

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第3期

Vol.39 No.3

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

长三角典型站点冬季大气 PM_{2.5} 中 OC、EC 污染特征 康晖, 朱彬, 王红磊, 施双双 (961)

南京北郊能见度变化中二次无机盐消光的重要作用 于超, 于兴娜, 赵天良, 张蕾, 马国煦, 王咏薇 (972)

常州夏冬季 PM_{2.5} 中无机组分昼夜变化特征与来源解析 刘佳澍, 顾远, 马帅帅, 苏亚兰, 叶招莲 (980)

天津市春季道路降尘 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 中的元素特征 王士宝, 姬亚芹, 李树立, 张伟, 张蕾 (990)

北京、新乡夏季大气颗粒物中重金属的粒径分布及人体健康风险评价 张鑫, 赵小曼, 孟雪洁, 王小颖, 杨帅, 许骁鹏, 王书亭, 谷超, 王梦蕾, 任浩, 张子洋, 闫广轩, 曹治国, 王跃思 (997)

山西省武乡县城大气 PM_{2.5} 痕量重金属的生态和健康风险分析 郭墨霞, 耿红, 张晋宏, 周欢, 彭妍, 翟帅莹, 李金磊, 陈雨杉 (1004)

隧道中机动车排放颗粒物及无机元素特征 李凤华, 张衍杰, 张静, 袁远, 吴琳, 毛洪钧 (1014)

河南省 2013 年大气氨排放清单建立及分布特征 王琛, 尹沙沙, 于世杰, 卫军华, 谷幸珂, 官密秘, 张瑞芹 (1023)

城市道路行道树池裸地扬尘排放特征 李贝贝, 秦建平, 祁丽荣, 杨涛, 曲松, 石爱军, 黄玉虎 (1031)

DOC 和 CDPF 对柴油公交车颗粒物组分影响 楼狄明, 耿小雨, 宋博, 谭丕强, 胡志远, 刘继跃 (1040)

南水北调中线工程总干渠河南段原水中消毒副产物前体物变化规律 黄飘逸, 徐斌, 郭东良 (1046)

广州市流溪河水体中 6 种内分泌干扰素时空分布特征与环境风险 樊静静, 王赛, 唐金鹏, 戴玉女, 王林, 龙胜兴, 何文祥, 刘帅磊, 王佳希, 杨扬 (1053)

西藏拉萨河流域河水主要离子化学特征及来源 张清华, 孙平安, 何师意, 文化, 刘明隆, 于爽 (1065)

太子河下游河流硝酸盐来源及其迁移转化过程 李艳利, 杨梓睿, 尹希杰, 孙伟 (1076)

海南岛北部海湾沉积物重金属来源、分布主控因素及生态风险评价 曾维特, 杨永鹏, 张东强, 刘兵, 张航飞, 吴多誉, 王晓林 (1085)

天津农田重金属污染特征分析及降雨沥浸影响 许萌萌, 刘爱凤, 师荣光, 蓝靖, 田永, 赵宗山 (1095)

太湖出入湖河道与湖体水质季节差异分析 查慧铭, 朱梦圆, 朱广伟, 杨周生, 许海, 沈睿杰, 钟春妮 (1102)

春季敏感时期三峡水库典型支流沉积物-水界面氮释放特性 李欣, 宋林旭, 纪道斌, 刘德富, 苏青青, 吕林鹏, 王雄, 黄亚男, 吴庆 (1113)

不同湖泊入湖河流沉积物可转化态氮的空间分布及其影响因素 周睿, 袁旭音, Marip Ja Bawk, 于辉辉, 章琪, 唐豆豆 (1122)

水文气象因素对东南山区水库硅藻异常增殖的影响 孙祥, 朱广伟, 笄文怡, 余茂蕾, 杨文斌, 朱梦圆, 许海, 国超旋, 余丽 (1129)

深水型水库热分层诱导水质及真菌种群结构垂向演替 商潘路, 陈胜男, 黄廷林, 张海涵, 康鹏亮, 王跃, 钊珍芳, 刘彤彤 (1141)

太湖竺山湾春季浮游细菌群落结构及影响因素 薛银刚, 刘菲, 孙萌, 江晓栋, 耿金菊, 滕加泉, 谢文理, 张皓, 陈心一 (1151)

分层型水源水库沉积物需氧量特性 苏露, 黄廷林, 李楠, 张海涵, 文刚, 李扬, 陈家炜, 王晓江 (1159)

污水氮浓度和 NH₄⁺/NO₃⁻ 比对粉绿狐尾藻去氮能力和植物体氮组分的影响 马永飞, 杨小珍, 赵小虎, 胡承孝, 谭启玲, 孙学成, 吴金水 (1167)

水体氮营养负荷对苦草净化能力和光合荧光特性的影响 周裔文, 许晓光, 韩睿明, 周晓红, 冯德友, 李致春, 王国祥 (1180)

化学预氧化耦合生物锰氧化对水中有机物的去除 菅之舆, 常洋洋, 王立新, 梁金松, 柏耀辉 (1188)

铜铁氧体法处理模拟染料废水 韩志勇, 韩昆, 郝昊天, 于建伟, 石宝友, 庄媛, 孔岩 (1195)

草酸根对 α-FeOOH 多相 UV-Fenton 催化能力的增效实验 苗笑增, 戴慧旺, 陈建新, 蒋柏泉, 龚烟 (1202)

生物基纳米 HZO 杂化材料的研制及其除磷特性 邱慧, 秦智峰, 刘凤玲, 梁晨, 宋明霞, 许正文, 管益东 (1212)

铁锰氧化物/生物炭复合材料对水中硝酸根的吸附特性 郑晓青, 韦安磊, 张一璇, 史良干, 张潇 (1220)

PAAm/HACC 半互穿网络水凝胶的制备及其对水中腐殖酸的吸附性能 刘泽瑛, 周少奇, 马福臻 (1233)

二氧化钛对地下水中砷硅的吸附及再生回用 马文静, 阎莉, 张建锋 (1241)

一体式絮体-超滤工艺去除腐殖酸效能与机制 李文江, 于莉芳, 苗瑞, 马百文 (1248)

中国城镇污水处理厂温室气体排放时空分布特征 闫旭, 邱德志, 郭东丽, 齐星昊, 郑仕侃, 程轲, 孙剑辉, 刘建伟 (1256)

硝化耦合 CANON 的铁锰生物净化工艺启动与运行 李冬, 曹瑞华, 杨航, 王艳菊, 吕赛赛, 张杰 (1264)

纤维载体的生物膜 CANON 反应器的启动特性 顾澄伟, 陈方敏, 李祥, 黄勇, 尤星怡, 金润, 张文静, 董石语 (1272)

DO/NH₄⁺-N 实现短程硝化过程中生物膜特性 赵青, 卞伟, 李军, 王文啸, 孙艺齐, 梁东博, 张舒燕 (1278)

AUSB 中置曝气对 CANON 颗粒污泥工艺的影响 成朔, 李冬, 张杰, 李帅, 曹瑞华, 吕赛赛 (1286)

有机碳源对启动及运行 CANON 颗粒污泥工艺的影响 李冬, 王艳菊, 吕育锋, 曹瑞华, 李帅, 张杰 (1294)

中试一体式部分亚硝化-厌氧氨氧化反应器的启动与区域特性 周正, 王凡, 林兴, 董石语, 朱强, 李祥, 黄勇 (1301)

硝化液回流比对 ABR-MBR 工艺反硝化除磷效能的影响 吕亮, 尤雯, 张敏, 吴鹏, 沈耀良 (1309)

磁性纳米铁对厌氧颗粒污泥特性及其微生物群落的影响 宿程远, 郑鹏, 卢宇翔, 袁秋红, 赵力剑, 廖黎明, 黄智 (1316)

好氧颗粒污泥系统中溶解性微生物代谢产物的特征及主要组分 杨丹, 刘东方, 杜丽琼, 黄文力 (1325)

环丙沙星对膜生物反应器中微生物群落及抗性基因的影响 戴琦, 刘锐, 梁玉婷, 舒小铭, 徐灿灿, 陈昌军 (1333)

CEM-UF 组合膜-硝化/反硝化系统处理低 C/N 废水及种群结构分析 邢金良, 张岩, 陈昌明, 张博康, 郭威, 马翔山 (1342)

磷对混养反硝化污泥活性和微生物群落结构的影响 王佩琦, 周伟丽, 何圣兵, 黄荣振 (1350)

甲烷厌氧氧化协同硝酸盐还原菌群驯化及其群落特征 薛松, 张梦竹, 李琳, 刘俊新 (1357)

城市尾水排海过程中微生物及主要致病菌扩散规律 徐爱玲, 牛成洁, 宋志文, 郎秀臻, 郭明月 (1365)

氧四环素的微生物燃料电池处理及微生物群落 严伟富, 肖勇, 王淑华, 丁蕊, 赵峰 (1379)

近 30 年余干县耕地土壤碳氮比时空变异特征及其影响因素 江叶枫, 钟珊, 李婕, 王澜珂, 郭熙 (1386)

中宁枸杞土壤碳组分分布特征及其空间异质性 王幼奇, 赵云鹏, 白一茹, 张兴 (1396)

滨海滩涂围垦区不同围垦年限土壤酶活性变化及其与理化性质关系 解雪峰, 濮励珊, 王琪琪, 朱明, 王小涵 (1404)

青藏高原中东部表层土壤中多环芳烃的分布特征、来源及生态风险评价 周雯雯, 李军, 胡健, 朱兆洲 (1413)

基于 UNMIX 模型的矿区周边农田土壤重金属源解析 卢鑫, 胡文友, 黄标, 李元, 祖艳群, 湛方栋, 卞荣禧 (1421)

铁锰双金属材料在不同 pH 条件下对土壤 As 和重金属的稳定化作用 费琦, 阎秀兰, 李永华 (1430)

我国 3 个城市人体血清中新型溴代阻燃剂水平趋势及分布特征 王庆华, 袁浩东, 金军, 李鹏, 马玉龙, 王英 (1438)

《环境科学》征订启事(979) 《环境科学》征稿简则(996) 信息(1022, 1064, 1293)

城市道路行道树树池裸地扬尘排放特征

李贝贝^{1,2}, 秦建平², 祁丽荣³, 杨涛², 曲松², 石爱军², 黄玉虎^{2*}

(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. 北京生产力促进中心, 北京 100088)

摘要: 本研究以北京市西城区为例, 研究城市道路行道树树池裸地(以下简称树池裸地)扬尘排放特征. 利用 GIS 技术获取西城区分道路类型里程空间分布, 对展览路街道树池裸地进行全口径调查, 得到西城区道路树池裸地活动水平, 采用便携式风洞(PI-SWERL)实测各种道路树池裸地扬尘 $PM_{2.5}$ 排放因子, 估算西城区 2016 年树池裸地扬尘排放清单. 结果表明: ① 快速路辅路、主干路、次干路和街坊路单位面积树池裸地扬尘 $PM_{2.5}$ 年排放因子分别为 47.9 、 7.9 、 14.9 和 $29.9 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$, 2016 年降水过程对树池裸地 $PM_{2.5}$ 排放因子的削减率为 30.3% ; ② 快速路辅路、主干路、次干路、支路和街坊路单位里程树池裸地扬尘 $PM_{2.5}$ 年排放因子分别为 2.57 、 2.33 、 4.04 、 7.31 和 $5.44 \text{ kg} \cdot (\text{km} \cdot \text{a})^{-1}$, 支路是街坊路、次干路、快速路辅路和主干路的 1.3 、 1.8 、 2.8 和 3.1 倍, 以次干路为例, 冬季排放因子分别是春夏秋季的 1.3 、 7.3 和 8.7 倍; ③ 北京市西城区树池裸地全年 $PM_{2.5}$ 排放量为 $1.60 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$, 排放清单的不确定性范围为 $-143\% \sim 184\%$, 冬季排放量为 $0.68 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$, 分别是春夏秋季的 1.1 、 4.2 和 5.1 倍, 快速路辅路、主干路、次干路、支路和街坊路占总排放量的 5.6% 、 8.7% 、 23.2% 、 4.1% 和 58.4% . 建议尽快对全市树池裸地采取不影响树木生长的覆盖措施, 减少风蚀扬尘排放.

关键词: 行道树树池; 便携式风洞; 风蚀扬尘; 排放特征

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)03-1031-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.201708109

Emission Characteristics of Wind Erosion Dust from Topsoil of Urban Roadside-Tree Pool

LI Bei-bei^{1,2}, QIN Jian-ping², QI Li-rong³, YANG Tao², QU Song², SHI Ai-jun², HUANG Yu-hu^{2*}

(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. Beijing Productivity Center, Beijing 100088, China)

Abstract: This study characterized the wind erosion dust emissions from topsoil of urban roadside-tree pool. The study area is the Xicheng District of Beijing and uses GIS to obtain the spatial distribution of various road mileages. A full bore investigation method was carried out to survey tree pool in the Zhanlanlu Subdistrict to obtain the activity level of tree pool in the Xicheng district. The portable in situ wind erosion laboratory (PI-SWERL) was used to determine the emission factors of $PM_{2.5}$ from the wind erosion dust from tree pool and to estimate the $PM_{2.5}$ emission inventory of tree pool in the Xicheng District in 2016. The results showed that: ① The annual emission factors per unit area of $PM_{2.5}$ from tree pool of freeways' frontage roads, major roads, minor roads, and alleys are 47.9 , 7.9 , 14.9 , and $29.9 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$, respectively. The reduction rate of $PM_{2.5}$ emission factors from tree pool by precipitation was about 30.3% in 2016. ② The annual emission factors per unit mileage of $PM_{2.5}$ from the tree pool of freeways' frontage roads, major roads, minor roads, branch roads, and alleys are 2.57 , 2.33 , 4.04 , 7.31 , and $5.44 \text{ kg} \cdot (\text{km} \cdot \text{a})^{-1}$, respectively, and the factors for branch roads are 1.3 , 1.8 , 2.8 , and 3.1 times as much as those for alleys, minor roads, freeways' frontage roads, and major roads, respectively. Taking the emission factor for minor roads as an example, the winter emission factor is 1.3 , 7.3 , and 8.7 times greater than that in the spring, summer, and autumn, respectively. ③ $PM_{2.5}$ emissions from the tree pool in the Xicheng District of Beijing are $1.60 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$, and the uncertainty range of the emission inventory is $-143\% \sim 184\%$. The emissions in winter are $0.68 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$, which are 1.1 , 4.2 , and 5.1 times greater than that in the spring, summer, and fall, respectively. The emission values for freeways' frontage roads, major roads, minor roads, collectors, and alleys account for 5.6% , 8.7% , 23.2% , 4.1% , and 58.4% of the total emissions, respectively. It is recommended that the urban roadside-tree pool be covered to reduce wind erosion dust emissions with materials that do not affect the growth of trees as soon as possible.

Key words: roadside-tree pool; PI-SWERL; wind erosion dust; emission characteristics

收稿日期: 2017-08-14; 修订日期: 2017-08-31

基金项目: 国家质量基础的共性技术研究与应用重点专项(2017YFF0211804); 国家科技支撑计划项目(2014BAC23B02); 北京市环境保护科学研究院基金项目(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: Leebeibe0404@163.com

* 通信作者, E-mail: huangyuhu@sina.com

北京市 2016 年环境空气中细颗粒物($PM_{2.5}$)年均浓度值为 $73 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 虽然相比 2015 年下降 9.4%, 但是仍然超过 GB 3095-2012《环境空气质量标准》的二级标准 1.1 倍^[1]. 2014 年北京市 $PM_{2.5}$ 源解析结果表明, 机动车和扬尘在本地排放源中的占比分别为 31.1% 和 14.3%^[2]. 近年来, 道路环境污染问题越来越受到科研人员关注. 如樊守彬等^[3,4]研究了北京市机动车尾气排放因子, 建立了基于实际道路交通流信息的机动车尾气排放清单; 黄玉虎等^[5,6]、张伟等^[7]、洪振宇等^[8]、武媛媛等^[9]分别研究了北京、天津、厦门、运城和鞍山等城市道路扬尘物理化学特征及来源; 郭振华等^[10]研究城市道路绿化带土壤侵蚀和 TSP 污染的相关性. 道路环境污染问题不仅限于机动车尾气和道路扬尘, 道路绿化带裸地风蚀扬尘也是一类城市大气污染源, 但是相关研究未见报道.

CJJ 75-1997《城市道路绿化规划与设计规范》将道路绿地分为道路绿带、交通岛绿地、广场绿地和停车场绿地, 其中道路绿带又分为分车绿带、行道树绿带和路侧绿带^[11]. 调研发现, 行道树绿带是最容易产生风蚀扬尘的道路绿地. 因为当在铺装地面上种植行道树时, 通常会在树木周围保留一块称为“树池”的未铺装土地^[12]. 《CJJ 75-1997》建议宜在树池上覆盖池算子^[11], 但实际上行道树树池裸露的情况比较普遍, 而且树池中经常有落叶和垃圾, 环卫工人每天清扫一次树池, 树池裸土每天被扰动一次, 遇到大风且无降雨的天气, 行道树树池裸地就会产生风蚀扬尘, 影响道路周边的环境空气质量.

《扬尘源颗粒物排放清单编制技术指南(试行)》推荐采用美国农业部农业风蚀扬尘模型估算土壤扬尘源排放量^[13], 该模型的适用性有待论证, 此外该模型无法得到满足空气质量模型需要的月或日排放量. 国内外很多学者采用移动式风洞原位测试风蚀扬尘^[14,15], 或将裸地切块送到风洞实验室异位测试风蚀扬尘^[16], 但是这 2 种风洞都存在体积大、操作困难、试验成本高等缺点, 因此, 美国沙漠所研制了一款便携式风洞(PI-SWERL)^[17,18], 近年来该风洞广泛应用于干河床^[19,20]、越野车训练场^[21,22]、沙漠^[23,24]和矿区^[25]等裸地风蚀扬尘测试. 行道树树池面积小且不利于异位测试, 正好可以采用 PI-SWERL 进行风蚀扬尘测试.

北京市西城区是首都功能核心区之一, 下辖 15 个街道, 总面积为 50.7 km^2 . 西城区大气污染源包

括散煤、机动车、工业和扬尘源等, 随着散煤和工业源污染治理工作不断深入, 西城区扬尘治理工作显得尤为重要. 本文以西城区为例, 研究城市道路行道树树池裸地(以下简称树池裸地)扬尘排放特征, 研究方法如下:①利用地理信息系统(GIS)技术统计西城区各种城市道路里程, 对西城区展览路街道树池裸地进行全口径调查, 确定各种道路单位里程树池数量和树池覆盖情况, 推算西城区树池裸地活动水平数据;②采用 PI-SWERL 测试展览路街道典型道路树池的裸地扬尘 $PM_{2.5}$ 排放特征, 估算西城区树池裸地扬尘因子、排放清单及其不确定性, 以期制定行道树树池裸地扬尘控制对策提供技术支撑.

1 材料与方法

1.1 树池裸地活动水平

CJJ 37-90《城市道路设计规范(1998 版)》将道路分为快速路、主干路、次干路和支路^[26], 北京市路网地图还包括快速路辅路和街坊路. 对展览路街道树池裸地进行全口径调查, 发现快速路没有行道树, 快速路辅路只有一侧有行道树, 并确定各种道路单位里程树池数量(见表 1), 树池覆盖率仅为 1.65%, 环卫工人每天清扫一次树池, 但很少浇水. 利用 GIS 技术统计西城区 5 种城市道路(快速路辅路、主干路、次干路、支路和街坊路)路网及里程(见图 1), 按照《CJJ 75-1997》规定的行道树最小株距(4 m)、行道树树池尺寸(长 \times 宽 = $1.25 \text{ m} \times 1.25 \text{ m}$)以及行道树直径(约 0.30 m), 可以估算西城区行道树数量和树池面积理论值 A; 按照西城区道路总里程和展览路街道树池裸地调研结果, 可以估算西城区树池面积实际值 B. 表 1 是西城区各种城市道路总里程和树池面积, 可以看出, 树池面积理论值比实际值高估了 1.3~7.0 倍, 势必会高估树池裸地扬尘排放量. 西城区树池面积为 7.78 万 m^2 , 相当于 1 个大型建筑工地的占地面积.

1.2 风蚀扬尘测试装置

风蚀扬尘测试装置见图 2. 采用美国沙漠所研制的 PI-SWERL 测试树池裸地风蚀扬尘排放特征, PI-SWERL 由风洞腔体、旋转环、DustTrak8530 智能粉尘仪、控制箱和电脑组成. 为了便于在试验场地内转移 PI-SWERL, 专门加工 1 台用于放置 PI-SWERL 及配套控制箱和电脑的推车. 为了获得校准 DustTrak8530 质量浓度的颗粒物滤膜样品, 并分析风蚀扬尘粒径分布和化学组分, 在推车侧面安装

表 1 西城区道路总里程和树池面积

Table 1 Total road mileage and roadside-tree pool area in Xicheng District

序号	道路类型	道路里程 /km	展览路街道单位道路里程树池数量 /个·km ⁻¹	行道树树池面积/km ²		
				理论值 A	实际值 B	A/B
1	快速路辅路	35.0	36 ± 16	0.013 1	0.001 9	6.9
2	主干路	59.6	198 ± 17	0.022 2	0.017 6	1.3
3	次干路	91.7	182 ± 63	0.034 2	0.024 9	1.4
4	支路	8.9	164 ± 87	0.003 3	0.002 2	1.5
5	街坊路	171.4	122 ± 70	0.063 9	0.032 1	2.0
合计		366.6	144 ± 76	0.136 7	0.077 8	1.8



含风蚀扬尘待测道路

图 1 西城区路网示意

Fig. 1 Map of Xicheng District road network

3 套颗粒物滤膜采样器, 采样器由颗粒物切割器、滤膜夹托、转子流量计、真空泵和发电机组组成, 气体采样流速为 $16.67 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$, 颗粒物切割器为 2 套美国 BGI 公司的 PM_{10} 和 $\text{PM}_{2.5}$ 串联切割器, 采集 PM_{10} 样品时拆下 $\text{PM}_{2.5}$ 切割器, 另外 1 台采样器没有切割器, 只能采集总颗粒物 (TPM). 在 PI-SWERL 风洞腔体出口安装 1 个 4 孔均匀采样适配器, 其中 3 个孔通过防静电管与 3 套滤膜采样器连接, 第 4 个孔通向大气.

1.3 排放因子测试方法

PI-SWERL 利用电机带动旋转环旋转形成速度



1. 电脑; 2. 控制箱; 3. 真空泵; 4. 流量计; 5. 颗粒物采样器; 6. DustTrak8530 智能粉尘仪; 7. PI-SWERL

图 2 风蚀扬尘测试装置

Fig. 2 Device for testing wind erosion dust

梯度, 产生一定强度的风剪切力, 侵蚀裸地从而释放粉尘. PI-SWERL 有 3 种工作模式, 分别是斜坡模式 (ramp-step)、阶梯模式 (multiple-step) 和单级模式 (single-step)^[25]. 斜坡模式指以恒定速率增加旋转环转速, 采用斜坡模式确定风蚀扬尘 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度不超过 DustTrak8530 最大量程 ($400 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$) 时对应的 PI-SWERL 最大转速; 阶梯模式指按若干值跳跃式增加转速, 得到不同风速情况下树池裸地扬尘排放潜势; 单级模式指转速快速到达某设定值并保持一段时间不变. 摩擦速度 (u^*) 与 PI-SWERL 旋转环转速 R 之间的关系见公式 (1), PI-SWERL 转速为 $5000 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 时, 对应 10m 高度处风速为 $15.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 相当于 7 级风.

$$u^* = -1.49 \times 10^{-12} R^3 + 8.20 \times 10^{-9} R^2 + 1.42 \times 10^{-4} R + 0.087 2 \quad (1)$$

式中, R 为旋转环转速 ($\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$).

排放因子测试方法步骤如下: ① 使用 PI-SWERL 斜坡模式确定本试验对应的 PI-SWERL 最大转速; ② 采用阶梯模式模拟测试不同风速下树池裸地风蚀扬尘 $\text{PM}_{2.5}$ 排放潜势^[25], 同步采集 $\text{PM}_{2.5}$ 滤膜样品; ③ 结合西城区 2016 年气象条件估算树

池裸地风蚀扬尘排放因子. 2017年6月,在展览路街道每种城市道路选取一条道路进行树池裸地扬尘排放测试,快速路辅路选取阜成门北大街,主干路选取展览馆路,次干路选取北营房中街,街坊路选取扣钟胡同,支路参照街坊路测试结果.待测道路位置如图1所示,每条道路随机选择3个树池,在树池的四角各测试一次,测试前48 h内无降水和人工洒水.

1.4 西城区气象条件

与风蚀扬尘排放因子最相关的2个气象参数是

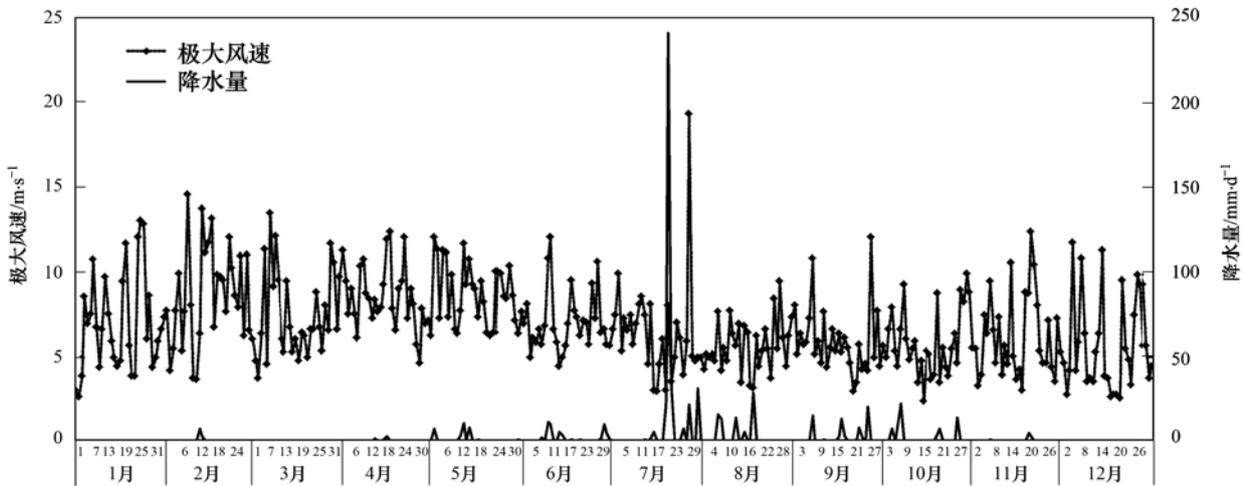


图3 西城区2016年逐日气象条件

Fig. 3 Daily weather conditions in the Xicheng District in 2016

2 结果与讨论

2.1 裸地扬尘排放因子计算案例

图4展示了阶梯模式下快速路辅路树池裸地风蚀扬尘 $PM_{2.5}$ 排放潜势,其中左侧纵坐标分别表示PI-SWERL旋转环不同转速,及其对应的10 m高度处环境风速和其在地面的摩擦风速(u^*).可以看出,当 u^* 为 $0.23 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,裸地开始起尘,当转速达到 $5000 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ (相当于7级风)并保持不变时,瞬时排放潜势虽然有小幅度的波动,但是没有出现整体下降的趋势,说明 u^* 保持在 $0.69 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 一段时间后,树池裸地依然有较大的排放潜势,瞬时排放潜势最高可达 $17.6 \text{ mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$,阶梯模式阶段的累积排放潜势达到了 $3533 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}$.

提取图4中不同 u^* 侵蚀终点时的裸地风蚀扬尘 $PM_{2.5}$ 累积排放潜势值,并与 u^* 进行回归分析(见图5).将风蚀扬尘 $PM_{2.5}$ 累积排放潜势与不同 u^* 的关系式分别按指数函数、幂函数和二次多项式函数进行回归,虽然可决系数 R^2 都大于0.95,但是都会出现不同程度的高估或低估,如:①对于幂

极大风速和降水^[27],极大风速是指给定时段内瞬时(一般指1 s)风速的最大值.环卫工人每天清扫一次树池,树池裸土每天被扰动一次,重新获得了风蚀扬尘排放潜势,因此本文统计西城区官园气象站2016年逐日气象条件(见图3).可以看出,西城区春冬季极大风速大于夏秋季,降水季节特征正好与极大风速相反.春夏秋冬四季极大风速90百分位数分别为 11.6 、 8.9 、 9.1 和 $11.9 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,春夏秋冬四季降水90百分位数分别为 2.2 、 17.1 、 7.1 和 $0.0 \text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$.

函数回归方程,其会低估 u^* 在 $0.39 \sim 0.68 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 之间的 $PM_{2.5}$ 累积排放潜势,会高估 u^* 大于 $0.69 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的 $PM_{2.5}$ 累积排放潜势;②指数函数回归方程的 R^2 小于指数函数,其对 $PM_{2.5}$ 累积排放潜势的低估和高估规律类似于指数函数,且估算误差明显大于指数函数;③对于二次多项式回归方程,当 u^* 在 $0.23 \sim 0.54 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 之间时, $PM_{2.5}$ 累积排放潜势会出现负值,这不符合实际情况,当 u^* 小于 $0.23 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,还会严重高估排放潜势.综上所述,本研究将采用5个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,并结合气象参数计算 $PM_{2.5}$ 排放因子.

为了得到准确的树池裸地扬尘 $PM_{2.5}$ 排放因子,在风蚀扬尘排放测试过程中采用滤膜采样器对Dusttrak8530的测试结果进行校准,图6是滤膜采样器与Dusttrak8530的校准方程($y = 1.21x + 5.93$).根据土壤含水率对风蚀影响的研究结果^[28],结合不同降水量天气雨过天晴地表含水率随时间变化关系,本研究确定日降水量大于 2.5 mm 时,可削减当天的排放量;日降水量大于 5 mm

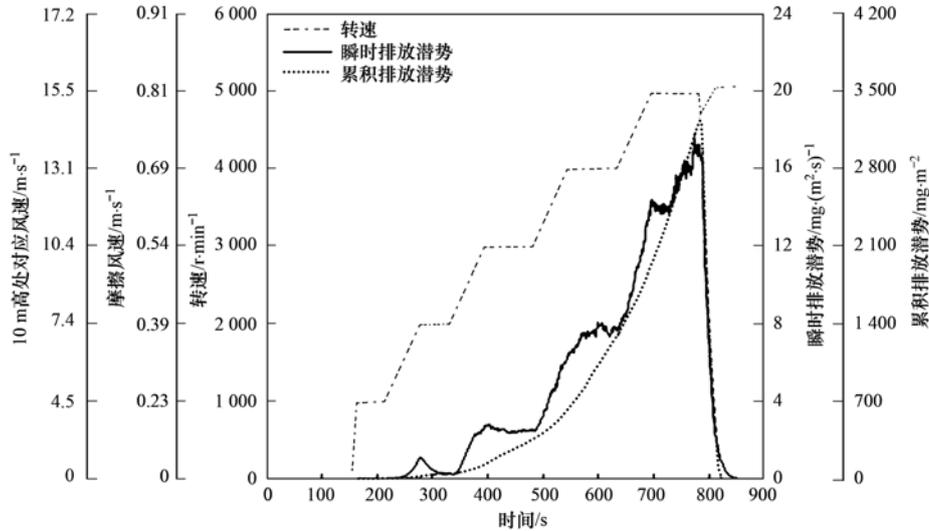


图 4 裸地扬尘瞬时和累积排放潜势

Fig. 4 Instantaneous and cumulative emission potential of bare land fugitive dust

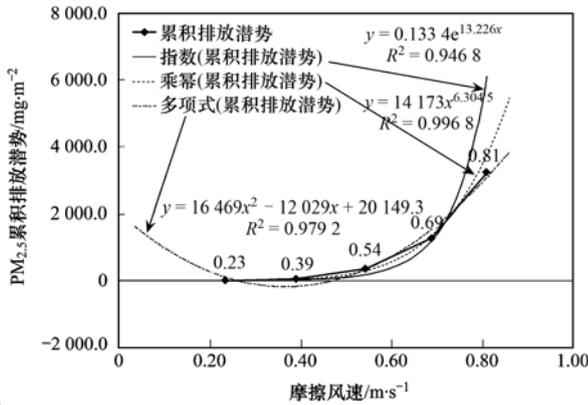


图 5 裸地扬尘累积排放潜势和 u^* 的关系

Fig. 5 Relationship between cumulative emission potential of bare land fugitive dust and frictional wind speed

时，可削减当天和未来一天的排放量；日降水量大于 10 mm 时，可削减当天和未来两天的排放量。

本文采用西城区官园气象站逐日的气象数据计算树池裸地扬尘排放量。气象数据中的风速是在 10 m 高度处监测的风速 (u_{10}^+)，根据风速对数廓线方程^[27]，可以得到地面摩擦风速 u^* 和 10m 高度处风速 (u_{10}^+) 的关系见公式(2)。

$$u^* = 0.053u_{10}^+ \quad (2)$$

将逐日极大风速经过公式(2)计算得到的 u^* 代入树池裸地扬尘排放潜势与 u^* 相应的线性函数方程，得到快速路辅路行道树池裸地风蚀扬尘 $PM_{2.5}$ 逐日排放因子。图 7 是某快速路辅路树池裸地扬尘 $PM_{2.5}$ 逐月排放因子，考虑降雨的影响，可以得到降雨天气可使全年树池裸地风蚀扬尘 $PM_{2.5}$ 排放因子下降 30.1%，月排放因子较大的月份主要是 1~4 月，符合北京市冬春季多风少雨的天气情况。

综上所述，得到裸地扬尘排放因子测试和计算方法。

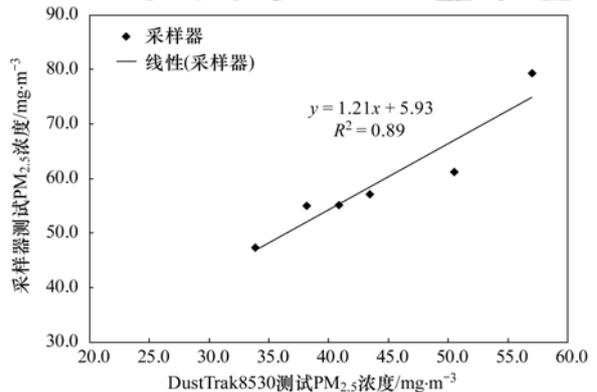


图 6 滤膜采样器与 Dusttrak8530 的校准方程

Fig. 6 Calibration equation between the filter mass sampler and Dusttrak8530 nephelometer

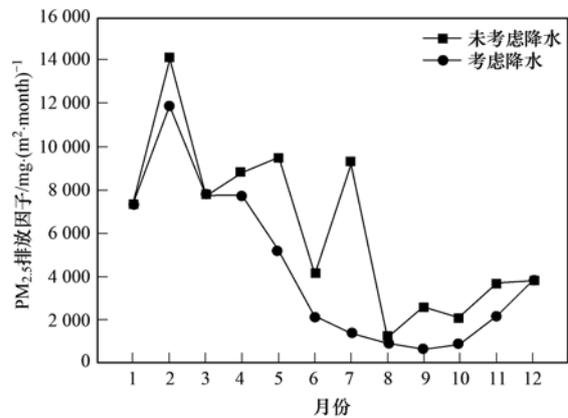


图 7 裸地扬尘 $PM_{2.5}$ 月度排放因子

Fig. 7 Monthly $PM_{2.5}$ emission factors for bare land fugitive dust

2.2 树池裸地扬尘排放因子

对 4 种道路所有测试的树池裸地在不同 u^* 下

PM_{2.5} 累积排放潜势进行统计, 得到树池裸地扬尘 PM_{2.5} 累积排放潜势信息, 如图 8(a) 所示. 可以看出, 相同的风速条件下, 主干路、次干路和快速路辅路的树池裸地 PM_{2.5} 累积排放潜势数据相对集中, 即树池裸地不同位置的扬尘排放潜势相差不大. 相比而言, 街坊路的树池裸地 PM_{2.5} 累积排放潜势数据相对分散, 树池裸地不同位置的排放潜势差异较大, 表明了街坊路树池裸地 PM_{2.5} 扬尘排放因子有较大不确定性. 结合调研发现, 环卫工人在日常清扫树池中的垃圾以及落叶时, 扰动了树池裸地表面, 破坏地表形成的结皮, 而表层土随着清扫聚集在了树池一角. 清扫工作不仅使得树池裸地扬尘排放潜势增加, 也因此导致树池裸地 PM_{2.5} 累积排放潜势有了位置上的差异.

计算每种道路行道树树池裸地在各种 u^* 下的风蚀扬尘 PM_{2.5} 累积排放潜势平均值, 图 8(b) 是各种道路树池裸地风蚀扬尘累积排放潜势与 u^* 的关系. 可以看出, 快速路辅路的树池裸地累积排放潜势最大, 而且随着 u^* 的增加, PM_{2.5} 累积排放潜势增长速度最快, 当 u^* 达到 0.81 m·s⁻¹ 时, 快速路辅路的累积排放潜势是主干路的 4.0 倍, 当 u^* 从 0.69 m·s⁻¹ 继续增加, 快速路辅路的累积排放潜势增长速度是主干路的 3.1 倍. 街坊路树池裸地累积排放潜势排名第二, 次干路排名第三, 主干路最小.

按照 2.1 节推荐的方法, 得到按树池裸地面积表述的各种城市道路的树池裸地扬尘 PM_{2.5} 月度排放因子, 如图 9(a) 所示, 由于支路与街坊路的区界限模糊, 支路参考街坊路的测试结果. 快速路辅路、主干路、次干路和街坊路单位面积树池裸地扬尘 PM_{2.5} 年排放因子分别为 47.9、7.9、14.9 和 29.9 g·(m²·a)⁻¹, 快速路辅路是街坊路、次干路和主干路的 6.1、3.2 和 1.6 倍. 文献[13]推荐的施

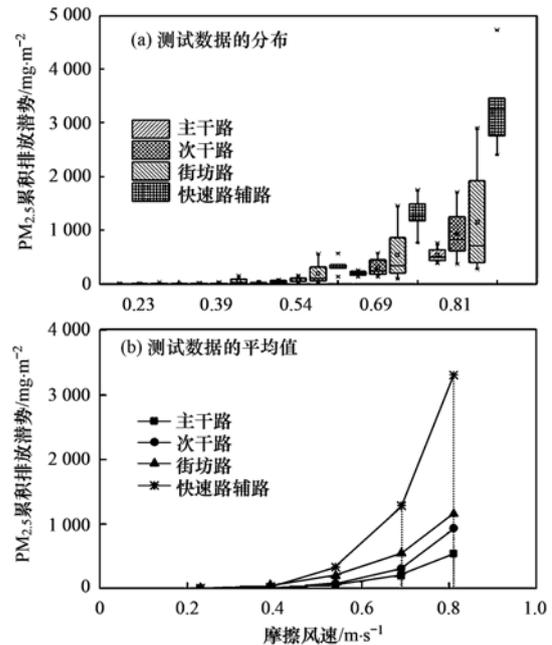


图 8 各种道路树池裸地扬尘 PM_{2.5} 累积排放潜势与 u^* 的关系
Fig. 8 Relationship between cumulative PM_{2.5} emission potential from various types of roadside-tree pool and friction wind speed

工扬尘 PM_{2.5} 年排放因子为 322.8 t·(km²·a)⁻¹, 郑州市^[29] 按照该指南估算裸露地面风蚀扬尘 PM_{2.5} 年均排放因子为 3,36 t·(km²·a)⁻¹, 本文试验得到的树池裸地扬尘 PM_{2.5} 年均排放因子为 26.1 t·(km²·a)⁻¹, 是上述 2 个排放因子的 0.08 和 7.77 倍, 原因是树池裸地受到的人为扰动强度远小于施工工地, 但是又明显大于裸露地面, 结果相对合理可信. 2016 年降水过程对快速路辅路、主干路、次干路和街坊路的削减率分别为 31.6%、31.3%、32.4% 和 25.7%, 平均削减率为 30.3%.

为了便于指导其他城市计算树池裸地扬尘排放清单, 各种道路按照各自单位道路里程树池数量, 得到 5 种城市道路单位里程对应的树池裸地扬尘排放因子, 如图 9(b) 所示. 快速路辅路、主干路、次干

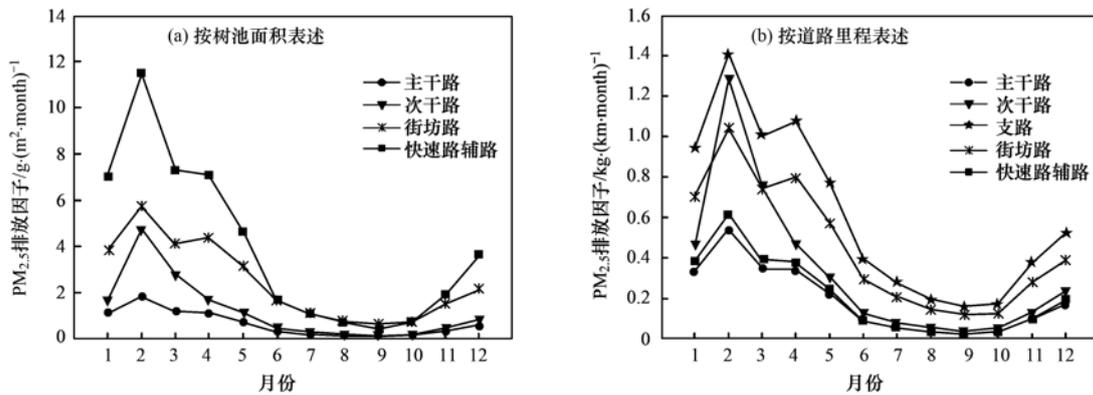


图 9 各种道路树池裸地扬尘 PM_{2.5} 月度排放因子

Fig. 9 Monthly PM_{2.5} emission factors of fugitive dust from various types of roadside-tree pool

路、支路和街坊路单位里程树池裸地扬尘 $PM_{2.5}$ 年排放因子分别为 2.57、2.33、4.04、7.31 和 5.44 $kg \cdot (km \cdot a)^{-1}$ ，支路是街坊路、次干路、快速路辅路和主干路的 1.3、1.8、2.8 和 3.1 倍；以次干路为例，冬季排放因子分别是春夏秋冬的 1.3、7.3、8.7 倍。

2.3 树池裸地扬尘排放清单

将各种道路单位里程树池裸地扬尘 $PM_{2.5}$ 月度排放因子乘以相应道路的路网里程，并考虑有 1.65% 的树池有覆盖措施，计算得到西城区树池裸地扬尘 $PM_{2.5}$ 月和年排放清单 (见图 10)。可以看出，全年 $PM_{2.5}$ 排放量为 $1.60 t \cdot a^{-1}$ ，冬季排放量为 $0.68 t \cdot a^{-1}$ ，分别是春夏秋冬的 1.1、4.2 和 5.1 倍；快速路辅路、主干路、次干路、支路和街坊路占总排放量的 5.6%、8.7%、23.2%、4.1% 和 58.4%，街坊路排放量最大，支路排放量最小。

图 11 是西城区 0.2 km × 0.2 km 网格化的树池裸地扬尘 $PM_{2.5}$ 排放量空间分布，可以看出，原西城区和二环内区域排放强度较高，因为该区域街坊路密集较高，右侧区域排放强度较低，因为无法获取中南海和一些军事管理区的路网信息，进而无法计算排放量。

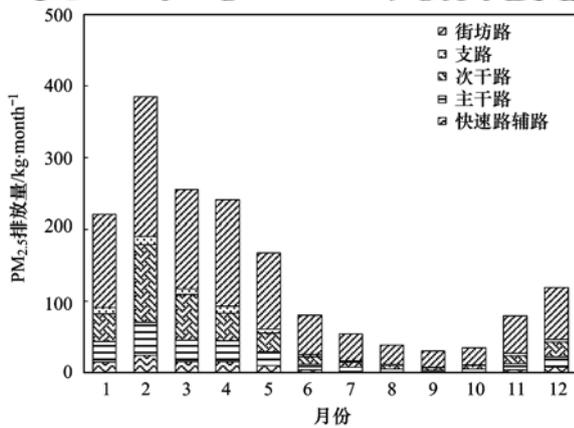


图 10 西城区树池裸地扬尘 $PM_{2.5}$ 排放量时间分布

Fig. 10 Temporal distribution of $PM_{2.5}$ emissions from roadside-tree pool in the Xicheng District

影响裸地扬尘排放清单不确定性的因素较多，

表 2 西城区树池裸地扬尘排放清单不确定性

Table 2 Uncertainty range of fugitive dust emission inventory from roadside-tree pool in Xicheng District

序号	道路类型	活动水平 不确定度/%	排放因子 不确定度/%	$PM_{2.5}$ 年排放量 / $t \cdot a^{-1}$	$PM_{2.5}$ 排放量 不确定度/%
1	快速路辅路	44	38	0.090	-102 ~ 123
2	主干路	9	37	0.139	-73 ~ 75
3	次干路	35	65	0.370	-135 ~ 164
4	支路	53	107	0.065	-236 ~ 292
5	街坊路	57	107	0.932	-237 ~ 306
合计		/	/	1.596	-143 ~ 184

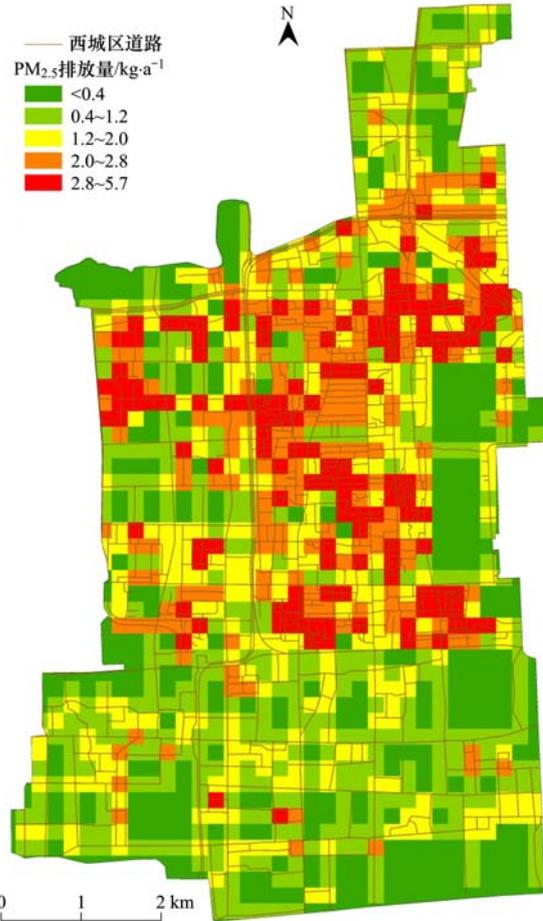


图 11 西城区树池裸地扬尘 $PM_{2.5}$ 排放量空间分布

Fig. 11 Spatial distribution of $PM_{2.5}$ emission from roadside-tree pool area in the Xicheng District

包括活动水平不确定度和排放因子不确定度^[30]。魏巍等推荐直接源于统计数据的活动水平不确定为 $\pm 30\%$ ，本文对展览路街道树池裸地进行全口径调查，根据表 1 得到各种道路树池裸地活动水平的不确定度。对各种道路不同 u^* 的排放因子相对标准偏差做加权平均，得到各种道路树池裸地扬尘排放因子的不确定度。采用蒙特卡罗不确定性分析方法对树池裸地扬尘排放清单潜在的不确定度进行量化，通过重复抽样的方法，获得排放清单的不确定性范围 (95% 的置信区间)，如表 2 所示。2016 年西

城区树池裸地扬尘 $PM_{2.5}$ 的不确定性范围为 $-143\% \sim 184\%$, 不确定性范围大的原因是扬尘排放因子的不确定度较大, 尤其是街坊路排放因子不确定较大, 而且街坊路里程占比高。

3 结论

(1) 快速路辅路、主干路、次干路和街坊路单位面积树池裸地扬尘 $PM_{2.5}$ 年排放因子分别为 47.9 、 7.9 、 14.9 和 $29.9 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$, 2016 年降水过程对树池裸地 $PM_{2.5}$ 排放因子的削减率为 30.3% 。

(2) 快速路辅路、主干路、次干路、支路和街坊路单位里程树池裸地扬尘 $PM_{2.5}$ 年排放因子分别为 2.57 、 2.33 、 4.04 、 7.31 和 $5.44 \text{ kg} \cdot (\text{km} \cdot \text{a})^{-1}$, 支路是街坊路、次干路、快速路辅路和主干路的 1.3 、 1.8 、 2.8 和 3.1 倍, 以次干路为例, 冬季排放因子分别是春夏秋冬的 1.3 、 7.3 、 8.7 倍。

(3) 北京市西城区行道树树池裸地全年 $PM_{2.5}$ 排放量为 $1.60 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$, 排放清单的不确定性范围为 $-143\% \sim 184\%$, 冬季排放量为 $0.68 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$, 分别是春夏秋冬的 1.1 、 4.2 和 5.1 倍, 快速路辅路、主干路、次干路、支路和街坊路占总排放量的 5.6% 、 8.7% 、 23.2% 、 4.1% 和 58.4% 。

(4) 建议结合当地实际情况在树池裸地采取铺设生态覆盖材料(如树皮、贝壳等)或安装池算子等不影响树木生长的措施, 减少树池裸地风蚀扬尘排放。

参考文献:

- [1] 北京市环境保护局. 2016 年北京市环境状况公报[R]. 北京: 北京市环境保护局, 2017.
- [2] 张大伟. 北京市大气环境 $PM_{2.5}$ 污染现状及成因研究[R]. 北京: 北京市环境保护监测中心, 2014.
- [3] 樊守彬, 田灵娣, 张东旭, 等. 北京市机动车尾气排放因子研究[J]. 环境科学, 2015, **36**(7): 2374-2380.
Fan S B, Tian L D, Zhang D X, et al. Emission factors of vehicle exhaust in Beijing[J]. Environmental Science, 2015, **36**(7): 2374-2380.
- [4] 樊守彬, 田灵娣, 张东旭, 等. 基于实际道路交通流信息的北京市机动车排放特征[J]. 环境科学, 2015, **36**(8): 2750-2757.
Fan S B, Tian L D, Zhang D X, et al. Emission characteristics of vehicle exhaust in Beijing based on actual traffic flow information[J]. Environmental Science, 2015, **36**(8): 2750-2757.
- [5] 黄玉虎, 李东晨, 秦建平, 等. 道路积尘湿式采样器研发与测试评价[J]. 环境工程学报, 2017, **11**(3): 1975-1980.
Huang Y H, Li D C, Qin J P, et al. Developing and test evaluating of wet road dust sampler[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2017, **11**(3): 1975-1980.
- [6] 黄玉虎, 韩凯丽, 李东晨, 等. 北京市城市道路尘土残存量和湿式积尘量特征[J]. 环境工程学报, 2017, **11**(7): 4149-4154.
Huang Y H, Han K L, Li D C, et al. Characteristic of remaining dust and wet road dust on city roads in Beijing[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2017, **11**(7): 4149-4154.
- [7] 张伟, 姬亚芹, 张军, 等. 辽宁典型城市道路扬尘 $PM_{2.5}$ 中水溶性无机离子组分特征及来源解析[J]. 环境科学, 2017, **38**(12): 4951-4957.
Zhang W, Ji Y Q, Zhang J, et al. Characteristics and source apportionment of water-soluble inorganic ions in road dust $PM_{2.5}$ in Liaoning province typical cities[J]. Environmental Science, 2017, **38**(12): 4951-4957.
- [8] 洪振宇, 洪有为, 尹丽倩, 等. 厦门市道路灰尘中铂族元素的污染特征[J]. 环境科学, 2015, **36**(1): 295-300.
Hong Z L, Hong Y W, Yin L Q, et al. Pollution characteristics of platinum group elements in road dust in Xiamen[J]. Environmental Science, 2015, **36**(1): 295-300.
- [9] 武媛媛, 李如梅, 彭林, 等. 运城城市道路扬尘化学组成特征及来源分析[J]. 环境科学, 2017, **38**(5): 1799-1806.
Wu Y Y, Li R M, Peng L, et al. Chemical compositions and source apportionment of road dust in Yuncheng[J]. Environmental Science, 2017, **38**(5): 1799-1806.
- [10] 郭振华, 胡可信, 尹奇德, 等. 城市道路绿化带土壤侵蚀和 TSP 污染的相关性研究[J]. 环境科学与技术, 2005, **28**(1): 44-45, 55.
Guo Z H, Hu K X, Yin Q D, et al. A correlation study of soil erosion in road green belt and urban TSP pollution[J]. Environmental Science & Technology, 2005, **28**(1): 44-45, 55.
- [11] CJJ 75-1997, 城市道路绿化规划与设计规范[S].
- [12] DBJ 08-53-96, 上海行道树栽植技术规程[S].
- [13] 环境保护部. 环境保护部公告[2014]92号 关于发布《大气可吸入颗粒物一次源排放清单编制技术指南(试行)》等5项技术指南的公告[R]. 北京: 环境保护部, 2014.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] Mark S, Vic E, Torin M, et al. Comparison of PI-SWERL with dust emission measurements from a straight-line field wind tunnel[J]. Journal of Geophysical Research: Earth Surface, 2008,

- 113(F1): F01012.
- [19] King J, Etyemezian V, Sweeney M, *et al.* Dust emission variability at the Salton Sea, California, USA [J]. *Aeolian Research*, 2011, **3**(1): 67-79.
- [20] 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.
- [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): 3458-3469.
- [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] 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.
- [24] 崔梦淳, 鹿化煜, Sweeney M, 等. 便携式粉尘观测仪测定腾格里沙漠和毛乌素沙地 PM₁₀ 释放通量 [J]. *科学通报*, 2015, **60**(17): 1621-1630.
Cui M C, Lu H Y, Sweeney M, *et al.* PM₁₀ 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.
- [25] 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.
- [26] CJJ 37-90, 城市道路设计规范[S].
- [27] US EPA. Emission factor documentation for AP- 42, Section 13.2.5 Industrial wind erosion[R]. Washington DC: US EPA, 2006.
- [28] 赵沛义, 妥德宝, 李焕春, 等. 土壤含水率及物理性砂粒含量对风蚀模数影响的风洞模拟[J]. *农业工程学报*, 2012, **28**(24): 188-195.
Zhao P Y, Tuo D B, Li H C, *et al.* Effects of soil moisture and physical sand content on wind erosion modulus in wind tunnel testing[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, **28**(24): 188-195.
- [29] 徐媛倩, 姜楠, 燕启社, 等. 郑州市裸露地面风蚀扬尘排放清单研究[J]. *环境污染与防治*, 2016, **38**(4): 22-27.
Xu Y Q, Jiang N, Yan Q S, *et al.* Research on emission inventory of bareness wind erosion dust in Zhengzhou [J]. *Environmental Pollution and Control*, 2016, **38**(4): 22-27.
- [30] 魏巍, 王书肖, 郝吉明. 中国人为源 VOC 排放清单不确定性研究[J]. *环境科学*, 2011, **32**(2): 305-312.
Wei W, Wang S X, Hao J M. Uncertainty analysis of emission inventory for volatile organic compounds from anthropogenic sources in China [J]. *Environmental Science*, 2011, **32**(2): 305-312.



CONTENTS

Characterization and Variation of Organic Carbon (OC) and Elemental Carbon (EC) in PM _{2.5} During the Winter in the Yangtze River Delta Region, China	KANG Hui, ZHU Bin, WANG Hong-lei, <i>et al.</i>	(961)
Important Effect of Secondary Inorganic Salt Extinction on Visibility Impairment in the Northern Suburb of Nanjing	YU Chao, YU Xing-na, ZHAO Tian-liang, <i>et al.</i>	(972)
Day-Night Differences and Source Apportionment of Inorganic Components of PM _{2.5} During Summer-Winter in Changzhou City	LIU Jia-shu, GU Yuan, MA Shuai-shuai, <i>et al.</i>	(980)
Characteristics of Elements in PM _{2.5} and PM ₁₀ in Road Dust Fall During Spring in Tianjin	WANG Shi-bao, JI Ya-qin, LI Shu-li, <i>et al.</i>	(990)
Particle Size Distribution and Human Health Risk Assessment of Heavy Metals in Atmospheric Particles from Beijing and Xixiang During Summer	ZHANG Xin, ZHAO Xiao-man, MENG Xue-jie, <i>et al.</i>	(997)
Ecological and Health Risks of Trace Heavy Metals in Atmospheric PM _{2.5} Collected in Wuxiang Town, Shanxi Province	GUO Zhao-xia, GENG Hong, ZHANG Jin-hong, <i>et al.</i>	(1004)
Characteristics of Particulate and Inorganic Elements of Motor Vehicles Based on a Tunnel Environment	LI Feng-hua, ZHANG Yan-jie, ZHANG Jing, <i>et al.</i>	(1014)
A 2013-based Atmospheric Ammonia Emission Inventory and Its Characteristic of Spatial Distribution in Henan Province	WANG Chen, YIN Sha-sha, YU Shi-jie, <i>et al.</i>	(1023)
Emission Characteristics of Wind Erosion Dust from Topsoil of Urban Roadside-Tree Pool	LI Bei-bei, QIN Jian-ping, QI Li-rong, <i>et al.</i>	(1031)
Particulate Component Emission Characteristic from a Diesel Bus with DOC and CDPF	LOU Di-ming, GENG Xiao-yu, SONG Bo, <i>et al.</i>	(1040)
Water Quality in the Henan Intake Area of the South-to-North Water Diversion Project	HUANG Piao-yi, XU Bin, GUO Dong-liang	(1046)
Spatio-Temporal Patterns and Environmental Risk of Endocrine Disrupting Chemicals in the Liuxi River	FAN Jing-jing, WANG Sai, TANG Jin-peng, <i>et al.</i>	(1053)
Fate and Origin of Major Ions in River Water in the Lhasa River Basin, Tibet	ZHANG Qing-hua, SUN Ping-an, HE Shi-yi, <i>et al.</i>	(1065)
Identification of Nitrate Sources and the Fate of Nitrate in Downstream Areas: A Case Study in the Taizi River Basin	LI Yan-li, YANG Zi-rui, YIN Xi-jie, <i>et al.</i>	(1076)
Sources, Distribution of Main Controlling Factors, and Potential Ecological Risk Assessment for Heavy Metals in the Surface Sediment of Hainan Island North Bay, South China	ZENG Wei-te, YANG Yong-peng, ZHANG Dong-qiang, <i>et al.</i>	(1085)
Characteristics of Heavy Metals Pollution of Farmland and the Leaching Effect of Rainfall in Tianjin	XU Meng-meng, LIU Ai-feng, SHI Rong-guang, <i>et al.</i>	(1095)
Seasonal Difference in Water Quality Between Lake and Inflow/Outflow Rivers of Lake Taihu, China	ZHA Hui-ming, ZHU Meng-yuan, ZHU Guang-wei, <i>et al.</i>	(1102)
Characteristics of Nitrogen Release at the Sediment-Water Interface in the Typical Tributaries of the Three Gorges Reservoir During the Sensitive Period in Spring	LI Xin, SONG Lin-xu, JI Dao-bin, <i>et al.</i>	(1113)
Spatial Distributions of Transferable Nitrogen Forms and Influencing Factors in Sediments from Inflow Rivers in Different Lake Basins	ZHOU Rui, YUAN Xu-yin, Marip Ja Bawk, <i>et al.</i>	(1122)
Effects of Hydrological and Meteorological Conditions on Diatom Proliferation in Reservoirs	SUN Xiang, ZHU Guang-wei, DA Wen-yi, <i>et al.</i>	(1129)
Vertical Distribution of Fungal Community Composition and Water Quality During the Deep Reservoir Thermal Stratification	SHANG Pan-lu, CHEN Sheng-nan, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i>	(1141)
Community Structure and Influencing Factors of Bacterioplankton in Spring in Zhushan Bay, Lake Taihu	XUE Yin-gang, LIU Fei, SUN Meng, <i>et al.</i>	(1151)
Characteristics of Sediment Oxygen Demand in a Drinking Water Reservoir	SU Lu, HUANG Ting-lin, LI Nan, <i>et al.</i>	(1159)
Effects of Wastewater Nitrogen Concentrations and NH ₄ ⁺ /NO ₃ ⁻ on Nitrogen Removal Ability and the Nitrogen Component of <i>Myriophyllum aquaticum</i> (Vell.) Verde	MA Yong-fei, YANG Xiao-zhen, ZHAO Xiao-hu, <i>et al.</i>	(1167)
Effect of Nutrient Loadings on the Regulation of Water Nitrogen and Phosphorus by <i>Vallisneria spiralis</i> and Its Photosynthetic Fluorescence Characteristics	ZHOU Yi-wen, XU Xiao-guang, HAN Rui-ming, <i>et al.</i>	(1180)
Removal of Organic Matter from Water by Chemical Preoxidation Coupled with Biogenic Manganese Oxidation	JIAN Zhi-yu, CHANG Yang-yang, WANG Li-xin, <i>et al.</i>	(1188)
Treating Simulated Dye Wastewater by an <i>In Situ</i> Copper Ferrite Process	HAN Zhi-yong, HAN Kun, HAO Hao-tian, <i>et al.</i>	(1195)
Experiment to Enhance Catalytic Activity of α -FeOOH in Heterogeneous UV-Fenton System by Addition of Oxalate	MIAO Xiao-zeng, DAI Hui-wang, CHEN Jian-xin, <i>et al.</i>	(1202)
Fabrication of a Biomass-Based Hydrous Zirconium Oxide Nanocomposite for Advanced Phosphate Removal	QIU Hui, QIN Zhi-feng, LIU Feng-ling, <i>et al.</i>	(1212)
Characteristic of Nitrate Adsorption in Aqueous Solution by Iron and Manganese Oxide/Biochar Composites	ZHENG Xiao-qing, WEI An-lei, ZHANG Yi-xuan, <i>et al.</i>	(1220)
Preparation of PAAm/HACC Semi-Interpenetrate Network Hydrogel and Its Adsorption Properties for Humic Acid from Aqueous Solution	LIU Ze-jun, ZHOU Shao-qi, MA Fu-zhen	(1233)
Groundwater Arsenic and Silicate Adsorption on TiO ₂ and the Regeneration of TiO ₂	MA Wen-jing, YAN Li, ZHANG Jian-feng	(1241)
Removal Efficiency and Mechanism of Removal by Humic Acid of the Integrated Flocculation-Ultrafiltration Process	LI Wen-jiang, YU Li-fang, MIAO Rui, <i>et al.</i>	(1248)
Emission Inventory of Greenhouse Gas from Urban Wastewater Treatment Plants and Its Temporal and Spatial Distribution in China	YAN Xu, QIU De-zhi, GUO Dong-li, <i>et al.</i>	(1256)
Start-up and Operation of Biofilter Coupled Nitrification and CANON for the Removal of Iron, Manganese and Ammonia Nitrogen	LI Dong, CAO Rui-hua, YANG Hang, <i>et al.</i>	(1264)
Analysis of CANON Process Start-up with Fiber Carrier	GU Cheng-wei, CHEN Fang-min, LI Xiang, <i>et al.</i>	(1272)
Characteristics of Biofilm During the Transition Process of Complete Nitrification and Partial Nitrification	ZHAO Qing, BIAN Wei, LI Jun, <i>et al.</i>	(1278)
Effect of Intermediate-Setting Aeration on the CANON Granular Sludge Process in the AUSB Reactor	CHENG Shuo, LI Dong, ZHANG Jie, <i>et al.</i>	(1286)
Effect of Organic Carbon Source on Start-up and Operation of the CANON Granular Sludge Process	LI Dong, WANG Yan-ju, LU Yu-feng, <i>et al.</i>	(1294)
Start-Up and Regional Characteristics of a Pilot-scale Integrated PN-ANAMMOX Reactor	ZHOU Zheng, WANG Fan, LIN Xing, <i>et al.</i>	(1301)
Effect of NO _x ⁻ -N Recycling Ratio on Denitrifying Phosphorus Removal Efficiency in the ABR-MBR Combined Process	LÜ Liang, YOU Wen, ZHANG Min, <i>et al.</i>	(1309)
Effects of Magnetic Fe ₃ O ₄ Nanoparticles on the Characteristics of Anaerobic Granular Sludge and Its Interior Microbial Community	SU Cheng-yuan, ZHENG Peng, LU Yu-xiang, <i>et al.</i>	(1316)
Characterization Composition of Soluble Microbial Products in an Aerobic Granular Sludge System	YANG Dan, LIU Dong-fang, DU Li-qiong, <i>et al.</i>	(1325)
Influence of Ciprofloxacin on the Microbial Community and Antibiotics Resistance Genes in a Membrane Bioreactor	DAI Qi, LIU Rui, LIANG Yu-ting, <i>et al.</i>	(1333)
Analysis of Low C/N Wastewater Treatment and Structure by the CEM-UF Combined Membrane-Nitrification/Denitrification System	XING Jin-liang, ZHANG Yan, CHEN Chang-ming, <i>et al.</i>	(1342)
Effects of Phosphorus on the Activity and Bacterial Community in Mixotrophic Denitrification Sludge	WANG Pei-qi, ZHOU Wei-li, HE Sheng-bing, <i>et al.</i>	(1350)
Acclimatization and Community Structure Analysis of the Microbial Consortium in Nitrate-Dependent Anaerobic Methane Oxidation	XUE Song, ZHANG Meng-zhu, LI Lin, <i>et al.</i>	(1357)
Diffusion of Microorganism and Main Pathogenic Bacteria During Municipal Treated Wastewater Discharged into Sea	XU Ai-ling, NIU Cheng-jie, SONG Zhi-wen, <i>et al.</i>	(1365)
Oxytetracycline Wastewater Treatment in Microbial Fuel Cells and the Analysis of Microbial Communities	YAN Wei-fu, XIAO Yong, WANG Shu-hua, <i>et al.</i>	(1379)
Spatial and Temporal Variability of Soil C-to-N Ratio of Yugan County and Its Influencing Factors in the Past 30 Years	JIANG Ye-feng, ZHONG Shan, LI Jie, <i>et al.</i>	(1386)
Spatial Heterogeneity of Soil Carbon and its Fractions in the Wolfberry Field of Zhongning County	WANG You-qi, ZHAO Yun-peng, BAI Yi-ru, <i>et al.</i>	(1396)
Response of Soil Enzyme Activities and Their Relationships with Physicochemical Properties to Different Aged Coastal Reclamation Areas, Eastern China	XIE Xue-feng, PU Li-jie, WANG Qi-qi, <i>et al.</i>	(1404)
Distribution, Sources, and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Soils of the Central and Eastern Areas of the Qinghai-Tibetan Plateau	ZHOU Wen-wen, LI Jun, HU Jian, <i>et al.</i>	(1413)
Source Apportionment of Heavy Metals in Farmland Soils Around Mining Area Based on UNMIX Model	LU Xin, HU Wen-you, HUANG Biao, <i>et al.</i>	(1421)
Stabilization Effects of Fe-Mn Binary Oxide on Arsenic and Heavy Metal Co-contaminated Soils Under Different pH Conditions	FEI Yang, YAN Xiu-lan, LI Yong-hua	(1430)
Concentration and Distribution of Novel Brominated Flame Retardants in Human Serum from Three Chinese Cities	WANG Qing-hua, YUAN Hao-dong, JIN Jun, <i>et al.</i>	(1438)