, 2010, 24(2): 345-354.
- [20] 刘萌萌. 林带对阻滞吸附 PM_{2.5} 等颗粒物的影响研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2014.
LIU M M. Studies on influence of the forest belt to intercept and adsorb particulate matter [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2014.
- [21] ZHANG X Y, KONDRAGUNTA S, KOGAN F, et al. Satellite-derived PM_{2.5} emissions from wildfires for air quality forecast[EB/

OL]. [2016- 11- 20]. http://www.researchgate.net/publication/239812407_SATELLITE-DERIVED_PM2.5_EMISSIONS_FROM_WILDFIRES_FOR_AIR_QUALITY_FORECAST.

[22] 吴沁淳, 陈方, 王长林, 等. 自然火灾碳排放估算模型参数的遥感反演进展[J]. 遥感学报, 2016, 20(1):11-26.

WU Q C, CHEN F, WANG C L, et al. Estimation of carbon emissions from biomass burning based on parameters retrieved[J]. Journal of Remote Sensing, 2016, 20(1):11-26.

[23] 袁帅, 杨泽. 森林火灾发生的原因·产生的气溶胶种类及影响[J]. 安徽农业科学, 2010, 38(31):17565-17567.

YUAN S, YANG Z. Causes of forest fires varieties and effects of aerosol produced by fires [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2010, 38(31):17565-17567.

[24] 刘霞, 胡海清, 赵希宽, 等. 大兴安岭地区岛状林沼泽 CH₄ 和 N₂O 排放及其影响因子[J]. 自然资源学报, 2014, 29(9): 1565-1575.

LIU X, HU H Q, ZHAO X K, et al. Emissions of CH₄ and N₂O from island forested swamp in Da Hinggan Mountains[J]. Journal of Natural Resources, 2014, 29(9):1565-1575.

[25] 李伟克, 刘晓东, 牛树奎, 等. 火烧对河北平泉油松林土壤微生物量的影响[J]. 北京林业大学学报, 2017, 39(10):70-77.

LI W K, LIU X D, NIU S K, et al. Impact of fire on soil microbial biomass of *Pinus tabulaeformis* forest in Pingquan County, Hebei of northern China [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2017, 39(10):70-77.

[26] 王效科, 冯宗炜, 庄亚辉. 中国森林火灾释放的 CO₂、CO 和 CH₄ 研究[J]. 林业科学, 2001, 37(1):90-95.

WANG X K, FENG Z W, ZHUANG Y H. CO₂, CO and CH₄ emissions from forest fire in China [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2001, 37(1):90-95.

[27] 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[J]. 植物生态学报, 2012, 36(7):629-644.

HU H Q, WEI S J, SUN L. Estimation of carbon emissions due to forest fire in Daxing'an Mountains from 1965 to 2010 [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2012, 36(7):629-644.

[28] 胡海清, 孙龙, 国庆喜, 等. 大兴安岭 1980—1999 年乔木燃烧释放碳量研究[J]. 林业科学, 2007, 43(11):82-88.

HU H Q, SUN L, GUO Q X, et al. Carbon emissions from forest fires on main arbor species in Daxing'an Mountains in Heilongjiang Province [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2007, 43(11):82-88.

[29] 孙龙, 张瑶, 国庆喜, 等. 1987 年大兴安岭林火碳排放及火后 NPP 恢复[J]. 林业科学, 2009, 45(12):100-104.

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 [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2009, 45(12):100-104.

[30] 李玉昆, 邓光瑞. 大兴安岭三种森林类型地表可燃物燃烧气体排放量的研究[J]. 林业科技, 2006, 31(6):28-31.

LI Y K, DENG G R. Study on gas emission from surface fuels of three forest types in Daxing'anling [J]. Forestry Science and Technology, 2006, 31(6):28-31.

[31] 郭福涛, 胡海清, 彭徐剑. 1980—2005 年大兴安岭森林火灾灌木、草本和地被物烟气的释放量的估算[J]. 林业科学, 2010, 46(1):78-83.

GUO F T, HU H Q, PENG X J. Estimation of gases released from shrubs, herbs and litters layer of different forest types in Daxing'an Mountains by forest fires from 1980 to 2005 [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2010, 46(1):78-83.

[32] FISCHER H, SCHÜPBACH S, GFELLER G, et al. Millennial changes in North American wildfire and soil activity over the last glacial cycle [J]. Nature Geoscience, 2015(9):723-727.

[33] OROZCO D, DELGADO R, WESLOH D, et al. Aerosol particulate matter in the Baltimore metropolitan area; temporal variation over a six-year period [J]. Journal of the Air & Waste Management Association, 2015, 65(9):1050-1061.

[34] DI CARLO P, ARUFFO E, BIANCOFIORE F, et al. Wildfires impact on surface nitrogen oxides and ozone in Central Italy [J]. Atmospheric Pollution Research, 2015, 6(1):29-35.

[35] ZU K, TAO G, LONG C, et al. Long-range fine particulate matter from the 2002 Quebec forest fires and daily mortality in Greater Boston and New York City [J]. Air Quality, Atmosphere & Health, 2016, 9(3):213-221.

[36] NAVARRO K M, CISNEROS R, O'NEILL S M, et al. Air quality impacts and intake fraction of PM_{2.5} during the 2013 Rim Mega Fire [J]. Environmental Science & Technology, 2016, 50(21):11965-11973.

[37] PENNER J E, EDDLEMAN H, NOVAKOV T. Towards the development of a global inventory for black carbon emissions [J]. Atmospheric Environment Part A General Topics, 1993, 27(8):1277-1295.

[38] KEYWOOD M, COPE M, MEYER C P M, et al. When smoke comes to town: the impact of biomass burning smoke on air quality [J]. Atmospheric Environment, 2015, 121:13-21.

[39] 杨国福, 江洪, 余树全, 等. 浙江省 1991—2006 年森林火灾释放黑碳量的估算[J]. 生态学报, 2009, 29(5):2612-2621.

YANG G F, JIANG H, YU S Q, et al. Black carbon emission from forest fires of Zhejiang Province during 1991-2006 [J]. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(5):2612-2621.

[40] VAN DROOGE B L, SICARD M, STOHL A, et al. Detection and simulation of wildfire smoke impacting a Mediterranean urban atmosphere [J]. Atmospheric Pollution Research, 2016, 7(3):494-502.

[41] MARLAND G, BODEN T A, ANDRES R J, et al. Global, regional, and national fossil-fuel CO₂ emissions [C] // Trends: a compendium of data on global change. Oak Ridge, Tenn: Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, U. S. Department of Energy, 2012.

[42] VAN DER WERF G, RANDERSON J T, GIGLIO L, et al. Global fire emissions and the contribution of deforestation, savanna, forest, agricultural, and peat fires (1997-2009) [J]. Atmospheric Chemistry & Physics, 2010, 10:11707-11735.

[43] 胡海清, 罗碧珍, 魏书精, 等. 1953—2011 年小兴安岭森林火灾含碳气体排放的估算[J]. 应用生态学报, 2013, 24(11):3065-3076.

HU H Q, LUO B Z, WEI S J, et al. Estimation of carbonaceous gases emission from forest fires in Xiao Xing'an Mountains of Northeast China in 1953-2011 [J]. Chinese Journal of Applied

- Ecology, 2013, 24(11):3065-3076.
- [44] 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[J]. 应用生态学报, 2007, 18(12):2647-2653.
HU H Q, SUN L. Estimation of carbon release from shrubs, herbages and litters in Daxing'an Mountains by forest fires in 1980—1999[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2007, 18(12):2647-2653.
- [45] 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[J]. 生态学报, 2012, 32(17):5373-5386.
HU H Q, WEI S J, SUN L. Estimating carbon emissions from forest fires during 2001 to 2010 in Daxing'anling Mountain[J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(17):5373-5386.
- [46] 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.
WEI S J. Quantitative evaluation methods of carbon emissions from forest fires in Heilongjiang Province, China[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2013.
- [47] 胡海清, 王广宇, 孙龙. 小兴安岭主要森林可燃物类型地被物燃烧烟气分析[J]. 林业科学, 2009, 45(5):109-114.
HU H Q, WANG G Y, SUN L. Analyses of gas emission in ground covers combustion of main forest fuel types in Xiaoxing'an Mountain[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2009, 45(5):109-114.
- [48] 赵凤君, 舒立福, 姚树人. 森林火灾碳排放估算方法与研究进展[J]. 森林防火, 2012(1):25-29.
ZHAO F J, SHU L F, YAO S R. Estimation methods and research progress of carbon emissions from forest fires[J]. Forest Fire Prevention, 2012(1):25-29.
- [49] 金森. 遥感估测森林可燃物载量的研究进展[J]. 林业科学, 2006, 42(12):63-67.
JIN S. A review on estimating forest fuel loads by remote sensing imagery[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2006, 42(12):63-67.
- [50] 殷丽, 田晓瑞, 康磊, 等. 林火碳排放研究进展[J]. 世界林业研究, 2009, 22(3):46-51.
YIN L, TIAN X R, KANG L, et al. Research development of carbon emissions from forest fires[J]. World Forestry Research, 2009, 22(3):46-51.
- [51] 王强. 基于多源遥感数据估测林火参数的研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2012.
WANG Q. Estimation of forest-fire parameters based on multi-source remote sensing data[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2012.
- [52] LASSLOP G, KLOSTER S. Impact of fuel variability on wildfire emission estimates[J]. Atmospheric Environment, 2015, 121:93-102.
- [53] 彭徐剑, 郭福涛, 胡海清, 等. 大兴安岭森林火灾 NO 和 SO₂ 释放量的估算[J]. 林业科技开发, 2015, 29(5):134-138.
PENG X J, GUO F T, HU H Q, et al. Estimation of NO and SO₂ emission by forest fires in the Da Hinggan Mountains[J]. China Forestry Science and Technology, 2015, 29(5):134-138.
- [54] 王明玉, 舒立福, 宋光辉, 等. 大兴安岭小尺度草甸火燃烧效率[J]. 生态学报, 2011, 31(6):1678-1686.
WANG M Y, SHU L F, SONG G H, et al. Combustion efficiency of small-scale meadow fire in Daxinganling Mountains[J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(6):1678-1686.
- [55] 胡海清, 郭福涛. 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[J]. 应用生态学报, 2008, 19(9):1884-1890.
HU H Q, GUO F T. Estimation of total carbon-containing gas emission from main tree species in forest fires in Daxing'an Mountains[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2008, 19(9):1884-1890.
- [56] 魏书精, 罗碧珍, 魏书威, 等. 黑河市森林火灾碳排放的计量估算研究[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2014, 38(1):70-76.
WEI S J, LUO B Z, WEI S W, et al. Estimates of carbon emissions in Heihe City due to forest fires[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Science Edition), 2014, 38(1):70-76.
- [57] 单延龙, 曾超, 翟成刚, 等. 延边地区森林火灾释放碳量的估算[J]. 浙江林业科技, 2010, 30(5):1-4.
SHAN Y L, ZENG C, ZHAI C G, et al. Estimation of carbon emission from forest fires in Yanbian Region[J]. Journal of Zhejiang Forestry Science and Technology, 2010, 30(5):1-4.
- [58] LAMBIN E F, GOYVAERTS K, PETI C T. Remotely-sensed indicators of burning efficiency of savannah and forest fires[J]. International Journal of Remote Sensing, 2003, 24(15):3105-3118.
- [59] FRENCH N H F, KASISCHKE E S, HALL R J, et al. Using Landsat data to assess fire and burn severity in the North American boreal forest region: an overview and summary of results[J]. International Journal of Wildland Fire, 2008, 17(4):443-462.
- [60] 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]. 环境工程学报, 1998, 6(4):1-15.
WANG X K, ZHUANG Y H, FENG Z W. Estimation of carbon-containing gases released from forest fire[J]. Advances in Environmental Science, 1998, 6(4):1-15.
- [61] LEVINE J. Global biomass burning: atmospheric, climatic, and biospheric implications[M]. Cambridge: The MIT Press, 1991.
- [62] 庄亚辉, 曹美秋, 王效科, 等. 中国地区生物质燃烧释放的含碳痕量气体[J]. 环境科学学报, 1998, 18(4):337-343.
ZHUANG Y H, CAO M Q, WANG X K, et al. Carbon-containing trace gases emitted during biomass burning in China[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 1998, 18(4):337-343.

(责任编辑 赵 勃
责任编辑 李俊清)