

国内外秸秆焚烧管控策略及对我国大气污染防治的启示

侯露,汪巍,刘冰,高愈霄

中国环境监测总站,国家环境保护环境监测质量控制重点实验室,北京 100012

摘要:露天秸秆焚烧是导致我国大气重污染事件频发的重要原因之一,这使得焚烧管控和禁烧政策的制定与实施引起高度关注。系统梳理了农业发达国家的秸秆焚烧污染时空演变特征,对比不同国家的立法进程与管控政策实施效果,回顾历史相似气象条件下我国东北地区秸秆焚烧污染跨海传输的影响,从法律法规、气象研判、综合利用等多个层面归纳总结我国可借鉴的先进经验。在此基础上,从大气污染防治角度提出出台专项禁烧管理法律法规、完善考核标准体系、制定分区气象指数计算方法、加强限烧区焚烧活动规范化管控和秸秆供热发电研究等具体建议,旨在以秸秆资源化高效利用为最终处理手段,对标空气质量持续改善行动计划,分阶段制定最大许可焚烧量,保障基本消除重污染天气的目标的实现。

关键词:秸秆焚烧;农业发达国家;污染防治;焚烧管控

中图分类号:X51 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-6002(2025)04-0001-11

DOI:10.19316/j.issn.1002-6002.2025.04.01

Control Strategies for Straw Burning at Home and Abroad and Their Implications for Air Pollution Prevention in China

HOU Lu, WANG Wei, LIU Bing, GAO Yuxiao

State Environmental Protection Key Laboratory of Quality Control in Environmental Monitoring, China National Environmental Monitoring Centre, Beijing 100012, China

Abstract: Open-air straw burning is one of the important reasons for frequent heavy air pollution incidents in China, making the formulation and implementation of burning control and prohibition policies a matter of high concern. This paper systematically reviews the spatiotemporal evolution characteristics of straw burning pollution in developed agricultural countries worldwide, compares the legislative processes and effectiveness of control policies in different countries, and examines the historical impact of cross-sea transportation of straw burning pollution from Northeast China under similar meteorological conditions. It summarizes advanced experiences that China can learn from in terms of laws and regulations, meteorological analysis, comprehensive utilization and other aspects. Based on the perspective of air pollution prevention and control, it is proposed to introduce a special law on prohibition of burning, improve the assessment standard system, develop regional meteorological index calculation methods, strengthen the standardized control of burning in restricted burning areas, and research on straw heating and power generation. The aim is to regard the effective utilization of straw resources as the ultimate disposal method, align with the continuous air quality improvement action plan, phase in maximum permitted burning quotas, and ensure the achievement of the goal of basically eliminating heavy pollution weather.

Keywords: straw burning; agricultural developed countries; pollution control; burning control

中国农作物秸秆产量大、分布广,露天秸秆焚烧量最高曾占亚洲总量的44%^[1-3]。秸秆露天焚烧是在农村能源结构发生转变和保障新一季农作物可持续耕种背景下,提高农业生产效率且降低生产成本的简便处理方法^[4-7]。研究显示,秸秆焚烧是生物质燃烧中最主要的污染贡献源^[8-9]。作为大气中有毒有害气体、颗粒态污染物和温室气

体的最大二级排放源^[10-13],秸秆露天焚烧会释放大量CO₂、CO及烟尘等物质,引发霾等灾害天气,严重影响环境质量和人体健康^[14-18]。申小凡等^[19]计算得出,2011—2020年,全国秸秆露天焚烧碳排放总量年均增幅为14.93%,年均碳排放总量高达0.84亿t。覃诚^[20]量化了2016年东三省秸秆焚烧对应的PM_{2.5}、VOCs、NO_x、SO₂等主要

收稿日期:2024-05-09;修订日期:2024-07-10

基金项目:国家重点研发计划项目(2023YFC3705504)

第一作者简介:侯露(1996-),女,天津人,硕士,工程师。

大气污染物排放量,发现由此引发的 $PM_{2.5}$ 污染程度最重,相当于增加了上亿吨民用煤燃烧排放量和上亿辆交通源排放量,并且随着未利用秸秆的焚烧比例按10%的梯度逐级增加,污染排放量呈明显的线性增长趋势。ZHANG等^[21]和方冬青等^[22]通过源解析定量计算出秸秆燃烧排放对北京地区 $PM_{2.5}$ 质量浓度和有机组分含量的贡献分别达10%和20%。朱莉娜^[23]发现,黑龙江省火点密集区域在秸秆露天焚烧期对重污染天的贡献明显高于春季沙尘期和冬季雾霾期,焚烧期首要污染物为 $PM_{2.5}$ 。可见,基于秸秆焚烧造成的严重环境污染,在特定环境下、预定区域内对其进行科学有效的管控,以支撑空气质量改善,是十分必要的。

秸秆焚烧管控是世界性难题。全球性的农业焚烧及其污染物排放研究从20世纪70年代开始才得以全面深入开展^[24]。美国经数十年规范、系统的科学管理,有效减轻了焚烧带来的烟雾污染影响^[25-27],在改善空气质量的同时,保障了农业生产,缓解了农业焚烧与公共利益间的矛盾。不少学者认为中国可借鉴美国的成功立法、管理经验,因地制宜制定限量焚烧制度^[28-30],强化焚烧替代手段和减排技术研究^[31-32]。王艳分^[33]、刘芳等^[34]重点研究了美国烟雾管理计划和农业焚烧政策,提出了可借鉴的管控经验。覃诚等^[4]对比研究了3个典型发达国家的秸秆焚烧历史与现状,从政策和法规角度总结提出了中国禁烧管理对策。刘树林等^[35]围绕秸秆价值转换和低碳农业发展,提出了4种秸秆综合利用技术。目前,国内多数研究主要集中在管理层面的中国与美国秸秆焚烧管理政策对比、遥感应用层面的污染物排放量估算^[36-41]以及技术层面的秸秆综合利用,结合 $PM_{2.5}$ 重污染频发的东北、京津冀、汾渭平原和长三角等重点区域的秸秆焚烧污染时空演变特征,从减轻上述地区大气污染层面完善焚烧管控政策和技术应用的系统性研究仍开展较少。

2020—2024年,由东北地区春季秸秆焚烧引发的 $PM_{2.5}$ 小时重度及以上污染过程共出现30余次,在不利大气扩散条件下加重了本地及下风向地区的空气污染程度。因此,有必要全面掌握国外最新秸秆计划焚烧管控规定、安全距离划定方法及执法管理经验等相关内容,结合我国秸秆露天焚烧背景下的大气污染物浓度高值区域的时空差异性和季节性特征,聚焦大气重污染地区,在

重点时段、重点区域有针对性地开展精细化秸秆焚烧管控,不断完善我国禁烧管理制度和政策体系,加强气象条件影响下的污染物扩散特性研究,推进新型秸秆生物质资源高效循环利用,为2025年基本消除重污染天气和2030年前碳达峰目标的实现提供科学参考。

1 国内外秸秆焚烧污染时空演变特征及空气质量影响对比

1.1 国外秸秆焚烧污染时空演变特征

KORONTZI等^[42]利用NASA卫星数据分析全球2001—2003年秸秆焚烧情况,发现欧洲和亚洲北部地区是全球农田焚烧的第1和第2大中心区域,两地的农田遥感火点数量分别占陆表总量的48%~73%和18%~29%,相关焚烧事件中发生在东欧、南欧和俄罗斯;印度与东南亚、非洲北部地区的火点数量占比分别位居全球第3、第4位。美国的年秸秆焚烧高峰期出现在4—6月和9—10月^[42],其中春天的焚烧排放源主要集中在北美大平原北部并逐渐向南蔓延,而秋天则集中在美国东南部与西北部临近太平洋地区。加拿大的秸秆焚烧集中出现在位于中南部平原的马尼托巴省、阿尔伯塔省和萨斯喀彻温省^[43],约一半的焚烧量集中在马尼托巴省。1992年前后,英国每年约产生750万t秸秆,秸秆焚烧率约为50%^[44],约250万t焚烧量来自东英格兰地区^[45]。丹麦可耕面积占国土总面积的62%,冬小麦和春大麦播种面积占总播种面积的60%,每年约产生570万t秸秆,秸秆直接焚烧率约为45%^[46]。

1.2 国内秸秆焚烧污染时空演变特征

在农业发展状况、控制政策、气象和其他自然条件等多种驱动因素的综合影响下,我国秸秆露天燃烧存在显著的区域性、季节性和年际差异性^[11,47-48]。从区域层面看,年秸秆田间焚烧量在1985年前后约为3600万t,以西部地区(四川盆地、关中平原)的稻草、小麦秸秆焚烧和南部地区(广东、广西、福建沿海)的甘蔗枯叶焚烧最为突出,焚烧量占作物总产量的比例分别达90%、90%和20%~30%^[49];2004—2005年,两大秸秆焚烧中心分别为以苏皖鲁豫为核心的东部平原区和以广东、广西、湖南为核心的华南区;2015年前后,在农村生产总值变化驱动影响下,高值排放区域由四川盆地转移至东北和华北平原^[50];到2016—

2017年,东北地区遥感火点数量占全国的79.4%,火点密度是全国的8.6倍^[4],焚烧强度明显升高;2023年,东北地区秸秆焚烧火点数量占全国总数的近7成(69.2%),是我国现今秸秆焚烧的重灾区和第5大霾污染区^[23]。

从季节层面看,秸秆开放燃烧的高发时段主要集中在夏季的6月、秋冬季的10—11月和春季的3—4月^[51]。在高发时段,秸秆焚烧的 $PM_{2.5}$ 排放量占其他人为源排放量的26%,对我国东部地区颗粒物污染高值的贡献超过50%^[52],特别是伴随秋冬季燃煤供暖的影响,使区域污染物排放总量急剧增加。在禁烧政策实施后,2018年,东北平原焚烧高发时段由秋季转向次年春季^[51,53],秋收后的秸秆焚烧对同期大气污染物的贡献率低于10%。从全国层面看,秸秆焚烧量随政策的收紧呈现先增加再减少的趋势。2016—2017年,秸秆露天焚烧 CO_2 年均排放量达到峰值(693.1万t);2018—2020年,下降至571.3万t,平均下降了17.6%^[54]。自2021年以来,我国形成秸秆禁烧和综合多元利用并举新格局,华北、东北和长江中下游地区秸秆综合利用率多年均超过86%,秸秆焚烧管控和资源转化利用成效显著。

1.3 秸秆焚烧背景下的国内外空气污染特征

秸秆焚烧是引发大规模雾霾天气进而导致空气污染的重要原因之一^[55]。焚烧烟雾中包含会严重危害人体健康的 PM_{10} ,多环芳烃、二噁英等有机化合物,以及 NO_x 、CO等^[56]。美国北部地区在秋收季节受秸秆焚烧引发的雾霾灾害影响尤为严重。1950—1970年间,路易斯安那州东南部甘蔗枯叶露天焚烧对该地区大气污染物的排放贡献占比为21%^[57]。1988年,加利福尼亚州秸秆焚烧量占农业焚烧总量的73%,污染物排放总量约为11万t^[58]。印度在2021年秋收季节约有2000万t秸秆被焚烧,秸秆焚烧对城市污染物的平均贡献率约为10%,对首都新德里的贡献率更是高达45%。2023年春季,泰国清迈府受秸秆焚烧和森林大火影响, $PM_{2.5}$ 浓度达 $94.4 \mu g/m^3$,超出泰国空气质量安全标准5倍以上,AQI达到严重污染水平。除燃烧区本地污染累积外,在特定风场影响下,生物质燃烧产生的污染物可通过跨境传输形成覆盖达数千公里的区域性污染过程,其影响范围与燃烧源火点分布高度关联。例如,新加坡等马来半岛国家和印度北部地区受印度尼西亚“烧芭”产生的污染物长距离传输的影响,空

气质量常达到严重污染水平。

在我国,以东北、京津冀和长三角为代表的污染较重区域具有明显的生物质燃烧传输特征^[59-62],表现为 $PM_{2.5}$ 浓度快速上升过程伴随着有机物、 K^+ 浓度的显著上升。华北平原及长三角地区作为重要的秸秆燃烧源区, $PM_{2.5}$ 浓度高值区与火点空间分布高度一致^[54]。徐敬等^[63]采用WRF-Chem化学传输模式模拟秸秆燃烧高发期 $PM_{2.5}$ 浓度的时空演变特征,发现华北地区受山地环绕、海上高压中心和蒙古国东部低压中心等天气系统配置影响,易发生偏南气流主导作用下的污染物跨区域传输。秸秆露天焚烧对华北平原颗粒物浓度的输送贡献大于30%^[64]。环流形势导致西北方向上的太行山-燕山山区一带易出现污染辐合^[65],华北中南部区域常出现持续时间较长(大于3d)、跨区域的连片 $PM_{2.5}$ 重污染天,北京东南部地区在污染严重时段内的 $PM_{2.5}$ 小时浓度增幅可超过40%。近5年(2020—2024年)春季,东北地区在秸秆焚烧时段(3—4月)虽然总体以西南风为主(合计占比约49%),东北风占比偏少(约19%),但东北地区秸秆焚烧跨海传输导致华北地区沿海城市出现 $PM_{2.5}$ 短时严重污染的次数超过10次,对山东地区 $PM_{2.5}$ 小时浓度的贡献可超过50%。

此外,以云南边疆为代表的环境空气较为清洁地区,同样可能受到生物质燃烧污染物的跨区域传输影响^[61]。在偏南气流风场条件下,东南亚地区的生物质燃烧污染气团可通过远距离输送,加重处于下风向的我国华南地区的空气污染程度。张玉洽等^[66]和饶晓琴等^[67]利用NAQPMS、WRF-CAMx和HYSPLIT后向轨迹模式定量评估了缅甸、老挝、越南对我国云南和广西等边境地区的生物质源污染物长距离输送影响,发现其月均贡献率高达43%。

2 国内外秸秆焚烧管控制度及成效

2.1 欧美主要国家秸秆焚烧管控制度

2.1.1 美国秸秆焚烧立法管理进程

早在20世纪50—60年代,美国在秋收季节就已出现由农田秸秆焚烧引起的雾霾灾害问题^[56,68]。为减轻萨克拉门托河谷秋季20万 hm^2 稻草焚烧的危害,加利福尼亚州于1991年最早制定并实施了《稻草减量焚烧法案》,对焚烧面积按

目标年限进行分阶段总量控制和削减,并鼓励综合利用代替焚烧。1999年,美国政府颁布了首个针对农业焚烧管理的指导性文件《农业焚烧政策》(ABP)^[24]。为控制农业焚烧烟雾污染,各州相继出台了相应的农业烟雾管理计划(SMP),经美国环保署(EPA)批准后作为州法律强制执行,包括焚烧授权、烟雾管理组件、公众教育与宣传、监督与执法、实施效果评价等5个具体步骤^[69]。

2.1.2 英国秸秆焚烧立法管理进程

英国的限制露天焚烧政策^[44]始于20世纪80年代后期。1992年前后,英国每年产生约370万t的秸秆焚烧量。由于秸秆焚烧屡禁不止,英国于1993年废止了《农作物残留物(焚烧)条例1991》,并颁布《农作物残留物(焚烧)条例1993》。新条例将农作物残余物限烧更改为禁烧和限烧相结合,明确了禁烧的3类主要农作物残余物,对限烧严格规定了时间、建筑物空间距离和焚烧操作流程,对违反禁烧限烧条例的犯罪行为处以最高5级罚款(对应5000英镑)。

2.1.3 加拿大秸秆焚烧立法管理进程

1993年,针对作物收获季节出现的占比近1/2的区域性严重秸秆焚烧现象^[49],加拿大马尼托巴省最先出台地方性《作物秸秆和牧草焚烧法规》,规定每年的8月1日至11月15日,禁止一切秸秆焚烧;兼顾当地夜间较差的大气烟雾扩散条件,全年禁止夜间焚烧;11月16日到次年7月31日,白天可有计划地开展焚烧活动。经不断修订完善,于2017年5月发布了最新版法规。此外,加拿大于2016年出台了《加拿大司法管辖区关于露天焚烧的指导文件》,将其作为全国性的烟雾管理指导文件。该文件以美国农业焚烧政策为参照,明确规定了包括焚烧时间、分区、授权、违规处罚和安全预防5个方面在内的全国秸秆焚烧管理内容。此外,该文件突出强调焚烧消防安全,明确在焚烧时需配备消防人员和物资;违规处罚以罚款为主,最高可达5万加元。

2.2 亚洲主要国家秸秆焚烧管控制度进程

20世纪80年代中期,中国开始出现大面积秸秆焚烧现象。20世纪90年代末,中国颁布了行政规范性文件《秸秆禁烧和综合利用管理办法》。该纲领性文件明确了秸秆禁烧区的划定方式,提出了实施目标责任制、严格禁烧执法的要求,用以指导开展秸秆禁烧管理和综合利用工作。2008年北京奥运会前夕,禁烧力度不断加大,各

直辖市、省会城市以及副省级城市所辖区域执行全面禁烧规定,西北、西南区域实行重点区域禁烧。2018年,中国部分地区开始探索实施秸秆计划焚烧,如黑龙江省和吉林省率先提出将全省分为秸秆禁烧区和限烧区,利用秸秆焚烧综合气象指数指导有限制地开展焚烧^[70]。

日本采取“疏堵结合”的秸秆焚烧管控方式。1951年《森林法》和2001年《废弃物管理和公共清洁法》规定^[71],除农林渔业生产如整地造林、开垦、烧荒造田等,以及篝火、宗教活动等涉及的废弃物轻微焚烧情形外,禁止一切露天焚烧行为;违规当事人将被处以5年以下有期徒刑或高额罚款,严重者可两者并罚。在森林或者接近森林的原野、荒废地或其他土地进行烧荒时,须经过森林或土地所在地政府部门的许可。在实施焚烧前,地区政府部门根据气象形势研判结论,对焚烧者进行风场扩散条件提示,通知当地消防部门保证消防安全,并依照废弃物“3R”原则开展秸秆资源循环利用。由此,日本稻草焚烧量占秸秆总量的比例在20世纪末逐渐降低至4%左右。

印度、印度尼西亚等国家主要采取处罚措施解决秸秆焚烧问题,尚未形成规范的管理体系和法律规定。

2.3 国内外秸秆焚烧管控成效与进展

监测结果显示,长期有目的地开展秸秆计划焚烧能使焚烧面积与火点数量大幅下降,管控效果显著。POULIOT等^[72]通过卫星遥感分析指出,2014年美国农业秸秆焚烧面积比1999年减少了约297.85万 hm^2 ,较21世纪初期和20世纪90年代中期分别大幅削减了1/2和5/6。MCCARTY等^[73]基于遥感方法,计算出2003—2007年美国本土年均焚烧遥感面积约为20世纪90年代中期的1/3,其中33个州的焚烧面积占各自农作物收获面积的比重低于1%。通过多年来严格的烟雾管控立法执法管理,加拿大马尼托巴省目前只剩约5%的焚烧占比,焚烧现象和烟雾引发的投诉大幅减少。目前,英国等西欧国家的秸秆焚烧问题也已“基本绝迹”^[4]。丹麦持续发展秸秆集中供热技术,通过秸秆发电大幅降低露天焚烧污染的同时,实现了生物质能源的可再生循环利用^[45]。何莹莹等^[74]和何立明等^[75]通过EOS-MODIS卫星遥感数据发现,2014年中国秸秆焚烧火点总数较2005年的降幅达72.9%,2016—2017年较2004—2005年年均火点数减少

35.9%,焚烧规模显著缩小,19个省份的年均降幅超过80%。随着秸秆禁烧限烧管控措施的持续执行,霾等灾害天气明显减少,空气质量明显改善,但也出现了成本增加^[76-77]、矛盾转移、政策落地实施困难等问题。

东北地区是我国秸秆资源最为集中的产区之一,2022年秸秆产量占全国秸秆总资源量的18.1%^[78]。研究显示,火点数量与区域污染程度具有较强相关性。CO和PM_{2.5}是秸秆焚烧过程中排放量最高的两种大气污染物,其排放量月变化呈现集中在春耕前(3—4月)和秋收后(10—11月)的双峰特征。监测数据显示,2020—2024年春季(3—4月),东北地区秸秆焚烧引发的大气重污染过程约为30次。在同期的PM_{2.5}污染地区大气监测结果中,秸秆焚烧类特征物(如K⁺、OC等)的浓度呈现同步升高趋势^[79]。2019年秋季至2024年春季,东北地区春秋PM_{2.5}和CO月均浓度呈现明显的年际波动下降趋势(表1),2024年春季PM_{2.5}和CO月均浓度较2020年同

期分别下降4.7 μg/m³和0.08 mg/m³,2023年秋季PM_{2.5}和CO月均浓度较2019年同期分别下降1.0 μg/m³和0.08 mg/m³。春季K⁺浓度自2021年峰值后,呈现年际波动下降趋势,到2023年出现小幅回升,呈现“V”形变化特征。东北地区禁烧效果虽然显著,但火点强度和数量的阶段性反弹表明秸秆焚烧问题依然严峻。

吉林省2023年新颁布的秸秆全域禁烧工作方案明确规定了火点认定标准,并要求全省可收集秸秆综合利用率达到85%,2024年春季K⁺浓度同比下降。可见,除了更严格的秸秆禁烧政策外,还要提升秸秆资源的“五化”(肥料化、饲料化、燃料化、原料化和基料化)高效综合利用水平。此外,春季PM_{2.5}浓度整体显著高于同年秋季(表1),空气质量相对较差,这是由于受限冬季寒冷漫长的特殊气象和播种条件,东北地区秸秆集中焚烧时段前移至春季,导致区域内多个城市易集中出现连片重度或严重污染天气。因此,要进一步加强春季重点时期的秸秆禁烧管控。

表1 近5年东北地区春秋PM_{2.5}和CO月均浓度变化统计

Table 1 Statistical analysis of monthly average PM_{2.5} and CO concentration variations in spring and autumn in northeast China over the past five years

省份	春季(3—4月)									
	PM _{2.5} /(μg/m ³)					CO/(mg/m ³)				
	2020年	2021年	2022年	2023年	2024年	2020年	2021年	2022年	2023年	2024年
辽宁	40	48	34	30	42	0.77	0.87	0.74	0.81	0.75
吉林	43	36	30	42	35	0.70	0.68	0.60	0.58	0.58
黑龙江	38	34	28	34	30	0.59	0.55	0.54	0.49	0.50
省份	秋季(10—11月)									
	PM _{2.5} /(μg/m ³)					CO/(mg/m ³)				
	2019年	2020年	2021年	2022年	2023年	2019年	2020年	2021年	2022年	2023年
辽宁	39	39	36	35	32	0.92	0.96	0.89	0.87	0.81
吉林	27	29	26	26	27	0.72	0.71	0.62	0.60	0.64
黑龙江	22	22	25	28	26	0.55	0.51	0.55	0.56	0.50

综合来看,秸秆焚烧管控不是一蹴而就的,发达国家的禁烧和限烧规定早于我国且更为严格规范^[23],经过长期的不断研究和完善,农业焚烧问题才逐步受到控制,管控阻力逐步减轻。实施秸秆计划焚烧的根本目的在于通过限制秸秆焚烧规模,将其对空气质量、人体健康、能见度等的不利影响控制在可接受范围内,促使种植者逐步减少直至最终放弃焚烧。从某种程度来看,发达国家的计划焚烧其实是通过严格的管理法规和复杂的申请流程促使露天焚烧行为减少,这对我国的秸秆禁烧管理具有一定的借鉴意义。

3 我国大气污染防治的发展思路及可借鉴的经验启示

3.1 制定焚烧过程标准及推进专项立法研究,健全考核指标和责任评价体系

近10年来,中央及地方各级政府围绕大气污染防治出台了一系列法律、行政法规、部门规章和地方规范性文件等,但相关文件并不以秸秆焚烧治理为重点,因此,我国在秸秆禁烧专项法律法规方面尚存空白,相应的实施和奖罚机制也尚存缺陷。建议从国家层面出台秸秆禁烧专项管理办

法,借鉴美国 SMP 经验,在烟雾敏感和火灾高风险地区设定秸秆焚烧监测点;划定秸秆禁烧区和限烧区,在焚烧重灾区开展计划焚烧试点工作,明确“非禁烧区”许可焚烧和限制焚烧的具体要求及标准规范;出台秸秆焚烧违规积分管理制度,按教育、罚款、不良积分管理、行政拘留、犯罪移交司法机关处理等多级处罚规定,完善违法处罚规定;强化省、市、县三级工作机制,设立火点数、综合利用率等考核指标,形成焚烧管控责任体系。

3.2 加强污染物扩散特性研究,针对重点管控地区因地制宜制定限烧量化指标

随着我国禁烧管理制度的严格落实,黄淮海、华南等地区秸秆焚烧现象明显好转,目前以晋鲁豫、东三省等地区最为突出^[4]。在风场这一污染物传输扩散气象动力因子的作用下,叠加秋冬季供暖、大气静稳等不利扩散条件的影响后,跨区域传输叠加本地生成累积使得东北地区及位于其下风向的京津冀地区霾污染严重^[80-81]。因此,可根据不同区域的地形地貌、人口密度和季风特点,调整人为可控因素(焚烧率和焚烧时长),优化污染源排放强度,制定阶段性控制焚烧量的计划表,在未全境禁烧的省份实行分级分区的时日限量焚烧和分阶段削减制度。

1) 利用秸秆焚烧气象指数分级方法进行烟雾扩散能力评价。基于风场驱动下的区域间污染物传输扩散特性,面向多种秸秆计划性烧除,建立焚烧排放清单,以区域为基本单元建立并发展秸秆焚烧条件下的气象与空气质量耦合数值模拟方法。基于防火安全、大气扩散、空气质量和秸秆干燥度 4 个主要因子,综合确定秸秆焚烧气象指数计算公式,并统一标准。例如,东北平原地区在春秋季节秸秆露天焚烧时段以较强偏西南风为主(占比 49%),污染生成和积累速率受本地排放量和气象条件影响较大,因而需提前预测研判适宜焚烧的大气扩散条件(无逆温层、偏西北气流、风速较强等),提高风场指数阈值,制定相应的污染可排放量级。在华北平原、四川盆地等环山和盆地地区^[82],常伴随风场辐合影响下的上游周边地区污染物山前输送堆积,风速较小时不易扩散,易出现长时间、大范围区域性污染过程,因而需重点研判潜在烟雾影响区域,明确焚烧时日,鼓励以白天焚烧为主,并提高温度层结指数阈值。整体上,需通过区域联防联控,强化上风向区域秸秆焚烧源头管控,以减轻污染物的跨区域传输影响。

2) 根据各地秸秆焚烧防控实际需要,因地制宜分级设置秸秆焚烧气象指数和许可指数,并依此授权焚烧。根据秸秆焚烧等级,分级设定焚烧限制条件或要求。我国焚烧许可指数与地区人口密度成正比,与地形高程成反比,呈现自南向北、自西向东收严的空间分布格局。严格设定各许可焚烧等级对应的限烧条件或要求,加密焚烧时日等级划分(3~5个),分级管理焚烧规模。对于人口密度较低地区(东北和西北),可适当放宽许可焚烧指数分级要求。对于火点相对较少的地区(华中、华南、西南),可优化许可焚烧区域的焚烧技术,采取少量多次的方式,避免集中时段、集中区域焚烧。对于焚烧量较大的地区(华北、东北),可强化焚烧替代手段研究和空气质量实时监测预警;严控秸秆就地焚烧,分级限制本地许可焚烧量和焚烧面积;强化省、市、县三级联动,加强焚烧授权管理。整体上,需对标空气质量持续改善行动计划设定的年限目标,分阶段明确最大许可焚烧量。

3.3 禁疏结合、以用促禁,加强焚烧规范化管控和秸秆资源化利用

将由上到下的政府组织秸秆焚烧方式和由下到上的农户申请秸秆焚烧方式相结合,兼顾农户秸秆焚烧需求和空气质量管控目标,可大幅降低防控成本,缓解防控压力。黑龙江省作为粮食总产量第一、秸秆年残余量约 1.1 亿 t 的高存留大省,秸秆收集总量的 30% 以露天焚烧方式进行处理^[83],其余 70% 以综合利用(20%)和农户家用燃烧(50%)方式进行处理。东三省等严寒地区低温少雨,秸秆还田困难、焚烧污染严重、其他利用方式不足等问题突出,亟须在限烧区内规范焚烧行为,在禁烧区内强化网格化、精细化监管,加强秸秆基料化、肥料化和饲料化综合利用,实现烟雾污染影响最小化^[84]。

1) 在限烧区实施焚烧授权制度。根据风向、地形等因素综合评判申请焚烧时日的烟雾扩散程度,开展焚烧效果及空气质量影响评价,定量评估同期重污染时段内的焚烧行为对大气首要污染物浓度的贡献率,以推断焚烧时段叠加同期气象条件的影响后可能达到的空气污染级别,从而在提前发布大气污染预警信息的同时,最大程度降低污染排放对本地空气质量的影响。同时,做到焚烧行为可溯源,切实做好秸秆露天焚烧大气污染防治工作。

2)在禁烧区完善监督巡查机制。建立重点地区“蓝天卫士”网格化监管信息平台 and 数据库,加强空气质量预测预警。在小风、逆温等静稳不利大气扩散条件下,严格禁止在烟雾敏感地区下风向安全距离内开展焚烧。此外,在华北平原地区受持续强偏南风、偏东风控制影响的天气条件下,重点加强长江中游城市群、长三角等上风向地区的禁烧管控。在焚烧高峰时期开展专项巡查,加强粮食主产区春耕前禁烧管控,加大违法处罚力度。

3)以绿色生态为导向,制定秸秆综合利用管理条例或办法。从政府层面加大秸秆基料化企业扶持力度,引导组建秸秆能源化企业,加大对较高利用率耕种农膜的资金和资源投入力度,推进严寒地区以秸秆堆肥间接还田、生物质燃料加工等焚烧替代方式开展秸秆资源循环利用,完善秸秆收储运体系,发展用于供热发电的新型秸秆资源。

参考文献 (References):

[1] YAN X Y, OHARA T, AKIMOTO H. Bottom-Up Estimate of Biomass Burning in Chinese Mainland [J]. *Atmospheric Environment*, 2006, 40(27): 5 262-5 273.

[2] STREETS D G, YARBER K F, WOO J H, et al. Biomass Burning in Asia: Annual and Seasonal Estimates and Atmospheric Emissions [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2003, 17(4): 1099.

[3] YIN L F, DU P, ZHANG M S, et al. Estimation of Emissions from Biomass Burning in China (2003-2017) Based on MODIS Fire Radiative Energy Data [J]. *Biogeosciences*, 2019, 16(7): 1 629-1 640.

[4] 覃诚, 毕于运, 高春雨, 等. 美英加农作物秸秆计划焚烧法规及其经验启示 [J]. *世界农业*, 2018(11): 65-70.

QIN Cheng, BI Yuyun, GAO Chunyu, et al. Regulations on Planned Burning of Crop Straw in the United States, Britain and Canada and Its Experience and Enlightenment [J]. *World Agriculture*, 2018 (11): 65-70.

[5] 王俊芳. 生物质秸秆露天焚烧污染物排放特性及排放规模研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2017.

[6] 钟方潜. 秸秆焚烧对区域城市空气质量影响的模拟分析 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2016.

[7] 丁焕峰, 孙小哲. 禁烧政策真的有效吗——基于农户与政府秸秆露天焚烧问题的演化博弈分析 [J]. *农业技术经济*, 2017(10): 79-92.

DING Huanfeng, SUN Xiaozhe. Is the Policy of Banning Burning Really Effective—Based on the Evolutionary Game Analysis of Open Burning of Straw Between Farmers and the Government [J]. *Journal of Agrotechnical Economics*, 2017(10): 79-92.

[8] 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, 25(4): 389-393.

CAO Guoliang, ZHANG Xiaoye, WANG Dan, et al. Inventory of Atmospheric Pollutants Discharged from Biomass Burning in Chinese Mainland [J]. *China Environmental Science*, 2005, 25(4): 389-393.

[9] 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 Tiantian, CHEN Liangfu, TAO Jinhua, 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.

[10] WU J, KONG S F, WU F Q, et al. Estimating the Open Biomass Burning Emissions in Central and Eastern China from 2003 to 2015 Based on Satellite Observation [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2018, 18(16): 11 623-11 646.

[11] ZHOU Y, XING X F, LANG J L, et al. A Comprehensive Biomass Burning Emission Inventory with High Spatial and Temporal Resolution in China [J]. *Atmospheric Chemistry & Physics*, 2017, 17(4): 2 839-2 864.

[12] KE H B, GONG S L, HE J J, et al. Spatial and Temporal Distribution of Open Bio-Mass Burning in China from 2013 to 2017 [J]. *Atmospheric Environment*, 2019, 210: 156-165.

[13] WANG J Y, WANG X F. A Triumph of Reducing Carbon Emission by Banning Open Straw Burning [J]. *Science Bulletin*, 2023, 68(1): 18-20.

[14] SINGH D, DHIMAN S K, KUMAR V, et al. Crop Residue Burning and Its Relationship Between Health, Agriculture Value Addition, and Regional Finance [J]. *Atmosphere*, 2022, 13(9): 1405.

[15] HAN K M, LEE B T, BAE M S, et al. Crop Residue Burning Emissions and the Impact on Ambient Particulate Matters over South Korea [J]. *Atmosphere*, 2022, 13(4): 559.

[16] LAI W Y, LI S J, LI Y N, et al. Air Pollution and Cognitive Functions: Evidence from Straw Burning in China [J]. *American Journal of Agricultural*

- Economics, 2022, 104(1): 190-208.
- [17] 张丰, 张澜, 吴昕旻. 低碳背景下农村秸秆焚烧处理处置及其资源化综合利用[J]. 农村实用技术, 2021(12): 127-128.
- ZHANG Feng, ZHANG Lan, WU Xinhao. Disposal and Comprehensive Utilization of Rural Straw Incineration Under the Background of Low Carbon [J]. Rural Practical Technology, 2021(12): 127-128.
- [18] 杜鑫. 基于 MODIS 数据的安徽农村秸秆焚烧现状监测[J]. 农业与技术, 2021, 41(2): 46-50.
- DU Xin. Monitoring of Straw Burning in Rural Areas of Anhui Province Based on MODIS Data [J]. Agriculture and Technology, 2021, 41(2): 46-50.
- [19] 申小凡, 张刚. 中国秸秆露天焚烧碳排放量统计清单[C]//中国环境科学学会. 中国环境科学学会 2023 年科学技术年会论文集(一). 北京, 2023: 264-276.
- [20] 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.
- [21] ZHANG Y S, SHAO M, LIN Y, et al. Emission Inventory of Carbonaceous Pollutants from Biomass Burning in the Pearl River Delta Region, China [J]. Atmospheric Environment, 2013, 76: 189-199.
- [22] 方冬青, 魏永杰, 黄伟, 等. 北京市 2014 年 10 月重霾污染特征及有机碳来源解析[J]. 环境科学研究, 2016, 29(1): 12-19.
- FANG Dongqing, WEI Yongjie, HUANG Wei, et al. Characterization and Source Apportionment of Organic Carbon During a Heavy Haze Episode in Beijing in October 2014 [J]. Research of Environmental Sciences, 2016, 29(1): 12-19.
- [23] 朱莉娜. 绥化市大气污染特征及重污染成因研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.
- [24] SEILER W, CRUTZEN P J. Estimates of Gross and Net Fluxes of Carbon Between the Biosphere and the Atmosphere from Biomass Burning [J]. Climatic Change, 1980, 2(3): 207-247.
- [25] U. S. Environmental Protection Agency (USEPA). Inventory of U. S. Greenhouse Gas Emissions and Sinks: 1990-2001 [R]. Washington: USEPA, 2003.
- [26] STANISH D I. Will the Takings Clause Eclipse Idaho's Right-to-Burn Act? [J]. Idaho Law Review, 2004, 40: 63-66.
- [27] SMIL V. Crop Residues: Agriculture's Largest Harvest: Crop Residues Incorporate More Than Half of the World's Agricultural Phytomass [J]. BioScience, 1999, 49(4): 299-308.
- [28] 吴迪. 秸秆焚烧治理的法律对策研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2012.
- [29] 陈蒙蒙. 秸秆焚烧的法律规制[D]. 苏州: 苏州大学, 2014.
- [30] 赵祥宇. 秸秆禁烧管理研究——以苏北 M 镇政府为例[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2016.
- [31] 陈明波, 汪玉璋, 杨晓东, 等. 秸秆能源化利用技术综述[J]. 江西农业学报, 2014, 26(12): 66-69, 73.
- CHEN Mingbo, WANG Yuzhang, YANG Xiaodong, et al. Summary of Straw Energy Utilization Technology [J]. Acta Agriculturae Jiangxi, 2014, 26(12): 66-69, 73.
- [32] 刘长永, 李玉琴, 胡洪, 等. 我国当前秸秆综合利用方式浅析[J]. 四川农业科技, 2018(5): 78-79.
- LIU Changyong, LI Yuqin, HU Hong, et al. Analysis on the Current Comprehensive Utilization Mode of Straw in China [J]. Sichuan Agricultural Science and Technology, 2018(5): 78-79.
- [33] 王艳分. 美国农业焚烧政策探析[J]. 鄂州大学学报, 2014, 21(11): 39-40, 43.
- WANG Yanfen. Analysis of American Agricultural Incineration Policy [J]. Journal of Ezhou University, 2014, 21(11): 39-40, 43.
- [34] 刘芳, 王艳分. 农作物秸秆焚烧的环境法律政策研究[J]. 石家庄经济学院学报, 2014, 37(4): 96-99.
- LIU Fang, WANG Yanfen. Study on the Environmental Legal Policy of Agricultural Burning [J]. Journal of Shijiazhuang University of Economics, 2014, 37(4): 96-99.
- [35] 刘树林, 马丽文. 农村秸秆焚烧带来的危害及如何综合利用[J]. 农村实用技术, 2023(3): 116-117.
- LIU Shulin, MA Liwen. Harm Caused by Burning Straw in Rural Areas and How to Comprehensively Utilize It [J]. Rural Practical Technology, 2023(3): 116-117.
- [36] 曹国良, 张小曳, 王亚强, 等. 中国区域农田秸秆露天焚烧排放量的估算[J]. 科学通报, 2007, 52(15): 1 826-1 831.
- CAO Guoliang, ZHANG Xiaoye, WANG Yaqiang, et al. Estimation of Emissions from Open-Burning of Farmland Straw in China Region [J]. Chinese Science Bulletin, 2007, 52(15): 1 826-1 831.
- [37] 陆炳, 孔少飞, 韩斌, 等. 2007 年中国大陆地区生物质燃烧排放污染物清单[J]. 中国环境科学, 2011, 31(2): 186-194.
- LU Bing, KONG Shaofei, HAN Bin, et al. Inventory of Atmospheric Pollutants Discharged from Biomass Burning in Chinese Mainland in 2007 [J]. China

- Environmental Science, 2011, 31(2):186-194.
- [38] 何敏,王幸锐,韩丽,等.四川省秸秆露天焚烧污染物排放清单及时空分布特征[J].环境科学,2015,36(4):1208-1216.
HE Min, WANG Xingrui, HAN Li, et al. Emission Inventory of Crop Residues Field Burning and Its Temporal and Spatial Distribution in Sichuan Province [J]. Environmental Science, 2015, 36(4):1208-1216.
- [39] 李建峰,宋宇,李蒙蒙,等.江汉平原秸秆焚烧污染物排放的估算[J].北京大学学报(自然科学版),2015,51(4):647-656.
LI Jianfeng, SONG Yu, LI Mengmeng, et al. Estimating Air Pollutants Emissions from Open Burning of Crop Residues in Jiangnan Plain[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2015, 51(4):647-656.
- [40] 付乐,王姗姗,武志立,等.河南省秸秆露天焚烧大气污染物排放量的估算与分析[J].农业环境科学学报,2017,36(4):808-816.
FU Le, WANG Shanshan, WU Zhili, et al. Estimation of Air Pollutant Emissions from Straw Residues Open Burning in Henan Province [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2017, 36(4):808-816.
- [41] 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):3280-3287.
LI Lili, WANG Kun, JIANG Junqiu, 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):3280-3287.
- [42] KORONTZI S, MCCARTY J, LOBODA T, et al. Global Distribution of Agricultural Fires in Croplands from 3 Years of Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) Data [J]. Global Biogeochemical Cycles, 2006, 20(2):GB2021.
- [43] CHEN Y, TESSIER S, CAVERS C, et al. A Survey of Crop Residue Burning Practices in Manitoba [J]. Applied Engineering in Agriculture, 2005, 21(3):317-323.
- [44] 张贞奇.英国农作物秸秆综合利用[J].世界农业,1992(2):39.
ZHANG Zhenqi. Comprehensive Utilization of Crop Straw in Britain [J]. World Agriculture, 1992(2):39.
- [45] BULLEN E R. Burning Cereal Crop Residues in England [R]. England: Controller of Experiments, Ministry of Agriculture, Fisheries and Food, 1973.
- [46] 邹桂金.丹麦的秸秆供热[J].可再生能源,1990,8(4):23-24.
ZOU Guijin. Straw Heating in Denmark [J]. Renewable Energy, 1990, 8(4):23-24.
- [47] XU Y Q, HUANG Z J, JIA G L, et al. Regional Discrepancies in Spatiotemporal Variations and Driving Forces of Open Crop Residue Burning Emissions in China [J]. Science of the Total Environment, 2019, 671:536-547.
- [48] WU J, KONG S, WU F, et al. The Moving of High Emission for Biomass Burning in China: View from Multi-year Emission Estimation and Human-Driven Forces [J]. Environment International, 2020, 142:105812.
- [49] YEVICH R, LOGAN J A. An Assessment of Biofuel Use and Burning of Agricultural Waste in the Developing World [J]. Global Biogeochemical Cycles, 2003, 17(4):1095.
- [50] 吴剑.中国生物质燃烧常规污染物和关键组分排放清单构建及应用研究[D].武汉:中国地质大学,2021.
- [51] 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].哈尔滨: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.
- [52] ZHANG L B, LIU Y Q, HAO L. Contributions of Open Crop Straw Burning Emissions to PM_{2.5} Concentrations in China [J]. Environmental Research Letters, 2016, 11(1):014014.
- [53] 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 Huiqin, ZHANG Lijuan, LI Qing, et al. Study on Open Burning of Crop Residues and Its Emissions of PM_{2.5} in Northeast China Based on Satellite Remote Sensing [J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2018, 39(4):59-66.
- [54] 刘慧琳,汪子博,涂智鹏,等.基于多源卫星表征的中国秸秆露天燃烧CO₂排放特征及驱动因子分析[J].环境科学学报,2024,44(2):261-272.
LIU Huilin, WANG Zibo, TU Zhipeng, et al. CO₂ Emission Characteristics and Driving Factors of Open Crop Straw Burning in China Based on Multi-source Satellite Observation [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2024, 44(2):261-272.
- [55] 果实.秸秆焚烧对北方雾霾天气产生的影响及相

- 应解决对策[J]. 农场经济管理, 2014(3):62-63.
- GUO Shi. Influence of Straw Burning on Haze Weather in Northern China and Corresponding Countermeasures[J]. Farm Economic Management, 2014(3):62-63.
- [56] 毕于运, 王亚静. 经验与启示——发达国家农作物秸秆计划焚烧与综合利用[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2017.
- [57] PARKER V C. The Louisiana Air Control Program [C]//Conference on Aspects of Air Pollution Control. Ruston, LA: Louisiana Tech University, 1970:8-9.
- [58] JENKINS B M, TURN S Q, WILLIAMS R B. Atmospheric Emissions from Agricultural Burning in California: Determination of Burn Fractions, Distribution Factors, and Crop-Specific Contributions [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 1992, 38(4):313-330.
- [59] 翟晓瑶, 曹芳, 张世春, 等. 东北三江平原地区生物质燃烧对 $PM_{2.5}$ 中 WSOC 吸光能力的影响[J]. 生态环境学报, 2019, 28(3):523-530.
- ZHAI Xiaoyao, CAO Fang, ZHANG Shichun, et al. Contribution of Biomass Burning on Light Absorption Property of Water Soluble Organic Carbon in $PM_{2.5}$ in Sanjiang Plain, Northeast China [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2019, 28(3):523-530.
- [60] 冯加良, 毛文文, 荆亮, 等. 上海不同功能区夏季 $PM_{2.5}$ 中生物质燃烧贡献的解析[J]. 环境科学学报, 2019, 39(11):3 677-3 684.
- FENG Jialiang, MAO Wenwen, JING Liang, et al. Interpretation on Biomass Burning Contributions to the Summer $PM_{2.5}$ at Different Sites in Shanghai[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2019, 39(11):3 677-3 684.
- [61] FU J S, HSU N C, GAO Y, et al. Evaluating the Influences of Biomass Burning During 2006 BASE-ASIA; A Regional Chemical Transport Modeling[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2012, 12(9):3 837-3 855.
- [62] TSAY S C, HSU N C, LAU W K M, et al. From BASE-ASIA Toward 7-SEAS: A Satellite-Surface Perspective of Boreal Spring Biomass-Burning Aerosols and Clouds in Southeast Asia [J]. Atmospheric Environment, 2013, 78:20-34.
- [63] 徐敬, 寇星霞, 李梓铭. 秸秆燃烧排放对北京及其周边地区 $PM_{2.5}$ 浓度影响的数值模拟[J]. 气候与环境研究, 2018, 23(5):587-595.
- XU Jing, KOU Xingxia, LI Ziming. Modeling the Impact of Emissions from Crop Residue Burning on $PM_{2.5}$ Concentration in Beijing and Its Surrounding Areas [J]. Climatic and Environmental Research, 2018, 23(5):587-595.
- [64] LONG X, TIE X X, CAO J J, et al. Impact of Crop Field Burning and Mountains on Heavy Haze in the North China Plain: A Case Study [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2016, 16(15):9 675-9 691.
- [65] 侯露, 朱媛媛, 刘冰, 等. 冬奥会期间京津冀及周边区域空气质量时空特征、气象影响和减排效果评估[J]. 环境科学, 2023, 44(11):5 899-5 914.
- HOU Lu, ZHU Yuanyuan, LIU Bing, et al. Analysis of Spatio-Temporal Characteristics of Air Quality, Meteorological Impact, and Emission Reduction Effect During the Winter Olympics in Beijing-Tianjin-Hebei and Its Surrounding Areas [J]. Environmental Science, 2023, 44(11):5 899-5 914.
- [66] 张玉洽, 杨迎春, 李杰, 等. 东南亚生物质燃烧对我国春季 $PM_{2.5}$ 质量浓度影响的数值模拟[J]. 环境科学研究, 2016, 29(7):952-962.
- ZHANG Yuqia, YANG Yingchun, LI Jie, et al. Modeling the Impacts of Biomass Burning in Southeast Asia on $PM_{2.5}$ over China in Spring [J]. Research of Environmental Sciences, 2016, 29(7):952-962.
- [67] 饶晓琴, 张碧辉, 江琪, 等. 东南亚生物质燃烧对云南边境污染传输影响[J]. 中国环境科学, 2023, 43(9):4 459-4 468.
- RAO Xiaoqin, ZHANG Bihui, JIANG Qi, et al. Effects of Biomass Burning in Southeast Asia on Pollution Transport in Yunnan Border Area [J]. China Environmental Science, 2023, 43(9):4 459-4 468.
- [68] BRANDT C. Stafford. Agricultural Burning [J]. Journal of the Air Pollution Control Association, 1966, 16(2):59-62.
- [69] 覃诚, 毕于运, 高春雨, 等. 美国农业焚烧管理对中国秸秆禁烧管理的启示[J]. 资源科学, 2018, 40(12):2 382-2 391.
- QIN Cheng, BI Yuyun, GAO Chunyu, et al. Enlightenment of the U.S. Agricultural Burning Management on Straw Burning Management in China [J]. Resources Science, 2018, 40(12):2 382-2 391.
- [70] 姚俊英, 于敏, 时一文. 秸秆焚烧气象指数计算方法研究[J]. 黑龙江农业科学, 2018(2):16-19.
- YAO Junying, YU Hongmin, SHI Yiwen. Research of Straw Burning Meteorological Index Calculation Method [J]. Heilongjiang Agricultural Sciences, 2018(2):16-19.
- [71] 王亚静. 美国、日本真的可以随便烧秸秆吗? [J].

- 湖南农业,2023(7):33.
- WANG Yajing. Can the United States and Japan Really Burn Straw Casually? [J]. Hunan Agriculture,2023(7):33.
- [72] POULIOT G, RAO V, MCCARTY J L, et al. Development of the Crop Residue and Rangeland Burning in the 2014 National Emissions Inventory Using Information from Multiple Sources[J]. Journal of the Air & Waste Management Association,2017,67(5):613-622.
- [73] MCCARTY J L, KORONTZI S, JUSTICE C O, et al. The Spatial and Temporal Distribution of Crop Residue Burning in the Contiguous United States[J]. Science of the Total Environment, 2009, 407(21):5701-5712.
- [74] 何莹莹,杨路云,王逸姣. 我国秸秆焚烧的现状分析及建议[J]. 四川农业科技,2015(8):9-11.
HE Yingying, YANG Luyun, WANG Yijiao. Analysis and Suggestions on the Current Situation of Straw Incineration in China [J]. Sichuan Agricultural Science and Technology,2015(8):9-11.
- [75] 何立明,王文杰,王桥,等. 中国秸秆焚烧的遥感监测与分析[J]. 中国环境监测,2007,23(1):42-50.
HE Liming, WANG Wenjie, WANG Qiao, et al. Evaluation of the Agricultural Residues Burning Reduction in China Using MODIS Fire Product [J]. Environmental Monitoring in China,2007,23(1):42-50.
- [76] 梅付春. 秸秆焚烧污染问题的成本-效益分析——以河南省信阳市为例[J]. 环境科学与管理,2008,33(1):30-32,37.
MEI Fuchun. Cost-Benefit Analysis of Straw-Burning Pollution [J]. Environmental Science and Management,2008,33(1):30-32,37.
- [77] 邬莉,陈静,朱晓东,等. 农村秸秆焚烧的原因及对策研究[J]. 中国人口·资源与环境,2001,11(增刊1):111-113.
WU Li, CHEN Jing, ZHU Xiaodong, et al. Study on the Causes and Countermeasures of Straw Burning in Rural Areas [J]. China Population, Resources and Environment,2001,11(S1):111-113.
- [78] 刘俊杰,严晓斌,张美怡,等. 中国农作物秸秆资源产量分布及利用分析[J/OL]. 农业资源与环境学报,2024:1-13. (2024-06-17) [2024-07-01]. <https://link.cnki.net/doi/10.13254/j.jare.2024.0184>.
LIU Junjie, YAN Xiaobin, ZHANG Meiyi, et al. Analysis of Yield Distribution and Utilization of Crop Straw Resources in China [J/OL]. Journal of Agricultural Resources and Environment,2024:1-13. (2024-06-17) [2024-07-01]. <https://link.cnki.net/doi/10.13254/j.jare.2024.0184>.
- [79] 王洋,董长青. 生物质燃烧和热解中钾的释放规律研究进展[J]. 化工进展,2020,39(4):1292-1301.
WANG Yang, DONG Changqing. Release of K During Biomass Combustion and Pyrolysis: A Review [J]. Chemical Industry and Engineering Progress,2020,39(4):1292-1301.
- [80] 程良晓,范萌,陈良富,等. 秋季秸秆焚烧对京津冀地区霾污染过程的影响分析[J]. 中国环境科学,2017,37(8):2801-2812.
CHENG Liangxiao, FAN Meng, CHEN Liangfu, et al. Effects on the Haze Pollution from Autumn Crop Residue Burning over the Jing-Jin-Ji Region [J]. China Environmental Science, 2017, 37(8):2801-2812.
- [81] 杜亚彬,赵红梅,张学磊,等. 基于 WRF-CMAQ 评估秸秆焚烧对区域空气质量的影响[J]. 中国环境科学,2022,42(12):5578-5588.
DU Yabin, ZHAO Hongmei, ZHANG Xuelei, et al. Evaluation of the Impacts of Straw Burning Ban on Air Quality Based on WRF-CMAQ [J]. China Environmental Science,2022,42(12):5578-5588.
- [82] 杨云芸,唐杰,王璐,等. 湖南省大气污染特征及气象影响分析[J]. 中国环境监测,2024,40(1):79-86.
YANG Yunyun, TANG Jie, WANG Lu, et al. Analysis of Air Pollution Characteristics and Meteorological Impact in Hunan Province [J]. Environmental Monitoring in China,2024,40(1):79-86.
- [83] 李成钢,程金灿,李艳,等. 多措并举推进秸秆综合利用——黑龙江秸秆综合利用与露天焚烧情况调研[J]. 环境经济,2018(21):38-41.
LI Chenggang, CHENG Jincan, LI Yan, et al. Promoting Comprehensive Utilization of Straw by Taking Various Measures—Investigation on Comprehensive Utilization of Straw and Open Burning in Heilongjiang Province [J]. Environmental Economy,2018(21):38-41.
- [84] 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):4573-4585.