

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第9期

Vol.39 No.9

2018

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

长三角区域非道路移动机械排放清单及预测	黄成, 安静宇, 鲁君 (3965)
基于 COPERT 模型的江苏省机动车时空排放特征与分担率	李荔, 张洁, 赵秋月, 李慧鹏, 韩军赞 (3976)
上海典型燃烧源铅和汞大气排放趋势分析	杨静, 陈龙, 刘敏, 孟祥周, 张希 (3987)
广东省秸秆燃烧大气污染物及 VOCs 物种排放清单	孙西勃, 廖程浩, 曾武涛, 张永波, 梁小明, 叶代启 (3995)
重庆市北碚城区气溶胶中水溶性无机离子的质量浓度及其粒径分布	李彦沛, 郝庆菊, 温天雪, 吉东生, 刘子锐, 王跃思, 江长胜 (4002)
济南市夏、冬季 PM _{2.5} 中化学组分的季节变化特征及来源解析	刘晓迪, 孟静静, 侯战方, 李静, 邢继钊, 魏本杰, 张二勋, 刘加珍, 董杰 (4014)
聊城冬季一重污染过程 PM _{2.5} 污染特征及成因分析	张敬巧, 吴亚君, 张萌, 王涵, 陈振兴, 胡君, 李慧, 范晓龙, 柴发合, 王淑兰 (4026)
夏季青岛大气气溶胶中不同形态磷的浓度、来源及沉降通量	王楠, 马森, 石金辉, 高会旺, 姚小红 (4034)
晋城市冬季环境空气中挥发性有机物的污染特征及来源解析	杨帆, 闫雨龙, 戈云飞, 李如梅, 李颖慧, 余化龙, 彭林 (4042)
北京冬季降尘重金属富集程度及综合污染评价	熊秋林, 赵文吉, 李大军, 周涛 (4051)
合肥市典型交通干道大气苯系物的特征分析	孟凡昊, 秦敏, 梁帅西, 谢品华, 夏晖晖, 段俊, 方武, 唐科, 李昂, 魏桢, 王凤 (4060)
填埋场作业面 NMOCs 臭氧生成潜势及高贡献物质	李昊, 刘彦君, 陈坦, 闫秋鹤, 代辉祥, 王洪涛, 陆文静 (4070)
北京市混凝土搅拌站风蚀扬尘排放特征	李贝贝, 韩凯丽, 秦建平, 王鑫, 宋博, 黄玉虎, 张春来 (4078)
基于源解析的傍河水源地污染风险季节性变化特征分析	高翔, 左锐, 郭学茹, 孟利, 刘鑫, 王膜, 滕彦国, 王金生 (4086)
透水路面-生物滞留池组合道路的城市面源污染控制效果评估	官曼莉, 左俊杰, 任心欣, 赵洪涛, 罗茜, 廖云杰, 李叙勇 (4096)
黄河兰州段水体中有色溶解性有机质组成、空间分布特征及来源分析	赵夏婷, 李珊, 王兆炜, 谢晓芸 (4105)
黄河干流宁蒙段溶解性有机物组分特征及其与金属离子的相关性	席玥, 王婷, 倪晋仁, 韩鹏, 仪马兰, 郑彤, 蒋咏, 马若绮, 崔锋 (4114)
伊洛河和浑太河春季水体光学吸收特征的对比	李柳阳, 邵田田, 张鑫, 宋炎炎, 苏东辉, 王涛 (4122)
马莲河流域化学风化的季节变化和影响因素	王雨山, 韩双宝, 邓启军, 祁晓凡 (4132)
柳江盆地浅层地下水硝化型水特征和成因分析	徐进, 何江涛, 彭毅, 曾颖 (4142)
地下水氮污染原位修复缓释碳源材料的研发与物化-生境协同特性	张雯, 尹琳, 周念清 (4150)
三峡水库干流沉积物及消落带土壤磷形态及其分布特征	张志永, 万成炎, 胡红青, 彭建华, 侯娟, 丁庆秋, 袁玉洁 (4161)
蓄水前后三峡库区香溪河沉积物磷形态分布特征及释放通量估算	刘心愿, 宋林旭, 纪道斌, 刘德富, 李欣, 黄佳维, 赵冲, 唐咏春, 平明明 (4169)
锆改性沸石添加对重污染河道底泥磷释放和钝化的影响	何思琪, 张薇, 林建伟, 詹艳慧, 李娟英, 邢云青, 高春梅, 黄宏, 梁舒静 (4179)
洱海流域乡镇尺度上人类活动对净氮输入量的影响	李影, 刘宏斌, 雷秋良, 胡万里, 王洪媛, 翟丽梅, 任天志, 连慧妹 (4189)
我国典型潮间带沉积物-水界面无机氮源汇效应	聂家琴, 王东启, 陈杰, 李杨杰, 陈姝, 陈振楼 (4199)
东太湖水产养殖对沉积物中氨氧化原核生物的影响	储瑜, 何肖微, 曾巾, 赵大勇, 孙强, 曹萍, 吴庆龙 (4206)
处理采矿废水湿地沉积物中厌氧氨氧化过程	汪海波, 马丁, 岳正波, 陶巍, 陈天虎, 王进 (4215)
华东地区某饮用水源地中磺胺类抗性基因的分布特征	胡亚茹, 姜蕾, 张天阳, 雷丹丹, 姜巍巍, 张东, 林匡飞, 崔长征 (4222)
制革废水处理过程中磺胺类抗生素和抗性细菌的分布特征	花莉, 李璐, 杨春燕 (4229)
人工湿地不同基质和粒径对污水净化效果的比较	赵林丽, 邵学新, 吴明, 姜小三, 陆琳莹 (4236)
城市污水管网中不同生化作用的基质流向	姚翔译, 石烜, 桑浪涛, 金鹏康, 王晓昌 (4242)
微絮凝对腐殖酸超滤过程膜污染的减缓特性	王旭东, 石彩霞, 廖正伟, 贺毓淑, 王磊 (4249)
UV 强化草酸络合 Fe ³⁺ 活化过硫酸盐氧化降解苯胺	韩东晖, 李瑛, 李开明, 应光国 (4257)
焦化废水 A/O ² 和 A/O/H/O 处理工艺中多环芳烃的削减行为分析	吴海珍, 孙胜利, 刘国新, 韦景悦, 吴超飞, 韦朝海, 钟练文, 彭亚环 (4265)
长期侧流提取对 EBPR 系统除磷及其磷回收性能的影响	俞小军, 李杰, 周猛, 宋璐, 李维维, 王亚娥, 马娟, 吕慧 (4274)
NaCl 盐度对 A ² /O 工艺缺氧区胞外聚合物及生物絮凝性的影响	张兰河, 田蕊, 郭静波, 贾艳萍, 张海丰, 李正, 陈子成 (4281)
温度和 pH 值对铁盐型氨氧化过程氮素转化的影响	陈方敏, 金润, 袁琨, 李祥, 黄勇, 顾澄伟 (4289)
游离氨 (FA) 对氨氧化菌 (AOB) 活性抑制动力学试验	孙洪伟, 于雪, 高宇学, 李维维, 祁国平, 许涓 (4294)
HRT 对厌氧氨氧化协同异养反硝化脱氮的影响	安芳娇, 赵智超, 黄利, 黄剑明, 邵兆伟, 陈永志 (4302)
长期储存亚硝化絮状污泥活性的恢复	李田, 魏凡凯, 汪裕昌, 沈耀良, 吴鹏, 宋吟玲 (4310)
广西西江流域农田土壤重金属含量特征及来源解析	宋波, 张云霞, 庞瑞, 杨子杰, 宾娟, 周子阳, 陈同斌 (4317)
紫色土壤有机碳活性组分对生物炭施用量的响应	罗梅, 田冬, 高明, 黄容 (4327)
秸秆及生物炭还田对油菜/玉米轮作系统碳平衡和生态效益的影响	李娇, 田冬, 黄容, 徐国鑫, 黎嘉成, 高明, 王子芳 (4338)
低积累水稻品种联合腐殖酸、海泡石保障重镉污染稻田安全生产的潜力	谢晓梅, 方至萍, 廖敏, 黄宇, 黄小辉 (4348)
臭氧和干旱交互作用对杨树叶片抗氧化酶活性的影响	周慧敏, 李品, 高峰, 冯兆忠, 张殷波 (4359)
再生水不同灌水水平对土壤酶活性及耐热大肠菌群分布的影响	韩洋, 李平, 齐学斌, 崔丙健, 常迪, 马欢欢 (4366)
黄淮海地区鸡粪有机肥重金属含量特征及环境风险	李发, 徐应明, 王林, 梁学峰, 孙约兵, 纪艺凝, 栾润宇 (4375)
村镇生活垃圾重金属含量及其来源分析	靳琪, 高红, 岳波, 黄启飞, 王瑜堂, 吴小丹, 於俊颖, 杨惠媛 (4385)
《环境科学》征订启事 (3986)	《环境科学》征稿简则 (4050) 信息 (4085, 4104, 4337)

北京市混凝土搅拌站风蚀扬尘排放特征

李贝贝^{1,2}, 韩凯丽^{2,3}, 秦建平², 王鑫⁴, 宋博^{1,2}, 黄玉虎^{2*}, 张春来⁵

(1. 首都师范大学资源环境与旅游学院, 北京 100048; 2. 北京市环境保护科学研究院国家城市环境污染控制工程技术研究中心, 北京 100037; 3. 河北先河环保科技股份有限公司, 石家庄 050035; 4. 中国环境监测总站, 北京 100012; 5. 北京师范大学地表过程与资源生态国家重点实验室, 防沙治沙教育部工程研究中心, 北京 100875)

摘要: 混凝土搅拌站是北京市一类典型扬尘源, 本研究以北京市 2 座混凝土搅拌站为例, 采用美国沙漠所的便携式风洞 (PI-SWRL) 测试搅拌站料堆和道路风蚀扬尘排放特征, 结合搅拌站料堆和道路表面扰动频次以及当地气象数据, 建立搅拌站料堆和道路风蚀扬尘 $PM_{2.5}$ 本地化排放因子。结果表明: ① 搅拌站骨料大棚进口、混凝土装载区、社会道路进口和搅拌站进口道路风蚀扬尘 $PM_{2.5}$ 日均排放因子差异不明显, 分别为 0.45 、 0.41 、 0.31 和 $0.30 \text{ kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{d})^{-1}$, 降水对道路风蚀扬尘 $PM_{2.5}$ 年排放因子的削减率仅为 4%; ② 搅拌站粗石、细石、粗砂和细砂料堆风蚀扬尘 $PM_{2.5}$ 日均排放因子分别为 0.10 、 0.12 、 0.26 和 $2.02 \text{ kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{d})^{-1}$, 细砂料堆风蚀扬尘排放因子是粗石、细石和粗砂料堆的 20.5、16.8 和 7.7 倍, 细砂料堆春季排放因子是夏秋冬季的 6.4、3.4 和 1.3 倍; ③ 北京市搅拌站料堆和道路风蚀扬尘 $PM_{2.5}$ 日均排放因子分别为 $1.13 \text{ kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ 和 $0.37 \text{ kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{d})^{-1}$, 是 AP-42 文件 (c11s12 混凝土, 1995 年版) 料堆风蚀扬尘排放因子推荐值的 3.9 和 1.3 倍, 搅拌站风蚀扬尘排放因子的不确定性范围为 34% ~ 92%; ④ 建议搅拌站加强道路洒水和清扫保洁, 对料堆尤其细砂料堆实施全封闭储存和喷雾降尘。

关键词: 混凝土搅拌站; 料堆; 铺装道路; 风蚀扬尘; 排放因子

中图分类号: X51 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)09-4078-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.201801024

Emission Characteristics of Wind-Eroded Dust from Concrete Batching Plants in Beijing

LI Bei-bei^{1,2}, HAN Kai-li^{2,3}, QIN Jian-ping², WANG Xin⁴, SONG Bo^{1,2}, HUANG Yu-hu^{2*}, ZHANG Chun-lai⁵

(1. College of Resource Environment and Tourism, Capital Normal University, Beijing 100048, China; 2. National Engineering Research Center of Urban Environmental Pollution Control, Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection, Beijing 100037, China; 3. Hebei Sailhero Environmental Protection Hi-tech Co., Ltd., Shijiazhuang 050035, China; 4. China National Environmental Monitoring Centre, Beijing 100012, China; 5. State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, Engineering Center of Desertification and Blown-sand Control, Ministry of Education, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: Concrete batching plants are a typical source of fugitive dust in Beijing. In this study, two concrete batching plants in Beijing were used to test wind erosion of dust with a Portable In-suit Wind Erosion Laboratory (PI-SWRL) designed by the Desert Research Institute (DRI). Sand and aggregate storage piles and paved roads in concrete batching plants were tested to determine the emission characteristics of wind eroded dust. Combining the frequencies of disturbance of storage piles and paved road surface with local meteorological data, localized wind erosion dust emission factors of $PM_{2.5}$ were established. Results demonstrate that: ① There are small differences in daily average emission factors for $PM_{2.5}$ between the aggregate warehouse entrance area, concrete loading area, social road import area, and concrete batching plant entrance area, with these being 0.45, 0.41, 0.31, and $0.30 \text{ kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{d})^{-1}$, respectively. ② Daily average emission factors for $PM_{2.5}$ of coarse stone, fine stone, coarse sand, and fine sand storage piles are 0.10, 0.12, 0.26, and $2.02 \text{ kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{d})^{-1}$, respectively. Emission factors of fine sand storage piles are 20.5, 16.8, and 7.7 times greater than those of coarse stone, fine stone, and coarse sand, respectively, and spring emission factors are 6.4, 3.4, and 1.3 times greater than those of summer, autumn, and winter, respectively. ③ Daily average emission factors for $PM_{2.5}$ of storage piles and paved roads are 1.13 and $0.37 \text{ kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{d})^{-1}$, respectively 3.9 and 1.3 times higher than the wind erosion factor from storage piles from AP-42 files (c11s12 concrete batching, 1995); the uncertainty range of the emission factor is 34% - 92%. ④ It is recommended to strengthen watering, sweeping, and cleaning of paved roads, and to ensure fully enclosed storage and use of spray water to reduce wind erosion of dust from storage piles, especially from fine sand piles.

Key words: concrete batching plant; storage piles; paved road; wind erosion dust; emission factor

收稿日期: 2018-01-03; 修订日期: 2018-03-06

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2017YFF0211804); 国家科技支撑计划项目 (2014BAC23B02); 北京市环保院基金项目 (2017-B-04)

作者简介: 李贝贝 (1993 ~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为扬尘污染控制, E-mail: Leebeibei0404@163.com

* 通信作者, E-mail: huangyuhu@sina.com

北京市 2017 年全市空气中细颗粒物($\text{PM}_{2.5}$)年均浓度值为 $58 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 较 2016 年同比下降 20.5%^[1], 是 GB 3095-2012《环境空气质量标准》二级标准的 1.7 倍, 北京市空气污染形势仍然严峻^[2-4]. 北京市 2018 年发布的 $\text{PM}_{2.5}$ 源解析结果表明, 扬尘占本地排放源的比例为 16%, 相比 2014 年上升了 1.7%^[5], 混凝土搅拌站是北京市一类典型扬尘源^[6, 7]. 北京市 1991 年水泥混凝土搅拌量约为 600 万 m^3 , 2013 年搅拌量达到峰值(约 6 000 万 m^3), 是 1991 年的 10 倍^[7], 2015~2017 年北京城市副中心、北京环球影城和大兴国际机场等多项大型工程投入建设, 使得北京市混凝土搅拌量居高不下.

搅拌站扬尘排放环节包括砂石骨料多次转移、水泥与矿物掺合剂输送到筒仓、称量斗装载原材料、搅拌筒装载与搅拌原材料、场区道路扬尘和料堆风蚀扬尘等. 黄玉虎等^[7]综合美国环保署(US EPA)和南加州空气质量管理局的搅拌站扬尘排放因子, 并在北京市典型搅拌站开展道路积尘负荷测试, 建立了北京市搅拌站各生产环节及综合扬尘排放因子. 其中, 料堆风蚀扬尘直接引用 US EPA 的 AP-42 文件(c11s12 混凝土, 1995 年版)排放因子^[8], 结果表明, 搅拌站料堆风蚀扬尘 $\text{PM}_{2.5}$ 排放因子对无控制综合扬尘排放因子的贡献率仅为 0.5%^[7], 这与人们对搅拌站扬尘污染特征的普遍认识不一致. 实际上, 搅拌站风蚀扬尘源除料堆之外还包括场区铺装道路, 砂石骨料、水泥及混凝土等物料遗撒在道路上会产生道路扬尘和风蚀扬尘, 北京市急需开展搅拌站料堆和道路风蚀扬尘排放特征研究.

风蚀扬尘排放因子研究方法包括 2 种, 第 1 种是 AP-42 文件(c13s0205 工业风蚀, 2006 年版)的经验公式法^[9], 第 2 种是风洞模拟法. AP-42 经验公式源自前人的风洞模拟测试结果, 经验公式中的关键参数是物料阈值摩擦风速, AP-42 文件推荐的阈值摩擦风速应用在搅拌站时存在一定误差; 风洞模拟法指利用风洞模拟自然风蚀过程, 可研究物料起尘风速、阈值摩擦风速和风蚀扬尘排放因子等, 风洞模拟法测试结果优于 AP-42 经验公式. 国内外很多学者采用移动式风洞原位测试风蚀扬尘^[10, 11], 或将土壤切块送到实验室使用风洞异位测试风蚀扬尘^[12, 13], 但是这 2 种风洞都存在体积大、操作复杂、试验投入高等缺点. 因此, 美国沙漠所研制了一款便携式风洞(PI-SWERL)^[14, 15], 近年来该风洞

广泛应用于干河床^[16, 17]、沙漠^[18, 19]、矿区^[20]、越野车训练场^[21, 22]、喷洒结壳抑尘剂的土壤^[23]、非铺装道路^[24]、铺装道路^[20, 25]和树池裸地^[26]等风蚀扬尘测试. 本研究采用便携式风洞(PI-SWERL)对北京市典型搅拌站料堆和道路风蚀扬尘排放特征进行测试, 估算搅拌站料堆和道路风蚀扬尘 $\text{PM}_{2.5}$ 排放因子, 以期完善搅拌站扬尘本地化排放因子和修订 DB 11/642-2014《预拌混凝土绿色生产管理规定》提供技术支撑.

1 材料与方法

1.1 风蚀扬尘测试装置

采用风蚀扬尘测试装置测试搅拌站风蚀扬尘排放特征, 该测试装置与李贝贝等^[26]测试树池裸地所采用的装置相同, 其核心设备(见图 1)是美国沙漠所研制的便携式风洞^[20](PI-SWERL), 由风洞腔体、旋转环、DustTrak8530 智能粉尘仪、控制箱和电脑组成.

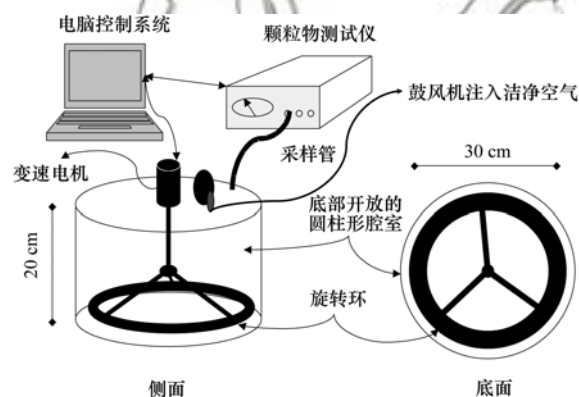


图 1 风蚀扬尘测试装置示意

Fig. 1 Schematic diagram of device for testing wind-eroded dust

1.2 排放因子测试方法

风蚀扬尘排放因子测试方法步骤如下: ①使用 PI-SWERL 斜坡模式^[20]确定料堆和道路对应的便携式风洞最大转速, 本文 PI-SWERL 最大转速为 5 000 $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ 时, 对应 10 m 高度处风速为 $15.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 相当于 7 级风; ②采用阶梯模式模拟测试不同风速下料堆和道路风蚀扬尘 $\text{PM}_{2.5}$ 排放潜势^[20, 26]; ③结合搅拌站所属区域 2016 年气象条件估算搅拌站料堆和道路风蚀扬尘排放因子.

搅拌站风蚀扬尘源包括料堆和道路. 其中, 料堆包括粗骨料堆和细骨料堆, 也称石料堆(粗石和细石)和砂料堆(粗砂和细砂); 搅拌站内外道路划分为 4 种区域: 搅拌站进口、社会道路进口、混凝土装载区、骨料大棚进口^[7]. 在北京市某郊区选取 2

座搅拌站分别对 4 种料堆和 4 种道路进行测试, 搅拌站料堆和道路风蚀扬尘测试点示意图 2, 每种料堆和道路随机选取 3 个位置进行测试, 测试前 48 h 内无降水和人工洒水。



图 2 搅拌站风蚀扬尘测试点位置示意

Fig. 2 Schematic diagram of the test point for wind-eroded dust in concrete batching plant

1.3 料堆和道路扰动频次

估算风蚀扬尘排放因子需要测试风蚀扬尘排放潜势, 还应该调研表面物料扰动^[21,24]频次, 以北京市某搅拌站 2016 年 12 月 (720 h) 的原材料入场车次 (每月 601 车次) 和混凝土出场车次 (每月 1705 车次) 数据为例, 考虑到还需要通过装载机将骨料由料堆转移到传送带, 可以确定搅拌站料堆和道路表面物料扰动频次为 $1 \text{ 次} \cdot \text{h}^{-1}$ 。

1.4 气象条件

已知搅拌站料堆和道路表面物料扰动频次为 $1 \text{ 次} \cdot \text{h}^{-1}$, 因此选用搅拌站所属区域气象站 2016 年逐时气象参数估算扬尘排放因子, 降水和极大风速是与风蚀扬尘排放因子最为相关的气象参数^[9]。图 3 是搅拌站所属区域 2016 年逐日气象条件, 可以看出降水集中在 5 ~ 10 月, 1 ~ 4 月极大风速较大。春夏秋冬四季极大风速 90 百分位数分别为 14.5、12.4、11.1 和 $12.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 降水 90 百分位数分别为 3.5、22.5、4.5 和 $0.0 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 。

根据 AP-42 文件中铺装道路扬尘排放因子模型^[27], 可知当小时降水量 $\geq 0.25 \text{ mm}$ 时, 可削减 1.2 h 的排放量。本研究确定当小时降水量 $\geq 0.25 \text{ mm}$ 时, 可削减当前 1 h 的排放量; 当小时降水量 $\geq 0.50 \text{ mm}$ 时, 可削减当前和未来 1 h 的排放量; 当小时降水量 $\geq 0.75 \text{ mm}$ 时, 可削减当前和未来 2 h 的排放量。料堆参照道路估算降水对风蚀扬尘排放因子的影响。

2 结果与讨论

2.1 料堆和道路风蚀扬尘排放特征

图 4(a) 展示了 PI-SWERL 阶梯模式下搅拌站 4 种料堆风蚀扬尘排放特征 (因为细砂料堆测试结果明显大于其他料堆, 为了便于作图和比较, 本文将所有料堆风蚀扬尘图中有关细砂料堆测试数据都统一除以 5), 从中可以看出, 石料堆和砂料堆风蚀扬

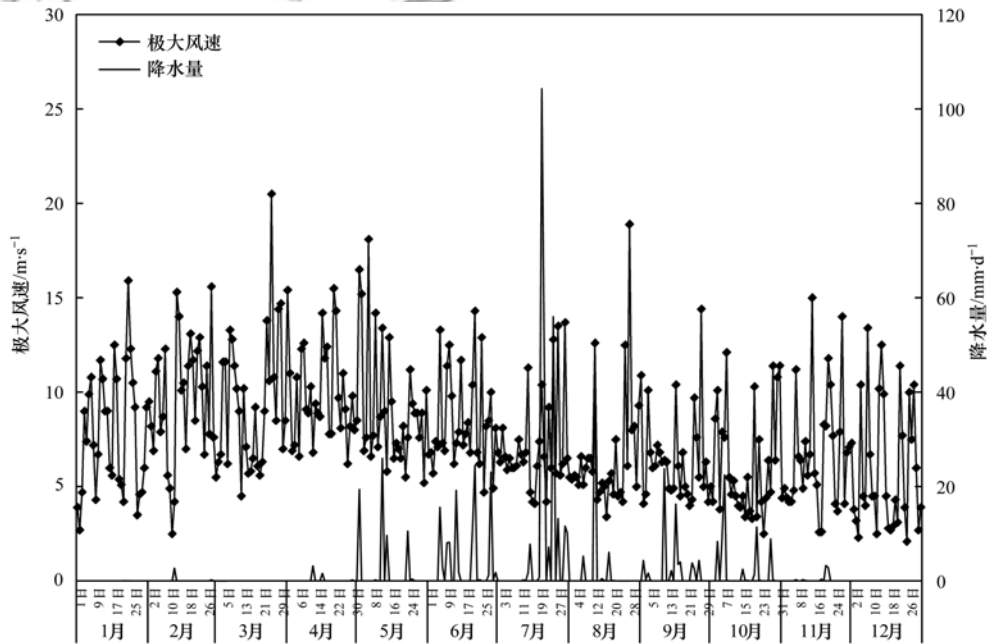


图 3 搅拌站所属区域 2016 年逐日气象条件

Fig. 3 Daily weather conditions in 2016 of the district within which concrete batching plants are located

尘排放潜势有明显差异,石料堆(粗石和细石)风蚀扬尘排放潜势较低,无论是瞬时排放潜势还是累积排放潜势,2种石料堆的曲线基本重合,说明这2种石料堆表面可风蚀的 $\text{PM}_{2.5}$ 量基本相同.当模拟风速相当于10 m高处风速 $7.4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以下时,4种料堆基本都没有 $\text{PM}_{2.5}$ 排放.由图4可得,在PI-SWERL最大转速为 $5\,000 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 的阶梯模式下,石料堆风蚀扬尘 $\text{PM}_{2.5}$ 排放潜势低于4种道路.砂料堆(粗砂和细砂)风蚀扬尘 $\text{PM}_{2.5}$ 排放潜势处于较高水平,并且当风速维持在某一特定值时,瞬时排放潜势下降的速度明显低于相同风速下的道路风蚀扬尘.其中,细砂料堆的 $\text{PM}_{2.5}$ 排放潜势最高,在模拟10 m高度处风速为 $15.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,瞬时排放潜势最高可达 $6.8 \text{ mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$,累积排放潜势可达 $668.8 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}$.4种料堆风蚀扬尘排放潜势由大到小依次为:细砂>粗砂>粗石≈细石,比例关系为

88.7:12.3:1.2:1.0.

图4(b)展示了PI-SWERL阶梯模式下搅拌站场区4种道路风蚀扬尘排放特征.4种道路的 $\text{PM}_{2.5}$ 瞬时排放潜势随风速变化的趋势大致相同,当风速以一定速率增大时, $\text{PM}_{2.5}$ 瞬时排放潜势也以一定的速率逐渐增大,当风速维持在某一特定值时, $\text{PM}_{2.5}$ 瞬时排放潜势几乎立即下降,表明搅拌站4种道路风蚀扬尘源均为有限源.相比较而言,当风速维持于某一特定值时,骨料大棚进口瞬时排放潜势下降缓慢,说明骨料大棚进口区域道路风蚀扬尘排放潜势较大,在模拟10 m高度处风速为 $15.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,骨料大棚进口 $\text{PM}_{2.5}$ 瞬时排放潜势可达 $0.9 \text{ mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$,累积排放潜势也是4类道路中最高的,达到了 $80.5 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}$.4类道路风蚀扬尘排放潜势由大到小依次为:骨料大棚进口>搅拌站进口>混凝土装载区>社会道路进口,比例关系为

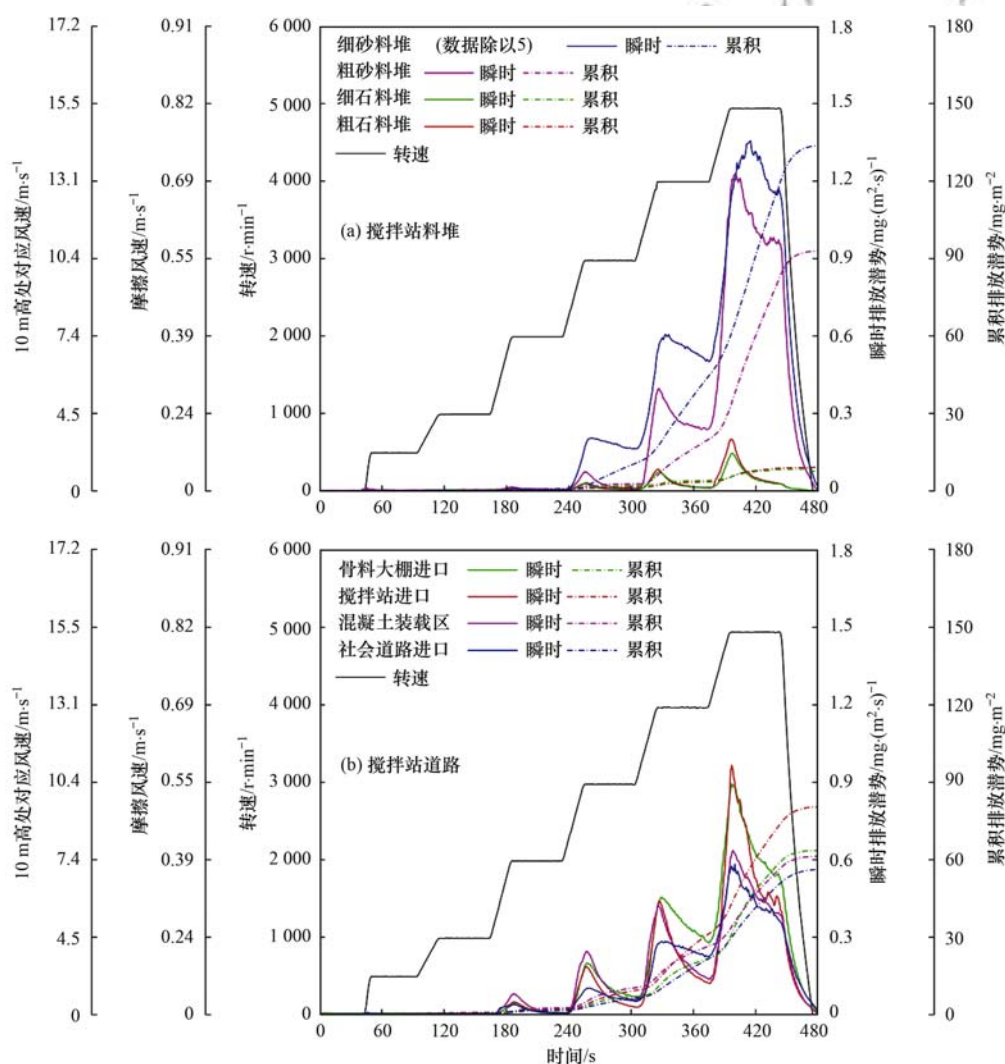


图4 搅拌站料堆和道路风蚀扬尘排放特征

Fig. 4 Emission characteristics of wind-eroded dust of storage piles and roads in concrete batching plants

1.43:1.13:1.09:1.00, 后3类道路风蚀扬尘排放潜势较为接近。

2.2 料堆风蚀扬尘排放因子

图5(a)是搅拌站4种料堆在不同摩擦风速(u^*)下所有测试点 $PM_{2.5}$ 累积排放潜势。当摩擦风速在 $0.55\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 及以下时,4种料堆不同位置测试的 $PM_{2.5}$ 累积排放潜势都相对集中,尤其是粗石和细石料堆,各种摩擦风速下的测试数据都非常集中。当摩擦风速为 $0.69\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 $0.82\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,粗砂和细砂料堆的测试数据变得相对分散,不确定性明显增大。

参照李贝贝等^[26]处理树池裸地风蚀扬尘排放潜势数据的方式,采用多段线性回归方程对不同 u^* 下 $PM_{2.5}$ 累积排放潜势数据点进行回归,分别得到4种料堆的风蚀扬尘累积排放潜势与 u^* 关系,如图5(b)所示。从中可见,随着摩擦风速的增加,粗石和细石料堆的 $PM_{2.5}$ 累积排放潜势增长趋势基本相同,都非常低。而细砂料堆在数值除以5的情况下,增长速率也高于其他料堆。

结合气象参数计算搅拌站4种料堆风蚀扬尘 $PM_{2.5}$ 排放因子,如图6所示。粗石和细石料堆风蚀

扬尘 $PM_{2.5}$ 月度排放因子变化趋势和数值都很接近,粗砂和细砂风蚀扬尘排放因子冬春季高,春季排放因子最高,夏季细砂料堆排放因子下降明显。其中细砂春季排放因子是夏秋冬季的6.4、3.4和1.3倍。粗石、细石、粗砂和细砂料堆的风蚀扬尘 $PM_{2.5}$ 日均排放因子分别是 0.10 、 0.12 、 0.26 和 $2.02\text{ kg}\cdot(\text{hm}^2\cdot\text{d})^{-1}$,细砂料堆的扬尘 $PM_{2.5}$ 日均排放因子是粗石、细石和粗砂的20.5、16.8和7.7倍。采用2006年US EPA更新的风蚀扬尘粒径分布^[9]($PM_{2.5}/PM_{10}=0.15$),估算得到所测试粗石、细石、粗砂和细砂料堆风蚀扬尘 PM_{10} 排放因子分别为 0.67 、 0.80 、 1.73 和 $13.47\text{ kg}\cdot(\text{hm}^2\cdot\text{d})^{-1}$ 。

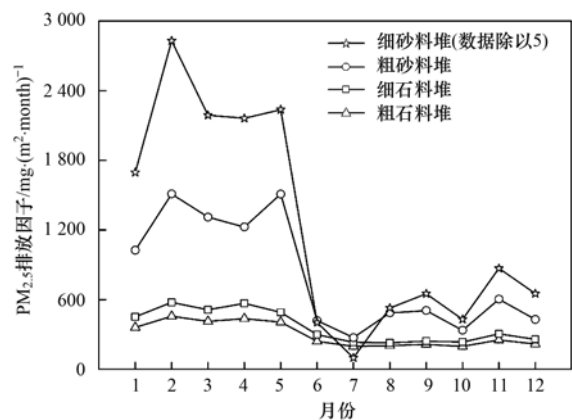


图6 各类料堆风蚀扬尘 $PM_{2.5}$ 月度排放因子

Fig. 6 Monthly $PM_{2.5}$ emission factors of wind-eroded dust from various types of storage piles

2.3 道路风蚀扬尘排放因子

图7(a)是搅拌站4种道路在不同摩擦风速(u^*)下所有测试点 $PM_{2.5}$ 累积排放潜势。当摩擦风速在 $0.55\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 及以下时,相同风速下,4种道路的 $PM_{2.5}$ 累积排放潜势都相对集中,即同一类型道路不同点位的扬尘排放潜势相差不大。当摩擦风速为 $0.69\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 $0.82\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,测试数据变得相对分散,数据的不确定性将在后文进行分析。

如图7(b)所示,随着摩擦风速的增加,4种道路的 $PM_{2.5}$ 累积排放潜势增长趋势相似,其中骨料大棚进口道路累积排放潜势增长速度一直保持最快。

结合气象参数计算搅拌站4种道路风蚀扬尘 $PM_{2.5}$ 排放因子,如图8所示。其风蚀扬尘排放因子的季节分布与粗砂和细砂料堆的排放因子相似,冬春两季排放因子明显高于夏秋两季,且春季排放因子最高。其中,骨料大棚进口道路春季排放因子是夏秋冬季的3.1、2.5和1.2倍。骨料大棚进口、混

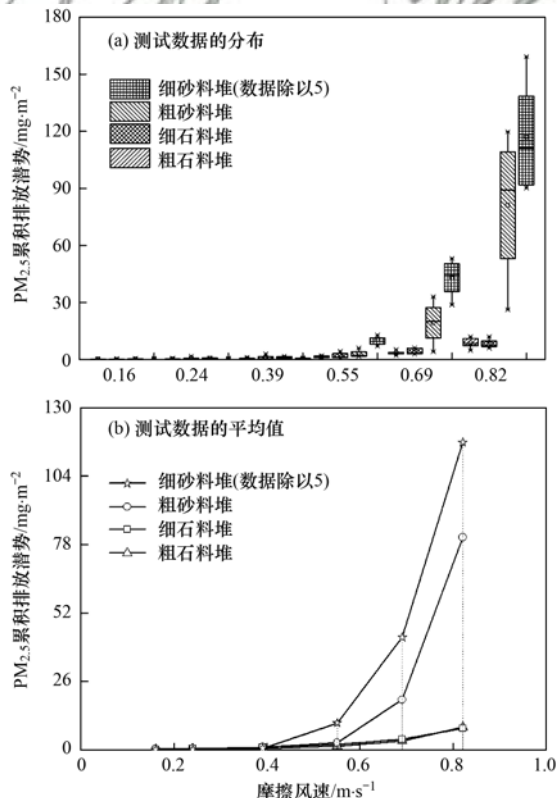


图5 各类料堆 $PM_{2.5}$ 累积排放潜势与 u^* 的关系

Fig. 5 Relationship between cumulative $PM_{2.5}$ emission potential from various types of storage piles and friction wind speed

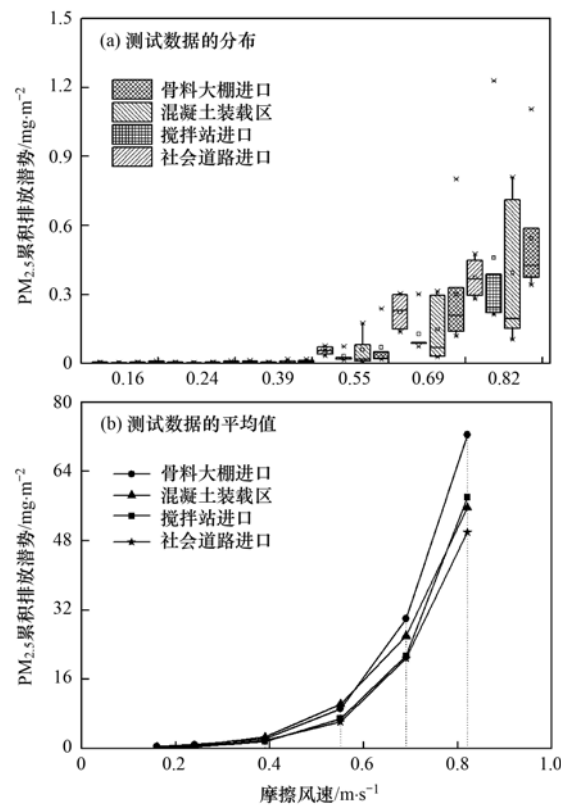


图7 各类道路 $\text{PM}_{2.5}$ 累积排放潜势与 u^* 的关系
Fig. 7 Relationship between cumulative $\text{PM}_{2.5}$ emission potential from various types of road and friction wind speed

凝土装载区、社会道路进口和搅拌站进口道路风蚀扬尘 $\text{PM}_{2.5}$ 日均排放因子分别为 0.45、0.41、0.31 和 0.30 $\text{kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{d})^{-1}$, 采用 2006 年 US EPA 更新的风蚀扬尘粒径分布 ($\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10} = 0.15$)^[9], 得到混凝土搅拌站这 4 种道路风蚀扬尘 PM_{10} 日均排放因子分别为 3.00、2.73、2.07 和 2.00 $\text{kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{d})^{-1}$; 骨料大棚进口处排放因子最高, 但与其他类型道路相比差异不大. 2016 年降水过程对搅拌站 4 种道路风蚀扬尘排放因子的平均削减率仅为 4%; 首先, 降水对极大风速的风蚀作用影响不大; 其次, 是因为降水在铺装道路上易形成径流, 而且重型车行驶过程会加快路面干燥速度.

根据北京市水泥混凝土配方中粗骨料和细骨料的比例^[5], 计算得到料堆风蚀扬尘 $\text{PM}_{2.5}$ 日均排放因子加权平均值为 1.13 $\text{kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{d})^{-1}$, 是行道树树池裸地扬尘排放因子^[26] 加权平均值 [0.72 $\text{kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{d})^{-1}$]^[26] 的 1.6 倍^[26]. 搅拌站道路风蚀扬尘 $\text{PM}_{2.5}$ 日均排放因子平均值为 0.37 $\text{kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{d})^{-1}$, 北京市搅拌站料堆和道路风蚀扬尘排放因子实测值分别是 AP-42 文件(c11s12 混凝土, 1995 年版)^[8] 料堆风蚀扬尘排放因子推荐值 0.29 $\text{kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{d})^{-1}$

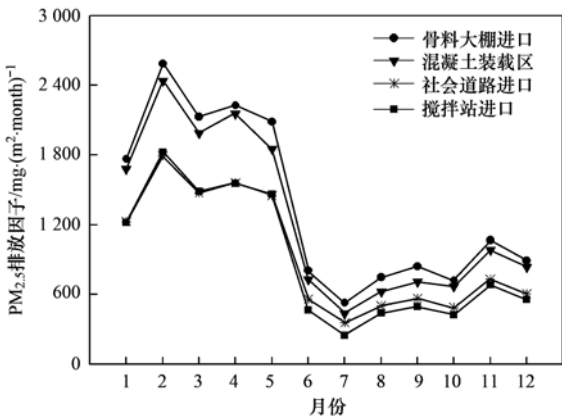


图8 各类道路风蚀扬尘 $\text{PM}_{2.5}$ 月度排放因子
Fig. 8 Monthly $\text{PM}_{2.5}$ emission factors of wind-eroded dust from various types of road

的 3.9 和 1.3 倍, 表明黄玉虎等^[7] 估算的北京市搅拌站风蚀扬尘排放量偏低, 但是因为风蚀扬尘占总排放量比例较低, 因此风蚀扬尘排放因子偏低对搅拌站扬尘排放清单计算结果影响较小.

2.4 排放因子不确定性分析

影响搅拌站料堆和道路风蚀扬尘排放因子不确定性的主要因素是不同 u^* 的排放因子相对标准偏差, 对不同 u^* 下测试点风蚀扬尘累积排放潜势的相对标准偏差加权平均, 分别得到料堆和道路风蚀扬尘 $\text{PM}_{2.5}$ 排放因子不确定性范围, 如表 1 所示. 可以得到, 料堆风蚀扬尘 $\text{PM}_{2.5}$ 排放因子不确定性范围为 34% ~ 59%, 道路风蚀扬尘 $\text{PM}_{2.5}$ 排放因子不确定性范围为 38% ~ 92%, 大于料堆风蚀扬尘排放因子的不确定性范围. 综合起来, 搅拌站风蚀扬尘 $\text{PM}_{2.5}$ 不确定性范围是 34% ~ 92%.

表1 混凝土搅拌站风蚀扬尘 $\text{PM}_{2.5}$ 排放因子不确定性
Table 1 Uncertainty range of emission factors of wind-eroded dust in concrete batching plant

类型		$\text{PM}_{2.5}$ 排放因子不确定度/%
料堆	粗石料堆	34
	细石料堆	59
	粗砂料堆	59
	细砂料堆	41
道路	搅拌站进口	66
	骨料大棚进口	79
	混凝土装载区	92
	社会道路进口	38
合计		34 ~ 92

2.5 建议

建议采用北京市本地化排放因子计算搅拌站扬尘排放清单, 同时搅拌站应加强道路洒水和清扫保洁, 对料堆尤其细砂料堆实施全封闭储存和喷雾

降尘.

3 结论

(1) 搅拌站骨料大棚进口、混凝土装载区、社会道路进口和搅拌站进口道路风蚀扬尘 $PM_{2.5}$ 日均排放因子差异不明显, 分别为 0.45、0.41、0.31 和 $0.30 \text{ kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{d})^{-1}$, 降水对道路风蚀扬尘 $PM_{2.5}$ 年排放因子的削减率仅为 4%.

(2) 搅拌站粗石、细石、粗砂和细砂料堆风蚀扬尘 $PM_{2.5}$ 日均排放因子分别为 0.10、0.12、0.26 和 $2.02 \text{ kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{d})^{-1}$, 细砂料堆风蚀扬尘排放因子是粗石、细石和粗砂料堆的 20.5、16.8 和 7.7 倍, 细砂料堆春季排放因子是夏秋冬季的 6.4、3.4 和 1.3 倍.

(3) 北京市搅拌站料堆和道路风蚀扬尘 $PM_{2.5}$ 日均排放因子平均值分别为 $1.13 \text{ kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ 和 $0.37 \text{ kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{d})^{-1}$, 是 AP-42 文件 (c11s12 混凝土, 1995 年版) 料堆风蚀扬尘排放因子推荐值的 3.9 和 1.3 倍, 搅拌站风蚀扬尘 $PM_{2.5}$ 排放因子的不确定性范围为 34% ~ 92%.

参考文献:

- [1] 2017年北京市环境状况公报[R]. 北京:北京市环境保护局, 2018.
- [2] 吴文景, 常兴, 邢佳, 等. 京津冀地区主要排放源减排对 $PM_{2.5}$ 污染改善贡献评估[J]. 环境科学, 2017, **38**(3): 867-875.
Wu W J, Chang X, Xing J, *et al.* Assessment of $PM_{2.5}$ pollution mitigation due to emission reduction from main emission sources in the Beijing-Tianjin-Hebei region[J]. Environmental Science, 2017, **38**(3): 867-875.
- [3] 王燕丽, 薛文博, 雷宇, 等. 京津冀区域 $PM_{2.5}$ 污染相互输送特征[J]. 环境科学, 2017, **38**(12): 4897-4904.
Wang Y L, Xue W B, Lei Y, *et al.* Regional transport matrix study of $PM_{2.5}$ in Jingjinji region, 2015[J]. 环境科学, 2017, **38**(12): 4897-4904.
- [4] 黄玉虎, 李媚, 曲松, 等. 北京城区 $PM_{2.5}$ 不同组分构成特征及其对大气消光系数的贡献[J]. 环境科学研究, 2015, **28**(8): 1193-1199.
Huang Y H, Li M, Qu S, *et al.* Characteristics of different components of $PM_{2.5}$ and contribution to ambient light extinction coefficient in Beijing[J]. Research of Environmental Sciences, 2015, **28**(8): 1193-1199.
- [5] 北京市环保局. 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]. <http://www.bjepb.gov.cn/bjhrb/index/tpxw/832588/index.html>, 2018-05-14.
- [6] 薛亦峰, 周震, 钟连红, 等. 北京市混凝土搅拌站颗粒物排放特征研究[J]. 环境科学, 2016, **37**(1): 88-93.
Xue Y F, Zhou Z, Zhong L H, *et al.* Characteristic of particulate emissions from concrete batching in Beijing[J]. Environmental Science, 2016, **37**(1): 88-93.
- [7] 黄玉虎, 韩凯丽, 陈丽媛, 等. 北京市混凝土搅拌站扬尘排放因子及排放清单[J]. 中国环境科学, 2017, **37**(10): 3699-3707.
Huang Y H, Han K L, Chen L Y, *et al.* Emission factor and inventory for fugitive dust from concrete batching plants in Beijing[J]. China Environmental Science, 2017, **37**(10): 3699-3707.
- [8] US EPA. Emission factor documentation for AP-42, Section 11. 12 Concrete batching [R]. Washington DC: US EPA, 1995.
- [9] US EPA. Emission factor documentation for AP-42, Section 13. 2.5 Industrial wind erosion [R]. Washington DC: US EPA, 2006.
- [10] Pietersma D, Stetler L D, Saxton K E. Design and aerodynamics of a portable wind tunnel for soil erosion and fugitive dust research[J]. Transactions of the ASAE, 1996, **39**(6): 2075-2083.
- [11] Van Pelt R S, Zobeck T M, Baddock M C, *et al.* Design, construction, and calibration of a portable boundary layer wind tunnel for field use[J]. Transactions of the ASABE, 2010, **53**(5): 1413-1422.
- [12] 王仁德, 邹学勇, 赵婧妍. 半湿润地区农田土壤粉尘释放的风洞模拟研究[J]. 地理科学, 2012, **32**(11): 1364-1369.
Wang R D, Zou X Y, Zhao J Y. Farmland soil dust emission in semi-humid areas by wind-tunnel simulation[J]. Scientia Geographica Sinica, 2012, **32**(11): 1364-1369.
- [13] 邹学勇, 张春来, 程宏, 等. 土壤风蚀模型中的影响因子分类与表达[J]. 地球科学进展, 2014, **29**(8): 875-889.
Zou X Y, Zhang C L, Cheng H, *et al.* Classification and representation of factors affecting soil wind erosion in a model[J]. Advances in Earth Science, 2014, **29**(8): 875-889.
- [14] Etyemezian V, Nikolich G, Ahonen S, *et al.* The portable in situ wind erosion laboratory (PI-SWERL): a new method to measure PM_{10} windblown dust properties and potential for emissions[J]. Atmospheric Environment, 2007, **41**(18): 3789-3796.
- [15] Sweeney M, Etyemezian V, Macpherson T, *et al.* Comparison of PI-SWERL with dust emission measurements from a straight-line field wind tunnel[J]. Journal of Geophysical Research, 2008, **113**(F1): F01012.
- [16] King J, Etyemezian V, Sweeney M, *et al.* Dust emission variability at the Salton Sea, California, USA [J]. Aeolian Research, 2012, **3**(1): 67-79.
- [17] Baddock M C, Zobeck T M, Van Pelt R S, *et al.* Dust emissions from undisturbed and disturbed, crusted playa surfaces; cattle trampling effects[J]. Aeolian Research, 2011, **3**(1): 31-41.
- [18] 崔梦淳, 鹿化煜, Mark S, 等. 便携式粉尘观测仪测定腾格里沙漠和毛乌素沙地 PM_{10} 释放通量[J]. 科学通报, 2015, **60**(17): 1621-1630.
Cui M C, Lu H Y, Mark S, *et al.* PM_{10} emission flux in the Tengger Desert and Mu Us Sand field, northern China, measured by PI-SWERL[J]. Chinese Science Bulletin, 2015, **60**(17): 1621-1630.
- [19] Gillies J A, Etyemezian V, Kuhns H, *et al.* Dust emissions created by low-level rotary-winged aircraft flight over desert surfaces[J]. Atmospheric Environment, 2010, **44**(8): 1043-1053.
- [20] Wang X L, Chow J C, Kohl S D, *et al.* Wind erosion potential for fugitive dust sources in the Athabasca Oil Sands Region[J].

- Aeolian Research, 2015, **18**: 121-134.
- [21] Goossens D, Buck B. Dust dynamics in off-road vehicle trails: measurements on 16 arid soil types, Nevada, USA [J]. Journal of Environmental Management, 2009, **90**(11): 3458-5469.
- [22] Soukup D, Buck B, Goossens D, *et al.* Arsenic concentrations in dust emissions from wind erosion and off-road vehicles in the Nellis Dunes Recreational Area, Nevada, USA [J]. Aeolian Research, 2012, **5**: 77-89.
- [23] Kavouras I G, Etyemezian V, Nikolich G, *et al.* A new technique for characterizing the efficacy of fugitive dust suppressants [J]. Journal of the Air & Waste Management Association, 2009, **59**(5): 603-612.
- [24] Sweeney M R, McDonald E V, Etyemezian V. Quantifying dust emissions from desert landforms, eastern Mojave Desert, USA [J]. Geomorphology, 2011, **135**(1-2): 21-34.
- [25] China S, James D E. Influence of pavement macrotexture on PM₁₀ emissions from paved roads: a controlled study [J]. Atmospheric Environment, 2012, **63**: 313-326.
- [26] 李贝贝, 秦建平, 祁丽荣, 等. 城市道路行道树树池裸地扬尘排放特征[J]. 环境科学, 2018, **39**(3): 1031-1039.
- Li B B, Qin J Q, Qi L R, *et al.* Emission characteristics of wind erosion dust from topsoil of urban roadside-tree pool [J]. Environmental Science, 2018, **39**(3): 1031-1039.
- [27] Measurement Policy Group, Office of Air Quality Planning and Standards, US EPA. Emission factor documentation for AP-42 Section 13.2.1 Paved Roads[R]. Research Triangle Park, NC: Measurement Policy Group, Office of Air Quality Planning and Standards, US EPA, 2011.

《环境科学》多项引证指标名列前茅

2017年10月31日,中国科学技术信息研究所在中国科技论文统计结果发布会上公布了2016年度中国科技论文统计结果.统计结果显示《环境科学》2015年度总被引频次10 024,影响因子1.878,多项引证指标位居环境科学技术及资源科学技术类科技期刊前列.



CONTENTS

Emission Inventory and Prediction of Non-road Machineries in the Yangtze River Delta Region, China	HUANG Cheng, AN Jing-yu, LU Jun (3965)
Vehicle Exhaust Emission Characteristics and Their Contributions in Jiangsu Province	LI Li, ZHANG Jie, ZHAO Qiu-yue, <i>et al.</i> (3976)
Historical Trends of Atmospheric Pb and Hg Emissions from Fossil Fuel Combustion in Shanghai	YANG Jing, CHEN Long, LIU Min, <i>et al.</i> (3987)
Emission Inventory of Atmospheric Pollutants and VOC Species from Crop Residue Burning in Guangdong Province	SUN Xi-bo, LIAO Cheng-hao, ZENG Wu-tao, <i>et al.</i> (3995)
Mass Concentrations and Size Distributions of Water-soluble Inorganic Ions in Atmospheric Aerosols in Beibei District, Chongqing	LI Yan-pei, HAO Qing-ju, WEN Tian-xue, <i>et al.</i> (4002)
Analysis of Seasonal Variations in Chemical Characteristics and Sources of PM _{2.5} During Summer and Winter in Ji'nan City	LIU Xiao-di, MENG Jing-jing, HOU Zhan-fang, <i>et al.</i> (4014)
PM _{2.5} Pollution Characterization and Cause Analysis of a Winter Heavy Pollution Event, Liaocheng City	ZHANG Jing-qiao, WU Ya-jun, ZHANG Meng, <i>et al.</i> (4026)
Concentrations, Sources, and Dry Deposition Fluxes of Different Forms of Phosphorus in Qingdao Aerosols in Summer	WANG Nan, MA Miao, SHI Jin-hui, <i>et al.</i> (4034)
Characteristics and Source Apportionment of Ambient Volatile Organic Compounds in Winter in Jincheng	YANG Fan, YAN Yu-long, GE Yun-fei, <i>et al.</i> (4042)
Enrichment Levels and Comprehensive Pollution Assessment of Dust Heavy Metals in Winter in Beijing	XIONG Qiu-lin, ZHAO Wen-ji, LI Da-jun, <i>et al.</i> (4051)
Characteristics of Atmospheric BTX near a Main Road in Hefei City	MENG Fan-hao, QIN Min, LIANG Shuai-xi, <i>et al.</i> (4060)
Ozone Generation Potential and Highly Contributing Substances of NMOCs from Landfill Working Face	LI Hao, LIU Yan-jun, CHEN Tan, <i>et al.</i> (4070)
Emission Characteristics of Wind-Eroded Dust from Concrete Batching Plants in Beijing	LI Bei-bei, HAN Kai-li, QIN Jian-ping, <i>et al.</i> (4078)
Seasonal Variation Characteristics of Pollution Risk in a Riverside Source Area Based on Source Apportionment	GAO Xiang, ZUO Rui, GUO Xue-ru, <i>et al.</i> (4086)
Evaluation of Effect of Urban Non-point Source Pollution Control on Porous Asphalt-Bio-retention Combined Roads	GONG Man-li, ZUO Jun-jie, REN Xin-xin, <i>et al.</i> (4096)
Composition, Spatial Distribution Characteristics and Source Analysis of Chromophoric Dissolved Organic Matter in the Lanzhou Reach of the Yellow River	 ZHAO Xia-ting, LI Shan, WANG Zhao-wei, <i>et al.</i> (4105)
Characterization of Dissolved Organic Matter Fractions in the Ning-Meng Section of the Yellow River and Relationship with Metal Ions	 XI Yue, WANG Ting, NI Jin-ren, <i>et al.</i> (4114)
Comparative Characteristics of Optical Absorption in Waters from Yiluo River and Huntai River in Spring	 LI Liu-yang, SHAO Tian-tian, ZHANG Xin, <i>et al.</i> (4122)
Seasonal Variations in River Water Chemical Weathering and Its Influence Factors in the Malian River Basin	 WANG Yu-shan, HAN Shuang-bao, DENG Qi-jun, <i>et al.</i> (4132)
Characteristics and Genesis of NO ₃ Type Water in Shallow Groundwater in Lujiang Basin	 XU Jin, HE Jiang-tao, PENG Cong, <i>et al.</i> (4142)
Development and Evaluation of a Sustainable Long-release Carbon Material Applied for In-Situ Remediation of Groundwater Nitrogen Pollution	 ZHANG Wen, YIN Lin, ZHOU Nian-qing (4150)
Phosphorus Forms and Distribution Characteristics in the Sediment and Soil of the Water-Level-fluctuating Zone in the Main Stream of the Three Gorges Reservoir	 ZHANG Zhi-yong, WAN Cheng-yan, HU Hong-qing, <i>et al.</i> (4161)
Distribution Characteristics and Release Fluxes of Phosphorus Forms in Xiangxi Bay Sediments in the Three Gorges Reservoir Before and After Impoundment	 LIU Xin-yuan, SONG Lin-xu, JI Dao-bin, <i>et al.</i> (4169)
Effect of Zirconium-modified Zeolite Addition on Phosphorus Release and Immobilization in Heavily Polluted River Sediment	 HE Si-qi, ZHANG Wei, LIN Jian-wei, <i>et al.</i> (4179)
Impact of Human Activities on Net Anthropogenic Nitrogen Inputs (NANI) at Township Scale in Erhai Lake Basin	 LI Ying, LIU Hong-bin, LEI Qiu-liang, <i>et al.</i> (4189)
Simulation of Inorganic Nitrogen Fluxes at the Sediment-water Interface in a Typical Intertidal Zone, Eastern China	 NIE Jia-qin, WANG Dong-qi, CHEN Jie, <i>et al.</i> (4199)
Effects of Aquaculture on Ammonia-oxidizing Prokaryotes in Sediments of Eastern Lake Taihu	 CHU Yu, HE Xiao-wei, ZENG Jin, <i>et al.</i> (4206)
Transformation of Ammonia in Wetland Sediments for Treatment of Mining Wastewater	 WANG Hai-bo, MA Ding, YUE Zheng-bo, <i>et al.</i> (4215)
Distribution Characteristics of Sulfonamide Antibiotic Resistance Genes in a Drinking Water Source in East China	 HU Ya-ru, JIANG Lei, ZHANG Tian-yang, <i>et al.</i> (4222)
Distribution Characteristics of Sulfonamides and Sulfamethoxazole-Resistant Bacteria in Tannery Wastewater Treatment Processes	 HUA Li, LI Lu, YANG Chun-yan (4229)
Effects of Different Substrates and Particle Sizes on Wastewater Purification	 ZHAO Lin-li, SHAO Xue-xin, WU Ming, <i>et al.</i> (4236)
Substrate Flow by Different Biochemical Activities in the Urban Sewage Network	 YAO Xiang-yi, SHI Xuan, SANG Lang-tao, <i>et al.</i> (4242)
Reducing Membrane Fouling from Micro-Flocculation in a Humic Acid Ultrafiltration Process	 WANG Xu-dong, SHI Cai-xia, LIAO Zheng-wei, <i>et al.</i> (4249)
Enhanced Degradation of Aniline by PS Oxidation in the Presence of UV and Ferric Oxalate	 HAN Dong-hui, LI Ying, LI Kai-ming, <i>et al.</i> (4257)
Behavior and Degradation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Coking Wastewater of A/O ² and A/O/H/O Processes	 WU Hai-zhen, SUN Sheng-li, LIU Guo-xin, <i>et al.</i> (4265)
Effects of Long-term Side Stream Extract on Phosphorus Removal and Recovery Performance of EBPR System	 YU Xiao-jun, LI Jie, ZHOU Meng, <i>et al.</i> (4274)
Effect of NaCl Salinity on Extracellular Polymeric Substances and Bioflocculation of Anoxic Sludge in A ² /O Process	 ZHANG Lan-he, TIAN Rui, GUO Jing-bo, <i>et al.</i> (4281)
Effect of Temperature and pH on Nitrogen Conversion in Feammox Process	 CHEN Fang-min, JIN Run, YUAN Yan, <i>et al.</i> (4289)
Inhibitory Kinetics of Free Ammonia (FA) on Ammonia-oxidizing Bacteria (AOB)	 SUN Hong-wei, YU Xue, GAO Yu-xue, <i>et al.</i> (4294)
Effect of HRT on Nitrogen Removal Using ANAMMOX and Heterotrophic Denitrification	 AN Fang-jiao, ZHAO Zhi-chao, HUANG Li, <i>et al.</i> (4302)
Reactivation Performance of Nitrosation Flocculent Sludge After Long-term Storage	 LI Tian, WEI Fan-kai, WANG Yu-chang, <i>et al.</i> (4310)
Analysis of Characteristics and Sources of Heavy Metals in Farmland Soils in the Xijiang River Draining of Guangxi	 SONG Bo, ZHANG Yun-xia, PANG Rui, <i>et al.</i> (4317)
Soil Organic Carbon of Purple Soil as Affected by Different Application of Biochar	 LUO Mei, TIAN Dong, GAO Ming, <i>et al.</i> (4327)
Effects of Straw and Biochar Addition on Soil Carbon Balance and Ecological Benefits in a Rape-maize Rotation Planting System	 LI Jiao, TIAN Dong, HUANG Rong, <i>et al.</i> (4338)
Potential to Ensure Safe Production from Rice Fields Polluted with Heavy Cadmium by Combining a Rice Variety with Low Cadmium Accumulation, Humic Acid, and Sepiolite	 XIE Xiao-mei, FANG Zhi-ping, LIAO Min, <i>et al.</i> (4348)
Interactive Effects of Ozone and Drought on Antioxidant Enzyme Activities of Poplar Leaves	 ZHOU Hui-min, LI Pin, GAO Feng, <i>et al.</i> (4359)
Effects of Different Levels of Irrigation with Reclaimed Water on Soil Enzyme Activity and Distribution of Thermotolerant Coliforms	 HAN Yang, LI Ping, QI Xue-bin, <i>et al.</i> (4366)
Characteristics of Heavy Metals in Chicken Manure Organic Fertilizers in the Huang-Huai-Hai Region and related Environmental Risk Assessment	 LI Fa, XU Ying-ming, WANG Lin, <i>et al.</i> (4375)
Heavy Metal Content of Rural Living Solid Waste and Related Source and Distribution Analysis	 JIN Qi, GAO Hong, YUE Bo, <i>et al.</i> (4385)