

基于 WRF-CMAQ 评估秸秆禁烧对区域空气质量的影响

杜亚彬^{1,2}, 赵红梅^{1*}, 张学磊¹, 修艾军¹ (1.中国科学院东北地理与农业生态研究所, 中国科学院湿地生态与环境重点实验室, 吉林 长春 130102; 2.中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 基于本地化的秸秆露天焚烧主要大气污染物排放清单, 采用空气质量模式 WRF-CMAQ, 定量评估秸秆禁烧管控对东北地区空气质量的影响。结果显示, 2013~2020 年东北地区秸秆露天焚烧污染物排放总量整体呈现先增加再降低的趋势, 每年的秸秆焚烧集中期为春耕前(3 月和 4 月)和秋收后(10 月和 11 月)。2017 年秸秆焚烧集中期中, 秸秆露天焚烧对东北三省的 CO 和 PM_{2.5} 浓度的贡献率分别为 24.01% 和 39.98%, 农作物秸秆露天焚烧是造成东北地区空气质量下降的重要因素; 相同气象条件下, 2019 年秸秆焚烧集中期中, 秸秆焚烧对东北三省大气中 CO 和 PM_{2.5} 浓度的贡献率较 2017 年同期分别下降了 9.58% 和 13.95%, 表明 2019 年的秸秆禁烧政策有效改善了东北地区的空气质量。同时, 若东北三省均实施吉林省 2019 年的秸秆禁烧管控政策, 则东北地区的空气质量将会进一步改善。本研究结果可为区域大气污染联防联控政策的制定提供科技支撑。

关键词: 秸秆禁烧管控; WRF-CMAQ; 空气质量; 生物质燃烧; 排放清单

中图分类号: X51 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-6923(2022)12-5578-11

Evaluation of the impacts of straw burning ban on air quality based on WRF-CMAQ. DU Ya-bin^{1,2}, ZHAO Hong-mei^{1*}, ZHANG Xue-lei¹, XIU Ai-jun¹ (1.Key Laboratory of Wetland Ecology and Environment, Northeast Institute of Geography and Agroecology, Changchun 130102, China; 2.University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China). *China Environmental Science*, 2022,42(12): 5578~5588

Abstract: The influence of straw burning ban policy on air quality in Northeast China was quantitatively evaluated by conducting the air quality simulation using WRF-CMAQ mode in different residue burning scenarios based on localized straw burning emission inventory. From 2013 to 2020, the total emissions of open straw burning in Northeast China showed a variation pattern of increasing at first and then decreasing. There are two crop residue burning and emission peaks in a year: before spring plowing (March and April) and after autumn harvesting (October and November). Among the three provinces, Jilin Province achieved the best results in controlling emissions from straw burning in 2019. The atmospheric CO and PM_{2.5} from straw burning contribute 24.01% and 39.98% to the total concentration in Northeast China during the straw burning peaks in 2017, imposing detrimental effect on local air quality and human health. With the implement of the strict straw burning ban policy, the contribution rate of crop straw burning to atmospheric CO and PM_{2.5} in the three northeastern provinces in 2019 decreased by 9.58% and 13.95% respectively compared with the same period in 2017, indicating that the straw burning ban policy in 2019 has effectively improved the air quality in Northeast China. If all three provinces in Northeast China implemented same straw burning ban policy as that in the Jilin Province in 2019, the regional air quality would be remarkably improved in the future. The results in this study can provide the technological supports for formulating the policies of regional air pollution prevention and control.

Key words: straw burning ban; WRF-CMAQ; airquality; biom-ass burning; emission inventory

生物质燃烧是大气中的痕量气体和颗粒物的重要来源之一, 直接影响区域空气质量和地气系统的辐射平衡, 进而对气候变化产生影响^[1-2]。我国生物质燃烧的主要类型为农作物秸秆露天焚烧, 其燃烧量约占全国总生物质燃烧量的 2/3^[3], 同时秸秆露天焚烧对主要大气污染物排放的贡献率达到生物质燃烧总排放的 98% 左右^[3-5]。近年来, 随着农作物秸秆产量的增加, 秸秆综合利用技术有限, 秸秆露天焚烧越来越严重, 东北地区已成为我国秸秆焚烧严重的地区之一^[6-8]。大量农作物秸秆被露天焚烧, 不仅会降低土壤肥力, 影响农田生态系统^[9-10], 而且焚烧过程

会释放大量的大气污染物, 例如 NO_x、CO 以及颗粒物等, 导致霾等大气污染事件频发, 影响交通运输和区域空气质量, 甚至危害人体健康^[11-12]。

秸秆露天焚烧已经成为东北地区大气环境中的研究热点。主要研究包括利用卫星遥感监测秸秆焚烧火点^[13-14], 编制秸秆焚烧排放清单并分析其时空分布特征^[15-16], 使用神经网络预测东北地区秸秆焚

收稿日期: 2022-05-05

基金项目: 国家重点研发计划资助(2022YFC3701203); 吉林省自然科学基金资助项目(20200201214JC)

* 责任作者, 研究员, zhaohongmei@iga.ac.cn

烧火点的变化^[17].与此同时,东北地区各地政府也采取了一系列的秸秆禁烧管控措施,划定了秸秆禁烧范围,建立了相应的责任制度.但是,在评估秸秆管控措施对改善东北地区空气质量的效果方面尚缺乏定量的分析研究.本文基于空气质量模式 WRF-CMAQ 定量评估秸秆禁烧管控对该区域空气质量改善的影响,为蓝天保卫战的顺利执行提供科技支撑.

1 模式介绍与研究方法

1.1 WRF-CMAQ 模式配置

WRF 模型是由美国国家海洋和大气管理局(NOAA)、美国国家大气研究中心(NCAR)、奥克拉荷马大学和美国联邦航空管理局(FAA)等机构共同参与,为开展大气研究和业务预报应用而设计研发的新一代中尺度数值天气预报系统.该模型是一种完全可压非静力模式,采用高度模块化和分层设计,计算网格为 Arakawa C 网格,支持 1~10 千米的网格分辨率范围,集数值预报、大气模拟及数据同化于一体^[18].本文采用的 WRF 模式是 3.9.1 研究用版本,研究区域为图 1 中的阴影部分,即包括黑龙江省、吉林省、辽宁省和内蒙古自治区的蒙东地区的中国东北地区,模式采用一重网格模拟,其水平分辨率为 27km×27km.WRF 模式的气象初始条件数据和边界场数据来自美国国家环境预报中心(NCAR/NCEP)全球数据同化系统(GDAS)的 FNL 全球气象再分析数据,其时间分辨率为 6h,空间分辨率为 1°×1°,该数据可在网站 (<https://rda.ucar.edu/datasets/ds083.2/>#!access) 下载.

CMAQ 模型是由美国国家环保署(EPA)开发的三维欧拉网格大气化学传输模型系统.CMAQ 模型为开源模型,使用 FORTRAN90 语言编写,第一次发布于 1998 年 6 月,此后一直供空气质量科学家、政策制定者以及利益相关群体免费使用.CMAQ 模型基于“一个大气”理念,将对流层大气看作一个整体,综合考虑了不同动力尺度间的相互作用和不同物种之间的相互影响^[19],能够更准确地模拟对流层内污染物的生消变化,例如大气颗粒物污染、光化学烟雾、酸沉降以及能见度等^[20].本文采用的 CMAQ 模式版本为 5.2,使用 CB05 气相化学机理和 AERO6 气溶胶机理.为保证模型模拟效果的准确性,WRF-

CMAQ 模式在两个研究时段中的每个时间段都开展了 7d 的预热计算(Spin-up)并将相关预热计算结果摒弃而不纳入数据分析;此外,为减小长时间模拟过程产生的误差,在每一个研究时段内启用 CMAQ 模式的 Restart 功能,即 CMAQ 模型每次仅模拟 14d,下一次的模拟便从上一次模拟的输出结果作为初始场继续进行计算.最后,用地面监测数据对模拟结果进行对比分析验证.地面监测数据来自中国环境监测总站的全国城市空气质量实时发布平台,主要包括 CO、PM_{2.5}、NO₂ 和 O₃ 的浓度.

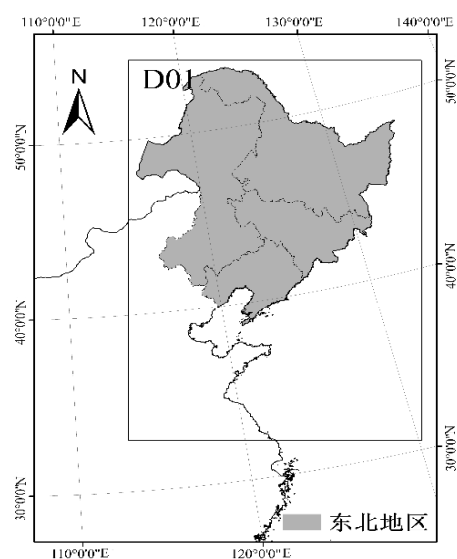


图 1 气象模式 WRF 的模拟区域

Fig.1 Simulated domain of Weather Research Forecasting (WRF) model

1.2 排放清单数据获取

输入空气质量模式的排放清单主要包含人为源排放和秸秆焚烧源排放两部分,人为源排放原始数据使用欧盟委员发布的 EDGAR-HTAP V2.2^[21]清单,该清单提供了 2010 年人为源排放,其网格分辨率为 0.1°×0.1°,通过 SMOKE 模式进行本地化处理后,获得网格分辨率与空气质量模式一致且可输入空气质量模型的人为源排放清单.该清单中的污染物种类主要包括 CH₄、CO、SO₂、NO_x、NH₃、NMVOC、PM₁₀、PM_{2.5}、BC 和 OC.

秸秆焚烧源排放清单为本地化的排放清单,其火点数据来自 Suomi-NPP 卫星上的 VIIRS 传感器的火点数据产品,包括火点的经纬度信息和火点强度信息,该数据通过美国航空航天局管理下的

FIRMS(火数据资源管理系统) 的官方网站 <https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov> 获得.然后根据火点数据,采用相关排放因子数据^[22]和优化的火辐射功率算法^[23],参照研究团队前期的研究工作,进行本地化排放清单构建.其计算公式为(1):

$$E = \int_{t_2}^{t_1} FRP^* dt \times \beta \times F$$
$$= FRP \times f_{FRP} \times (t_1 - t_2) \times \beta \times F \quad (1)$$

式中: E 表示生物质露天燃烧排放量,g; FRP^* 表示校正后的卫星捕获的火辐射功率, MW; FRP 表示卫星过境时直接捕获的火焰辐射功率, MW; f_{FRP} 表示校正系数,用来调整卫星过境时低估的 FRP 值,参考杨光义^[22]的研究将校正系数 f_{FRP} 设置为 5; β 表示生物质燃烧效率, kg/MJ; F 表示不同类型生物质燃烧排放的各污染物的排放因子, g/kg.

1.3 情景模拟设置

基于 WRF-CMAQ 模式,本文设置了 3 个模拟情景,分别为基础情景、减排情景和未来情景.研究时段为每年秸秆焚烧集中期即春耕前(3~4 月)和秋收后(10~11 月).三个模拟情景的主要变量为秸秆焚烧源污染物排放清单,而气象条件和其他源排放清单均与基础情景保持一致.

情景模拟的具体设置如表 1 所示:在基础情景中,通过对比排放清单中添加和关闭 2017 年的农作物秸秆露天焚烧源排放时模式模拟结果的变化,计算秸秆焚烧对大气中污染物浓度的贡献率,定量评估 2017 年秸秆焚烧集中期秸秆露天焚烧对东北地区空气质量的影响.在减排情景中,生物质燃烧排放清单使用 2019 年农作物秸秆露天焚烧源排放.对比分析 2017 年无秸秆禁烧政策和 2019 年禁烧政策下空气质量的变化,计算秸秆露天焚烧对区域空气质量的影响,定量评估 2019 年秸秆禁烧政策对改善东北地区大气环境质量的影响.在未来情景中,假设东北地区全域实施吉林省 2019 年秸秆禁烧政策.依据吉林省 2019 年实施的《吉林省秸秆禁烧区和限烧区划定与管控规范》划定东北地区的秸秆禁烧区(如表 2 所示),使用 2019 年秸秆露天焚烧火点数据,去除位于禁烧区内的秸秆焚烧火点,平均增加其他地方火点的 FRP 值,使东北地区秸秆焚烧火点的总 FRP 值保持不变,制作未来情境下秸秆露天焚烧源排放清

单,对比未来情景模拟结果和基础情景中添加秸秆焚烧源排放的模拟结果,定量评估若未来东北地区推广吉林省 2019 年秸秆禁烧政策将对该地区空气质量产生的影响.

表 1 实验模拟情景设置

Table 1 Simulation scenarios set up for experiments

模拟情景	排放清单	实验目的
基础情景	2017 年秸秆焚烧源	评估 2017 年秸秆禁烧管控政策对空气质量的影响
减排情景	2019 年秸秆焚烧源	定量评估秸秆禁烧政策对空气质量的影响
未来情景	东北地区全域实施吉林省 2019 年秸秆禁烧政策下的秸秆焚烧源	定量评估未来秸秆禁烧政策对空气质量的影响

表 2 未来情景中禁烧区划定规则

Table 2 Rules for delineating straw burn prohibition zones in future scenarios

位置	范围
城区周围	市(州)城市建成区外围主导上风向 15km,主导下风向 10km,县(市、区)建成区外围主导上风向 8km,主导下风向 5km
高速公路两侧	高速公路沿线两侧各 10km
铁路(高铁)两侧	铁路(高铁)沿线两侧 5km
国、省干道两侧	国道、省道公路干线 5km
机场	机场周边 20km

2 结果与讨论

2.1 东北地区秸秆焚烧污染物排放变化

基于本地化秸秆焚烧主要大气污染物排放清单,本文计算了 CH_4 、 CO 、 SO_2 、 NO_x 、 NH_3 、 $NM VOC$ 、 PM_{10} 、 $PM_{2.5}$ 、 BC 和 OC 共 10 种污染物年排放总量,汇总了 2013~2020 年间东北地区秸秆露天焚烧污染物排放总量的变化趋势.

东北地区 2013~2020 年秸秆焚烧污染物总排放的月度变化如图 2 所示,除 2019 年 2 月秸秆焚烧污染物排放量为当年的最高值以外,其余各年秸秆焚烧污染物排放量的高值集中在每年的 3~4 月和 10~11 月,这与李莉莉等^[15]、徐奔奔等^[24]、喻萌萌^[25]和吴双等^[26]对该区域的研究结果一致,即东北地区每年秸秆焚烧排放主要集中在春耕前和秋收后.造成东北地区秸秆焚烧污染物排放月变化呈现双峰特征的主要原因是,东北地区为我国一熟制农业

区^[27],每年 10~11 月为东北地区农作物收割时期,产生大量农作物秸秆,为方便处理秸秆,农民们便选择在此时间段集中焚烧秸秆.同时,每年的 3~4 月是东北地区农作物种植时期,由于秋季秸秆焚烧相对有限^[1],以及东北地区冬季寒冷漫长,不利于秸秆还田处理^[28],为新一季度的农田耕作,农民便在春耕前集中焚烧处理秸秆.

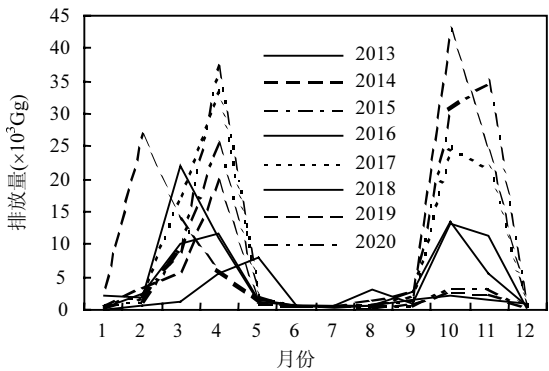


图 2 2013~2020 年东北地区秸秆焚烧总污染物排放量的月变化

Fig.2 Monthly variations of total pollutant emissions from straw burning in Northeast China from 2013 to 2020

2013~2020 年东北三省各省每年秸秆焚烧的污染物排放总量如表 3 所示.2013~2020 年黑龙江省农作物秸秆焚烧污染物排放总量均高于其余两省,每年秸秆焚烧污染物总排放量占比在 58.88%~75.57%之间.其次是吉林省,吉林省每年秸秆焚烧污

染物总排放量在东北地区的占比最高达到 22.33%.吴双等^[26]基于东北三省秸秆焚烧热源点数量的年变化趋势与此类似,黑龙江省的热源点数量占热源点总数的比例均超过 50%.这也与东北地区秸秆资源产量成正相关性,黑龙江省的秸秆资源产量常年位居国内首位,吉林省则紧随其后,是我国秸秆资源产量前五的省份^[29].由于每年大量的农作物秸秆产出,加之不利的气候条件、农村能源结构改变以及农民环保意识等因素,农作物秸秆被露天焚烧,使得黑龙江省和吉林省的秸秆焚烧污染物排放处于较高水平.

总结秸秆焚烧污染物排放总量的逐年变化趋势发现,与 2017 年相似,在经历了一年严格的禁烧管控后,2019 年东北三省的秸秆焚烧污染物排放量均有所上升,但 2019 年并未像 2017 年一样迅速恢复到严格禁烧前一年的水平.其中,吉林省 2019 年秸秆焚烧污染物排放总量较 2017 年总排放量下降了 48.69%,高于辽宁省 (25.59%) 和黑龙江省 (48.47%).同时,吉林省 2019 年秸秆焚烧污染物排放量较 2018 年增加了 37.63%,低于黑龙江省 (114.09%).因此,吉林省 2019 年在面临前一年未利用秸秆积压以及秸秆资源产量增加的情况下,秸秆焚烧污染物排放变化趋势均好于黑龙江省和辽宁省,说明吉林省秸秆禁烧管控措施在东北三省的管控措施中减少农作物秸秆露天焚烧的效果最好.

表 3 2013~2020 年东北三省农作物秸秆焚烧大气污染物的排放总量(Gg)

Table 3 Total emissions of air pollutants from crop straw burning in the three provinces of Northeast China from 2013 to 2020 (Gg)

	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
黑龙江	23700.05	60457.82	80543.97	49553.32	75101.85	18074.45	38695.88	22592.37
吉林	4741.22	18862.97	13546.01	6533.25	18381.76	6852.53	9431.50	23461.83
辽宁	6338.59	18211.08	12504.14	9849.79	9857.41	5766.27	7334.81	7439.49
东三省	34779.86	97531.87	106594.12	65936.36	103341.02	30693.25	55462.19	53493.69

2.2 东北地区秸秆禁烧管控对东北地区空气质量影响

2.2.1 模型验证 以 2017 年 10 月的 WRF 模拟结果为例,气象模式 WRF 模拟结果与实际气温数据的相关性分析如图 3 所示,结果显示东北三省省会城市气象站点的气温模拟结果与实际观测结果显著相关,相关系数 R^2 均高于 0.70,这表明气象模式 WRF 模拟的

气象条件与实际监测的气象数据有较好的吻合.

为验证 CMAQ 模式模拟结果的准确性,本文使用标准化平均偏差(NMB)、标准化平均误差(NME)和相关系数 3 个验证指标进行验证.依据我国生态环境部发布的《环境空气质量模型遴选工作指南(试行)》提出的模拟准确性评价标准,PM_{2.5} 的评价标准为-50%<NMB<80%, NME<150%.

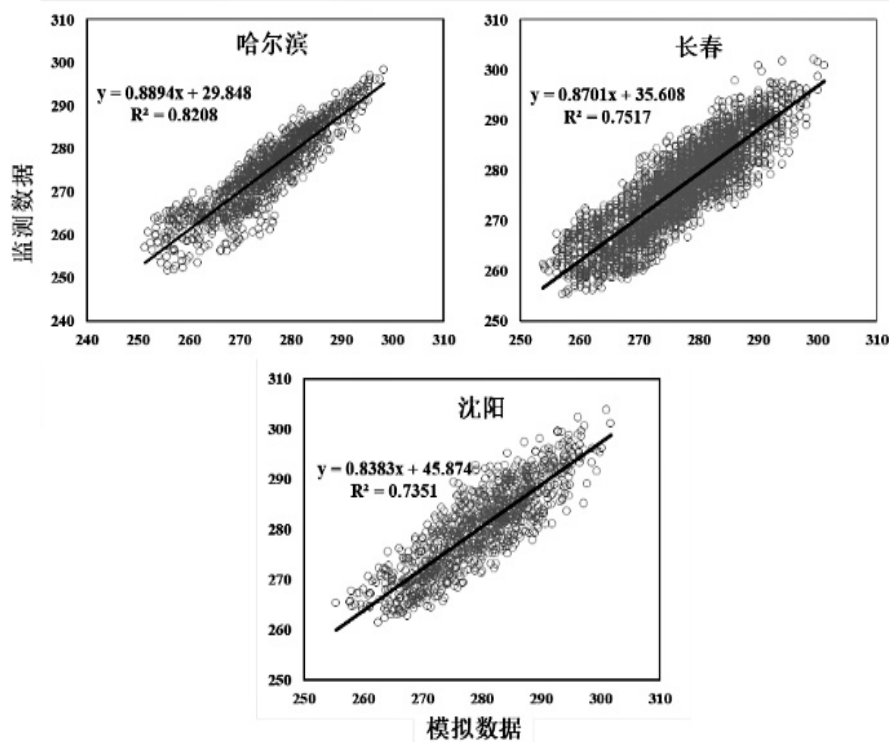


图 3 气温的 WRF 模拟值与实测数据的相关性分析

Fig.3 Correlation analysis between simulated and measured air temperature

由表 4 可知,东北三省省会城市的 $PM_{2.5}$ 模拟值与监测值的 NMB 范围为 0.62%~29.63%,NME 范围为 65.07%~99.73%,满足评价标准要求的范围.图 4 展示了 2017 年 10 月上旬东北三省省会城市各监测站点的大气污染物浓度数据与空气质量模式 CMAQ 模拟结果的对比,结果显示,哈尔滨市监测结果与模拟结果 CO 、 $PM_{2.5}$ 、 NO_2 和 O_3 浓度的相关系数分别为 0.55,0.69,0.46 和 0.53;长春市监测结果与模拟结果 CO 、 $PM_{2.5}$ 、 NO_2 和 O_3 浓度的相关系数分别为 0.34,0.51,0.53 和 0.72;沈阳市监测结果与模拟结果 CO 、 $PM_{2.5}$ 、 NO_2 和 O_3 浓度的相关系数分别为 0.31,0.36,0.57 和 0.75.这些结果与其他一些研究结果一致^[30-31].所以,东北三省省会城市的模式模拟效果较好,模拟值能表现出观测值的变化趋势.

表 4 $PM_{2.5}$ 模拟结果统计

Table 4 Statistics of $PM_{2.5}$ Simulation Results

城市	NMB(%)	NME(%)
沈阳市	12.57	92.73
长春市	26.63	65.07
哈尔滨市	0.62	99.73

2.2.2 基础情景研究 WRF-CMAQ 模式模拟结果

如图 5 所示,由图 5 (a)和图 5(b)可知,在春耕前,关闭排放清单中的秸秆焚烧源后,东北三省地区大气中 CO 和 $PM_{2.5}$ 浓度沿着沈阳-长春-哈尔滨一线以及三江平原地区显著下降.黑龙江省颗粒物 $PM_{2.5}$ 和 CO 浓度的平均值降幅最大,分别下降了 $45.13\mu g/m^3$ 和 $0.22mg/m^3$,在黑龙江省的中南部地区两种污染物浓度平均值降幅最大,降幅分别为 $110.92\mu g/m^3$ 和 $0.56mg/m^3$.辽宁省受秸秆焚烧源影响较小,该省 $PM_{2.5}$ 和 CO 平均浓度的降幅仅为 $18.92\mu g/m^3$ 和 $0.09mg/m^3$.农作物秸秆露天焚烧源对黑龙江省、吉林省和辽宁省 CO 浓度的贡献率分别为 39.74%、14.32%以及 9.14%,对黑龙江省、吉林省和辽宁省 $PM_{2.5}$ 浓度的贡献率分别为 61.87%、32.47%和 22.24%.整体上看,春耕前农作物秸秆焚烧源对东北三省的 $PM_{2.5}$ 和 CO 浓度的贡献率分别为 38.08%和 18.37%.因此,东北三省春耕前农作物秸秆焚烧是影响东北地区空气质量的重要因素,促进了东北地区包括 CO 和细颗粒物在内的大气污染物的浓度上升,其中对黑龙江省空气质量的影响最大,对辽宁省空气质量的影响相对较小.

图 5(c)和图 5(d)结果显示,与春耕前染物浓度变化类似,在关闭秸秆焚烧源后,东北三省地区秋收后大气中 CO 和 $PM_{2.5}$ 浓度沿着长春-哈尔滨一线以及

三江平原地区显著降低. 黑龙江省颗粒物 $\text{PM}_{2.5}$ 和 CO 浓度的平均值降幅最大, 分别降低了 $34.31\mu\text{g}/\text{m}^3$ 和 $0.21\text{mg}/\text{m}^3$, 在黑龙江省的中南部地区两种污染物浓度平均值降幅最大, 降幅分别为 $89.81\mu\text{g}/\text{m}^3$ 和 $0.56\text{mg}/\text{m}^3$. 辽宁省受秸秆焚烧源影响较小, 该省 $\text{PM}_{2.5}$ 和 CO 平均浓度的降幅仅为 $1.57\mu\text{g}/\text{m}^3$ 和 $0.02\text{mg}/\text{m}^3$. 农作物秸秆露天焚烧源对黑龙江省、吉

林省和辽宁省 CO 浓度的贡献率分别为 55.35%、29.63% 以及 5.99%, 对黑龙江省、吉林省和辽宁省颗粒物 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的贡献率分别为 69.55%、38.32% 以及 4.90%. 整体上看, 秋收后农作物秸秆焚烧源对东北三省的颗粒物 $\text{PM}_{2.5}$ 和 CO 浓度的贡献率分别为 41.87% 和 29.63%. 因此, 秋季秸秆焚烧是空气质量下降的重要影响因素^[32].

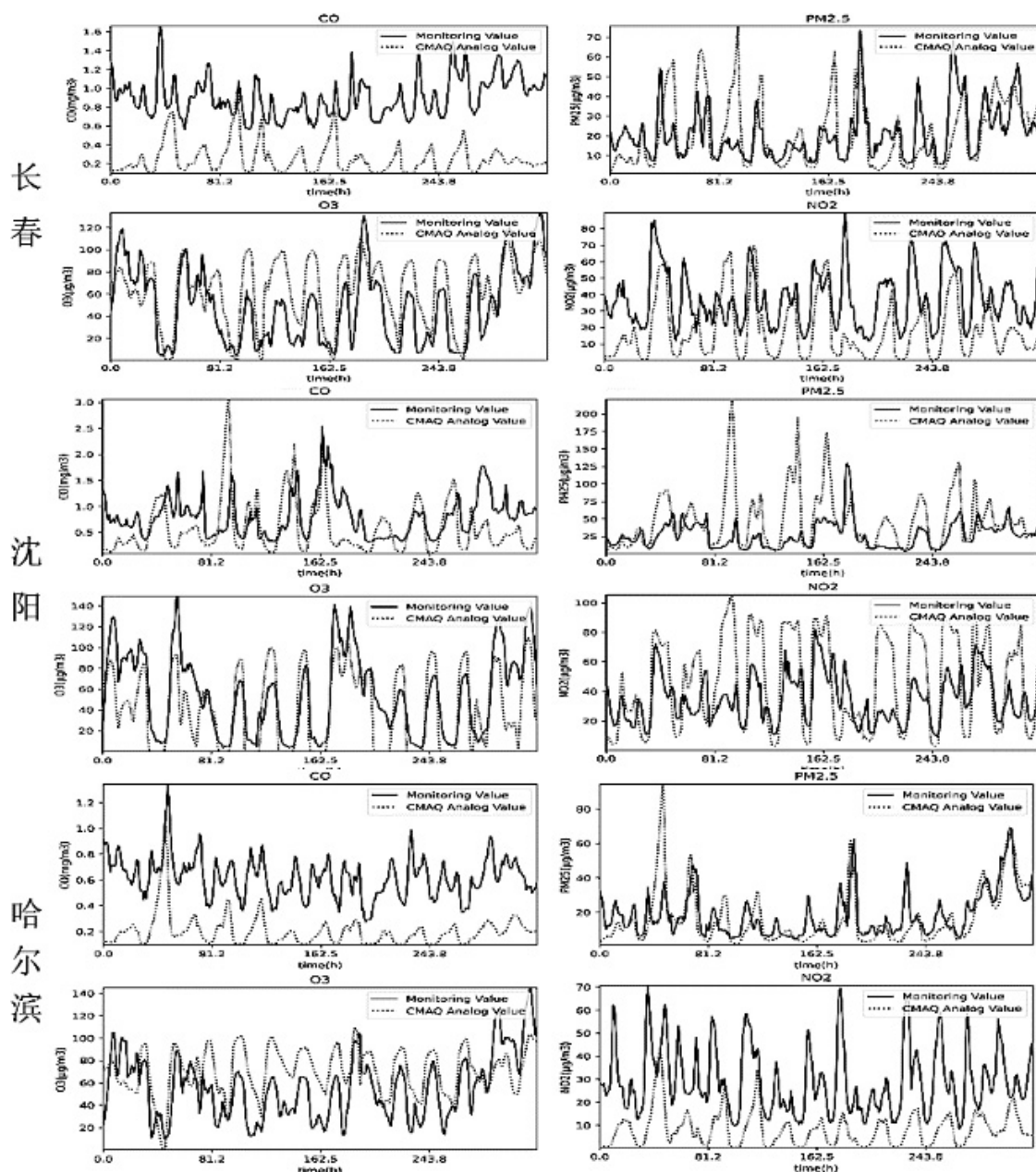


图4 2017年10月上旬东北三省省会城市大气污染物监测数据与空气质量模型模拟结果的趋势对比

Fig.4 Comparison of observed and simulated air pollutants in the capital cities of the three northeastern provinces in early October, 2017

综合以上结果可知, 东北三省农作物秸秆焚烧对东北地区空气质量产生了重要影响. 这与文惠子

等^[33]和杨光义^[22]的研究结果一致, 秸秆焚烧是影响区域空气质量的重要因素. 在空间上, 东北地区

秸秆焚烧主要影响沈阳-长春-哈尔滨条状地带和三江平原地区.其中,秸秆焚烧对黑龙江省颗粒物 $\text{PM}_{2.5}$ 和 CO 平均浓度贡献率均超过了 39%,是东北三省中受农作物秸秆焚烧影响最大的省份.在时间

上,2017 年东北地区秋收后秸秆焚烧对大气污染物浓度的贡献率均超过春耕前秸秆焚烧,在东北三省中,只有辽宁省春耕前秸秆焚烧的贡献率超过秋收后.

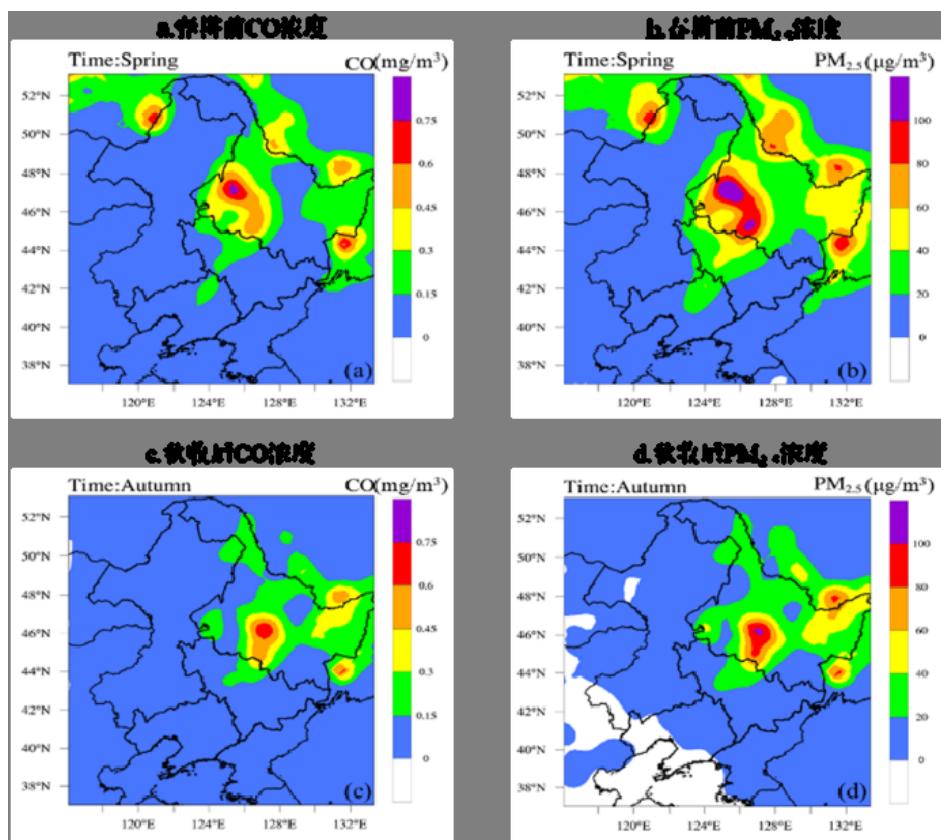


图 5 关闭秸秆焚烧源后东北地区春耕前和秋收后 $\text{PM}_{2.5}$ 和 CO 平均浓度降低分布图

Fig.5 The distributions of the reductions of $\text{PM}_{2.5}$ and CO mean concentration before spring plowing and after autumn harvesting in Northeast China after turning off the straw burning sources

2.2.3 减排情景研究 将排放清单中的秸秆焚烧源修改为 2019 年的秸秆露天焚烧排放源后,对比添加 2017 年秸秆焚烧源的基础情景,如图 6 所示,东北三省大部分地区春季和秋季的颗粒物 $\text{PM}_{2.5}$ 和 CO 浓度均有一定程度的下降.在东北三省中,与基础情景相比,春耕前大气中 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度平均减少 $13.85\mu\text{g}/\text{m}^3$,最大减少量为 $184.38\mu\text{g}/\text{m}^3$,春耕前 CO 浓度平均减少 $1.2\times 10^{-4}\text{mg}/\text{m}^3$,最大减少量为 $3.9\times 10^{-4}\text{mg}/\text{m}^3$;秋收后 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度平均减少 $55.15\mu\text{g}/\text{m}^3$,最大减少量为 $219.38\mu\text{g}/\text{m}^3$,秋收后 CO 浓度平均减少 $0.03\text{mg}/\text{m}^3$,最大减少量为 $0.56\text{mg}/\text{m}^3$.在东北三省范围内,春耕前大气污染物浓度降幅较大的地区沿沈阳-长春-哈尔滨一带分布.秋收后,东北地区大气污染物浓度降幅最大的地区

集中在黑龙江南部,同时,三江平原地区大气污染物浓度也呈现较大幅度的下降.综合以上信息,在相同气象条件下,2019 年东北地区的秸秆焚烧管控使该地区大气中污染物浓度显著降低,其中 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的降幅超过 CO 浓度,且一年中大气污染物浓度的秋收后降幅最大,有效改善了东北地区大气环境质量.

在秸秆焚烧政策管控下,2019 年东北三省春耕前秸秆焚烧效果明显,春耕前农作物秸秆焚烧对东北三省大气中 CO 和颗粒物 $\text{PM}_{2.5}$ 的贡献率分别为 10.97% 和 23.59%,秸秆焚烧对大气污染物的贡献率明显下降,较基础情景分别下降了 7.40% 和 14.49%.其中东北三省各省农作物秸秆焚烧对大气中 CO 和 $\text{PM}_{2.5}$ 的贡献率均明显降低,黑龙江省受秸秆焚烧管

控政策影响最大,贡献率降幅最高,分别为 17.79%和 19.53%,大气污染物浓度降幅最为显著。

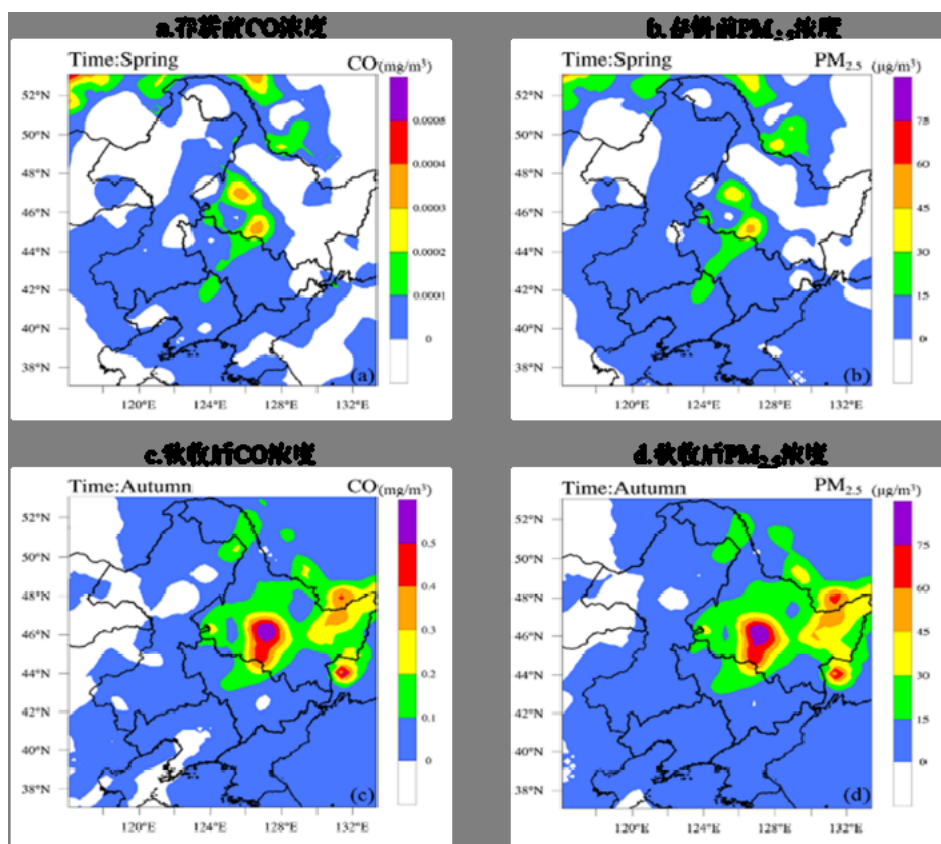


图 6 减排情景下东北地区春耕前和秋收后 $PM_{2.5}$ 和 CO 平均浓度较 2017 年污染物浓度降低分布图

Fig.6 The distributions of the reductions of $PM_{2.5}$ and CO mean concentration in Northeast China before spring plowing and after autumn harvesting compared with 2017 in the emission reduction scenario

东北地区秋收后农作物秸秆焚烧对东北三省大气中 CO 和颗粒物 $PM_{2.5}$ 的贡献率分别为 6.61% 和 4.96%,较基础情景中同期秸秆焚烧的贡献率分别降低了 11.76%和 13.41%。从东北三省各省来看,黑龙江省秸秆焚烧对大气中 CO 和 $PM_{2.5}$ 的贡献率依旧位列首位,分别为 11.37%和 12.74%,同时黑龙江省秸秆焚烧贡献率对比 2017 年同期秸秆焚烧贡献率的降幅同样是东北三省最高的省份,降幅分别为 28.37%和 27.01%,吉林省和辽宁省的秸秆焚烧贡献率也均有所下降。由上述结果可知,减排情景下,东北三省秋收后秸秆焚烧贡献率明显低于春耕前秸秆焚烧贡献率,且均低于基础情景中秸秆焚烧对东北三省大气污染物的贡献率,因此 2019 年东北三省秸秆禁烧管控效果要优于 2017 年秸秆禁烧管控。2019 秸秆禁烧管控有效减少了污染物的排放,降低了大气污染物的浓度^[34],对改善区域大气环境有积极影响。

2.2.4 未来情景研究 基于 2019 年秸秆焚烧火点

数据,依据表 2 所示划定秸秆禁烧范围,将吉林省 2019 年秸秆禁烧政策推广至整个东北地区,制作秸秆焚烧排放清单,输入 WRF-CMAQ 模式中,模拟结果如图 7 所示,东北三省地区大气污染物 CO 和颗粒物 $PM_{2.5}$ 的平均浓度较减排情景均有所下降。春耕前,两种污染物浓度下降较大地区主要集中在黑龙江省的西南部、三江平原和辽宁省的中部地区,东北三省地区 CO 和 $PM_{2.5}$ 浓度平均降低了 16.04%和 26.94%;秋收后,污染物浓度下降较大地区主要集中在沈阳至长春一线以及黑龙江省三江平原地区,东北三省地区 CO 和 $PM_{2.5}$ 浓度平均降低了 3.40%和 7.01%。总体上看,未来情景中,东北三省大气中 CO 和 $PM_{2.5}$ 的浓度均在秸秆禁烧管控下较减排情景明显下降,秋收后秸秆禁烧管控效果明显低于春耕前秸秆禁烧管控,对辽宁省中部和黑龙江省三江平原地区的管控效果最好。通过前两种模拟情景的分析,秸秆禁烧管控对黑龙江省南部以及吉林省中西部

地区污染物浓度已经达到较好的效果,故在未来情

境中管控效果对该地区的影响有限.

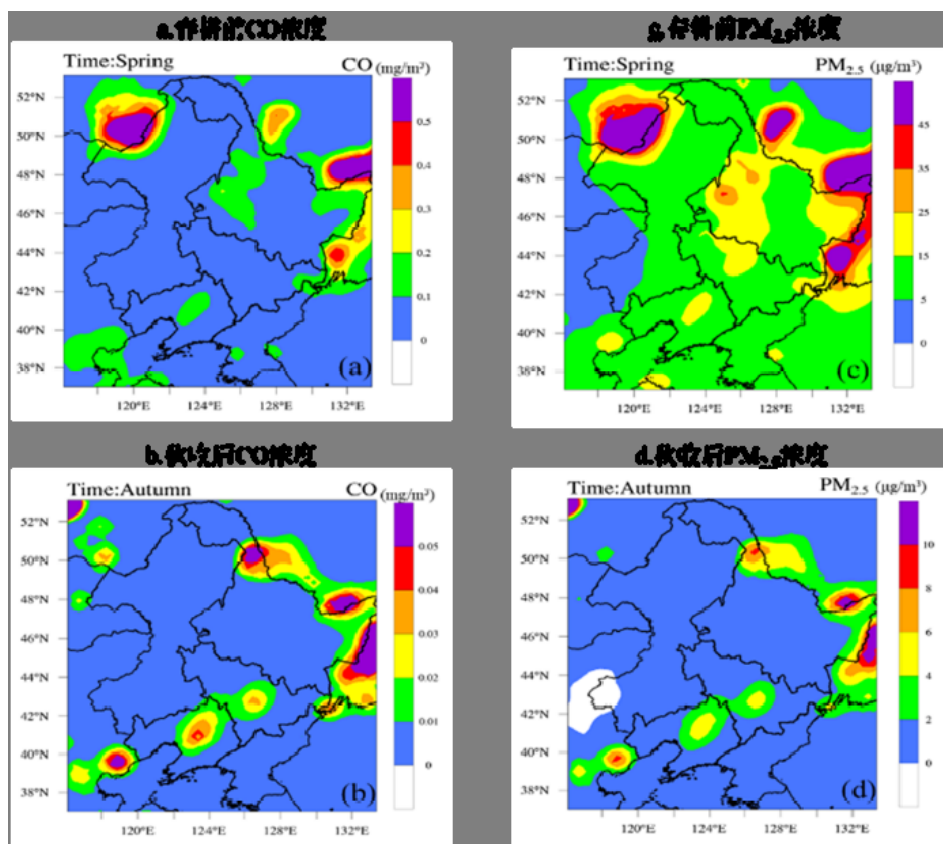


图7 未来情景中东北地区春耕前和秋收后 CO 和 PM_{2.5} 平均浓度较减排情景的降低值分布图

Fig.7 The distributions of the reductions of the of CO and PM_{2.5} mean concentrations before spring plowing and after autumn harvesting in Northeast China in future scenarios compared with emission reduction scenarios

春耕前,未来情景中农作物秸秆焚烧对东北三省大气中 CO 和 PM_{2.5} 的贡献率进一步降低,分别为 4.43% 和 6.36%,较减排情景分别下降了 6.54% 和 17.23%。除黑龙江省外其余两省秸秆焚烧对东北三省大气中两种污染物的贡献率均低于 10%,黑龙江省秸秆焚烧对 CO 和 PM_{2.5} 的贡献率仍处于东北三省的较高水平,分别为 12.36% 和 21.63%。与此同时,东北三省各省农作物秸秆焚烧对大气中 CO 和 PM_{2.5} 的贡献率中,黑龙江省降幅最高,分别为 21.96% 和 20.29%,降幅高于减排情景中的贡献率降幅。综上所述,在东北三省均实施《吉林省秸秆禁烧区和限烧区划定与管控规范》规定的管控下,未来情景中东北三省春耕前秸秆禁烧效果进一步提高,秸秆焚烧对辽宁省和吉林省大气污染物的贡献率已经处于较低水平,黑龙江省虽然受秸秆禁烧管控政策影响最大,大气污染物浓度降幅最为显著,但秸秆焚烧对黑龙江省空气质量的影响依然较大。

秋收后,农作物秸秆焚烧对东北三省大气中 CO 和 PM_{2.5} 的贡献率分别是 2.99% 和 2.74%,对东北三省各省的贡献率也均低于 10%。因此,若东北三省严格实施禁烧区禁烧农作物秸秆,能显著降低秸秆焚烧对空气质量的影响^[35],改善东北三省空气质量。与春耕前相比,秋收后农作物秸秆焚烧对污染物的贡献率显著降低,同时由于秸秆焚烧的集中时期转移至春耕前^[36],因此春耕前将是未来东北地区秸秆禁烧管控的重点时期。

3 结论

3.1 秸秆焚烧排放清单表明,2014~2017 年秸秆露天焚烧排放总体平稳,2017 年以后秸秆焚烧排放量先大幅下降随后有所上升并逐渐趋于稳定。其中,2019 年吉林省秸秆禁烧管控政策具有一定的借鉴意义和研究价值。

3.2 东北地区每年秸秆焚烧排放量高峰期均集中

在春耕前(3~4 月)和秋收后(10~11 月)两个时间段。

3.3 在基础情景中, 2017 年秸秆焚烧集中期, 农作物秸秆露天焚烧源对东北三省的颗粒物 $\text{PM}_{2.5}$ 和 CO 浓度的贡献率分别为 39.98% 和 24.01%, 表明秸秆露天焚烧严重影响了东北地区的空气质量。

3.4 在减排情景中, 东北三省大气中的 CO 和 $\text{PM}_{2.5}$ 的浓度较 2017 年分别下降了 $0.02\text{mg}/\text{m}^3$ 和 $41.43\mu\text{g}/\text{m}^3$, 表明 2019 年东北地区的秸秆禁烧政策进一步改善了该地区的空气质量。

3.5 在未来情景中, 秸秆露天焚烧排放对东北地区 CO 和 $\text{PM}_{2.5}$ 的贡献率进一步下降至 3.71% 和 4.55%, 这表明吉林省 2019 年秸秆禁烧政策对于进一步提升东北地区空气质量具有积极意义。

参考文献:

- [1] 周裕雯, 廖炜鹏, 杨 静, 等. 基于 MODIS 火点数据分析南北方省份生物质开放式燃烧与排放特征 [J]. 环境科学学报, 2021, 41(9): 3696-708.
Zhou Y W, Liao W P, Yang J, et al. Based on MODIS fire pixel location data to characterize the biomass burning and air pollutants emissions in northern and southern China [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2021, 41(9): 3696-708.
- [2] 毛慧琴, 张玉环, 厉 青, 等. 基于卫星遥感的生物质燃烧排放估算研究进展 [J]. 大气与环境光学学报, 2016, 11(6): 402-11.
Mao H Q, Zhang Y H, Li Q, et al. Research progress on estimating emissions from biomass burning based on satellite observations [J]. Journal of Atmospheric and Environmental Optics, 2016, 11(6): 402-11.
- [3] 田贺忠, 赵 丹, 王 艳. 中国生物质燃烧大气污染物排放清单 [J]. 环境科学学报, 2011, 31(2): 349-57.
Tian H Z, Zhao D, Wang Y. Emission inventories of atmospheric pollutants discharged from biomass burning in China [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2011, 31(2): 349-57.
- [4] 王甜甜, 陈良富, 陶金花, 等. 生物质燃烧对中国东北地区 CO 浓度的影响研究 [J]. 遥感技术与应用, 2016, 31(2): 297-306.
Wang T T, Chen L F, Tao J H, et al. The study of the effects on carbon monoxide in Northeast China from biomass burning [J]. Remote Sensing Technology and Application, 2016, 31(2): 297-306.
- [5] 曹国良, 张小曳, 王 丹, 等. 中国大陆生物质燃烧排放的污染物清单 [J]. 中国环境科学, 2005, (4): 389-93.
Cao G L, Zhang X Y, Wang D, et al. Inventory of atmospheric pollutants discharged from biomass burning in China continent [J]. China Environmental Science, 2005, (4): 389-93.
- [6] 王书肖, 张楚莹. 中国秸秆露天焚烧大气污染物排放时空分布 [J]. 中国科技论文在线, 2008, (5): 329-33.
Wang S X, Zhang C Y. Spatial and temporal distribution of air pollutant emissions from open burning of crop residues in China [J]. China Sciencepaper, 2008, (5): 329-33.
- [7] 张丽娟, 厉 青, 陈 辉, 等. 2014~2015 年夏秋收期间全国秸秆焚烧遥感监测结果对比分析 [J]. 环境与可持续发展, 2016, 41(6): 61-5.
Zhang L J, Li Q, Chen H, et al. Analysis and comparison of straw burning based on remote sensing monitoring data during summer and autumn harvest season from 2014 to 2015 in China [J]. Environment and Sustainable Development, 2016, 41(6): 61-5.
- [8] 李文龙, 马孝博, 张金波, 等. 农作物秸秆综合处理及有效利用 [J]. 中国科技信息, 2021, (16): 41-2.
Li W L, Ma X B, Zhang J B, et al. Comprehensive treatment and effective utilization of crop straw [J]. China Science and Technology Information, 2021, (16): 41-2.
- [9] 田国成, 王 钰, 孙 路, 等. 秸秆焚烧对土壤有机质和氮磷钾含量的影响 [J]. 生态学报, 2016, 36(2): 387-93.
Tian G C, Wang Y, Sun L, et al. Effects of wheat straw burning on content of soil organic matter, nitrogen, phosphorus, and potassium [J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(2): 387-93.
- [10] 李运英. 关于秸秆还田和综合利用情况的调研分析 [J]. 农机使用与维修, 2014, (8): 89-90.
Li Y Y. Investigation and analysis on straw returning and comprehensive utilization [J]. Agricultural Machinery Using & Maintenance, 2014, (8): 89-90.
- [11] 覃 诚. 中国秸秆禁烧管理与美国秸秆计划焚烧管理比较研究 [D]. 北京: 中国农业科学院, 2019.
Qin C. A comparative study of crop residue burning ban management in China and crop residue control burning management in the United States [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2019.
- [12] 尹 聪, 朱 彬, 曹云昌, 等. 秸秆焚烧影响南京空气质量的成因探讨 [J]. 中国环境科学, 2011, 31(2): 207-13.
Yin C, Zhu B, Cao Y C, et al. The origin of crop residue burning impact on air quality of Nanjing [J]. China Environmental Science, 2011, 31(2): 207-13.
- [13] 周凤杰, 万鲁河. 基于 Python 的 MODIS 卫星秸秆焚烧监测——以哈尔滨市为例 [J]. 哈尔滨师范大学自然科学学报, 2020, 36(6): 24-31.
Zhou F J, Wan L H. Monitoring of MODIS satellite straw burning based on pythons——Take Harbin as an example [J]. Natural Science Journal of Harbin Normal University, 2020, 36(6): 24-31.
- [14] 吴 黎, 李 岩. 基于 MODIS 数据黑龙江省秸秆焚烧监测研究 [J]. 现代化农业, 2021, (7): 37-9.
Wu L, Li Y. Monitoring of straw burning in Heilongjiang Province based on MODIS data [J]. Modernizing Agriculture, 2021, (7): 37-9.
- [15] 李莉莉, 王 琨, 姜珺秋, 等. 黑龙江省秸秆露天焚烧污染物排放清单及时空分布 [J]. 中国环境科学, 2018, 38(9): 3280-7.
Li L L, Wang K, Jiang Q Q, et al. Emission inventory and the temporal and spatial distribution of pollutant for open field straw burning in Heilongjiang province [J]. China Environmental Science, 2018, 38(9): 3280-7.
- [16] 赵 越. 2001~2017 年中国东北地区生物质燃烧高分辨率多年排放清单研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨师范大学, 2020.
Zhao Y. A high resolution and multi-year emission inventory for biomass burning in Northeast China during 2001~2017 [D]. Harbin: Harbin Normal University, 2020.
- [17] 白 冰, 赵红梅, 张素梅, 等. 基于神经网络的东北地区秸秆焚烧预测 [J]. 中国环境科学, 2020, 40(12): 5205-12.
Bai B, Zhao H M, Zhang S M, et al. Forecasting of agricultural straw

- burning in the Northeastern China based on neural network [J]. *China Environmental Science*, 2020,40(12):5205-12.
- [18] 汪 鹏.应用双向耦合的 WRF-CMAQ 模型研究排放控制策略对长三角地区 PM_{2.5} 及 O₃ 浓度的影响 [D]. 杭州:浙江大学, 2018.
- Wang P. Impacts of Emission Control Strategies on PM_{2.5} and O₃ concentrations over the Yangtze River Delta investigated by the two-way coupled WRF-CMAQ model [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2018.
- [19] 尹 伊.基于 CMAQ 模式、MEIC 清单对兰州市主城区臭氧污染特征的初步研究 [D]. 兰州大学, 2019.
- Yin Y. Ozone pollution characteristics in the main urban area of Lanzhou City based on CMAQ Model and MEIC [D]. Lanzhou University, 2019.
- [20] Zhang Q, Streets D G, Carmichael G R, et al. Asian emissions in 2006 for the NASA INTEX-B mission [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2009,9(14):5131-53.
- [21] Janssens-Maenhout G, Crippa M, Guizzardi D, et al. HTAP_v2.2: a mosaic of regional and global emission grid maps for 2008 and 2010 to study hemispheric transport of air pollution [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2015,15(19):11411-32.
- [22] 杨光义.东北地区生物质露天燃烧源排放及其对大气环境的影响与评估 [D]. 中国科学院大学(中国科学院东北地理与农业生态研究所), 2020.
- Yang G Y. Emission of Open Biomass Burning and its Impacts on Atmospheric Environment in the Northeastern China [D]. Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, 2020.
- [23] Zhang X Y, Kondragunta S, Ram J, et al. Near-real-time global biomass burning emissions product from geostationary satellite constellation [J]. *J Geophys Res-Atmos*, 2012,117(18).
- [24] 徐奔奔,范 萌,陈良富,等.2013~2017 年主要农业区秸秆焚烧时空特征及影响因素分析 [J]. *遥感学报*, 2020,24(10):1221-32.
- Xu B B, Fan M, Chen L F, et al. Analysis of temporal and spatial characteristics and Influencing Factors of crop residue burning in major agricultural areas from 2013 to 2017 [J]. *National Remote Sensing Bulletin*, 2020,24(10):1221-32.
- [25] 喻萌萌.秸秆燃烧季节我国主要农业区大气污染物的时空变化与健康风险研究 [D]. 华中农业大学, 2021.
- Yi M M. Spatiotemporal changes of air Pollutants and health risks during crop residue burning seasons in China's main agricultural production areas [D]. Huazhong Agricultural University, 2021.
- [26] 吴 双,吴 英,徐作敏,等.基于 FY3 系列极轨卫星的中国东北三省秸秆焚烧热源点时空变化分析 [J]. *湖北农业科学*, 2021,60(22):168-73.
- Wu S, Wu Y, Xu Z M, et al. Spatial and temporal variation analysis of straw burning heat source in three northeast provinces based on FY3 series polar orbiting satellites [J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2021,60(22):168-73.
- [27] 陈 阜,姜雨林,尹小刚.中国耕作制度发展及区划方案调整 [J]. *中国农业资源与区划*, 2021,42(3):1-6.
- Chen F, Jiang Y L, Yin X G. Adjustment of China's farming system regionalization scheme [J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2021,42(3):1-6.
- [28] 姜英华.东北地区秸秆利用现状及有效还田方式 [J]. *乡村科技*, 2021,12(19):112-4.
- Jiang Y H. Current situation of straw utilization and effective way of returning straw to farmland in Northeast China [J]. *Rural Science and Technology*, 2021,12(19):112-4.
- [29] 许山晶.我国农村秸秆资源利用的综合效应评价 [D]. 北京:中国社会科学院研究生院, 2020.
- Xu S J. The effect evaluation of comprehensive utilization of straw resources in China [D]. Beijing: Graduate School of Chinese Academy of Social Sciences, 2020.
- [30] 陈颢元,王晓琦,程水源,等.京津冀和长三角地区一次重霾过程气象成因及传输特征 [J]. *中国环境科学*, 2021,41(6):2481-92.
- Chen Y Y, Wang X Q, Cheng S Y, et al. Analysis of meteorological causes and transmission characteristics of a heavy haze process in Beijing Tianjin Hebei and Yangtze River Delta [J]. *China Environmental Science*, 2021,41(6):2481-92.
- [31] 许艳玲,薛文博,雷 宇,等.中国氨减排对控制 PM_{2.5} 污染的敏感性研究 [J]. *中国环境科学*, 2017,37(7):2482-91.
- Xu Y L, Xue W B, Lei Y, et al. Sensitivity analysis of PM_{2.5} pollution to ammonia emission control in China [J]. *China Environmental Science*, 2017,37(7):2482-91.
- [32] 王 醒,李莉莉,王 琨,等.哈尔滨市一次大气污染过程及潜在源分析 [J]. *中国环境科学*, 2019,39(11):4502-10.
- Wang X, Li L L, Wang K, et al. An air pollution process and potential sources of Harbin [J]. *China Environmental Science*, 2019,39(11):4502-10.
- [33] 文惠子,李锦伦,石文龙,等.秸秆焚烧对黄石市空气质量的影响分析 [J]. *环境科学与技术*, 2022,45(1):163-73.
- Wen H Z, Li J L, Shi W L, et al. Analysis of the impact of straw burning on air quality in Huangshi City [J]. *Environmental Science and Technology*, 2022,45(1):163-73.
- [34] 陶金花,王子峰,韩 冬,等.华北地区秸秆禁烧前后的 NO₂ 卫星遥感监测分析 [J]. *中国环境科学*, 2009,29(10):1016-20.
- Tao J H, Wang Z F, Han D, et al. Analysis of crop residue burning and tropospheric NO₂ vertical column density retrieved from satellite remote sensing in North China [J]. *China Environmental Science*, 2009,29(10):1016-20.
- [35] Cheng Z, Wang S, Fu X, et al. Impact of biomass burning on haze pollution in the Yangtze River delta, China: a case study in summer 2011 [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2014,14(9):4573-85.
- [36] 毛慧琴,张丽娟,厉 青,等.基于卫星遥感的东北三省露天秸秆焚烧及其排放研究 [J]. *中国农业资源与区划*, 2018,39(4):59-66.
- Mao H Q, Zhang L J, Li Q, et al. Study on open burning of crop residues and its emissions of PM_{2.5} in Northeast China based on satellite sensing [J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2018,39(4):59-66.

作者简介: 杜亚彬(1996-),男,山东临沂人,硕士,主要从事大气数值模式模拟研究.发表论文 1 篇。