

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

长江经济带PM_{2.5}空间异质性和驱动因素的地理探测

王丽丽, 刘笑杰, 李丁, 孙颖琦



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年3月

第43卷 第3期

Vol.43 No.3

目次

2000~2020年天津PM_{2.5}质量浓度演变及驱动因子分析 蔡子颖, 郝团, 韩素芹, 唐颖潇, 杨旭, 樊文雁, 姚青, 邱晓滨(1129)

天津市PM_{2.5}-O₃复合污染特征及来源分析 肖致美, 徐虹, 高璟寰, 蔡子颖, 毕温凯, 李鹏, 杨宁, 邓小文, 戴运峰(1140)

基于随机森林模型的武汉市城区大气PM_{2.5}来源解析 张志豪, 陈楠, 祝波, 陶卉婷, 成海容(1151)

华北南部重污染城市周边区域二次气溶胶的化学特征及来源解析 任秀龙, 胡伟, 吴春苗, 胡偲豪, 高娜娜, 张崇崇, 岳亮, 王金喜, 樊景森, 牛红亚(1159)

“大气十条”实施结束川南城市群秋季霾污染过程中水溶性离子特征 吴安南, 黄小娟, 何仁江, 李金建, 叶秋麟, 吴涛, 肖智丹, 刘子锐, 王跃思, 张小玲, 张军科(1170)

郑州市典型污染过程PM₁₀中重金属浓度、来源及健康风险评估 翟诗婷, 王申博, 张栋, 赵孝因, 杨洁茹, 刘洋, 陈红阳, 张瑞芹(1180)

长江经济带PM_{2.5}空间异质性和驱动因素的地理探测 王丽丽, 刘笑杰, 李丁, 孙颖琦(1190)

长三角地区PM_{2.5}浓度对土地利用/覆盖转换的空间异质性响应 周丽霞, 吴涛, 蒋国俊, 张建珍, 濮励杰, 徐飞, 解雪峰(1201)

“2+26”城市春节和元宵节期间污染特征、气象影响和预报回顾分析 朱媛媛, 王晓斐, 汪巍, 刀谔, 王帅, 陈善荣(1212)

基于小波变换的山西省PM_{2.5}污染特征及影响因素 张可可, 胡冬梅, 闫雨龙, 彭林, 段小琳, 尹浩, 王凯, 邓萌杰(1226)

中国地表臭氧浓度估算及健康影响评估 赵楠, 卢毅敏(1235)

湖南省臭氧污染基本特征分析及长期趋势变化主控因素识别 刘妍妍, 杨雷峰, 谢丹平, 泽仁央宗, 黄志烟, 杨俊, 赵鹏, 韩静磊, 贾文超, 袁自冰(1246)

山东半岛近地面O₃浓度时空变化及潜在源区解析 李乐, 刘旻霞, 肖仕锐, 王思远, 米佳乐(1256)

COVID-19疫情期间雄安新区VOCs的变化特征、臭氧生成潜势及来源解析 刘新军, 王淑娟, 刘程, 范莉茹, 付翠轻, 齐莹, 宿文康(1268)

淄博市城区臭氧超标期间的VOCs污染特征与来源解析 王帅, 王秀艳, 杨文, 王雨燕, 白瑾丰, 程颖(1277)

淄博市夏季城区与背景点VOCs污染特征比较 秦涛, 徐勃, 王信梧, 李丽明, 杨文, 王晓丽, 耿春梅(1286)

四川省餐饮源挥发性有机物组分特征和清单 钱骏, 韩丽, 陈军辉, 王斌, 姜涛, 徐晨曦, 李英杰, 王成辉, 王波(1296)

餐饮源气相与颗粒相多环芳烃排放特征 李源速, 吴爱华, 童梦雪, 栾胜基, 李鹭(1307)

堆肥厂不同工作区空气真菌的多样性与群落结构 于奥园, 邢礼军, 孙兴滨, 仇天雷, 王旭明, 高敏(1315)

城市扬尘污染主要成因与精准治尘思路 李廷昆, 冯银厂, 毕晓辉, 张裕芬, 吴建会(1323)

黄河干流水质评价与时空变化分析 刘彦龙, 郑易安(1332)

典型山地城市河流营养元素空间分布特征及影响因素分析:以重庆市清水溪为例 王超, 叶秋, 贾伯阳, 何文战, 党超军, 黄焱, 杜浪(1346)

三峡库区支流的河-湖两态及其对沉积物不同形态磷含量的影响 黄伟, 张研, 罗晓佼, 张磊(1356)

派河及其支流溶解性有机质分子组成特征 詹亚, 尹浩, 冯景伟, 冯艾荣, 胡艳云, 张刘, 郑刘根(1365)

粤港澳大湾区典型潮间带环境多介质中Cd形态空间分布特征及其影响因素 崔新月, 莫武秋, 廖建波(1375)

骆马湖及主要入湖河流表层水体中抗生素的赋存特征及风险评估 龚润强, 赵华璋, 高占欣, 胡冠九, 卜元卿, 张圣虎, 邱惠(1384)

宁夏第三排水沟中抗生素的污染特征与生态风险评估 李富娟, 高礼, 李凌云, 卜兰香, 陶红, 杨桂钦(1394)

百年来北方湖泊沉积物PAHs的变化特征及其对人类活动的响应 龚雄虎, 赵中华, 丁琪琪, 张路, 姚书春, 薛滨(1404)

长江流域河流和湖库的浮游细菌群落差异 胡愈忻, 张静, 黄杰, 段春建, 李天翠, 刘威, 王英才, 胡圣(1414)

河套平原灌溉间隙期乌梁素海水体细菌群落结构特征 史玉娇, 李文宝, 张博尧, 姚国旺, 史小红(1424)

不同空间尺度的景观结构对袁河浮游细菌群落的影响 舒旺, 王鹏, 丁明军, 张华, 黄高翔, 聂明华(1434)

鄱阳湖白鹤保护区微塑料表面微生物群落结构特征 刘淑丽, 简敏菲, 邹龙, 胡启武(1447)

微塑料对变形杆菌生物膜生长发育的影响 陶辉, 戚怡婷, 于多, 杨兰, 顾颖, 厉彦辉(1455)

乌梁素海低密度微塑料聚合物沉降规律 刘禹, 史小红, 张生, 郝若男, 孙标, 赵胜男(1463)

老化前后微塑料对富里酸的吸附 宋亚丽, 俞娅, 郑磊, 汪华, 朱文芳(1472)

天津市滨海河流N₂O扩散通量及控制因子 汤梦瑶, 胡晓康, 王洪伟, 王云仓, 常素云, 王松庆, 钟继承(1481)

铁矿石和生物炭添加对潜流人工湿地污水处理效果和温室气体排放及微生物群落的影响 陈鑫童, 郝庆菊, 熊艳芳, 胡剑, 江长胜(1492)

降雨径流污染风险等级识别与优化方法 齐小天, 张质明, 赵鑫, 胡文翰, 刘迪(1500)

基于贝叶斯网络的给水管网消毒副产物生成因素分析 江杉杉, 王臻宇, 高权, 杨愿愿, 高方舟, 华佩, 应光国(1512)

聚硫代酰胺修饰活性炭对Au(III)的选择性吸附效果与机制 赵文金, 张顺, 安晓强, 兰华春, 刘会娟, 曲久辉(1521)

F/M对活性污泥微生物生态网络的影响 张冰, 孙晨翔, 文湘华(1529)

城乡融合区土壤元素地球化学特征与源解析:以天府新区青龙片区为例 刘书准, 王德伟, 施泽明, 唐亮, 章凤英, 廖程, 李晓雨, 徐文斌(1535)

基于总量与形态的矿区周边土壤重金属生态风险与健康风险评估 王蕊, 陈楠, 张二喜(1546)

湖南锡矿山周边土壤-农作物系统镉迁移转换特征及污染评价 张龙, 宋波, 黄凤艳, 肖乃川, 顿梦杰(1558)

生物炭负载氧化石墨烯对离子型稀土土壤中重金属的阻控效应 杨士, 刘祖文, 龙培, 毕永顺, 林苑, 左华伟(1567)

溶解性有机质强化棉花修复镉污染土壤 闵涛, 罗彤, 陈丽丽, 茹思博, 李俊华(1577)

铁锰氧化物-微生物负载生物炭材料对镉和砷的吸附机制 连斌, 吴骥子, 赵科理, 叶正钱, 袁峰(1584)

不同冬小麦品种镉富集转运及离子组特征差异 刘畅, 徐应明, 黄青青, 陶雪莹, 王林, 孙均兵, 赵立杰(1596)

镉胁迫下不同小麦品种对镉的积累特性 任超, 任或仲, 王浩, 朱利文, 李竞天, 杜倩倩, 李萍(1606)

嘉陵江滨岸带不同土地利用类型对土壤细菌群落多样性的影响 刘坤和, 薛玉琴, 竹兰萍, 徐飞, 朱志豪, 张拓, 张富斌(1620)

蚯蚓/钾改性生物炭对As污染红壤中细菌多样性和群落结构的影响 苏倩倩, 李莲芳, 朱昌雄, 叶婧, 刘雪, 耿兵, 田云龙, 黄晓雅(1630)

DA-6和EDDS施用对龙葵生长、Cd吸收和土壤细菌群落结构的影响 罗洋, 孙丽, 刘方, 任军, 郭金梅, 闫修民(1641)

地膜覆盖对农田土壤养分和生态酶计量学特征的影响 胡志娥, 肖谋良, 王双, 董瑶瑶, 鲁顺保, 陈剑平, 葛体达(1649)

增温和增雨对黄土丘陵区撂荒地土壤呼吸的影响 王兴, 钟泽坤, 朱玉帆, 王佳懿, 杨改河, 任成杰, 韩新辉(1657)

秸秆还田、地膜覆盖及施肥对冬小麦田N₂O和N₂排放的影响 彭毅, 李惠通, 张少维, 阳婷, 王筱斐, 周春菊, 王林权(1668)

基于Meta分析的不同生产条件下秸秆还田对土壤挥发性的影响 赵政鑫, 王晓云, 田雅洁, 王锐, 彭青, 蔡焕杰(1678)

施肥对农田土壤抗生素抗性基因影响的整合分析 冉继伟, 肖琼, 黄敏, 蔡岸冬, 张文菊(1688)

《环境科学》征订启事(1331) 《环境科学》征稿简则(1403) 信息(1462, 1511, 1605)

城市扬尘污染主要成因与精准治尘思路

李廷昆, 冯银厂*, 毕晓辉, 张裕芬, 吴建会

(南开大学环境科学与工程学院, 中国气象局-南开大学大气环境与健康研究联合实验室, 国家环境保护城市空气颗粒物污染防治重点实验室, 天津 300350)

摘要: 扬尘是城市环境空气颗粒物的重要贡献源。为进一步提升扬尘污染防治水平, 梳理总结了城市扬尘排放与贡献特征, 剖析了城市扬尘污染的主要成因, 明确主要起尘情景和关键控制指标, 并针对性提出主要防治措施建议, 以进一步完善“精准治尘”的思路。各扬尘源类中, 道路扬尘和施工扬尘是对城市环境空气颗粒物贡献的主要源类, 其中通常以道路更为突出。生产活动、车辆扰动和风蚀是各类扬尘源的主要起尘情景。道路扬尘防治应以积尘负荷为关键控制指标, 施工等其他扬尘源以场地内道路积尘负荷和裸露土壤(物料)面积为关键控制指标。围绕关键指标, 进一步明确了控制道路积尘负荷的3种主要途径和控制施工等其他扬尘源的6项主要措施。此外, 还针对扬尘治理所需保障措施提出了建议, 为城市扬尘防治的实践应用提供参考。

关键词: 扬尘; 颗粒物; 污染防治; 精细化; 成因分析

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)03-1323-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.202107092

Main Problems and Refined Solutions of Urban Fugitive Dust Pollution in China

LI Ting-kun, FENG Yin-chang*, BI Xiao-hui, ZHANG Yu-fen, WU Jian-hui

(China Meteorological Administration-Nankai University Cooperative Laboratory for Atmospheric Environment-Health Research, State Environmental Protection Key Laboratory of Urban Ambient Air Particulate Matter Pollution Prevention and Control, College of Environmental Science and Engineering, Nankai University, Tianjin 300350, China)

Abstract: Fugitive dust poses an important contribution to urban air particulate matter in China. To further improve the level of dust pollution prevention and control, the emission and contribution characteristics of urban fugitive dust were summarized; the main causes of dust pollution were analyzed; and the key links, key indicators, and main measures for prevention and control were clarified, so as to further improve the concept of “accurate dust control.” Among all types of fugitive dust sources, road dust and construction dust were the main emission and contribution sources, among which road dust was more prominent. Production activities, vehicle disturbances, and wind erosion were the main dust-generating links of various dust sources. Silt loading was taken as the key control index for road dust prevention and control, whereas silt loading and bare soil (or material) areas were taken as the key control index for construction and other dust sources. Around the key indicators, three main ways to control the road dust and six main measures to control the construction and other dust sources were defined. In addition, some suggestions on the necessary supporting measures for dust control were put forward, so as to provide a comprehensive and beneficial reference for the practical application of dust control in Chinese cities.

Key words: fugitive dust; particulate matter; pollution prevention and control; refine; cause analysis

早在20世纪60年代,就有国外学者开始关注土壤风蚀、铺装道路和施工活动中“尘”的排放情况,并开展排放特征研究^[1,2]。随着研究不断深入,扬尘(fugitive dust)的概念逐渐形成,并识别了包括农业耕作与收获、建筑拆迁与施工、物料装卸、铺装道路、未铺装道路和农业风蚀等10余种主要扬尘源类^[3,4]。随着扬尘污染防治工作不断深入,我国先后发布了相关规范和技术指南^[5,6],明确了扬尘源定义,建立扬尘源多级分类体系,识别了道路扬尘、施工扬尘、料堆扬尘和土壤扬尘这4项一级源类,并根据道路类型、施工阶段和土地利用类型等详细信息进一步划分分子源类。

扬尘是城市环境空气颗粒物的重要贡献源,对城市环境空气质量、市容市貌和人体健康均具有重要影响^[7-12]。近年来,国家高度重视包括扬尘在内的各项污染源管控工作,采取了诸多有效措施^[13-17],并取得了显著成效,全国范围内颗粒物浓度逐年下降。但监测结果显示,截至2020年,我国部

分城市环境空气颗粒物依然显示出较为明显的扬尘污染特征,尤其是中国北方地区。如河北省石家庄、保定、廊坊和唐山等多个城市,以及太原、郑州、济南和西安等省会城市2020年的年均 $\rho(\text{PM}_{10})$ 均处于较高水平(80~103 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$),且粗细粒子比例($\text{PM}_{2.5-10}/\text{PM}_{2.5}$)在0.70~0.85之间,而作为对比,同区域的北京和天津两地年均 $\rho(\text{PM}_{10})$ 分别为56 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和68 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,且粗细粒子比例仅分别为0.47和0.41(数据来源于真气网: <https://www.aqistudy.cn/>)。根据2020年京津冀大气污染传输通道“2+26”城市和汾渭平原11城市降尘监测结果,不少城市降尘量仍长期处于相对较高水平(数据来源于生态环境部, <http://www.mee.gov.cn/>)。

收稿日期: 2021-07-11; 修订日期: 2021-08-29

基金项目: 大气重污染成因与治理攻关项目(DQGG0201); 中国工程院咨询研究项目(2020CO-0002); 天津市科技计划项目(18ZXSZSF00160)

作者简介: 李廷昆(1994~),男,博士,主要研究方向为扬尘源排放清单编制和污染防治, E-mail: Tingkunli1986@mail.nankai.edu.cn

* 通信作者, E-mail: fengyc@nankai.edu.cn

目前关注扬尘排放特征的研究逐渐增多,但系统和深入地分析并回答如何开展精准治尘的文献还较少.因此,为“精准治尘”,本文梳理总结了城市扬尘排放与贡献特征,并将学术研究成果与扬尘防治实践应用联系起来,综合剖析城市扬尘污染的主要成因,明确主要起尘情景和关键控制指标,并提出主要防治措施建议,为精准有效防尘和深入贯彻落实防尘工作指明方向.同时,针对扬尘治理所需保障措施提出建议,以期为我国城市扬尘防治的实践应用提供全面的和有益的参考.

1 扬尘源排放与贡献特征

1.1 扬尘源排放特征

扬尘源的排放与气候环境有较为密切的关系^[18].气候越干燥、风速越大的环境,越便于尘的累积与起尘^[19,20].同时,干燥少雨环境相对湿润气候环境不利于自然植被生长,会进一步影响植被覆盖水平,加大裸土风蚀潜力.在此环境下,地面积尘易于进入环境受体,并通过风蚀和人为扰动(如车辆)不断在地表与环境受体之间重复“扬起-传输-沉降-扬起”的过程,造成扬尘污染.

环境空气颗粒物监测结果和各类排放评估研究均表明我国北方地区扬尘排放较为突出,相对固定燃烧源、工艺过程源和移动源等其他各类源处于较高水平.近年来我国北方地区扬尘排放特征相关代表性研究成果如表1所示.其中土壤扬尘,在我国东起黑龙江、西至新疆,南抵青海、陕西、山西和河北

等省份的广大北方干旱-半干旱地区,每年春季排放风沙尘可达4亿t^[21].各类下垫面中以荒漠或荒漠草原起尘最为剧烈,如塔克拉玛干沙漠所在的新疆南部地区年排放PM_{2.5}和PM₁₀可分别达到400万t和1200万t的水平^[22].但农田和植被等北方主要下垫面类型颗粒物排放量也很大,如“2+26”城市和山东省PM₁₀年排放量经测算均有100万t左右的排放水平,其中城市级别区域PM_{2.5}排放量在万t水平,PM₁₀排放量在数万t乃至十数万t之间^[18,23].这些主要来自于郊区荒漠、农田和裸土等地表类型的风沙尘在传输到城市之后,又会成为道路和施工等其他扬尘源类的重要积尘来源^[24].土壤扬尘之外,各类研究评估所得城市级别道路扬尘源和施工扬尘源PM₁₀排放量也均在万t以上水平^[25-27,33].各项研究成果表明,我国北方地区城市级别区域土壤、道路和施工等主要扬尘源类PM_{2.5}排放量总和大约在数万t水平,PM₁₀排放量大约在数万t至十数万t水平.扬尘源庞大的颗粒物排放量可对标其他各项人为源排放量总和.以京津冀及其周边地区的大气污染源排放清单研究^[28-29]为例,北京市、天津市和石家庄市各项人为排放源在2012年和2013年排放PM_{2.5}和PM₁₀总量只分别在6~11万t和12~18万t之间.Jiang等^[30]的研究建立的山东省大气污染源排放清单中,各类扬尘源排放PM₁₀和PM_{2.5}排放量分别占各类源排放总量的64%和72%,远高于化石燃料燃烧、工业企业和道路机动车等其他污染源.

表1 我国部分地区扬尘源排放特征研究成果

Table 1 Study results of fugitive dust emission characteristic in some regions of China

研究区域	扬尘类型	基准年份	评估方法	粒径	排放量/(kt·a ⁻¹)	文献
北方干旱-半干旱地区	土壤	1982~2011	IWEMS	—	401 100(春季)	[21]
“2+26”城市	土壤	2018	指南	PM _{2.5} /PM ₁₀	151/1 007	[17]
山东省	土壤	2012	WEPS	PM ₁₀	917	[23]
新疆南部	土壤	2016	WEPS	PM _{2.5} /PM ₁₀	4 000/12 000	[22]
天津市	土壤	2013	指南 ^[6]	PM _{2.5} /PM ₁₀	6/14	[31]
天津市	土壤	2016	风洞模拟	PM ₁₀	23	[32]
哈尔滨市	道路	2016	指南 ^[6]	PM _{2.5} /PM ₁₀	14/55	[33]
山东省	土壤、道路和施工	2016	指南 ^[6]	PM _{2.5} /PM ₁₀	3 716/3 640	[30]
河南省	土壤、道路和施工	2016	指南 ^[6]	PM _{2.5} /PM ₁₀	103/461	[34]
郑州市	土壤、道路和施工	2016	指南 ^[6]	PM _{2.5} /PM ₁₀	22/104	[35]
雄安新区	土壤、道路和施工	2020	指南 ^[6]	PM _{2.5} /PM ₁₀	10/43	[36]

1.2 扬尘源对环境受体贡献特征

部分主要城市官方发布的,采用受体模型得到的环境空气PM_{2.5}和PM₁₀来源解析结果显示扬尘源具有重要贡献(如表2).扬尘源在北方城市对环境空气颗粒物贡献率相对较高,其中PM_{2.5}和PM₁₀能分别达到20%~30%和30%~40%的高水平,排名

相对其他源类也较为靠前.如扬尘源对天津市^[38]和郑州市^[40]环境空气PM_{2.5}和PM₁₀贡献率相对于燃煤、工业和机动车等主要排放源均排名第1,对北京市环境空气PM_{2.5}贡献率也仅次于机动车源排名第2.而扬尘源在南方地区对环境空气颗粒物贡献率相对较低,其中PM_{2.5}多在20%以下,甚至10%以下,相比

于机动车、燃煤源和工业源也多处于倒数第 1 或靠后水平。有关北京市、天津市、石家庄市、保定市和沧州市等城市开展的区域性环境空气 $PM_{2.5}$ 来源解析研究也表明,扬尘源贡献率多在 10%~26% 区间内^[46,47]。Hopke 等^[48]综述世界各地 $PM_{2.5}$ 受体来源解析研究成果,指出尘源对中国北方地区 PM_{10} 平均贡献率为 30.5%,相对其他源类位列第 1,对南方地区 PM_{10} 贡献率为 15.2%。采用大气污染源排放清单与源扩散模型联用的方法评估扬尘源对环境受体颗粒物贡献的研究^[27,31,36,49,50],也得到了类似的结果。

各扬尘源中,道路和施工是我国多数城市扬尘的主要贡献源^[35,51],在扬尘污染较为突出的城市中通常以道路扬尘更为突出^[36]。赵普生等^[50]和薛亦峰等^[27]的研究采用 FDM、ISC 和 WRF/CMAQ 等模型分别模拟了施工扬尘源对天津和北京环境受体 PM_{10} 的年度贡献,分别达到 $20.3 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $17.5 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,可见施工扬尘源贡献之大。而在雄安新区的研究发现,道路扬尘源排放量 1.4 倍于施工扬尘,但对城区目标点位环境受体 PM_{10} 贡献达到 3.3 倍的差距^[36]。原因在于施工扬尘源在研究区域内多呈零星点状分布,少部分呈线状或面状分布(如道路

施工或大规模基础设施建设);施工扬尘在施工区域可能对环境受体颗粒物有较高的贡献,但是由于排放颗粒以粗颗粒为主,其在扩散过程中快速沉降,对远距离环境受体贡献相对有限。赵普生等^[50]的研究发现施工扬尘排放颗粒物向下风向扩散 1.5 km 距离,对环境受体 PM_{10} 浓度贡献即从 $800 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 下降至 $10\sim 20 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。田刚等^[52]的研究发现施工工地周边降尘浓度随距离增加而递减,前者与后者的 2 次方成反比关系。与之相比,道路扬尘源呈密集网状分布,且集中于城区。同时,道路扬尘具有更为明显“二重性特征”,即是颗粒物排放源,也是各类颗粒物排放源的受体。城区道路可能受到渣土车物料遗撒和“脏车”进城的影响,造成局部路段积尘负荷上升,再加上车辆反复剧烈扰动,引起积尘在不同道路之间转移扩散并加大道路扬尘排放强度^[36,51,53]。因此,在扬尘污染较为突出的城市中,道路通常是环境空气颗粒物的主要扬尘贡献源,但其部分积尘来自于施工工地和矿山等其他污染源。土壤扬尘源以裸露农田和荒地为主,主要位于郊区,多在气候干燥多风的北方和风沙季节对城市环境空气颗粒物有较大影响^[18]。

表 2 我国南北方部分省会城市官方发布扬尘源对环境空气颗粒物贡献结果¹⁾

Table 2 Sources apportionment of ambient particulate matter in some provincial capitals in north and south China

研究区域	基准年份	算法	颗粒物粒径	贡献率/%	排名
北京市 ^[37]	2017	—	$PM_{2.5}$	16	2
天津市 ^[38]	2014	CMB 模型	$PM_{2.5}/PM_{10}$	30/42	1/1
济南市 ^[39]	2017	CMB 模型	$PM_{2.5}/PM_{10}$	14.6/34.2	3/1
郑州市 ^[40]	2013	—	$PM_{2.5}/PM_{10}$	25.4/40	1/1
上海市 ^[41]	2014	—	$PM_{2.5}$	13.40	4
南京市 ^[42]	2014	—	$PM_{2.5}$	14.10	4
广州市 ^[43]	2018	—	$PM_{2.5}$	7.60	3
杭州市 ^[44]	2014	CMB 模型	$PM_{2.5}$	20.40	3
成都市 ^[45]	2015	CMB 模型	$PM_{2.5}/PM_{10}$	20.8/25.4	3/1

1) 排名为燃煤、工业、机动车和扬尘这 4 类主要颗粒物排放源贡献;“—”表示无相关数据

2 扬尘污染主要成因

基于扬尘源贡献特征,结合我国城市扬尘污染现状,进一步梳理、总结扬尘污染成因如图 1 所示,包括“5 类主要扬尘源、3 种主要起尘情景、3 类关键控制指标、3 种积尘来源、6 类主要问题和 11 种典型现象”。

各城市扬尘源一般主要包括道路、施工、裸土、矿区和料堆这 5 项子源类。其中,道路扬尘通常是各扬尘源类中的首要贡献源。因此,城市扬尘污染防治需要将道路扬尘防治置于更为突出的位置。

道路扬尘源起尘情景包括车辆扰动和气象扰动两种,其中以车辆扰动为主。车辆扰动起尘强度取决

于道路积尘负荷和交通强度(如车流量和车重等)两类指标。限制交通强度的控尘措施将影响生产生活秩序,因此,以积尘负荷作为道路扬尘防治关键控制指标更为可行,其在扬尘污染突出的城市主要来源于道路自身、车辆携带和自然沉降等 3 种途径,而较小比例来自于车辆刹车磨损和轮胎磨损等^[18,54~57]。因此,基于全流程管控的思路,通过以这 3 种来源途径为主来实现对关键指标道路积尘负荷的控制是道路扬尘防治的主要措施^[20,58]。现今扬尘污染较重的道路普遍存在的典型现象如图 1 所示,包括但不限于诸如车辆通行路面破损、硬化标准不高或未硬化和渣土车带尘上路等 7 种^[53],其直接导致道路积尘负荷处于较高水平,从而使得道路扬尘

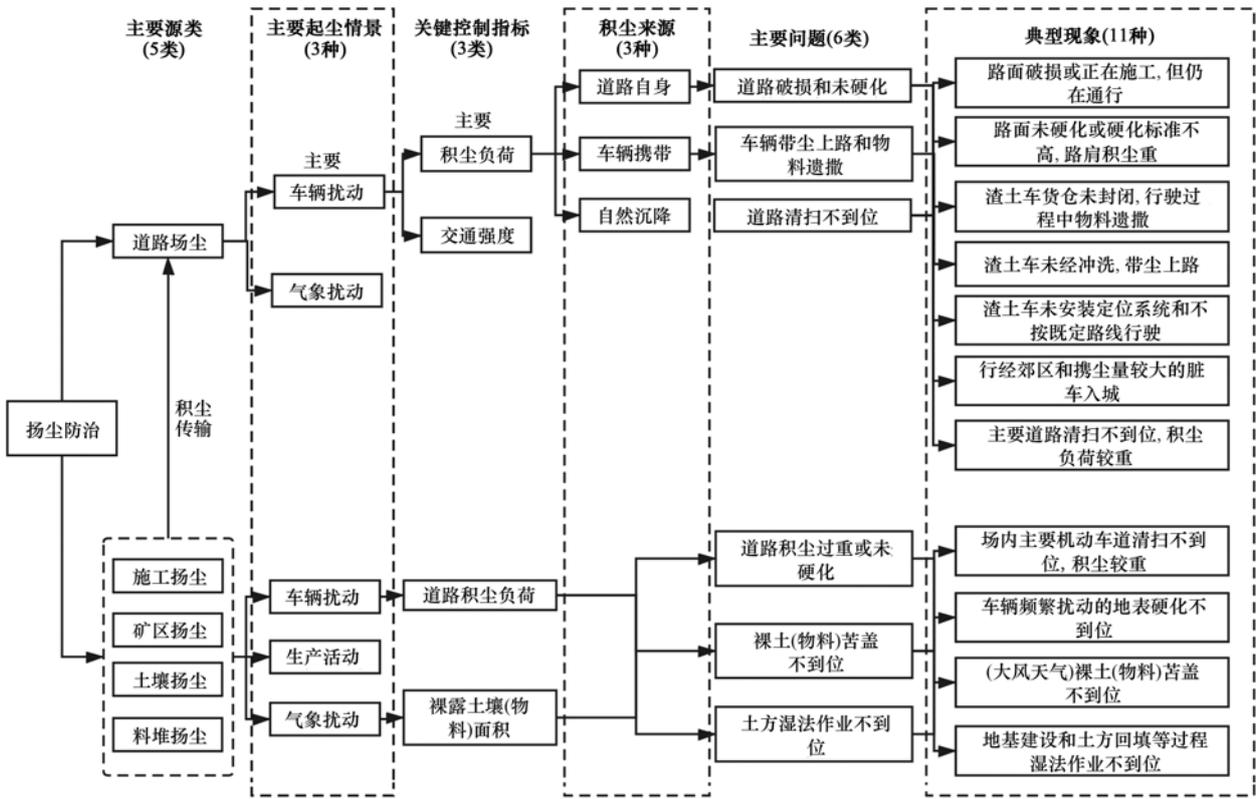


图 1 城市扬尘污染主要问题剖析
 Fig. 1 Analysis of the main problems of urban dust pollution

排放较大. 由此分析总结道路扬尘突出的主要原因, 也即没有围绕关键指标落实好各项主要防治措施, 以致道路积尘负荷较重.

施工和矿区两类扬尘源起尘环节众多, 可以总结为来自于生产活动自身、车辆扰动和气象扰动. 生产活动包括物料机械破碎活动(含爆破、拆迁等)、土方矿料挖掘和材料的就地制造等, 一般伴随强烈起尘, 其扬尘防治十分必要, 多采取空间隔离(如密闭、围挡和苫盖等)和湿法作业等措施^[59-61]. 生产活动目前相关的防尘措施较为明确, 且在没有不利气象情况下, 直接影响范围一般仅限于局部周边区域, 相比之下, 车辆扰动是更加重要并且需要引起关注的防治环节^[62]. 由于物料运输所需, 施工工地、矿区内通行大型货车较多. 部分中小型施工工地在地基开挖和地基建设等土方作业阶段, 日进出车辆能达到数百车次^[50]; 在大型施工工地, 日进出车辆甚至能达到上千车次. 同时, 工地和矿区内道路受到土方作业、运输物料遗撒和空气中积尘自然沉降等来源贡献, 积尘负荷可能较重, 能达到数十乃至上百 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. 未硬化的道路, 由于车辆反复碾压, 表面形成浮土, 起尘潜势相对于铺装道路更大. 因此, 由于具有较高水平的扰动频率、扰动强度和积尘负荷, 车辆扰动通常是施工扬尘和矿区扬尘的主要起尘情景. 基于全流程管控的思路, 通过以道路硬

化、地表(积尘)清扫和湿法作业为主的各种方式, 一方面从“源头”角度控制积尘从工地和矿区各个生产环节向道路转移, 另一方面从“末端”角度控制和削减道路表面积尘负荷是防治扬尘的重要措施. 同时, 裸露土壤(或其他物料)在风蚀作用下也会直接产生起尘或将颗粒输送至道路乃至场地外, 特别是在风沙季或者特定大风天气^[63]. 有研究指出, 由于车辆携带和风蚀的原因, 施工工地周围道路积尘负荷远超城市街道平均水平^[53, 64-66]. 针对气象扰动, 关键防治措施则是通过各种方法途径控制场内道路积尘负荷和裸土面积. 施工、矿区扬尘起尘环节众多, 而扬尘污染较重时主要存在的典型现象如图 1 所示, 分析总结污染主要成因即是没有紧紧聚焦围绕以上关键指标落实好各项主要防治措施, 导致部分施工工地和矿区扬尘防治效果时好时坏, 容易反弹. 来自于农田和荒地等地表的裸土扬尘和工业企业内部的料堆扬尘影响因素较为单一, 起尘环节较少, 主要受到气象和人为(料堆装卸转移)扰动, 易于管控, 主要通过苫盖和密闭等手段削减裸露面积这一关键指标.

3 扬尘污染防治思路

对于扬尘污染防治, 在众多起尘情景中根据起尘强度、环境影响和可操作空间, 归纳总结确定主

要防治情景,提出关键防治指标和主要防治措施,明确扬尘监管和防治责任主体单位,制定保障机制是有效落实防治措施和精准治尘的总体思路.因此,本文基于现有各类扬尘防治研究^[13~17],围绕各类扬尘主要起尘情景、关键控制指标和主要来源途径,梳理主要防治措施.在明确防治重点的同时,针对现今城市扬尘防治相关配套保障措施存在的薄弱之处提出建议(如图2).

3.1 扬尘污染防治重点

道路是城市扬尘的主要贡献源,积尘负荷是其关键控制指标,而施工、矿区、裸土和料堆等扬尘源对道路存在积尘输送.因此,城市扬尘防治应采取“标本兼治”的总体策略,一方面以削减道路积尘负荷为主要途径,开展道路扬尘治理;另一方面加强其他扬尘源内部治理,并严格把控其对外传输环节,从源头控制其他扬尘对道路扬尘的输送.

3.1.1 道路扬尘源防治

道路扬尘防治以积尘负荷为关键控制指标,主要从加强道路基础设施建设维护、严格管理渣土物料运输等“带尘”车辆和加大道路的日常清扫保洁力度这3个方面着手.其次,可以从限制交通强度的角度,根据实际情况对大型货车和渣土车在特定时间和特定区域内通行活动做出合理规划.

道路基础设施建设维护主要通过路面修复、道路扩宽和新路建设等各项措施逐步消除路面坑槽、裂缝、沉陷和路肩裸土等各类问题,保障道路功能

并提升道路品质,避免路基材料在车辆碾压过程中受损起尘.渣土物料运输车辆监管主要目的在于尽可能减少车辆行驶过程中物料遗撒加重道路积尘负荷的情况出现,采取包括货舱全密闭运输、规定货运装卸的时间路线和杜绝带尘脏车进入主城区等3项手段.道路清扫保洁活动的目的在于定期或者及时清除道路表面积尘,对于控制道路扬尘较为有效^[20,55,64,67,68].其他道路扬尘防治措施,比如采用抑尘剂对防治道路起尘也是有效的^[20],但考虑到经济性原因,可能不便大规模使用此方法.

各项工作在必要时还需划定重点路段、重点区域和重点时段,深入贯彻“精准治尘”.其中以交通繁忙、货车通行密集、年久失修的国省干线和县乡道路为重点路段,以城区周围城乡结合部为重点区域,以风沙季和雨季为重点时段.并且采取走航观测等先进手段开展各区域、各时段和各道路扬尘的常态化监测,以便于进一步识别分析起尘原因,及时调整防控重点.

3.1.2 其他扬尘源防治

施工工地是道路之外的另一个重点防控源类.施工工地起尘环节众多,防尘工作量较大,更有必要推进落实“精准治尘”.根据前文分析,围绕场内道路车辆扰动和裸土风蚀两个主要起尘情景,以及切断场内积尘向外输送通道的目的,施工工地在落实“六个百分百”和“八项标准”等常规防治要求的过程中^[69],可以重点、优先落实“6项关键措施”,即

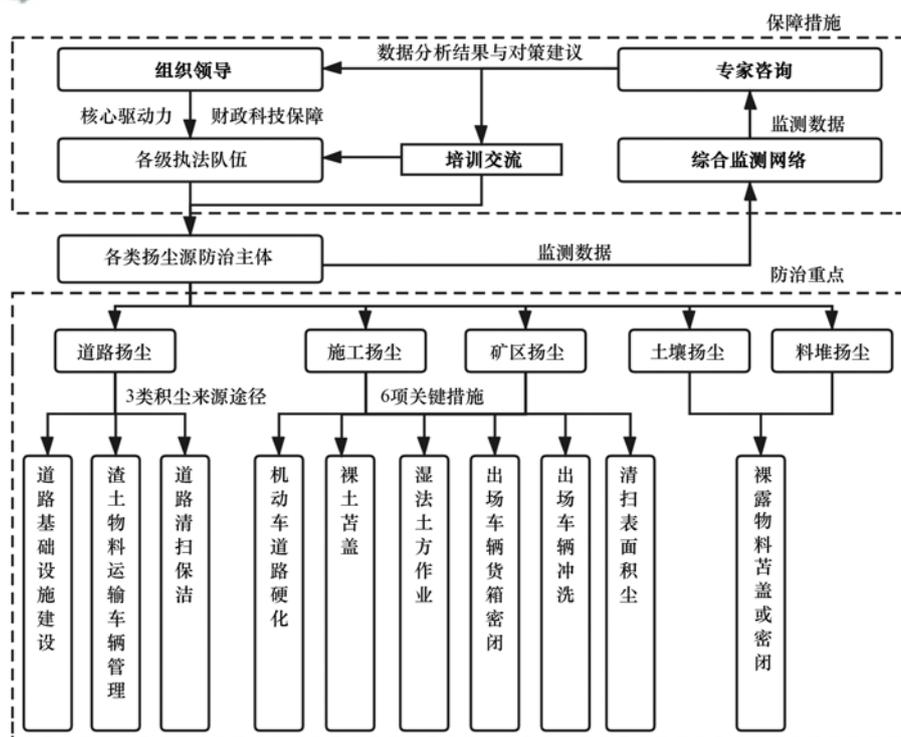


图2 城市扬尘污染综合防治体系

Fig. 2 Comprehensive prevention and control system of urban fugitive dust pollution

机动车道路硬化、裸土苫盖、湿法土方作业、出场运输车辆货箱密闭、车辆出场冲洗和表面积尘清扫。其中裸土苫盖和湿法土方作业 2 项措施的主要目的是从源头控制生产环节和气象扰动两个主要起尘情景,并避免积尘向场地内的道路或场地外输送。机动车道路硬化和表面积尘清扫这 2 项措施主要目的在于,通过控制积尘负荷水平来控制道路上车辆扰动起尘,同时一定程度抑制气象扰动起尘强度。出场运输车辆货箱密闭和车辆出场清洗这 2 项措施主要目的在于避免场内积尘通过车辆携带的方式向场外传输。以上 6 项关键措施,特别是在施工工地存在土方开挖、地基建设和土方回填等大量动土作业时,需要特别注意落实,以最大程度控制积尘的产生和转移乃至向场外传输。

矿区扬尘主要起尘情景与施工较为相似,开矿等生产活动起尘剧烈,车辆扰动频繁且裸土面积较大,扬尘防治难度较大。矿区扬尘防治可结合自身实际,参考施工扬尘防治思路和重点,围绕车辆扰动和气象扰动两个重点防治环节,基于“源头-过程-末端”全流程控制的思路,采取机动车道路硬化、表面积尘清扫和苫盖为主的各类措施控制场地内道路积尘负荷和裸露土壤(物料)面积,以便于加强场地内扬尘污染防治并控制场内积尘通过车辆和风蚀向外输送的途径。

土壤扬尘污染主要出现在风速较大的风沙季和裸土面积较大的秋冬季节,其关键控制指标是裸土面积。其主要排放源在郊区农田和荒地,但防治重点在城市公共区域、临时闲置土地和城区道路两侧的裸露地表,主要采用绿化和苫盖等控制裸土面积的措施抑制起尘。

料堆主要集中在工业企业和物流仓储,其主要防治环节是表面风蚀和装卸运输过程,主要采取表面苫盖或者密闭方式抑尘。同时,料堆扬尘通过车辆携带等方式对外输送也是重要控制环节。

3.2 扬尘防治配套保障措施建议

完善的监测网络是及时掌握、追踪扬尘污染特征动态变化趋势以及防治措施履行情况的根本途径^[60-62]。综合线上线下、在线离线各类监测方式,构建涵盖“环境空气质量监测、污染源监测监控和定期抽查巡检”三位一体的扬尘综合监测监控网络,并确保持续良好状态运行。其中扬尘源监测监控体系包括道路积尘负荷监测、施工工地降尘监测、施工工地扬尘(PM_{10})监测、施工工地视频监控、矿山扬尘(PM_{10})监测和矿山视频监控等。同时,环境监察等相关执法部门对各类扬尘源重点防治措施执行情况开展线下不定期抽查巡检。综合监测网络各

项监测数据与分析结果定期报送决策部门为扬尘防尘策略动态调整提供情报支持。

保障措施主要包括组织领导、培训交流、专家咨询和财政科技这 4 项。自上而下的组织领导和配套的考核问责机制是扬尘防治工作强力推进最为核心和最为重要的驱动。其次,针对扬尘防治业务部门各级领导和执法人员,特别是道路、工地和矿区等扬尘防治责任主体单位的管理人员和一线操作人员开展充分的培训交流与宣传教育,使其熟悉和掌握各类扬尘源防治的思路和重点,将是各项防尘措施深入落实和常态化运行取得成效的关键所在^[49]。加强科技支撑作用,对扬尘污染防治形势进行跟踪研究,识别扬尘防治主要问题并提出应对措施,可以为扬尘防治策略动态调整提供重要指导作用。必要的金融财政和科技装备(如各种先进监测设备和大数据平台等)是扬尘综合防治体系常态化运行的必要的保障。

4 结论

(1)扬尘是我国城市环境空气颗粒物的重要来源,尤以我国北方地区更为突出。扬尘源 PM_{10} 排放量可对标其他所有人为源排放总量,对环境空气颗粒物贡献率相比于燃煤、工业和机动车等主要源类排名靠前。

(2)道路和施工是城市扬尘主要贡献源类,其中在扬尘污染突出的城市通常以道路扬尘为首要贡献源,而道路积尘部分来自于施工、裸土等其他扬尘源的输送。城市扬尘防治在加强道路本身治理的同时,需注意做好其他扬尘源场内治理,以便于削减其对场外积尘输送。

(3)各类扬尘源主要包括生产活动、车辆扰动和气象扰动这 3 类起尘情景,而扬尘污染的主要成因是各类起尘情景中关键指标的控制不到位。其中道路扬尘源以积尘负荷为关键控制指标,施工、矿区、料堆和裸土等扬尘源在生产活动之外,以场地内道路积尘负荷和裸露土壤(或物料)面积为关键控制指标。

(4)从关键控制指标来源途径分析,建议道路扬尘以路面维护、“脏”车管理和加强清扫 3 种主要措施开展扬尘防治;施工、矿区扬尘源以“6 项关键措施”为主的多种措施来开展扬尘防治;裸土和料堆扬尘主要通过苫盖等措施开展扬尘防治。

(5)建议完善配套保障措施,其中监测网络、组织领导和培训交流这三者最为重要。监测网络是及时掌握、追踪扬尘污染特征动态变化趋势和防治措施履行情况的根本途径;组织领导是防治体系的核

心驱动力; 培训交流是确保防尘取得成效的关键所在。

参考文献:

- [1] Woodruff N P, Siddoway F H. A wind erosion equation[J]. Soil Science Society of America Journal, 1965, **29**(5): 602-608.
- [2] Cowherd C Jr, Axetell K Jr, Guenther C M, *et al.* Development of emission factors for fugitive dust sources[R]. North Carolina: US Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, 1974.
- [3] USEPA. Compilation of air pollutant emission factors[R]. Fifth Edition, Volume I. North Carolina: US Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, 1995.
- [4] Countess Environmental. WRAP fugitive dust handbook [M]. Westlake Village, California: Countess Environmental, 2006.
- [5] HJ/T 393-2007, 防治城市扬尘污染技术规范[S].
- [6] 生态环境部. 扬尘源颗粒物排放清单编制技术指南(试行)[EB/OL]. <http://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bgg/201501/W020150107594588131490.pdf>, 2014-12-31.
- [7] Shen Z X, Sun J, Cao J J, *et al.* Chemical profiles of urban fugitive dust PM_{2.5} samples in Northern Chinese cities [J]. Science of the Total Environment, 2016, **569-570**: 619-626.
- [8] Tao J, Zhang L M, Cao J J, *et al.* A review of current knowledge concerning PM_{2.5} chemical composition, aerosol optical properties and their relationships across China[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2017, **17**(15): 9485-9518.
- [9] Chen S Y, Zhang X R, Lin J T, *et al.* Fugitive road dust PM_{2.5} emissions and their potential health impacts[J]. Environmental Science & Technology, 2019, **53**(14): 8455-8465.
- [10] Li C Z, Zhao Y Y, Xu X X. Investigation of dust exposure and control practices in the construction industry: implications for cleaner production [J]. Journal of Cleaner Production, 2019, **227**: 810-824.
- [11] Cheriyan D, Choi J H. A review of research on particulate matter pollution in the construction industry [J]. Journal of Cleaner Production, 2020, **254**, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.120077.
- [12] Gong X S, Shen Z X, Zhang Q, *et al.* Characterization of polycyclic aromatic hydrocarbon (PAHs) source profiles in urban PM_{2.5} fugitive dust: a large-scale study for 20 Chinese cities[J]. Science of the Total Environment, 2019, **687**: 188-197.
- [13] 国务院. 大气污染防治行动计划[EB/OL]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2013-09/13/content_4561.htm, 2013-09-10.
- [14] 国务院. 中华人民共和国大气污染防治法(修订草案)[EB/OL]. <https://baike.baidu.com/item/%E4%B8%AD%E5%8D%8E%E4%BA%BA%E6%B0%91%E5%85%B1%E5%92%8C%E5%9B%BD%E5%A4%A7%E6%B0%94%E6%B1%A1%E6%9F%93%E9%98%B2%E6%B2%BB%E6%B3%95%EF%BC%88%E4%BF%AE%E8%AE%A2%E8%8D%89%E6%A1%88%EF%BC%89/16211488?fr=aladdin>, 2014-11-26.
- [15] 辽宁省人民政府. 辽宁省扬尘污染防治管理办法[EB/OL]. http://www.law-lib.com/law/law_view.asp?id=420004, 2013-05-14.
- [16] 西安市人大. 西安市扬尘污染防治条例[EB/OL]. <http://www.china-xa.gov.cn/2015/36933.jhtml>, 2015-07-30.
- [17] 河北省人民政府. 河北省扬尘污染防治办法[EB/OL]. <https://www.chndaqi.com/news/303438.html>, 2020-02-07.
- [18] Li T K, Bi X H, Dai Q L, *et al.* Optimized approach for developing soil fugitive dust emission inventory in “2 + 26” Chinese cities[J]. Environmental Pollution, 2021, **285**, doi: 10.1016/j.envpol.2021.117521.
- [19] Kauhaniemi M, Kukkonen J, Härkönen J, *et al.* Evaluation of a road dust suspension model for predicting the concentrations of PM₁₀ in a street canyon[J]. Atmospheric Environment, 2011, **45**(22): 3646-3654.
- [20] Amato F, Querol X, Johansson C, *et al.* A review on the effectiveness of street sweeping, washing and dust suppressants as urban PM control methods [J]. Science of the Total Environment, 2010, **408**(16): 3070-3084.
- [21] Song H Q, Zhang K S, Piao S L, *et al.* Spatial and temporal variations of spring dust emissions in northern China over the last 30 years[J]. Atmospheric Environment, 2016, **126**: 117-127.
- [22] Liu Y X, Teng Y, Liang S, *et al.* Establishment of PM₁₀ and PM_{2.5} emission inventories from wind erosion source and simulation of its environmental impact based on WEPS-Models3 in southern Xinjiang, China [J]. Atmospheric Environment, 2021, **248**, doi: 10.1016/j.atmosenv.2021.118222.
- [23] Chen L, Zhao H, Wang W X, *et al.* Effect of windblown dust from local and regional sources on the air quality of the central district in Jinan, China[J]. Atmospheric Research, 2017, **185**: 44-52.
- [24] Sun J, Shen Z X, Zhang L M, *et al.* Chemical source profiles of urban fugitive dust PM_{2.5} samples from 21 cities across China [J]. Science of the Total Environment, 2019, **649**: 1045-1053.
- [25] 杨乃旺, 宋文斌, 闫东杰, 等. 基于积尘负荷的西安市铺装道路扬尘排放研究[J]. 环境科学学报, 2021, **41**(4): 1259-1266.
- [26] Yang N W, Song W B, Yan D J, *et al.* Emission characteristics of pavement road dust in Xi'an based on dust load method[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2021, **41**(4): 1259-1266.
- [26] 张诗建. 基于快速检测法的天津市道路扬尘排放清单研究[D]. 天津: 南开大学, 2016. 44-50.
- [26] Zhang S J. Research on road dust emission inventory of Tianjin based on fast detection[D]. Tianjin: Nankai University, 2016. 44-50.
- [27] 薛亦峰, 周震, 黄玉虎, 等. 北京市建筑施工扬尘排放特征[J]. 环境科学, 2017, **38**(6): 2231-2237.
- [27] Xue Y F, Zhou Z, Huang Y H, *et al.* Fugitive dust emission characteristics from building construction sites of Beijing [J]. Environmental Science, 2017, **38**(6): 2231-2237.
- [28] Liu H J, Wu B B, Liu S H, *et al.* A regional high-resolution emission inventory of primary air pollutants in 2012 for Beijing and the surrounding Five provinces of north China [J]. Atmospheric Environment, 2018, **181**: 20-33.
- [29] Qi J, Zheng B, Li M, *et al.* A high-resolution air pollutants emission inventory in 2013 for the Beijing-Tianjin-Hebei region, China[J]. Atmospheric Environment, 2017, **170**: 156-168.
- [30] Jiang P Y, Chen X L, Li Q Y, *et al.* High-resolution emission inventory of gaseous and particulate pollutants in Shandong Province, eastern China [J]. Journal of Cleaner Production, 2020, **259**, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.120806.
- [31] Li T K, Bi X H, Dai Q L, *et al.* Improving spatial resolution of soil fugitive dust emission inventory using RS-GIS technology: an application case in Tianjin, China [J]. Atmospheric Environment, 2018, **191**: 46-54.
- [32] Gao S, Wang Y Q, Shan M, *et al.* Wind-tunnel and modelled PM₁₀ emissions and dust concentrations from agriculture soils in Tianjin, northern China[J]. Aeolian Research, 2020, **42**, doi: 10.1016/j.aeolia.2019.100562.
- [33] Li L L, Wang K, Sun Z J, *et al.* Bottom-up emission inventory

- and its spatio-temporal distribution from paved road dust based on field investigation: a case study of Harbin, northeast China[J]. *Atmosphere*, 2021, **12**(4), doi: 10.3390/atmos12040449.
- [34] Yang H, Song X, Zhang Q. RS&GIS based PM emission inventories of dust sources over a provincial scale; a case study of Henan province, central China[J]. *Atmospheric Environment*, 2020, **225**, doi: 10.1016/j.atmosenv.2020.117361.
- [35] Yang H, Song X, Du L P, *et al.* Estimating particulate matter emission from dust sources using ZY-3 data and GIS technology—a case study in Zhengzhou city, China[J]. *Atmosphere*, 2021, **12**(6), doi: 10.3390/atmos12060660.
- [36] Li T K, Dong W, Dai Q L, *et al.* Application and validation of the fugitive dust source emission inventory compilation method in Xiong'an New Area, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, **798**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.149114.
- [37] 北京市生态环境局. 最新科研成果新一轮北京市PM_{2.5}来源解析正式发布[EB/OL]. <https://www.antpedia.com/news/27/n-2210027.html>, 2018-05-14.
- [38] 天津市生态环境监测中心. 天津市颗粒物源解析[EB/OL]. <http://www.tjemc.org.cn/html/1/75/87/769.html>, 2018-05-05.
- [39] 济南市生态环境局. 济南市2017年度环境空气PM₁₀、PM_{2.5}来源解析结果发布[EB/OL]. http://jnepb.jinan.gov.cn/art/2018/5/18/art_10429_1115123.html, 2018-05-18.
- [40] 郑州市生态环境局. 河南日报: 我省灰霾源解析报告: 燃煤为大气灰霾首要来源[EB/OL]. <https://www.henan.gov.cn/2015/10-29/355720.html>, 2015-10-29.
- [41] 蔡新华. 上海公布大气颗粒物源解析结果[N]. *中国环境报*, 2015-01-09(01).
- [42] 南京市生态环境局. 2014年南京市环境状况公报[EB/OL]. http://cn.chinagate.cn/environment/2015-06/30/content_35944418.htm, 2015-06-05.
- [43] 广州市生态环境局. 2018年度广州PM_{2.5}来源解析结果公布[EB/OL]. <https://kuaibao.qq.com/s/20191126A0938R00?refer=spider>, 2019-11-30.
- [44] 杭州市生态环境局. 2014年杭州市环境状况公报[EB/OL]. http://www.hangzhou.gov.cn/art/2015/6/5/art_1228974625_5306956.html, 2015-06-05.
- [45] 成都市生态环境局. 2015年成都市大气颗粒物来源解析[EB/OL]. <https://www.bidcenter.com.cn/newscontent-23356239-4.html>, 2016-12-18.
- [46] Gao J J, Wang K, Wang Y, *et al.* Temporal-spatial characteristics and source apportionment of PM_{2.5} as well as its associated chemical species in the Beijing-Tianjin-Hebei region of China[J]. *Environmental Pollution*, 2018, **233**: 714-724.
- [47] Xu H, Xiao Z M, Chen K, *et al.* Spatial and temporal distribution, chemical characteristics, and sources of ambient particulate matter in the Beijing-Tianjin-Hebei region [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **658**: 280-293.
- [48] Hopke P K, Dai Q L, Li L X, *et al.* Global review of recent source apportionments for airborne particulate matter[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **740**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.140091.
- [49] Li T K, Ma S M, Liang W Z, *et al.* Application of the high spatiotemporal resolution soil fugitive dust emission inventory compilation method based on CAMx model[J]. *Atmospheric Research*, 2021, **262**, doi: 10.1016/j.atmosres.2021.105770.
- [50] 赵普生, 冯银厂, 张裕芬, 等. 建筑施工扬尘排放因子定量模型研究及应用[J]. *中国环境科学*, 2009, **29**(6): 567-573.
- Zhao P S, Feng Y C, Zhang Y F, *et al.* Modeling and impact study of fugitive dust emissions from building construction sites [J]. *China Environmental Science*, 2009, **29**(6): 567-573.
- [51] 中华人民共和国生态环境部. 蓝天保卫战专家谈(5) | 扬尘是颗粒物的重要来源, 应持续强化管控[EB/OL]. http://www.mee.gov.cn/ywz/dqjhbh/dqjzjgl/202003/t20200312_768760.shtml, 2020-03-12.
- [52] 田刚, 李钢, 闫宝林, 等. 施工扬尘空间扩散规律研究[J]. *环境科学*, 2008, **29**(1): 259-262.
- Tian G, Li G, Yan B L, *et al.* Spatial dispersion laws of fugitive dust from construction sites [J]. *Environmental Science*, 2008, **29**(1): 259-262.
- [53] Li D, Chen J H, Zhang Y F, *et al.* Dust emissions from urban roads using the AP-42 and TRAKER methods: a case study[J]. *Atmospheric Pollution Research*, 2021, **12**(5), doi: 10.1016/j.apr.2021.03.014.
- [54] Norman M, Johansson C. Studies of some measures to reduce road dust emissions from paved roads in Scandinavia [J]. *Atmospheric Environment*, 2006, **40**(32): 6154-6164.
- [55] Amato F, Querol X, Alastuey A, *et al.* Evaluating urban PM₁₀ pollution benefit induced by street cleaning activities [J]. *Atmospheric Environment*, 2009, **43**(29): 4472-4480.
- [56] Padoan E, Ajmone-Marsan F, Querol X, *et al.* An empirical model to predict road dust emissions based on pavement and traffic characteristics[J]. *Environmental Pollution*, 2018, **237**: 713-720.
- [57] Denby B R, Kupiainen K J, Gustafsson M. Review of road dust emissions [A]. In: Amato F (Ed.). *Non-Exhaust Emissions* [M]. Amsterdam: Elsevier, 2018. 183-203.
- [58] Bukowiecki N, Lienemann P, Hill M, *et al.* PM₁₀ emission factors for non-exhaust particles generated by road traffic in an urban street canyon and along a freeway in Switzerland [J]. *Atmospheric Environment*, 2010, **44**(19): 2330-2340.
- [59] 黄玉虎, 田刚, 秦建平, 等. 不同施工阶段扬尘污染特征研究[J]. *环境科学*, 2007, **28**(12): 2885-2888.
- Huang Y H, Tian G, Qin J P, *et al.* Characteristics of fugitive dust pollution in different construction phases[J]. *Environmental Science*, 2007, **28**(12): 2885-2888.
- [60] Giunta M. Assessment of the environmental impact of road construction: modelling and prediction of fine particulate matter emissions[J]. *Building and Environment*, 2020, **176**, doi: 10.1016/j.buildenv.2020.106865.
- [61] Wu Z Z, Zhang X L, Wu M, *et al.* Mitigating construction dust pollution: state of the art and the way forward [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2016, **112**: 1658-1666.
- [62] 田刚, 黄玉虎, 樊守彬. 扬尘污染控制[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2013. 70-99.
- [63] 张立坤, 李令军, 姜磊, 等. 北京建筑施工裸地时空变化及扬尘污染排放[J]. *环境科学*, 2019, **40**(1): 135-142.
- Zhang L K, Li L J, Jiang L, *et al.* Spatial and temporal distribution characteristics and fugitive dust emission of building sites in Beijing[J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(1): 135-142.
- [64] Amato F, Pandolfi M, Viana M, *et al.* Spatial and chemical patterns of PM₁₀ in road dust deposited in urban environment [J]. *Atmospheric Environment*, 2009, **43**: 1640-1659.
- [65] Amato F, Pandolfi M, Alastuey A, *et al.* Impact of traffic intensity and pavement aggregate size on road dust particles loading[J]. *Atmospheric Environment*, 2013, **77**: 711-717.
- [66] Amato F, Pandolfi M, Viana M, *et al.* Spatial and chemical patterns of PM₁₀ in road dust deposited in urban environment

- [J]. *Atmospheric Environment*, 2009, **43**(9): 1650-1659.
- [67] Amato F, Schaap M, Van Der Gon H A C D, *et al.* Effect of rain events on the mobility of road dust load in two Dutch and Spanish roads[J]. *Atmospheric Environment*, 2012, **62**: 352-358.
- [68] Zhu D Z, Kuhns H D, Gillies J A, *et al.* Analysis of the effectiveness of control measures to mitigate road dust emissions in a regional network [J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2012, **17**(4): 332-340.
- [69] 河北省生态环境厅. 关于加快建立环境监管正面清单的通知 [EB/OL]. <http://www.yidiansixun.com/article/00Gtd1QZ/amp>, 2019-08-26.

欢迎订阅 2022 年《环境科学》

《环境科学》创刊于 1976 年,由中国科学院主管,中国科学院生态环境研究中心主办,是我国环境科学学科中最早创刊的学术性期刊。

《环境科学》自创刊以来,始终坚持“防治污染,改善生态,促进发展,造福人民”的宗旨,报道我国环境科学领域内具有创新性高水平,有重要意义的基础研究和应用研究成果,以及反映控制污染,清洁生产和生态环境建设等可持续发展的战略思想、理论和实用技术等。

《环境科学》在国内外公开发行,并在国内外科技界有较大影响,被国内外一些重要检索系统收录,如工程索引 Ei Compendex;医学索引 MEDLINE; Scopus; 化学文摘 CA;俄罗斯文摘杂志 AJ;美国生物学文摘预评 BP;美国医学索引 IM;日本科学技术情报中心数据库 JICST;英国动物学记录 ZR;剑桥科学文摘(CSA): Environmental Sciences;剑桥科学文摘(CSA): Pollution Abstracts;剑桥科学文摘(CAS): Life Sciences Abstracts 等;国内的检索系统有中国科技论文统计与引文数据库(CSTPCD);中文科技期刊数据库(维普);中国期刊全文数据库(CNKI);数字化期刊全文数据库(万方);中国科学引文数据库(CSCD);中国生物学文摘等。

全国各地邮局均可订阅,如有漏订的读者可直接与编辑部联系,办理补订手续。

国内统一连续出版物号:CN 11-1895/X

国际标准连续出版物号:ISSN 0250-3301

国外发行代号:M 205

国内邮发代号:2-821

编辑部地址:北京市海淀区双清路 18 号(2871 信箱) 邮编:100085

电话:010-62941102;传真:010-62849343;E-mail:hjcx@rcees.ac.cn;网址:www.hjcx.ac.cn

CONTENTS

Analysis of Change and Driving Factors of PM _{2.5} Mass Concentration in Tianjin from 2000 to 2020	CAI Zi-ying, HAO Jian, HAN Su-qin, <i>et al.</i> (1129)
Characteristics and Sources of PM _{2.5} -O ₃ Compound Pollution in Tianjin	XIAO Zhi-mei, XU Hong, GAO Jing-yun, <i>et al.</i> (1140)
Source Analysis of Ambient PM _{2.5} in Wuhan City Based on Random Forest Model	ZHANG Zhi-hao, CHEN Nan, ZHU Bo, <i>et al.</i> (1151)
Chemical Characteristics and Sources of Atmospheric Aerosols in the Surrounding District of a Heavily Polluted City in the Southern Part of North China	REN Xiu-long, HU Wei, WU Chun-miao, <i>et al.</i> (1159)
Characteristics of Water-soluble Ions in an Autumn Haze Process in the Southern Sichuan Urban Agglomeration After the Implementation of China's Air Pollution Prevention and Control Action Plan	WU An-nan, HUANG Xiao-juan, HE Ren-jiang, <i>et al.</i> (1170)
Concentration, Source, and Health Risk Assessment of PM ₁ Heavy Metals in Typical Pollution Processes in Zhengzhou	ZHAI Shi-ting, WANG Shen-bo, ZHANG Dong, <i>et al.</i> (1180)
Geographical Detection of Spatial Heterogeneity and Drivers of PM _{2.5} in the Yangtze River Economic Belt	WANG Li-li, LIU Xiao-jie, LI Ding, <i>et al.</i> (1190)
Spatial Heterogeneity of PM _{2.5} Concentration in Response to Land Use/Cover Conversion in the Yangtze River Delta Region	ZHOU Li-xia, WU Tao, JIANG Guo-jun, <i>et al.</i> (1201)
Analysis of Pollution Characteristics, Meteorological Impact, and Forecast Retrospective During the Spring Festival and the Lantern Festival in "2 + 26" Cities	ZHU Yuan-yuan, WANG Xiao-fei, WANG Wei, <i>et al.</i> (1212)
Pollution Characteristics and Influencing Factors of PM _{2.5} in Shanxi Province Based on Wavelet Transform	ZHANG Ke-ke, HU Dong-mei, YAN Yu-long, <i>et al.</i> (1226)
Estimation of Surface Ozone Concentration and Health Impact Assessment in China	ZHAO Nan, LU Yi-min (1235)
Analysis of Ozone Pollution Spatio-temporal Evolution Characteristics and Identification of Its Long-term Variation Driving Factor over Hunan Province	LIU Yan-yan, YANG Lei-feng, XIE Dan-ping, <i>et al.</i> (1246)
Temporal and Spatial Variation in O ₃ Concentration Near the Surface of Shandong Peninsula and Analysis of Potential Source Areas	LI Le, LIU Min-xia, XIAO Shi-ni, <i>et al.</i> (1256)
Characteristics, Ozone Formation Potential, and Source Apportionment of VOCs During the COVID-19 Epidemic in Xiong'an	LIU Xin-jun, WANG Shu-juan, LIU Cheng, <i>et al.</i> (1268)
Characteristics and Source Analysis of VOCs Pollution During the Period of Ozone Exceeding the Standard in Zibo City	WANG Shuai, WANG Xiu-yan, YANG Wen, <i>et al.</i> (1277)
Comparison of VOCs Pollution Characteristics Between an Urban Site and a Background Site in Summer in Zibo	QIN Tao, XU Bo, WANG Xin-wu, <i>et al.</i> (1286)
Emission Characteristics and Inventory of Volatile Organic Compounds from Cooking in Sichuan Province	QIAN Jun, HAN Li, CHEN Jun-hui, <i>et al.</i> (1296)
Emission Characteristics of Gas-and Particle-Phase Polycyclic Aromatic Hydrocarbons from Cooking	LI Yuan-ju, WU Ai-hua, TONG Meng-xue, <i>et al.</i> (1307)
Diversity and Community Structure of Airborne Fungi in Different Working Areas of Composting Plants	YU Ao-yuan, XING Li-jun, SUN Xing-bin, <i>et al.</i> (1315)
Main Problems and Refined Solutions of Urban Fugitive Dust Pollution in China	LI Ting-kun, FENG Yin-chang, BI Xiao-hui, <i>et al.</i> (1323)
Water Quality Assessment and Spatial-temporal Variation Analysis in Yellow River Basin	LIU Yan-long, ZHENG Yi-an (1332)
Spatial Distribution and Influential Factors of Nutrients in Rivers of a Typical Mountainous City: A Case Study of the Qingshuixi River in Chongqing	WANG Chao, YE Qiu, JIA Bo-yang, <i>et al.</i> (1346)
River-Lake States in the Tributary of the Three Gorges Reservoir Area and Their Effects on the Phosphorus Content of Different Forms in the Sediment	HUANG Wei, ZHANG Xing, LUO Xiao-jiao, <i>et al.</i> (1356)
Molecular Signatures of Dissolved Organic Matter in the Paihe River and Its Tributaries	ZHAN Ya, YIN Hao, FENG Jing-wei, <i>et al.</i> (1365)
Multiphase Spatial Distribution Characteristics of Cd Morphology in Typical Intertidal Zones in the Guanglong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area and Its Influencing Factors	CUI Xin-yue, MO Wu-qiu, LIAO Jian-bo (1375)
Occurrence Characteristics and Risk Assessment of Antibiotics in the Surface Water of Luoma Lake and Its Main Inflow Rivers	GONG Run-qiang, ZHAO Hua-jin, GAO Zhan-qi, <i>et al.</i> (1384)
Contamination Characteristics and Ecological Risk Assessment of Antibiotics in the Third Drain of Ningxia	LI Fu-juan, GAO Li, LI Ling-yun, <i>et al.</i> (1394)
Historical Changes and Responses to Human Activities of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Lake Sediments from Northern China During the Past 100 Years	GONG Xiong-hu, ZHAO Zhong-hua, DING Qi-qi, <i>et al.</i> (1404)
Characteristics of Bacterioplankton Community Between River and Lake/Reservoir in the Yangtze River Basin	HU Yu-xin, ZHANG Jing, HUANG Jie, <i>et al.</i> (1414)
Characteristics of Bacterial Community Structure in Wuliangs Lake During an Irrigation Interval in Hetao Plain	SHI Yu-jiao, LI Wen-bao, ZHANG Bo-yao, <i>et al.</i> (1424)
Effects of Landscape Structures on Bacterioplankton Communities at Multi-spatial Scales in the Yuanhe River	SHU Wang, WANG Peng, DING Ming-jun, <i>et al.</i> (1434)
Microbial Community Structure on Microplastic Surface in the <i>Grus leucogeranus</i> Reserve of Poyang Lake	LIU Shu-li, JIAN Min-fei, ZOU Long, <i>et al.</i> (1447)
Influence of Microplastics on the Development of <i>Proteus</i> Biofilm	TAO Hui, QI Yi-ting, YU Duo, <i>et al.</i> (1455)
Deposition Law of Low-Density Microplastics Aggregation in Wuliangs Lake	LIU Yu, SHI Xiao-hong, ZHANG Sheng, <i>et al.</i> (1463)
Adsorption of Fulvic Acid on Virgin and Aging Microplastics	SONG Ya-li, YU Ya, ZHENG Lei, <i>et al.</i> (1472)
Diffusive Fluxes and Controls of N ₂ O from Coastal Rivers in Tianjin City	TANG Meng-yao, HU Xiao-kang, WANG Hong-wei, <i>et al.</i> (1481)
Effects of Hematite and Biochar Addition on Wastewater Treatment Efficiency, Greenhouse Gas Emission, and Microbial Community in Subsurface Flow Constructed Wetland	CHEN Xin-tong, HAO Qing-ju, XIONG Yan-fang, <i>et al.</i> (1492)
Identification and Optimization Method of Rainfall-Runoff Pollution Risk Level	QI Xiao-tian, ZHANG Zhi-ming, ZHAO Xin, <i>et al.</i> (1500)
Factor Analysis of Disinfection Byproduct Formation in Drinking Water Distribution Systems Through the Bayesian Network	JIANG Shan-shan, WANG Zhen-yu, GAO Quan, <i>et al.</i> (1512)
Selective Adsorption of Au(III) by Activated Carbon Supported Polthioamides and Adsorption Mechanism	ZHAO Wen-jin, ZHANG Shen, AN Xiao-qiang, <i>et al.</i> (1521)
Impacts of F/M Ratio on Microbial Networks in Activated Sludge	ZHANG Bing, SUN Chen-xiang, WEN Xiang-hua (1529)
Geochemical Characteristics and Source Apportionment of Soil Elements in an Urban-rural Integration Area: A Case Study in the Qinglong Area of Tianfu New District	LIU Shu-huai, WANG De-wei, SHI Ze-ming, <i>et al.</i> (1535)
Ecological and Health Risk Assessments Based on the Total Amount and Speciation of Heavy Metals in Soils Around Mining Areas	WANG Rui, CHEN Nan, ZHANG Er-xi (1546)
Characteristics of Antimony Migration and Transformation and Pollution Evaluation in a Soil-Crop System Around a Tin Mine in Hunan Province	ZHANG Long, SONG Bo, HUANG Feng-yan, <i>et al.</i> (1558)
Effect of Controlling Heavy Metals in Soil of Rare Earth Mining Area by Biochar Supported Graphene Oxide	YANG Shi, LIU Zu-wen, LONG Bei, <i>et al.</i> (1567)
Enhanced Remediation of Cd Contaminated Soil by Cotton with DOM	MIN Tao, LUO Tong, CHEN Li-li, <i>et al.</i> (1577)
Novel Insight into the Adsorption Mechanism of Fe-Mn Oxide-Microbe Combined Biochar for Cd(II) and As(III)	LIAN Bin, WU Ji-zi, ZHAO Ke-li, <i>et al.</i> (1584)
Variations in Cadmium Accumulation and Transport and Ionic Traits Among Different Winter Wheat Varieties	LIU Chang, XU Ying-ming, HUANG Qing-qing, <i>et al.</i> (1596)
Cadmium Accumulation Characteristics of Different Heat Varieties Under Cadmium Stress	REN Chao, REN Yu-zhong, WANG Hao, <i>et al.</i> (1606)
Effect of Different Land Use Types on the Diversity of Soil Bacterial Community in the Coastal Zone of Jialing River	LIU Kun-he, XUE Yu-qin, ZHU Lan-ping, <i>et al.</i> (1620)
Effects of Earthworms/Biochar on Bacterial Diversity and Community in As-contaminated Red Soil	SU Qian-qian, LI Lian-fang, ZHU Chang-xiong, <i>et al.</i> (1630)
Effects of DA-6 and EDDS on Growth and Cd Uptake by <i>Solanum nigrum</i> L. and on the Soil Bacterial Community Structure	LUO Yang, SUN Li, LIU Fang, <i>et al.</i> (1641)
Effects of Plastic Mulch Film on Soil Nutrients and Ecological Enzyme Stoichiometry in Farmland	HU Zhi-e, XIAO Mou-liang, WANG Shuang, <i>et al.</i> (1649)
Effects of Warming and Increased Precipitation on Soil Respiration of Abandoned Grassland in the Loess-Hilly Regions	WANG Xing, ZHONG Ze-kun, ZHU Yu-fan, <i>et al.</i> (1657)
Effect of Film Mulching, Straw Retention, and Nitrogen Fertilization on the N ₂ O and N ₂ Emission in a Winter Wheat Field	PENG Yi, LI Hui-tong, ZHANG Shao-wei, <i>et al.</i> (1668)
Effects of Straw Returning on Soil Ammonia Volatilization Under Different Production Conditions Based on Meta-analysis	ZHAO Zheng-xin, WANG Xiao-yun, TIAN Ya-jie, <i>et al.</i> (1678)
Impacts of Fertilization on Soil Antibiotic Resistance Genes Across Croplands: A Meta-Analysis	RAN Ji-wei, XIAO Qiong, HUANG Min, <i>et al.</i> (1688)