DOI: 10.20103/j.stxb.202205291508

王明玉,司莉青,陈锋,舒立福,赵凤君,田晓瑞,李伟克,李威,李笑笑.森林火灾污染物质释放及其影响研究进展.生态学报,2024,44(12): 4933-4944.

Wang M Y, Si L Q, Chen F, Shu L F, Zhao F J, Tian X R, Li W K, Li W, Li X X. Advances of forest fires pollutants release and influence. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(12):4933-4944.

森林火灾污染物质释放及其影响研究进展

王明玉1,司莉青1,*,陈 锋2,舒立福1,赵凤君1,田晓瑞1,李伟克1,李 威1,李笑笑1

1 中国林业科学研究院森林生态环境与自然保护研究所,国家林业和草原局森林保护学重点实验室,北京 1000912 北京林业大学生态与自然保护学院,北京 100083

摘要:森林火灾是大气中气体污染物和颗粒物的重要来源,可对全球气候系统、大气环境以及生态系统产生重要影响,对全球温 室气体和含碳颗粒物释放具有重要的贡献,是推动全球气候变化的重要因素。森林火灾释放污染物已成为区域乃至全球范围 内重要污染源之一,这些污染物质与辐射、能见度以及温室效应等问题直接相关。准确地描述森林火灾释放的气体和颗粒污染 物释放机理、释放总量、时空分布特征、不同尺度的扩散过程模拟,以及对区域大气环境的影响,对于量化森林火灾释放污染物 总量及区域影响具有重要意义。基于森林火灾污染物质释放方面的国内外文献,从火灾释放的污染物质对环境的影响、森林火 灾释放污染物定量化和传输路径监测的研究方法、污染物质的扩散和运输模型以及跨区域影响等几个方面进行了综述。森林 火灾释放的 CO、PM₁₀和 PM₂₅对环境和人的生命安全造成巨大威胁,而且森林火灾释放的污染物质能够随气流长距离传输,不 仅对当地的空气造成污染,污染物也能够随着气团进行长距离传输,并在传输过程与当地气溶胶混合,形成跨区域污染。森林 火灾释放污染物扩散、传输模拟通过不同模型相互耦合完成,包括可燃物载量估算模型、可燃物消耗和释放模型、污染物扩散传 输模型,以及污染物预测和可视化模型等。总结了国内外森林火灾释放污染物质主要研究方法,并展望了今后研究重点:目前 我国关于森林火灾释放物质相关的研究尚不足以支撑我国森林火灾温室气体释放、污染物释放等方面的研究,并且我国目前还 没有发展出适合于我国的森林火灾污染物释放模型,以及污染物扩散、传输系统。森林火灾排放因子库大多数引用国外研究结 果,在一定程度上增加不确定性,缺乏森林火灾对区域大气环境影响的定量化研究。因此,今后我国应加强对森林火灾污染物 质释放与影响的研究,尤其是污染物质扩散和传输模型的预测和可视化研究以及排放因子的测量。 关键词:森林火灾污染物;大气环境:扩散模型;跨区域污染

Advances of forest fires pollutants release and influence

WANG Mingyu¹, SI Liqing^{1,*}, CHEN Feng², SHU Lifu¹, ZHAO Fengjun¹, TIAN Xiaorui¹, LI Weike¹, LI Wei¹, LI Xiaoxiao¹

1 Key Laboratory of Forest Protection of National Forestry and Grassland Administration, Ecology and Nature Conservation Institute, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China

2 School of Ecology and Nature Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

Abstract: Forest fires are an important source of gaseous pollutants and particulate matter in the atmosphere, which have a significant impact on the global climate system, atmospheric environment and ecological system. They make an important contribution to the release of global greenhouse gases and carbon-containing particulate matter, and is an important factor driving global climate change. Forest fires have become one of the important pollution sources in the region and even the world. These pollutants are directly related to radiation, visibility and greenhouse effect. Accurately describing the release mechanism, total amount, spatial and temporal distribution characteristics, diffusion process simulation at different scales

收稿日期:2022-05-29; 网络出版日期:2024-04-10

基金项目:国家自然科学基金项目资助(32271895,32301595)

^{*} 通讯作者 Corresponding author.E-mail: liqing_si@ caf.ac.cn

and impacts on regional atmospheric environment of gas and particulate pollutants released by forest fires is of great significance for quantifying the amount of pollutants released by forest fires and their regional impacts. Based on the domestic and foreign literature on the release of pollutants from forest fires, this paper summarizes the environmental impact of pollutants released from forest fires, research methods of quantification and transport path monitoring of pollutants released from forest fires, diffusion and transport models of pollutants, and inter-regional impacts. The CO, PM10 and PM25 released by forest fires pose a great threat to the environment and human life. In addition, the pollutants released by forest fires can transport over the long distance with the air flow, not only causing pollution to the local air, but also forming interregional pollution with pollutants transported along the long distance with the air mass and mixed with local aerosols. The diffusion and transport simulation of forest fire pollutants can be completed by coupling different models, including fuel load estimation model, fuel consumption and release model, pollutant diffusion and transport model, and pollutant prediction and visualization model. In the end, the article reviewed the main research methods of forest fire emission pollutants at home and abroad, and suggested future direction for research. At present, the pollutants released from forest fires are not enough to support the study on the release of greenhouse gases and pollutants from forest fires in our country. The model of pollutant release from forest fire and the system of pollutant diffusion and transmission have not been developed. Most of the forest fire emission factor databases cite foreign research results, which increases the uncertainty of the results in our country. Moreover, the quantitative study on the effect of forest fire on regional atmospheric environment is lacking in China. Therefore, the study on the release and effects of pollution from forest fires should be strengthened in the future, especially the prediction and visualization of pollution diffusion and transmission model and the measurement of emission factors.

Key Words: forest fire pollutants; atmospheric environment; diffusion model; inter-regional pollution

全球尺度上森林火灾是森林生态系统重要的干扰因子之一,影响着地球生物化学循环,在大气的化学循环和碳循环中起着重要作用^[1]。森林火灾是全球生物质燃烧的重要组成部分之一,森林火灾排放的固体颗粒物和气体成分,对气候变化有直接和间接的影响,对全球温室气体排放具有重要的贡献,是推动全球气候变化的重要因素^[2]。森林火灾排放的固体颗粒物和气体成分主要包括 PM、PM₁₀、PM₂₅、SO₂、NO_x、NH₃、CH₄、BC、EC、OC、VOCs、CO、CO₂等^[3-4],这些污染物质具有对人体有害的成份^[5],不但影响区域大气环境质量^[6],影响降水酸度^[7],影响改变平流层臭氧和光化学烟雾^[8-9],影响生态系统^[10-12]等,而且对区域的能见度下降和灰霾的形成都有重要影响^[13],对公路交通、民航、旅游、户外活动等均产生影响。森林火灾每年向大气碳释放约 3.5×10¹⁵g,约占全球化石燃料燃烧释放量的 50%^[14-15]。受气候变化影响,全球森林火灾碳释放有增加的趋势,Cahoon 等利用遥感技术对中国东北和东南西伯利亚 1987 年的森林火灾温室气体释放量进行计算,他根据阴燃和有焰燃烧气体释放量的不同分别计算,1987 年这一区域温室气体释放量达到了当年全球温室气释放量的 4%,达到了全球稀树草原火灾温室气体释放量的 20%^[16]。2010 年莫斯科地区发生了一场 8hm²的森林泥炭火灾,这场火灾中碳的损失包括生物量在内约 650t CO₂/hm²,这表明北方森林-泥炭火对大气中气体浓度和气候的影响被低估了^[17]。北方森林和热带森林被认为是含碳气体释放的两个主要来源。近年来森林火灾排放到大气中的颗粒物及污染气体的研究越来越受到科学家的关注。

受气候变化影响,森林火灾有增加的趋势,不同的气候变化情景下 2010s—2090s 黑龙江森林火灾次数将 增加 70.29%—76.35%、云南将增加 26.25%—60.18%^[18]。随着森林火灾次数和面积的增加,森林火灾造成的 大气污染和对气候变化的影响将进一步加剧。建立区域森林火灾污染物质释放清单及排放因子清单,不同可 燃物不同条件燃烧效率清单,以及建立森林火灾污染物释放模型,进而建立区域森林火灾污染物扩散、传输模 拟系统,使之成为国家空气质量预报系统的组成部分。森林火灾释放污染物质大气扩散模拟是进行森林火灾 危险性评估的重要步骤,是进行大气污染综合预警的重要组成部分,是大气污染联防联控机制重要环节。森 林火灾释放污染物质成份复杂,涵盖了当前大气污染的主要成份,具有特殊的热力学和动力学过程,我国要提 高应对重大空气污染事件能力,既是我国建设生态安全、生态文明的需要,也是减少扑火人员伤亡,降低公众 健康损害的需要,同时也是我国应对气候变化森林火灾释放温室气体计算的前提和基础性研究。因此,本文 综合回顾了近年来森林火灾释放污染物质的最新研究进展,特别从森林火灾释放污染物质对大气的影响、主 要的研究方法、污染物质的扩散和传播以及其造成的跨区域影响几个方面进行论述,同时提出了我国在森林 火灾释放物质方面研究的不足,指出了未来的努力方向。

1 森林火灾释放污染物质对大气的影响

森林火灾,尤其是重大森林火灾是大气中污染物的重要来源,森林燃烧过程是可燃物纤维素、半纤维素、 木质素等组分的热分解过程,燃烧生成的烟雾通常被定义为森林燃烧所产生的各种气体及悬浮在空气中的固 体和液体颗粒的总称^[19]。森林火灾释放的有害气体和颗粒物对人体产生不同的伤害,其中森林燃烧产生的 CO是扑火人员伤亡的主要因素^[20]。当空气中 CO浓度过高或持续时间过长,都会使人窒息或死亡。森林火 灾扑火人员死亡原因中,48%是由 CO引起的,26%是由 CO和其他毒物联合作用造成的^[21]。热解产生的气态 挥发物的燃烧完全程度是决定 CO释放速率及释放量大小的关键。当空气中 CO质量分数为0.002%— 0.008%时,会使人的血红蛋白失去携带氧气的功能,造成组织缺氧,野外扑火人员要十分小心 CO中毒^[22]。 巴西亚马逊地区在以森林为主的生物质燃烧季节,高浓度的 PM₁₀(400—600µg/m³)远远超过了世界卫生组织 确定的浓度上限(每日接触 PM₁₀:50µg/m³)的 8-12 倍^[23]。

森林火灾的重要排放物之一是颗粒物,它常常会形成雾霾,空气动力直径大于 10µm 的颗粒可以通过鼻 喉系统中过滤,PM₁₀(指空气动力学当量直径小于 10µm 的颗粒物)以下的则可以进入呼吸系统甚至进入血 液^[24]。2000—2014 年期间中加里曼丹省在发生森林火灾后 7—11 月的 PM₁₀浓度增加,能见度下降^[25]。PM₂₅(指空气动力学当量直径小于 2.5µm 的颗粒物)粒径更小,富含大量的有毒、有害物质,且在大气中的停 留时间长、输送距离远,因而对人体健康和大气环境质量的影响更大,虽然 PM₂₅只是地球大气中含量很少的 成分,但它对空气质量和能见度等有重要的影响。大气中 PM₂₅含有多种 PAHs 化合物,大气中 PM₂₅浓度增 加会导致发病率和死亡率增加^[3]。许多对人体具有潜在危害的物质主要集中于细颗粒物中,由于可吸入颗 粒物 PM₂₅的比表面积较大,使得所吸附的重金属和有毒有害物质(如酸、重金属、PAHs 等)更多,对人体健康 造成极大危害。PM₂₅可能导致新生婴儿体重过轻,并与呼吸系统和心脏问题有关^[26-27]。森林火灾产生的细 小颗粒物能深达人体肺部,有些超细颗粒物甚至可以渗透进血液,从而引发人体整个范围的疾病,包括哮喘, 心血管疾病,支气管炎^[28]。森林燃烧过程中可释放出高浓度 PM₂₅颗粒物,对人体具有极大的危害^[29]。欧盟 国家中,PM₂₅导致人们的平均寿命减少 8.6 个月,PM₂₅和 PM₁₀浓度越高,儿童及其双亲呼吸系统病症的发生 率也越高,而 PM₂₅的影响尤为显著。2017 年 1 月在智利中南部发生了历史性的森林火灾,火灾排放增加了 首都圣地亚哥地表的污染物浓度,PM₃,平均增加 150%(+30µg/m³),CO 平均增加 50%(+200µg/m³)^[30]。

在区域尺度上, PM_{2.5}浓度明显受森林大火影响, 魁北克森林大火产生的浓烟对纽约城区 PM_{2.5}质量浓度 的贡献可达 40%—90%^[31]。Price 等对澳大利亚南威尔士林地内 52hm²和 700hm²的森林大火产生的烟羽和 PM_{2.5}进行研究发现, 52hm²的森林火灾产生约高 800m, 长 9km 的烟羽, 而且在距离火源 500m 处的 PM_{2.5}达到 峰值 400μg/m³; 700hm²的森林大火产生了更大的羽流, 影响了 14km 外的下风地区^[32]。2020 年 3 月至 4 月 期间, 利用新建立的 AirVisual 传感器微型网络在乌克兰基辅市五个区域调查 PM_{2.5}浓度, 在乌克兰基辅市上 空观测到极高的 PM_{2.5}气溶胶污染, 污染源是乌克兰北部和基辅地区的大面积森林大火^[33]。

森林燃烧释放的颗粒物还含有较高的钾离子和氯离子,在1997年发生在印尼森林大火时采集的0.15— 3µm颗粒物中S/K会明显增高^[34]。森林火灾释放的SO₂、NO_x、NH₃则是形成酸沉降的最关键的反应性气体^[35],它们和CO,VOCs一起也是大气中形成二次气溶胶粒子的重要前体物,并且对区域的能见度下降和灰霾的形成都有重要影响。森林可燃物热解过程中也释放出大量的VOCs^[36—37],VOCs、CO、NO_x还是生成O₃和形成光化学污染的最主要的前体物^[38]。生物质燃烧还会产生大量的气溶胶^[39],其还有助于增强云冰含量,

44 卷

导致闪电的增加^[40],闪电的增加反过来又会增加森林雷击火发生的可能性,而引发雷击火的闪电则主要是云 地闪电^[41],研究表明云地闪次数与10μm 直径及更小(PM₁₀)粒子的浓度呈正相关关系^[42]。

森林火灾释放的污染物是造成区域大气污染的重要来源,森林火灾释放的烟雾对周围环境和人类社会造成直接的危害,森林大火造成的空气污染与呼吸系统的疾病患者的数量有很强的相关性,森林大火期间呼吸系统疾病患者明显增加。森林大火释放的污染物对人体产生严重的危害,2017年智利发生的森林火灾导致该地区有76人过早死亡,209人因呼吸系统疾病入院,而对儿童和老人所造成的长期危害尚难确定。这场大火对全球生物多样性和气候变化也造成了巨大损害^[6]。

2 森林火灾释放污染物质扩散和传输

大气污染物扩散模型是一种用以处理大气污染物在大气中输送和扩散问题的物理和数学模型。污染物质的扩散模型依据不同的地理条件、气象条件、污染源状况、预测的时间尺度与空间范围分成不同的模型。根据不同的理论方法可分为高斯大气污染物扩散模式、拉格朗日大气污染物扩散模式、欧拉大气污染物扩散模式、嵌套模式的大气污染物扩散模拟系统等^[43]。森林火灾释放污染物扩散、传输模拟通过不同模型相互耦合完成,包括可燃物载量估算模型、可燃物消耗和释放模型、污染物扩散传输模型,以及污染物预测和可视化模型等。化学-传输模型(CTM)方法可以用来描述和评估生物质燃烧排放对全球大气组成的运输和影响^[44-45]以及区域尺度的影响^[46-47],特别是嵌套模式^[48]被广泛用于研究世界上几个地区的大型生物质燃烧事件的大气影响,包括非洲^[49]、俄罗斯^[50]和地中海^[51]中应用的例子。

扩散传输模型与污染物预测可视化模型往往集成在一起,包括 BlueSkyRains (Blue Sky smoke modeling framework and Rapid Access INformation System)、加拿大西部野火烟雾预报系统、欧洲森林火灾信息系统 EFFIS (European Forest Fire Information System)、NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration)烟气 预报系统、VSmoke 和 VSmoke-GIS 烟雾扩散系统等。其中比较典型的是 BlueSkyRains, BlueSkyRains 是基于 BlueSky 模型,使用 WebGIS 技术开发的一个快速访问系统。BlueSkyRains 可以提前 3 天对计划烧除和野火释 放的 CO₂、CO、CH₄、NMHC、PM、PM₁₀、PM₂₅等进行预报,系统可以对华盛顿州,俄勒冈州,爱达荷州和蒙大拿 州西 部提供预测。BlueSkyRains 系统中森林燃烧信息从美国林务局 FASTRACS (Fuel Analysis, Smoke Tracking Report Access Computer System)获得^[52]。可燃物信息从 NFDRS(National Fire Danger Rating System) 获得,可燃物消耗使用 CONSUME3.0 系统,森林火灾释放量使用 FEPS(Fire Emission Production Simulator),由 MM5 模式提供气象场数据资料。其中 PM 浓度扩散采用 CALPUFF 模型,烟气运动轨迹模型则使用 HYSPLIT 模型。

加拿大西部野火烟雾预报系统(Wildfire Smoke Forecasts for Western Canada)参考 BlueSky 模型开发而来, 但其中可燃物信息来自于加拿大火险等级系统 CFFDRS(Canadian Forest Fire Danger Rating System)。该系统 在防火期提供加拿大西部地区未来 48 小时森林大火释放 PM_{2.5}逐时浓度和分布预报,每天预报一次,不同的 浓度用不同的颜色来表示。4KM 的空间分辨率。同时输出提供了 Google Earth 格式,可以在 Google Earth 进 行显示。

欧洲森林火灾信息系统 EFFIS(The European Forest Fire Information System)是由欧洲 37 个国家从 2000 年开始发展起来,具有火险预测、过火面积提取、火后植被更新、潜在土壤流失、损失评估等模型,其中森林火 灾燃烧释放物质计算是其中一个模块,但目前烟气扩散模型正在开发过程中,该系统也是基于 BlueSky 发展 而来。

NOAA 烟气预报系统(NOAA Smoke Forecasting System)是国家空气质量预报系统(National Air Quality Forecast System)子模块,是由 NOAA 和 EPA 发展的提供森林火灾释放污染物的预报,实现森林火灾释放的烟 气预报模拟。集成 NOAA 国家环境卫星获得的森林火灾位置信息和数据、北美中尺度模式提供的气象信息, HYSPLIT 扩散模型,以及美国林务局森林火灾释放模型,提供覆盖全国的 48 小时的烟气扩散和浓度的预

报^[53]。NASA 和 NOAA 联合领导评估火灾对区域、全球环境和空气质量的影响(FIREX-AQ),基于地面和空中跟踪,2019年已经观察并追踪了美国西部野火产生的烟雾,同时在 NASA 的 DC-8 空中实验室上收集测量数据。NASA 和 NOAA 的卫星可以提供包括可燃物类型、火灾强度、烧毁面积以及其他天气变量如风速、温度等信息,这些信息将被用于烟雾模型预测中,预测内容包括火灾烟雾量、方向和速度等,FIREX-AQ 行动将火灾烟雾的研究从实验室带到野外,针对不同的火灾烟雾成分(气溶胶、棕碳、VOCs)、火灾喷烟高度、空气质量预测等进行追踪研究,可用于改进现有的烟雾模型^[54]。

VSmoke 和 VSmoke-GIS 烟雾扩散模型由美国林务局基于高斯模型进行开发,用于确定计划烧除对高速公路、人体健康的影响,相比其他点源高斯模型(如烟囱模型),该模型允许用户控制地表烟雾浓度,以及余下的烟雾上升到大气中的最大高度。VSmoke-GIS 在基于 ArcView 和 ArcMap 开发的扩散模块,2.0 版本已经与FEPS 集成,利用 FEPS 计算的结果,预测下风向颗粒物扩散的距离,可对颗粒物浓度以及可见度进行分析^[55]。

此外,ATHAM(Active tracer high-resolution atmospheric model)模型^[56]、READY 系统^[57]等均可以对森林火 灾烟气动态演化进行模拟。研究者基于不同的目的也发展了其他生物质燃烧污染物扩散系统,为了估算清理 的可燃物堆燃烧释放烟气总量,Wright等开发了一种基于可燃物堆形状估算烟气释放量的在线工具^[58],以及 用于模拟秸秆焚烧产生的 PM_{2.5}浓度扩散情况 ClearSky 系统,ClearSky 基于 MM5 中尺度数值预报模式和 CALPUFF 进行模拟。

国内对于火灾中烟气运动以及烟气迁移规律的研究较少,主要集中在建筑火灾烟气危害性、烟气的生成 机理、以及建筑空间内烟气的运动等,以及城市、工业排放污染物扩散、传输方面的研究^[59-61],与森林火灾释 放污染物扩散、传输方面的研究比较接近的是秸秆焚烧释放污染物的研究^[62-63],而森林火灾释放污染物扩 散、传输方面的研究则很少。由中国科学院大气物理研究所搭建的区域大气环境污染模式系统 RAMS-CMAQ 可以对为全国范围的空气质量进预报,尤其是沙尘气溶胶和 PM₁₀质量浓度进行预报^[64-66],但不能对森林火 灾污染物释放、扩散情况进行预报模拟。

3 森林火灾释放污染物质的跨区域影响

全球生物质燃烧主要分布在赤道附近地区以及北半球中、高纬度区域,高温度烟气可以穿透边界层进入 自由对流层甚至对流层上部^[67],并沿高层盛行风向在区域、洲际甚至半球尺度上做长距离输送。森林火灾不 仅能够对当地的大气造成危害,而且已经成为跨区域的问题,森林火灾释放的污染物质,能够随气流长距离传 输,因此,森林火灾释放的污染物质不仅对当地的空气造成污染,而且污染物能够随着气团长距离传输,并在 传输过程与当地气溶胶混合,形成区域性污染。

森林火灾释放出大量的热量和烟气,在大气湍流的作用下,扩散至大气后的烟气,并不是立即消失在大气之中,而是要在大气中周转几天,周转期间,发生一系列的物理和化学变化,可分为沉降、光化学反应及氧化反应等^[68]。加拿大的森林火灾释放的烟雾影响了美国的空气质量,1995 年夏天在美国东南部有超过 2 个星期 CO、O₃、VOCs 和气溶胶浓度明显升高,研究表明这期间空气污染物质的升高是由加拿大的森林大火引起来的。以往的研究认为人为污染是北半球的中纬度地区主要的空气污染,而这次研究表明北方针叶林森林火 灾释放污染特质对空气质量的影响需要进行重新评估^[69]。1997 年发生在印度尼西亚的森林大火,引起了跨边界空气污染,造成东南亚地区严重的烟雾污染,影响到新加坡、泰国、马来西亚、菲律宾、文莱等国的空气质量,给这些国家带来了环境和健康问题^[70]。印尼森林大火后开展了一系列的研究项目,其中包括研究这次大 火的物质释放量和烟雾长距离传输模型^[71]。2016 年俄罗斯西伯利亚森林火灾产生的烟雾途径中亚进入中国新疆西南部,经过西伯利亚进入蒙古国和中国东北地区,亚洲地区的烟尘气溶胶含量和 PM₁₀含量显著增加,对中亚、蒙古国以及中国北部的空气质量造成严重影响^[72]。2019 年 8 月亚马逊火灾事件成为国际媒体的 头条新闻,烟雾从亚马逊地区蔓延传播到 2700 多公里外的巴西圣保罗,导致整个城市在下午 3 点陷入黑

暗^[73]。2019—2020,在澳大利亚发生了一场历史上最灾难性的(过火面积和严重程度)森林火灾,产生的烟雾 扩散到了新西兰和南美,而且美国国家航空航天局(NASA)卫星图像显示,澳大利亚山火产生的烟雾已经环 绕地球周转了一圈^[74]。

国内外大量研究结果表明了生物质燃烧释放长距离输送对大气成分的影响^[75]。加拿大森林大火的烟雾 据卫星观测可上升至 5000km 高空。基于拉格朗日混合单粒子轨道模型得出了中国西南地区 2012—2017 年 森林和草原火灾高峰季节的烟雾高度在 2500—2890m 之间,75%的烟雾位于对流层以上,烟雾可造成大范围 的空气污染^[8]。而格陵兰岛的冰晶的分析显示加拿大的生物质燃烧烟雾经 3—4d 的传输可到达格陵兰岛,其 中含有较高浓度的 NH₄⁺,K⁺等。印度尼西亚森林大火产生的颗粒物能够传输到泰国和菲律宾。春季东南亚 和南亚的生物质燃烧不仅影响源区对流层臭氧含量,而且对处于环流下游的中国南部地区也有显著作用;燃 烧源区主要影响对流层低层,下游地区则影响对流层中低层^[76]。东南亚部分国家(如老挝、缅甸、越南)仍然 保留了"刀耕火种",每年 2 月底 3 月初焚烧森林和草地,产生的污染物主要为 PM_{2.5}和 O₃,随着持续西南风影 响到云南省西双版纳州、普洱和怒江州等地,造成区域性污染,导致云南空气质量出现不同程度超标^[77]。

4 森林火灾释放污染物质主要研究方法

森林火灾释放污染物的定量化和传输路径的监测是森林火灾释放污染物质研究的重要方面,这依赖于森林火灾污染物排放和传输模型的构建,以及定量化关键参数的获取,其主要研究方法见表1。森林火灾释放污染物质的计算方法,是从 Seiler 等构建的森林火灾碳排放量计算模型发展而来^[78-79],是对 Seiler 等构建模型应用范围的扩展。森林火灾释放污染物质计算通常使用下面的公式进行计算:

$$E_i = A \times FL \times BE \times EF$$

(1)

式中,E,释放物质 i 的排放量,A 为过火面积,FL 为可燃物载量,BE 为燃烧效率,EF(i)为排放因子^[79]。

基于不同的研究方法,可对这些关键参数进行修正,一般通过室内模拟实验、野外火烧实验、野外大气观测实验、遥感反演等对这些参数进行获取。这些参数具有很大的不确定性和高相关性,在区域尺度使用这些参数时会加重这种不确定性,并且由于这种不确定性的存在使得很难对不同的区域的森林火灾释放量进行比较^[80],因此准确获得森林火灾燃烧过程中的各个因子就成为定量化研究和降低不确定性的一个关键。

基于不同的卫星传感器,通过遥感方法可以对森林火灾过火面积进行提取,对污染物质的释放情况以及 传输路径进行监测。利用卫星云图或光学厚度或示踪物质浓度变化可以描述典型的森林火灾污染物释放情 况,卫星云图和光学厚度等反演数据反映的是大气污染柱的分布情况,能够给出气溶胶的光学特性,进一步根 据光学特性分析气溶胶的组成和性质^[81]。通过火烧实验研究森林火灾对气候变化的影响以及森林火灾释放 物质的大气化学传输等^[82]。

排放因子(单位质量的植被燃烧产生的气体或气溶胶的质量)和燃烧效率(指可燃物燃烧掉的部分占总 干质量的比例)^[83]是影响森林火灾释放污染物质定量化计算和不确定性最重要的因素,由于控制实验能够很 好观测不同燃烧阶段的气体释放状况,因而往往用于排放因子的测算。此法可以测定森林可燃物样品燃烧时 释放出的含碳混合气体和颗粒物,也可用于测量燃烧效率^[84]。Clements 等利用微燃烧实验进行含碳气体释 放的研究,用测算燃烧所释放的全碳、CO和CO₂。虽然微燃烧实验与野外实际火灾差异比较大,但是微燃烧 实验可以有效地确定燃烧过程和燃烧效率对气体释放的影响^[85]。室内燃烧实验与野外火烧大气测量相结合 可以更好的对初始排放因子和排放比进行确定^[86-87]。

基于森林火灾污染物释放量尤其是碳释放准确计量的需要,国际进行了大量排放因子测量的研究,如 TROFFEE^[86-87]、BIBEX^[82]等实验项目。由于区域位置、生态区、测算方法,以及控制燃烧条件的不同,全球不 同地区不同森林火灾释放物质的排放因子具有很大的差异,一般是某一范围区间,在使用时往往根据生态区、 或气候区等计算平均值^[84,88]。由于排放因子多根据植被类型,甚至植被器官进行测量,在进行释放量计算 时,排放因子进行简单平均并不能很好的代表可燃物的不同植被类型的实际组成,造成释放量计算的偏差,并 且很难对这种不确定性进行评价。

针对全球不同区域和生态区的森林火灾碳释放量,Schultz等对森林火灾碳释放模型进行简化,假定森林 火灾碳释放量仅与区域位置、生态区,以及单位面积平均碳排量有关,通过这种方法对全球不同区域的碳释放 量进行了估算。通过 Global Fire Emissions Database (GFED version 4 s)输出的碳排放量与过火面积,在洲际 尺度上,森林火灾碳释放量与森林过火面积具有很强的相关性^[89]。虽然这种方法可以对全球不同区域释放 量进行评价和比较,但以降低计算精度为代价。

我国对森林火灾排放因子的使用最初源自森林火灾温室气体释放量计算的需求,由于我国森林火灾排放 因子方面的测算数据比较少,大多引用国外研究结果^[90-91],排放因子的引用具有很大的主观性,往往根据生 态区或者相关国家发展情况进行引用,由于不同区域森林类型排放因子差别很大,计算结果的可靠性比较低, 并且不同学者的计算结果差别很大。为了提高计算结果的可靠性,国内学者也进行了部分植被类型温室排放 因子的室内实验测算,包括大兴安岭^[92-93]、小兴安岭^[94]、黑龙江温带森林^[95]典型植被燃烧温室气体排放因 子的测算,由于这些实验多是为了计算森林火灾温室气体释放量,并没有测算固体颗粒物,以及其他污染性气 体的排放因子。

燃烧效率是估计森林火灾释放污物质的关键,与可燃物类型、可燃物结构、植被类型、可燃物的尺寸、森林 覆盖率、燃烧类型、生物群系,土地利用方式、生态气候区等因素密切相关^[96]。燃烧效率估算一般可采用地面 调查、遥感反演、模型方法,以及多种方法相结合的估算方法。由于影响燃烧效率的因素具有多样性和复杂 性,在大尺度对燃烧效率或可燃物消耗量进行准确估计有一定的难度,通过模型则可直接对可燃物消耗量进 行计算,如 FOFEM (First Order Fire Effects Model),CONSUME 等系统^[97]。CFFDRS 中 FBP (Fire Behavior Prediction)模块除了对火强度和火蔓延速度进行计算外,也可以对可燃物消耗量进行计算,包括地表可燃物 消耗量和树冠可燃物消耗量^[98]。我国在燃烧效率方面的研究较少,王明玉等根据地面调查和空间插值测算 了大兴安岭草甸火的燃烧效率^[99],其他学者在进行碳释放计算时多根据气候区或生态区相同的国外数据或 利用遥感反演燃烧效率^[100]。

可燃物载量和过火面积一般可通过地面调查和遥感进行获取,NASA 基于 MODIS 也开发和发布了过火 面积产品,可对过火面积进行获取。加拿大的 CFFDRS、美国的 NFDRS 以及 FCCS (Fuel Characteristic Classification System)具有可燃物类型和载量等可燃物信息,可以直接为释放模型提供可燃物相关信息数据, 进行森林火灾释放物总量的计算^[101]。

FEPS 是比较常用的森林火灾释放模型,FEPS 适用于北美和全球大部分的森林、灌木、草地类型。该系统可以按小时计算总算可燃物的总体消耗,计算有焰燃烧、短期阴燃,以及长期阴燃的可燃物消耗,进而可以计算出可燃物燃烧释放热量和释放物。可对计划烧除、森林火灾、农业用火等释放的烟雾进行管理,可用于区域释放清单的建立和空气质量的评估。同时该系统的计算结果也为 BlueSkyRains 系统、加拿大西部野火烟雾预报系统以及 VSmoke 和 VSmoke-GIS 等森林火灾污染物扩散、传输系统提污染源数据^[102]。

SMOKE(Sparse Matrix Operator Kernel Emission)污染释放模型也常用于森林火灾释放污染物的计算^[103], 根据周围环境的气象条件和社会经济活动对空气中污染源的释放情况进行计算,为 CMAQ 提供释放源数据 资料,可以对 CO、NO_x、VOCs、NH₃、SO₂、PM、PM_{2.5}、PM₁₀)、汞,镉,苯,和甲醛等进行计算,并且处理能 力不受污染物数量和类型的限制。该模式包括生物源释放清单系统(BEIS2 和 BEIS3-Biogenic Emission Inventory System),可以对森林火灾释放的污染物质进行计算,为森林火灾污染物扩散、传输模型提供污染源 数据。

森林火灾释放污染物受多种因素的影响,由于参数的差异会导致结果有很大的不同,而燃烧方式、燃烧频 率、燃烧密度、燃烧地点、排放因子等是影响污染程度的关键因素。排放因子是依赖于火险条件、气象条件、可 燃物等条件的一个动态因子,在全球不同区域、不同气候区和植被区有很大差异。在大多数情况下,排放因子 只是在可接受条件下能得到的数据的简单平均,但排放因子很大程度依赖于燃烧的状态,如阴燃火比有焰燃 烧放出更多的污染物。国外有关颗粒物和污染气体的排放因子有很多实测数据,但有关中国区域的实验工作 目前还较少,排放因子主要引用国内外已有的研究成果。目前我们国家还没有森林火灾排放因子库,大多数 只能引用国外研究结果,会在一定程度上增加不确定性。

Table 1 Main research methods of pollutants released by forest fire		表 1 森林火火释放污染物质王要研究方法
Table 1 Main research methods of politicatis released by forest me	Table 1	Main research methods of pollutants released by forest fire

研究者及方法 Researchers and methods	主要研究内容 Main research contents
Seiler 玺 ^[78-84]	森林火灾释放污染物质计算通常使用下面的公式进行计算: $E_i = A \times$
Solidi (j	$FL \times BE \times EF(i)$
Clements 等 ^[85]	微燃烧实验进行含碳气体释放的研究
TROFFEE、BIBEX 等实验项目 ^[86-88]	排放因子测量的研究
Schultz 等 ^[89]	森林火灾碳释放模型进行简化,对全球不同区域的碳释放量进行估算
国内席云竹、李春阳、王千雪、魏书精等[90—95]	大兴安岭、小兴安岭、黑龙江温带森林典型植被燃烧温室气体排放因 子的测算
FOFEM(First Order Fire Effects Model)、CONSUME 等系统 ^[96—97]	对可燃物消耗量进行计算
CFFDRS (Canadian Forest Fire Danger Rating System) 中 FBP (Fire Behavior Prediction) 模块 $^{[98]}$	除了对火强度和火蔓延速度进行计算外,也可以对可燃物消耗量进行 计算,包括地表可燃物消耗量和树冠可燃物消耗量
王明玉等[99]	根据地面调查和空间插值测算了大兴安岭草甸火的燃烧效率
吴沁淳等[100]	根据气候区或生态区相同的国外数据或利用遥感反演燃烧效率
NASA、加拿大的 CFFDRS、美国的 NFDRS (National Fire Danger Rating System) 以及 FCCS (Fuel Characteristic Classification System) ^[101]	通过地面调查和遥感进行获取可燃物类型、载量和过火面积
FEPS(Fire Emission Production Simulator) $[102]$	比较常用的森林火灾释放模型,适用于北美和全球大部分的森林、灌木、草地类型
SMOKE(Sparse Matrix Operator Kernel Emission)污染释放模型 ^[103]	常用于森林火灾释放污染物的计算,根据周围环境的气象条件和社会 经济活动对空气中污染源的释放情况进行计算

5 结语

综上可以看出,森林火灾释放污染物质主要涉及局域尺度对扑火人员安全造成影响,区域尺度的空气污染,以及全球尺度范围内温室气体释放对气候变化的影响。森林火灾释放污染物质作为全球大气污染重要来源,森林火灾释放的烟雾除了对周围环境和人类社会造成直接的危害,还衍生出更大的间接危害。由于不同 气体污染物、粗颗粒物和细颗粒物污染物具有不同的化学性质、物理性质及质量,具有不同的大气扩散过程, 通过对森林燃烧直接释放颗粒物的理化性质的分析,考察森林燃烧释放颗粒物在大气中的老化过程以及与城 市灰霾天气之间的关系。森林燃烧对大城市空气污染的贡献,分析森林燃烧释放物质与城市释放污染物以及 沙尘的混合过程。在区域大气环境综合防治、政府预案的制定和执行、对气候变化影响的评价方面均有重要 意义。

目前我国对关于森林火灾释放物质相关的研究尚不足以支撑我国森林火灾温室气体释放、污染物释放等 方面的研究,计算过程多引用国外同行参数,尤其是排放因子和燃烧效率,而由于我国区域植被、气候的差异, 各输入参数与全球其他地区差异较大,而不恰当的引用往往使得计算误差积累进一步扩大,需要在这方面进 行系统、全面的研究来提高我国森林火灾温室气体、污染物释放等方面的准确性和精度,对于我国在国际气候 变化谈判中的缺乏有力的科技支撑。目前我国烟气模拟主要局限于建筑火灾室内模拟,与开放条件下的大气 扩散过程差别很大,并且我国目前还没有发展出适合于我国的森林火灾释放模型,以及污染物扩散、传输系 统,缺乏森林火灾对区域大气环境影响的定量化研究。因此,应加强森林火灾释放污染物质的研究。

参考文献(References):

[1] Barmpoutis P, Papaioannou P, Dimitropoulos K, Grammalidis N. A review on early forest fire detection systems using optical remote sensing.

Sensors, 2020, 20(22): 6442.

- [2] Silva C A, Santilli G, Sano E E, Laneve G. Fire occurrences and greenhouse gas emissions from deforestation in the Brazilian Amazon. Remote Sensing, 2021, 13(3): 376.
- [3] Bret-Harte M S, Mack M C, Shaver G R, Huebner D C, Johnston M, Mojica C A, Pizano C, Reiskind J A. The response of Arctic vegetation and soils following an unusually severe tundra fire. Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series B, Biological Sciences, 2013, 368 (1624): 20120490.
- [4] Andreae M O. Emission of trace gases and aerosols from biomass burning-an updated assessment. Atmospheric Chemistry and Physics, 2019, 19 (13): 8523-8546.
- [5] Vadrevu K P, Lasko K, Giglio L, Schroeder W, Biswas S, Justice C. Trends in Vegetation fires in South and Southeast Asian Countries. Scientific Reports, 2019, 9(1): 7422.
- [6] Bowman D M J S, Moreira-Muñoz A, Kolden C A, Chávez R O, Muñoz A A, Salinas F, González-Reyes Á, Rocco R, de la Barrera F, Williamson G J, Borchers N, Cifuentes L A, Abatzoglou J T, Johnston F H. Human-environmental drivers and impacts of the globally extreme 2017 Chilean fires. Ambio, 2019, 48(4): 350-362.
- [7] Ma, Tigabu, Guo, Zheng, Guo, Guo. Water-soluble inorganic ions in fine particulate emission during forest fires in Chinese boreal and subtropical forests: an indoor experiment. Forests, 2019, 10(11): 994.
- [8] Wang W J, Zhang Q X, Zhao R R, Luo J, Zhang Y M. Smoke injection heights from forest and grassland fires in southwest China observed by CALIPSO. Forests, 2022, 13(3): 390.
- [9] Müller D, Mattis I, Wandinger U, Ansmann A, Althausen D, Stohl A. Raman lidar observations of aged Siberian and Canadian forest fire smoke in the free troposphere over Germany in 2003: Microphysical particle characterization. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2005, 110 (D17): e2004jd005756.
- [10] Kaewsong K, Johnson D J, Bunyavejchewin S, Baker P J. Fire impacts on recruitment dynamics in a seasonal tropical forest in continental southeast Asia. Forests, 2022, 13(1): 116.
- [11] Földi L, Kuti R. Characteristics of forest fires and their impact on the environment. Academic and Applied Research in Military and Public Management Science, 2016, 15(1): 5-17.
- [12] Martin D, Tomida M, Meacham B. Environmental impact of fire. Fire Science Reviews, 2016, 5(1): 5.
- [13] Zou Y F, O'Neill S M, Larkin N K, Alvarado E C, Solomon R, Mass C, Liu Y, Odman M T, Shen H Z. Machine learning-based integration of high-resolution wildfire smoke simulations and observations for regional health impact assessment. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2019, 16(12): 2137.
- [14] Page S E, Rieley J O, Banks C J. Global and regional importance of the tropical peatland carbon pool. Global Change Biology, 2011, 17(2): 798-818.
- [15] van der Werf G R, Randerson J T, Giglio L, Collatz G J, Mu M, Kasibhatla P S, Morton D C, DeFries R S, Jin Y, van Leeuwen T T. Global fire emissions and the contribution of deforestation, savanna, forest, agricultural, and peat fires (1997-2009). Atmospheric Chemistry and Physics, 2010, 10(23): 11707-11735.
- [16] 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 Geophysical Research: Atmospheres, 1994, 99(D9): 18627-18638.
- [17] Sirin A, Maslov A, Makarov D, Gulbe Y, Joosten H. Assessing wood and soil carbon losses from a forest-peat fire in the boreo-nemoral zone. Forests, 2021, 12(7): 880.
- [18] 王明玉, 舒立福. 气候变化情景下中国林火响应特征及趋势. 北京: 科学出版社, 2015.
- [19] 刘晓东, 王博. 森林燃烧主要排放物研究进展. 北京林业大学学报, 2017, 39(12): 118-124.
- [20] 向临川, 王秋华, 龙腾腾, 王儒龙, 闫想想, 张文文. 森林火灾燃烧产物研究概述. 森林防火, 2020(3): 28-33.
- [21] 舒立福, 杜军, 包国荣. 森林燃烧产生的烟雾对人体的影响. 森林防火, 1998(4): 19-20.
- [22] 王鑫玉, 张金专, 金静, 刘卓洋, 黄文晓, 杨云. 火场烟毒性研究进展. 工业安全与环保, 2021, 47(9): 17-19.
- [23] de Oliveira Alves N, Vessoni A T, Quinet A, Fortunato R S, Kajitani G S, Peixoto M S, Hacon S S, Artaxo P, Saldiva P, Menck C F M, Batistuzzo de Medeiros S R. Biomass burning in the Amazon region causes DNA damage and cell death in human lung cells. Scientific Reports, 2017, 7(1): 10937.
- [24] Anderson J O, Thundiyil J G, Stolbach A. Clearing the air: a review of the effects of particulate matter air pollution on human health. Journal of Medical Toxicology, 2012, 8(2): 166-175.
- [25] Sumaryati S, Cholianawati N, Indrawati A. The impact of forest fire on air-quality and visibility in Palangka Raya. Journal of Physics: Theories and Applications, 2019, 3(1): 16.
- [26] Long Y, Wang J H, Wu K, Zhang J J. Population exposure to ambient PM_{2.5} at the subdistrict level in China. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2018, 15(12): 2683.
- [27] Kusuma W L, Chih-Da W, Zeng Y T, Hapsari H H, Muhamad J L. PM_{2.5} pollutant in asia-a comparison of metropolis cities in Indonesia and Taiwan. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2019, 16(24): 4924.
- [28] Morgan G, Sheppeard V, Khalaj B, Ayyar A, Lincoln D, Jalaludin B, Beard J, Corbett S, Lumley T. Effects of bushfire smoke on daily mortality

- [29] 宁吉彬, 张运林, 袁思博, 于宏洲, 邸雪颖, 杨光. 林火排放细颗粒污染物(PM25)研究进展. 世界林业研究, 2021, 34(3): 52-57.
- [30] Lapere R, Mailler S, Menut L. The 2017 mega-fires in central Chile: impacts on regional atmospheric composition and meteorology assessed from satellite data and chemistry-transport modeling. Atmosphere, 2021, 12(3): 344.
- [31] Qureshi S, Dutkiewicz V A, Khan A R, Swami K, Yang K X, Husain L, Schwab J J, Demerjian K L. Elemental composition of PM_{2.5} aerosols in Queens, New York: Solubility and temporal trends. Atmospheric Environment, 2006, 40: 238-251.
- [32] Karnae S, John K. Source apportionment of fine particulate matter measured in an industrialized coastal urban area of South Texas. Atmospheric Environment, 2011, 45(23): 3769-3776.
- [33] Nakamura A, Nakatani N, Maruyama F, Fujiyoshi S, Márquez-Reyes R, Fernández R, Noda J. Characteristics of PM_{2.5} pollution in Osorno, Chile: ion chromatography and meteorological data analyses. Atmosphere, 2022, 13(2): 168.
- [34] Heil A, Goldammer J. Smoke-haze pollution: a review of the 1997 episode in Southeast Asia. Regional Environmental Change, 2001, 2(1): 24-37.
- [35] Terada H, Ueda H, Wang Z F. Trend of acid rain and neutralization by yellow sand in East Asia—a numerical study. Atmospheric Environment, 2002, 36(3): 503-509.
- [36] Magro C, Morais M, Ribeiro P A, Sério S, Vieira P, Raposo M. Development of a Gas Sensor for Eucalyptol Supervision: A Supporting Tool for Extreme Wildfire Management. Chemistry Proceedings. 2021, 5(1):19.
- [37] Osmont A, Chetehouna K, Chaumeix N, DeYonker N J, Catoire L. Thermodynamic data of known volatile organic compounds (vocs) in rosmarinus officinalis: implications for forest fire modeling. Computational and Theoretical Chemistry. 2015, 1073: 27-33.
- [38] Koss A, Sekimoto K, Gilman J, Selimovic V, Coggon M, Zarzana K J, Yuan B, Lerner B, Brown S, Jimenez J, Krechmer J, Roberts J, Warneke C, Yokelson R, Gouw J. Non-methane organic gas emissions from biomass burning: identification, quantification, and emission factors from PTR-ToF during the FIREX 2016 laboratory experiment. Atmospheric Chemistry and Physics. 2018, 18: 3299-3319.
- [39] Galytska E, Danylevsky V, Hommel R, Burrows J P. Increased aerosol content in the atmosphere over Ukraine during summer 2010. Atmospheric Measurement Techniques, 2018, 11(4): 2101-2118.
- [40] Liu L X, Cheng Y F, Wang S W, Wei C, Pöhlker M L, Pöhlker C, Artaxo P, Shrivastava M, Andreae M O, Pöschl U, Su H. Impact of biomass burning aerosols on radiation, clouds, and precipitation over the Amazon: relative importance of aerosol-cloud and aerosol-radiation interactions. Atmospheric Chemistry and Physics, 2020, 20(21): 13283-13301.
- [41] 雷小丽,周广胜,贾丙瑞,李帅.大兴安岭地区森林雷击火与闪电的关系.应用生态学报, 2012, 23(7): 1743-1750.
- [42] Naccarato K P, Pinto O Jr, Pinto I R C A. Evidence of thermal and aerosol effects on the cloud-to-ground lightning density and polarity over large urban areas of Southeastern Brazil. Geophysical Research Letters, 2003, 30(13):1674.
- [43] 苑春莉, 范世良, 柴天昱, 朱玉芳, 谢元华, 朱彤. 大气扩散模型的研究进展. 节能, 2016, 35(10): 14-18, 22.
- [44] Jacobson M Z. Effects of biomass burning on climate, accounting for heat and moisture fluxes, black and brown carbon, and cloud absorption effects. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2014, 119(14): 8980-9002.
- [45] Cussac M, Marécal V, Thouret V, Josse B, Sauvage B. The impact of biomass burning on upper tropospheric carbon monoxide: a study using MOCAGE global model and IAGOS airborne data. Atmospheric Chemistry and Physics, 2020, 20(15): 9393-9417.
- [46] Vara-Vela A, de Fátima Andrade M, Zhang Y, Kumar P, Ynoue R Y, Souto-Oliveira C E, da Silva Lopes F J, Landulfo E. Modeling of atmospheric aerosol properties in the So Paulo Metropolitan Area: Impact of biomass burning. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2018, 123: 9935-9956.
- [47] Haslett S L, Taylor J W, Evans M, Morris E, Vogel B, Dajuma A, Brito J, Batenburg A M, Borrmann S, Schneider J, Schulz C, Denjean C, Bourrianne T, Knippertz P, Dupuy R, Schwarzenböck A, Sauer D, Flamant C, Dorsey J, Crawford I, Coe H. Remote biomass burning dominates southern West African air pollution during the monsoon. Atmospheric Chemistry and Physics, 2019, 19(24): 15217-15234.
- [48] Mailler S, Menut L, Khvorostyanov D, Valari M, Couvidat F, Siour G, Turquety S, Briant R, Tuccella P, Bessagnet B, Colette A, Létinois L, Markakis K, Meleux F. CHIMERE-2017: from urban to hemispheric chemistry-transport modeling. Geoscientific Model Development, 2017, 10 (6): 2397-2423.
- [49] Menut L, Flamant C, Turquety S, Deroubaix A, Chazette P, Meynadier R. Impact of biomass burning on pollutant surface concentrations in megacities of the Gulf of Guinea. Atmospheric Chemistry and Physics, 2018, 18(4): 2687-2707.
- [50] Konovalov I B, Beekmann M, Berezin E V, Petetin H, Mielonen T, Kuznetsova I N, Andreae M O. The role of semi-volatile organic compounds in the mesoscale evolution of biomass burning aerosol: a modelling case study of the 2010 mega-fire event in Russia. Atmospheric Chemistry and Physics Discussions, 2015, 15(6): 9107-9172.
- [51] Majdi M, Kim Y, Turquety S, Sartelet K. Impact of mixing state on aerosol optical properties during severe wildfires over the Euro-Mediterranean region. Atmospheric Environment, 2020, 220: 117042.
- [52] Larkin N K, O'Neill S M, Solomon R, Raffuse S, Strand T, Sullivan D C, Krull C, Rorig M, Peterson J, Ferguson S A. The BlueSky smoke modeling framework. International Journal of Wildland Fire, 2009, 18(8): 906.
- [53] Stein A F, Draxler R R, Rolph G D, Stunder B J B, Cohen M D, Ngan F. NOAA's HYSPLIT atmospheric transport and dispersion modeling system. Bulletin of the American Meteorological Society, 2015, 96(12): 2059-2077.

- [54] Stockwell C E, Bela M M, Coggon M M, Gkatzelis G I, Wiggins E, Gargulinski E M, Shingler T, Fenn M, Griffin D, Holmes C D, Ye X X, Saide P E, Bourgeois I, Peischl J, Womack C C, Washenfelder R A, Veres P R, Neuman J A, Gilman J B, Lamplugh A, Schwantes R H, McKeen S A, Wisthaler A, Piel F, Guo H Y, Campuzano-Jost P, Jimenez J L, Fried A, Hanisco T F, Huey L G, Perring A, Katich J M, Diskin G S, Nowak J B, Bui T P, Halliday H S, DiGangi J P, Pereira G, James E P, Ahmadov R, McLinden C A, Soja A J, Moore R H, Hair J W, Warneke C. Airborne emission rate measurements validate remote sensing observations and emission inventories of western U. S. wildfires. Environmental Science & Technology, 2022, 56(12): 7564-7577.
- [55] Paul J T, Dozier A, Chan D. Internet VSMOKE: a user-oriented system for smoke management. Fire Management Today, 2010,69(4): 15-18.
- [56] Trentmann J, Andreae M O, Graf H F, Hobbs P V, Ottmar R D, Trautmann T. Simulation of a biomass-burning plume: comparison of model results with observations. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2002, 107(D2): e2001jd000410.
- [57] Rolph G, Stein A, Stunder B. Real-time environmental applications and display system: ready. Environmental Modelling Software, 1995, 95: 210-228.
- [58] Wright C S, Balog C S, Kelly J W. Estimating volume, biomass, and potential emissions of hand-piled fuels. U.S. Department of Agriculture, 2010:23.
- [59] 谢正桐,廖俊豪,蔡晓鸣. 气相和微颗粒污染物在城市环境中的传输扩散. 力学进展, 2015, 45(0): 521-559.
- [60] 夏慧瑶, 王汉青, 李旺, 孟德雨. 城市下垫面污染物扩散关键因素与模型进展研究. 科技创新与应用, 2022, 12(1): 1-6, 12.
- [61] 吕楠, 赵敬源, 张鹏. 基于 GIS 技术的城市大气污染物扩散模型研究. 西安建筑科技大学学报: 自然科学版, 2019, 51(5): 724-728.
- [62] 钟方潜,苏琪骅,周任君,易明建,吴其重,颜妍.秸秆焚烧对区域城市空气质量影响的模拟分析.气候与环境研究,2017,22(2): 149-161.
- [63] 张恒, 王柏杰, 王飞. 内蒙古主要农作物秸秆燃烧释放烟气污染物研究. 环境工程技术学报, 2022, 12(4): 1015-1021.
- [64] 邢芝雯,魏敏,宁文涛,张美根,李侃,江伟,刘厚凤. 基于 RAMS-CMAQ 模拟的 2019 年初威海市大气污染反弹成因研究.环境科学学报,2021,41(3):886-897.
- [65] 王天正,张美根,韩霄.秦皇岛 2019 年冬季重污染过程 PM2.5来源数值模拟. 气候与环境研究, 2021, 26(5): 471-481.
- [66] 李佳霖, 张美根. 北京冬季不同污染情况下 PM2.5 传输特征模拟研究. 高原气象, 2022, 41(3): 829-838.
- [67] Matsueda H, Inoue H Y, Ishii M, Tsutsumi Y. Large injection of carbon monoxide into the upper troposphere due to intense biomass burning in 1997. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 1999, 104(D21): 26867-26879.
- [68] Paugam R, Wooster M, Freitas S, Martin M. A review of approaches to estimate wildfire plume injection height within large-scale atmospheric chemical transport models. Atmospheric Chemistry and Physics, 2016, 16(2): 907-925.
- [69] Wotawa G, Trainer M. The influence of Canadian forest fires on pollutant concentrations in the United States. Science, 2000, 288 (5464): 324-328.
- [70] Davies S J, Unam L. Smoke-haze from the 1997 Indonesian forest fires: effects on pollution levels, local climate, atmospheric CO₂ concentrations, and tree photosynthesis. Forest Ecology and Management, 1999, 124(2/3): 137-144.
- [71] Fang M, Huang W. Technical note-Tracking the Indonesian forest fire using NOAA/AVHRR images. International Journal of Remote Sensing, 1998, 19(3): 387-390.
- [72] 祝清哲,刘玉芝,贾瑞,华珊,邵天彬,汪兵. 俄罗斯森林火灾烟尘气溶胶对亚洲空气质量的影响.第 35 届中国气象学会年会 S13 大气物理 学与大气环境.2018;281.
- [73] Bencherif H, Bègue N, Kirsch Pinheiro D, du Preez D J, Cadet J M, da Silva Lopes F J, Shikwambana L, Landulfo E, Vescovini T, Labuschagne C, Silva J J, Anabor V, Coheur P F, Mbatha N, Hadji-Lazaro J, Sivakumar V, Clerbaux C. Investigating the long-range transport of aerosol plumes following the Amazon fires (august 2019): a multi-instrumental approach from ground-based and satellite observations. Remote Sensing, 2020, 12(22): 3846.
- [74] Deb P, Moradkhani H, Abbaszadeh P, Kiem A S, Engström J, Keellings D, Sharma A. Causes of the widespread 2019-2020 Australian bushfire season. Earth's Future, 2020, 8(11): e2020EF001671
- [75] Choi S D, Chang Y S. Carbon monoxide monitoring in Northeast Asia using MOPITT: effects of biomass burning and regional pollution in April 2000. Atmospheric Environment, 2006, 40(4): 686-697.
- [76] 吴涧,蒋维楣,陈新梅,王卫国,郭世昌,谢应齐,刘红年.生物质燃烧对东南亚及中国南方对流层臭氧含量影响的模拟研究.环境科学,2004,25(2):1-6.
- [77] 王成辉. 云南省典型城市近地面臭氧成因研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2018.
- [78] Seiler W, Crutzen P J. Estimates of gross and net fluxes of carbon between the biosphere and the atmosphere from biomass burning. Climatic Change, 1980, 2(3): 207-247.
- [79] Larkin N, Raffuse S, Strand T. Wildland fire emissions, carbon, and climate: U.S. emissions inventories. Forest Ecology and Management, 2014, 317: 61-69.
- [80] van der Werf G R, Randerson J T, Giglio L, Collatz G J, Kasibhatla P S, Arellano A F Jr. Interannual variability in global biomass burning emissions from 1997 to 2004. Atmospheric Chemistry and Physics, 2006, 6(11): 3423-3441.
- [81] 韦小丽. 基于多源数据协同融合的高分辨率 AOD 反演与 PM,5浓度估算研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2021.
- [82] Andreae M. The IGAC Biomass Burning Experiment (BIBEX): rationale and evolution. International Global Atmospheric Chemistry (IGAC)

Project Newsletter IGACtivities, 1998(15): 2-3.

- [83] Urbanski S. Wildland fire emissions, carbon, and climate: emission factors. Forest Ecology and Management, 2014, 317: 51-60.
- [84] Patterson E M, McMahon C K, Ward D E. Absorption properties and graphitic carbon emission factors of forest fire aerosols. Geophysical Research Letters, 1986, 13(2): 129-132.
- [85] Ward D, Radke L, Emissions measurements from vegetation fires: A comparative evaluation of methods and results. Fire in the Environment: The Ecological, Atmospheric and Climatic Importance of Vegetation Fires, 1993: 53-76.
- [86] Yokelson R J, Karl T, Artaxo P, Blake D R, Christian T J, Griffith D W T, Guenther A, Hao W M. The Tropical Forest and Fire Emissions Experiment: overview and airborne fire emission factor measurements. Atmospheric Chemistry and Physics, 2007, 7(19): 5175-5196.
- [87] Yokelson R J, Christian T J, Karl T G, Guenther A. The tropical forest and fire emissions experiment: laboratory fire measurements and synthesis of campaign data. Atmospheric Chemistry and Physics, 2008, 8(131): 3509-3527.
- [88] Sahai S, Sharma C, Singh D P, Dixit C K, Singh N, Sharma P, Singh K, Bhatt S, Ghude S, Gupta V, Gupta R K, Tiwari M K, Garg S C, Mitra A P, Gupta P K. A study for development of emission factors for trace gases and carbonaceous particulate species from *in situ* burning of wheat straw in agricultural fields in India. Atmospheric Environment, 2007, 41(39): 9173-9186.
- [89] van der Werf G R, Randerson J T, Giglio L, van Leeuwen T T, Chen Y, Rogers B M, Mu M Q, van Marle M J E, Morton D C, Collatz G J, Yokelson R J, Kasibhatla P S. Global fire emissions estimates during 1997-2016. Earth System Science Data, 2017, 9(2): 697-720.
- [90] 郭怀文. 福建三明地区森林火灾碳排放研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2013.
- [91] 王志红,关山,单延龙,胡威,曾超.白山地区森林火灾释放碳量的估算.北华大学学报:自然科学版,2011,12(2):199-203.
- [92] 席云竹. 基于遥感影像的大兴安岭近十年林火碳释放的估测[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2020.
- [93] 李春阳, 张运林, 郭妍, 胡海清. 大兴安岭 6 种主要乔木树种燃烧过程的含碳气体释放特征. 中南林业科技大学学报, 2020, 40(6): 81-88.
- [94] 王千雪. 小兴安岭 2003 年森林火灾碳排放估算[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2014.
- [95] 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.
- [96] De Santis A, Asner G P, Vaughan P J, Knapp D E. Mapping burn severity and burning efficiency in California using simulation models and Landsat imagery. Remote Sensing of Environment, 2010, 114(7): 1535-1545.
- [97] Kennedy M C, Prichard S J, McKenzie D, French N H F. Quantifying how sources of uncertainty in combustible biomass propagate to prediction of wildland fire emissions. International Journal of Wildland Fire, 2020, 29(9): 793.
- [98] Wiedinmyer C, Quayle B, Geron C, Belote A, McKenzie D, Zhang X Y, O'Neill S, Wynne K K. Estimating emissions from fires in North America for air quality modeling. Atmospheric Environment, 2006, 40(19): 3419-3432.
- [99] 王明玉, 舒立福, 宋光辉, 王秋华, 赵凤君, 田晓瑞. 大兴安岭小尺度草甸火燃烧效率. 生态学报, 2011, 31(6): 1678-1686.
- [100] 吴沁淳,陈方,王长林,李斌,吴薇,刘三超,徐丰.自然火灾碳排放估算模型参数的遥感反演进展.遥感学报,2016,20(1):11-26.
- [101] Reinhardt E. Using fofem 5.0 to estimate tree mortality, fuel consumption, smoke production and soil heating from wildland fire. in Presentation at the 2nd International Wildland Fire Ecology and Fire Management Congress. 2003.
- [102] Anderson G, Sandberg D, Norheim R. Fire Emission Production Simulator (FEPS) User's Guide. USDA Forest Service Pacific.
- [103] Heilman W E, Liu Y Q, Urbanski S, Kovalev V, Mickler R. Wildland fire emissions, carbon, and climate: plume transport, and chemistry processes. Forest Ecology and Management, 2014, 317: 70-79.