

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

PM_{2.5}污染对我国健康负担和经济损失的影响

李勇, 廖琴, 赵秀阁, 白云, 陶燕

PM_{2.5}

• 中风

PM_{2.5}控制目标
健康经济效益

• 冠心病

• 呼吸系统疾病

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年4月

第42卷 第4期
Vol.42 No.4

目次

京津冀及周边地区秋冬季大气污染物排放变化因素解析	唐倩, 郑博, 薛文博, 张强, 雷宇, 贺克斌 (1591)
珠江三角洲大气光化学氧化剂(O_3)与 $PM_{2.5}$ 复合超标污染特征及气象影响因素	颜丰华, 陈伟华, 常鸣, 王伟文, 刘永林, 钟部卿, 毛敬英, 杨士士, 王雪梅, 刘焯芳 (1600)
广州市臭氧污染溯源:基于拉格朗日光化学轨迹模型的案例分析	裴成磊, 牟江山, 张英南, 申恒青, 陈玉茹, 黄杰生, 丁浩然, 李成柳 (1615)
运城秋冬季大气细粒子化学组成特征及来源解析	赵清, 李杏茹, 王国选, 张兰, 杨阳, 刘永桥, 孙宁宁, 黄禹, 雷文凯, 刘新罡 (1626)
降雪后24 h内大气中多环芳烃的变化规律	范慧泽, 祝富杰, 胡鹏持, 马万里 (1636)
道路扬尘中 $PM_{2.5}$ 粒度乘数的测定方法及特征	李冬, 陈建华, 张月帆, 高忠阳, 高健, 张凯, 竹双 (1642)
铸造行业挥发性有机物排放成分谱及影响	高爽, 李时蓓, 伯鑫, 李厚宇, 舒木水, 谈默, 屈加豹, 雷团团 (1649)
燃煤电厂和垃圾焚烧电厂燃烧产物中卤代多环芳烃的赋存特征和毒性风险	倪秀峰, 王儒威, 蔡飞旋, 蔡家伟 (1660)
兰州市春季微生物气溶胶浓度、粒径及细菌群落结构分布特性	赵炜, 李杰, 谢慧娜, 张莉红, 王亚娥 (1668)
大气污染排放格局优化方法及案例	李敏辉, 廖程浩, 常树诚, 张永波, 杨柳林, 曾武涛 (1679)
$PM_{2.5}$ 污染对我国健康负担和经济损失的影响	李勇, 廖琴, 赵秀阁, 白云, 陶燕 (1688)
基于多同位素的不同土地利用区域水体硝酸盐源解析	金赞芳, 胡晶, 吴爱静, 李光耀, 张文辽, 李非里 (1696)
新疆叶尔羌河流域地表水水化学特征及控制因素	张杰, 周金龙, 曾妍妍, 涂治, 纪媛媛, 孙英, 雷米 (1706)
漓江流域水体中重金属污染特征及健康风险评价	黄宏伟, 肖河, 王敦球, 席北斗, 孙晓杰, 李洁月, 李向奎 (1714)
近20年来鄱阳湖流域泛滥平原沉积物微量元素含量与污染变化	李括, 杨柯, 彭敏, 刘飞, 杨峥, 赵传冬, 成杭新 (1724)
汾河流域浅层地下水水化学和氢氧稳定同位素特征及其指示意义	刘鑫, 向伟, 司炳成 (1739)
会仙岩溶湿地地下水主要离子特征及成因分析	李军, 邹胜章, 赵一, 赵瑞科, 党志文, 潘民强, 朱丹尼, 周长松 (1750)
贵州威宁草海流域地下水水化学特征及无机碳通量估算	曹星星, 吴攀, 杨诗笛, 刘闪, 廖家豪 (1761)
辽宁典型海域表层海水中在用化学农药浓度水平与潜在生态风险	杜静, 胡超魁, 解怀君, 田甲申, 李爱, 谢晴, 吴金浩, 宋伦 (1772)
辽河流域土壤中微(中)塑料的丰度、特征及潜在来源	韩丽花, 徐笠, 李巧玲, 陆安祥, 殷敬伟, 田佳宇 (1781)
津冀辽地区典型湖库沉积物PAHs污染特征及来源解析	吴鹏, 鲁逸人, 李慧, 郑天娇子, 程云轩, 焦立新 (1791)
环太湖河流及湖体中有有机磷酸酯的污染特征和风险评价	张文萍, 张振飞, 郭昌胜, 吕佳佩, 邓洋慧, 张恒, 徐建 (1801)
太湖表层水体典型抗生素时空分布和生态风险评价	丁剑楠, 刘舒娇, 邹杰明, 石溪哲, 邹华, 史红星 (1811)
淮河流域南四湖可挥发性有机物污染特征及风险评价	程云轩, 高秋生, 李捷, 李慧, 吴鹏, 焦立新 (1820)
三亚河沉积物PAHs和PCBs的分布、来源及风险评价	詹咏, 韦婷婷, 叶汇彬, 董滨, 张领军, 黄远东 (1830)
三峡库区非点源污染氮磷负荷时空变化及其来源解析	李明龙, 贾梦丹, 孙天成, 褚琳, 李朝霞 (1839)
反硝化细菌、硝酸钙和锆改性沸石联用对底泥中氮磷迁移转化的影响及硝态氮释放风险评估	辛慧敏, 李建伟, 詹艳慧 (1847)
锁磷剂联合好氧反硝化菌修复富营养化水体	李炳堂, 周志勤, Ravi Naidu, 胡智泉, 郭大滨, 陈嘉鑫 (1861)
太湖蓝藻胞内有机质的微生物降解	张巧颖, 孙伟, 杜瑛珣, 巩小丽 (1870)
青藏高原拉萨河流域附石藻类群落结构特征及其驱动因子分析	魏俊伟, 李鸿然, 汪兴中, 齐文华, 汪洋, 赵彬洁, 谭香, 张全发 (1879)
基于EEMs与UV-vis分析苏州汛期景观河道中DOM光谱特性与来源	何杰, 朱学惠, 魏彬, 李学艳, 汤如涛, 林欣, 周飞, 司壮壮 (1889)
老化前后轮胎磨损微粒与聚氯乙烯微粒对抗生素的吸附-解吸行为	范秀磊, 邹峰峰, 刘加强, 李莹, 刘强, 侯俊 (1901)
磁性铁基改性生物炭去除水中氨氮	王芳君, 桑倩倩, 邓颖, 赵元添, 杨娅, 陈永志, 马娟 (1913)
城市污水处理厂进水氨氧化菌对活性污泥系统的季节性影响	于莉芳, 汪宇, 滑思思, 李韧, 张兴秀, 惠晓飞 (1923)
基于粒径分化的厌氧氨氧化污泥性能与微生物多样性分析	王晓瞳, 杨宏 (1930)
ClO_2 消毒工艺对污水处理厂出水超级耐药基因的影响	程春燕, 李海北, 梁永兵, 师丹阳, 陈郑珊, 杨栋, 焦巧瑞, 邵一帆, 李君文, 金敏 (1939)
微塑料PES与2,4-DCP复合污染对厌氧污泥胞外聚合物与微生物群落的影响	林旭萌, 宿程远, 吴淑敏, 黄嫒, 邓雪, 林香凤, 黄尊, 魏佳林 (1946)
城镇污水处理厂污泥泥质监测及资源化风险评价	李娟, 李金香, 杨妍妍 (1956)
气候变暖对冻结期黑土碳氮循环关键过程及指标的影响	王子龙, 刘传兴, 姜秋香, 李世强, 柴迅 (1967)
沼液秸秆联用对滨海围垦田土壤重金属迁移及形态变化的影响	王伟, 周珺楠, 汤逸帆, 申建华, 韩建刚 (1979)
地块尺度城市土地质量地球化学调查方法:以雄安新区起步区为例	周亚龙, 郭志娟, 刘飞, 韩伟, 孔牧, 赵传冬, 刘爱涛, 彭敏, 王乔林, 王成文 (1989)
雄安新区农田土壤-农作物系统重金属潜在生态风险评估及其源解析	周亚龙, 杨志斌, 王乔林, 王成文, 刘飞, 宋云涛, 郭志娟 (2003)
地质背景农田土壤下不同水稻品种对Cd的累积特征及影响因素	代子雯, 方成, 孙斌, 魏志敏, 胡锋, 李辉信, 徐莉 (2016)
不同外源硒对镉污染土壤中小白菜生长及镉吸收的影响	刘杨, 齐明星, 王敏, 刘娜娜, Pornpimol Kleawsampanjai, 周菲, 翟辉, 王梦柯, 任蕊, 梁东丽 (2024)
影响不同农作物镉富集系数的土壤因素	陈洁, 王娟, 王怡雯, 姚启星, 苏德纯 (2031)
Cd胁迫下不同外源植物激素对水稻幼苗抗氧化系统及Cd吸收积累的影响	张盛楠, 黄益宗, 李颜, 保琼莉, 黄永春 (2040)
不同有机物料对水稻根表铁膜及砷镉吸收转运的影响	李开叶, 赵婷婷, 陈佳, 赵秀兰 (2047)
铜尾矿坝及其周边土壤真菌群落结构与功能多样性	陈建文, 张红, 李君剑, 刘勇 (2056)
微生物群落驱动AM真菌、生物炭及联合改良沙化土壤作用潜力	张哲超, 杨久扬, 郝百惠, 郝利君, 罗俊清, 李雪, 刁风伟, 张璟霞, 郭伟 (2066)
动物粪便施肥措施促进耐药基因在粪便-土壤-蔬菜之间的散播	张红娜, 董梦洁, 周玉法, 孙佳欣, 常美洁, 翟真真 (2080)
区域水生态文明建设绩效评价及障碍诊断模型的建立与应用	万炳彤, 鲍学英, 赵建昌, 李爱春 (2089)
《环境科学》征订启事(1738) 《环境科学》征稿简则(1790) 信息(1860, 1878, 1900)	

道路扬尘中 PM_{2.5} 粒度乘数的测定方法及特征

李冬¹, 陈建华^{1*}, 张月帆¹, 高忠阳², 高健¹, 张凯¹, 竹双¹

(1. 中国环境科学研究院环境基准与风险评估国家重点实验室, 北京 100012; 2. 中国航天科工集团第二研究所, 北京 100854)

摘要: 粒度乘数是表征道路扬尘中颗粒物粒径分布特征和计算道路扬尘排放量的重要参数. 为实现粒度乘数本地化, 采用 AP-42 法和 TRAKER 法于 2019 年 3 月对保定市城区不同类型的道路进行采样和走航监测, 利用校正公式计算得到道路扬尘 PM_{2.5} 粒度乘数 ($K_{2.5}$), 对比了两种方法测定的 $K_{2.5}$ 结果, 分析了保定市道路扬尘粒度乘数特征. 结果表明: ① 基于 AP-42 法和 TRAKER 法获取的保定市道路积尘的 $K_{2.5}$ 平均值分别为 0.21 g·VKT⁻¹ 和 0.23 g·VKT⁻¹. 两种方法获得的道路积尘 $K_{2.5}$ 具有较高的线性相关性, 相关系数约为 0.6. 分别利用两种方法获得的 $K_{2.5}$ 计算道路扬尘 PM_{2.5} 排放因子值差异较小. 说明利用基于激光传感器的 TRAKER 法能够满足测量并计算道路扬尘 $K_{2.5}$ 的要求. ② 保定市不同类型道路积尘 $K_{2.5}$ 特征按其值大小排序表现为: 快速路 < 次干道 < 支路 < 主干道, 存在显著差异; ③ 保定市各道路扬尘 $K_{2.5}$ 平均值高于 0.15 g·VKT⁻¹, 说明若直接借鉴美国环保署的推荐值 ($K_{2.5} = 0.15 \text{ g·VKT}^{-1}$) 进行排放清单计算, 将会低估保定市的道路扬尘排放量, 进而增加排放清单的不确定性. 保定市 $K_{2.5}$ 相对较高, 说明保定市道路积尘中微颗粒物含量较多, 道路扬尘对城市 PM_{2.5} 的贡献可能较大.

关键词: 道路扬尘; PM_{2.5}; AP-42 法; TRAKER 法; 粒度乘数; 保定市

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)04-1642-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.202009051

Determination Method and Characteristics of Particle Size Multiplier of PM_{2.5} in Road Dust

LI Dong¹, CHEN Jian-hua^{1*}, ZHANG Yue-fan¹, GAO Zhong-yang², GAO Jian¹, ZHANG Kai¹, ZHU Shuang¹

(1. State Key Laboratory of Environmental Criteria and Risk Assessment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China; 2. Second Research Institute of the China Aerospace Science and Industry Group, Beijing 100854, China)

Abstract: The particle size multiplier is a valuable parameter for depicting the particle size distribution characteristics of road dust and calculating road dust emissions. In order to realize the localization of the particle size multiplier, the AP-42 and TRAKER methods were used for sampling on typical and different types of roads in Baoding in March 2019. Then, the particle size multiplier of road dust PM_{2.5} ($K_{2.5}$) was calculated using the correction formula, and the characteristics were analyzed. The results indicated: ① The $K_{2.5}$ obtained separately by AP-42 and TRAKER were 0.21 g·VKT⁻¹ and 0.23 g·VKT⁻¹ on average, which correlated well, with a high correlation coefficient of 0.6. The PM_{2.5} emission factors calculated using the $K_{2.5}$ of the different methods were almost at the same value, indicating that TRAKER method based on a laser sensor could measure and calculate the $K_{2.5}$ and could be directly used to obtain the particle size multiplier or be converted using the fitting equation. ② The characteristics of the $K_{2.5}$ in Baoding were ranked as: Expressway < Secondary roads < Branch roads < Major Roads. ③ Further study results of $K_{2.5}$ characteristics demonstrated that the average $K_{2.5}$ was higher than 0.15 g·VKT⁻¹ (the value recommended by US EPA) in Baoding City, which would cause an underestimate of road dust emissions and increase the uncertainty of the emissions inventory if the recommended value from the EPA were adopted. The $K_{2.5}$ in Baoding City is relatively high, indicating that the road dust contains a significant number of micro particles, increasing the contribution of road dust to urban atmospheric PM_{2.5}.

Key words: road dust; PM_{2.5}; AP-42 method; TRAKER method; particle size multiplier; Baoding City

污染源排放清单对了解大气污染的成因、污染过程及污染源分布具有重要意义^[1~3]. 污染源数据的准确度和清单计算中参数的确定均影响到污染源排放清单的准确性^[4]. 完善相关计算参数等对建立精确的污染源排放清单具有重要意义.

道路扬尘排放清单是大气污染源排放清单之一. 在道路扬尘排放量计算中, 粒度乘数是重要参数之一^[5~7]. 我国道路扬尘排放清单的编制主要参照《防治城市扬尘污染技术规范》(HJ/T 3932007), 其中, 粒度乘数的取值主要依靠美国环保署 (EPA) 的 AP-42 指导文件^[8]. 为实现 PM_{2.5} 粒度乘数的本地

化, 我国学者开展了一系列研究, 主要利用降尘法和积尘负荷法 (AP-42 法) 采集道路积尘样品, 并通过颗粒物再悬浮装置及颗粒物分级采样而获得粒度乘数^[9~12]. 然而, 这两种方法均按照一定的间隔采样, 不能够实现连续采样. 采样过程需要耗费大量人力

收稿日期: 2020-09-04; 修订日期: 2020-09-25

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42075182); 国家重点研发计划项目 (2019YFC0214200); 大气重污染成因与治理攻关项目 (DQGG0304-05); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项 (2016YSKY-025)

作者简介: 李冬 (1994 ~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为大气环境化学, E-mail: lidong_craes@163.com

* 通信作者, E-mail: chenjh@craes.org.cn

物力、不安全,且采样的活动水平有限.此外,道路积尘样品在再悬浮过程中难以模拟车辆激发扬尘的真实情况.近年来,TRAKER 法成为道路扬尘排放检测的主流方法之一,它通过在车辆上搭载颗粒物检测仪对道路扬尘进行实时快速地检测^[13].国外学者主要在车上搭载 Dusttrak 仪器检测道路扬尘排放的 PM_{10} 浓度状况,进而获得道路扬尘排放潜势,了解城市道路扬尘排放特征^[14-17];近年来国内学者也开始结合 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 颗粒物分级采样切割头来研究道路扬尘中的 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 对大气环境的影响^[18].然而,Dusttrak 仪器价格相对高昂,且无法克服车辆在行驶过程中的等速采样问题,易导致道路扬尘颗粒物浓度的监测值出现负值情况^[19].

保定市道路扬尘污染较为严重,为更好地获取其道路积尘 $\text{PM}_{2.5}$ 粒度乘数,本文提出了基于激光传感器的 TRAKER 法的 $\text{PM}_{2.5}$ 粒度乘数获取方法,进而实现实时、动态、快速和精确评估.本研究对于实现 $\text{PM}_{2.5}$ 粒度乘数本地化和精准编制城市道路扬尘排放清单具有重要意义.

1 材料与方法

1.1 采样时间、地点及路线

采样时间为 2019 年 3 月,其为保定市春季典型月份,城市空气质量极易受道路扬尘影响.分别采用 AP-42 法和 TRAKER 法对保定市城市道路快速路(北三环、东三环、南二环)、主干道(朝阳北大街、乐凯北大街、长城北大街)、次干道(天鹅西路、恒滨路、复兴中路)和支路(风帆路、市府后街、达五道庙)共 4 种类型道路 12 条典型路段进行道路积尘采集和走航. AP-42 法采样点见图 1.

1.2 样品采集与处理

1.2.1 颗粒物再悬浮与分级采样处理

AP-42 法采样及实验室处理方法参照《防治城市扬尘污染技术规范》(HJ/T 3932007).颗粒物再悬浮及分级采样步骤为:将同一条道路子样品充分均匀混合,利用再悬浮系统悬浮道路积尘颗粒物,配备使用 $16.7 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ 流量的 Cyclone 旋风采样器进行颗粒物粒径分级采样.被悬浮颗粒物进入 Cyclone 旋风采样器后,经 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 旋风分离后将得到 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 组分并采集到 Teflon 膜(直径为 47 mm)上,进行称重.

1.2.2 TRAKER 法采样设备及处理方案

本研究采用北京市无线电测量研究所研发的车载式道路扬尘监测系统,该系统采用激光传感器技术测量道路扬尘颗粒物浓度.为克服普通激光传感器的自身局限性^[20,21](如:数据易发生漂移

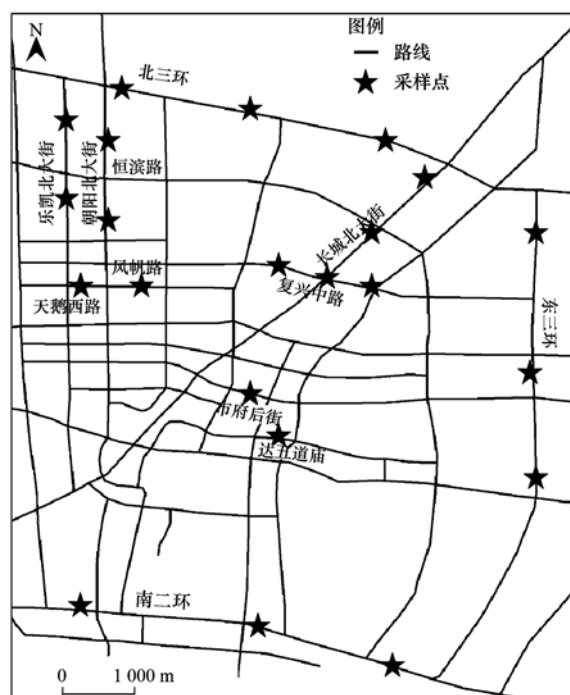


图 1 道路积尘采样点位示意

Fig. 1 Map of road dust sampling points

造成数据不准确和易受湿度影响等)和满足道路扬尘颗粒物浓度的检测需求,其对激光传感器做出如下改进:①内置伺服电机和流量计,根据车速闭环控制进气速度,使传感器采样速度与被动进气速度(车速)相同,以避免大颗粒物因惯性沉积管路导致的不等速采样问题;②内置流量计,可真实测得进气体积,以便精确计算颗粒物浓度;③可根据车速自主控制是否采样,以提高采样数据的有效性.④装有颗粒物过滤装置,可过滤大颗粒灰尘及柳絮等干扰杂质,同时根据温湿度计算露点,以避免湿度对传感器的干扰.

目前,该传感器已与 Dusttrak 仪器进行联合校正,并对采用闭环流量控制前后的颗粒物浓度变化进行对比和验证.发现该传感器加入闭环流量控制后,颗粒物浓度变化平缓且稳定,传感器性能良好,能够满足监测道路扬尘颗粒物浓度的需求.

本研究采用激光传感器同时计数 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 粒子,可保证相同时间内采样气流流速一致和颗粒物来源一致,进而同时获得颗粒物中 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 的含量.具体步骤为:通过安置在车顶的采样口测量大气背景浓度,安置在车底轮胎处的采样口测量车辆行驶激发的扬尘浓度,二者差值即代表道路扬尘中 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 的浓度,该道路积尘监测系统实时将数据传输至计算机,通过计算可获得道路扬尘的 $\text{PM}_{2.5}$ 粒度乘数.

1.3 数据处理

1.3.1 再悬浮及分级采样后样品数据处理

将利用 AP-42 法采集的样品,通过再悬浮处理及分级采样后,得到各道路积尘粒径分布数据,按照公式(1)计算 $PM_{2.5}$ 粒度乘数。

$$K_{2.5} = (l_{2.5}/l_{10}) \times K_{10} \quad (1)$$

式中, $K_{2.5}$ 为修正后的 $PM_{2.5}$ 粒度乘数; $l_{2.5}$ 和 l_{10} 分别为通过再悬浮及颗粒物分级采样所获得的空气动力学当量直径小于 $2.5 \mu m$ 和 $10 \mu m$ 的颗粒物浓度; K_{10} 为美国环保署 AP-42 文件中给出的 PM_{10} 粒度乘数推荐值,取值 $0.62 g \cdot VKT^{-1}$ (该单位表示一辆机动车行驶 1 km 所引起的扬尘颗粒污染物排放的质量)。

1.3.2 TRAKER 法数据处理

TRAKER 法在原理上认为扬尘颗粒物浓度与车速有关,对于积尘分布均匀的道路,车速越大,则车辆激发并引起的颗粒物浓度越高。本研究选取一条长度约 1.2 km、道路积尘分布较为均匀的道路进行测试,首先验证保定市道路积尘随车速变化的规律。为排除和平衡车速对扬尘的影响,普遍将速度校正并统一到 $40 km \cdot h^{-1}$ (不同类型城市道路上平均车速值),利用以下校正公式分别对获取的道路扬尘中 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 进行校正^[22]:

$$T'_i = T_i \times (40/v)^b \quad (2)$$

式中, T'_i 表示校正后扬尘颗粒物浓度 ($\mu g \cdot m^{-3}$); T_i 表示由车辆在不同车速下激发引起的颗粒物浓度 ($\mu g \cdot m^{-3}$); v 表示机动车行驶速度 ($km \cdot h^{-1}$); b 为不定参数,主要取决于道路的颗粒物粒径及组分组成,其值在不同城市间存在差异,需由测试路段进行测试; i 表示颗粒物粒径段,为 $2.5 \mu m$ 或 $10 \mu m$ 。

颗粒物粒度乘数仍利用公式(1)计算。

2 结果与讨论

2.1 基于 TRAKER 法测定粒度乘数的方法探讨与构建

2.1.1 颗粒物再悬浮及分级采样获取的道路积尘的 $K_{2.5}$

利用 AP-42 法对保定市各类型道路上道路积尘采样,通过再悬浮及分级采样获得的 $PM_{2.5}$ 粒度乘数如图 2 所示。整体来看,保定市道路积尘的 $PM_{2.5}$ 粒度乘数为 $0.15 \sim 0.35 g \cdot VKT^{-1}$, 平均值为 $0.21 g \cdot VKT^{-1}$ 。从不同类型道路来看,不同类型道路的 $K_{2.5}$ 存在显著差异。图 2 表明,不同类型道路的 $PM_{2.5}$ 粒度乘数值表现为:快速路 ($0.15 \sim 0.23 g \cdot VKT^{-1}$) < 次干道 ($0.15 \sim 0.28 g \cdot VKT^{-1}$) < 支路 ($0.15 \sim 0.29 g \cdot VKT^{-1}$) < 主干道 ($0.22 \sim 0.35 g \cdot VKT^{-1}$)。

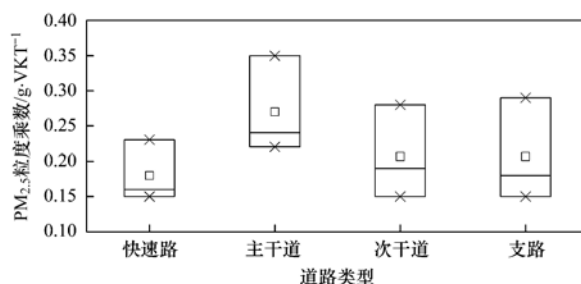


图 2 基于 AP-42 法获取的道路积尘的 $K_{2.5}$

Fig. 2 The $K_{2.5}$ of road dust based on AP-42 method

2.1.2 TRAKER 法获取的道路积尘的 $K_{2.5}$

为确保 TRAKER 法能够有效测定道路扬尘颗粒物浓度,首先对道路扬尘颗粒物浓度与速度的关系进行校正。将道路扬尘颗粒物中 PM_{10} 的浓度与车速进行拟合,如图 3 所示。结果表明颗粒物浓度 (T) 随着车速 (S) 的增加而增加,颗粒物浓度 (T) 与车速 (S) 之间具有良好的相关性,相关系数约为 0.87。根据相关研究,拟合方程中的幂指数 2.197 1 即为公式 (2) 中的 b 值^[23]。

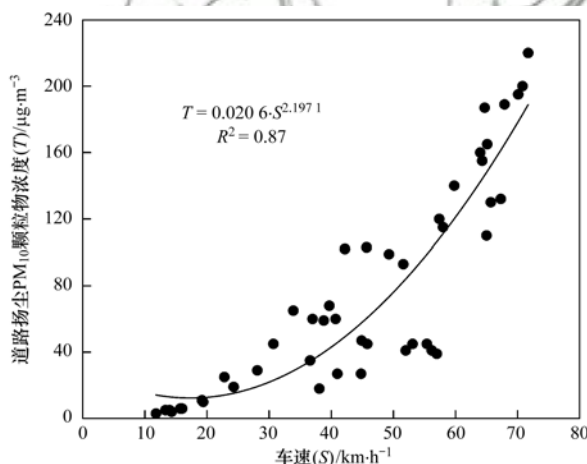


图 3 道路扬尘 PM_{10} 浓度与车速之间的关系

Fig. 3 Relationship between PM_{10} concentrations of road dust and vehicle speed

根据公式(2),将不同车速下的浓度值进行校正处理,得到校正后的浓度值如图 4 所示。从中可知,道路上积尘分布并不均匀,在个别路段会出现颗粒物浓度高值现象。同时也说明在采用 AP-42 法进行道路积尘采样时,采样间隔过大会影响采样精度,进而影响颗粒物粒度乘数的测定精度。

TRAKER 法走航获得道路积尘的 $PM_{2.5}$ 粒度乘数如图 5 所示。结果表明,基于激光传感器的 TRAKER 法走航获得道路积尘的 $K_{2.5}$ 中位值表现为:快速路 ($0.18 g \cdot VKT^{-1}$) < 次干道 ($0.23 g \cdot VKT^{-1}$) < 支路 ($0.26 g \cdot VKT^{-1}$) < 主干道 ($0.26 g \cdot VKT^{-1}$),测定道路的 $K_{2.5}$ 的平均值为 0.23

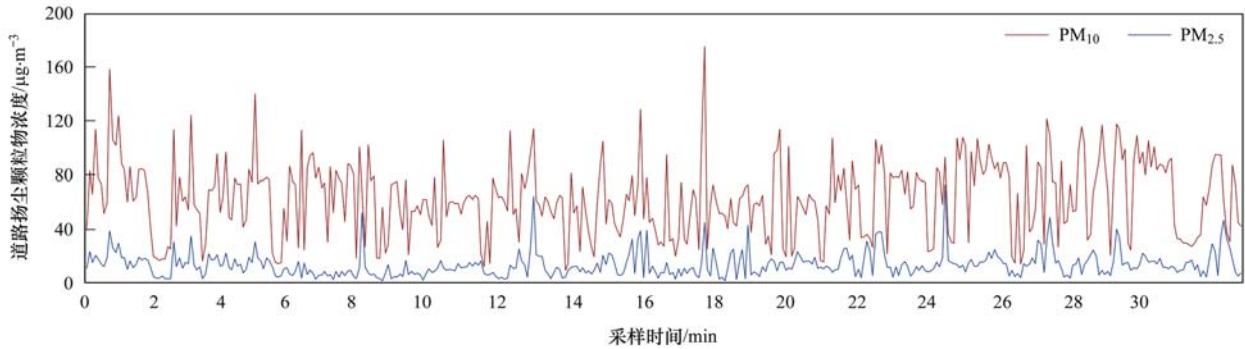


图4 校正后道路扬尘颗粒物浓度

Fig. 4 PM_{10} concentrations of road dust particles after correction

$g \cdot VKT^{-1}$. 然而, TRAKER 法测定的 $K_{2.5}$ 的最大值浮动范围存在较大差异(图5). 特别是在主干道上, $K_{2.5}$ 的最大值均在 0.6 左右, 说明部分路段的

积尘 PM_{10} 中 $PM_{2.5}$ 占比在 90% 以上, 主干道各粒径段积尘分布并不均匀, 可能在个别路段细微颗粒物污染严重.

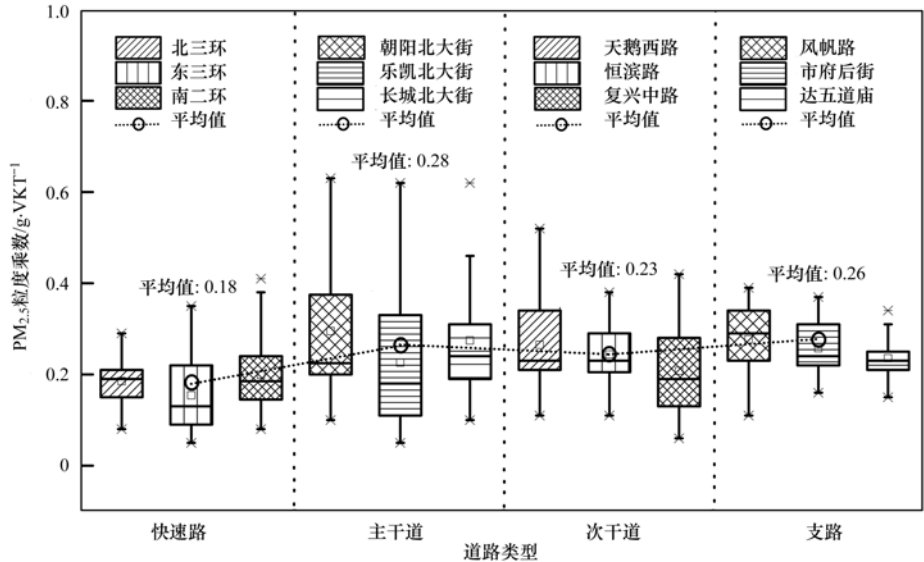


图5 TRAKER 法走航获得道路积尘的 $K_{2.5}$

Fig. 5 The $K_{2.5}$ of road dust obtained using TRAKER method

2.1.3 两种不同方法获得的道路积尘 $K_{2.5}$ 对比

对分别采用两种方法获得的道路积尘的 $K_{2.5}$ 结果进行对比, 如图6所示. 两种方法获得的道路积尘 $K_{2.5}$ 具有较好的一致性. 然而, AP-42 法在大部分快速路及主干道上测得的粒度乘数比 TRAKER 测得的数值略微偏大. 这是由于快速路及主干道上车辆速度较快, 地面积尘中的细微颗粒物极易在车辆流速的带动下扬起并飘散, 进而导致激光传感器获得的细微颗粒物含量较少, 所以 TRAKER 获得的粒度乘数较小. 而在市府后街及达五道庙等支路上, 由于支路狭窄, 细微颗粒物积尘较多、车速相对较慢, 所以测得的 $PM_{2.5}$ 含量相对较高, 所以 TRAKER 获得的粒度乘数相对较高. 因此, 控制并保持 TRAKER 的车速均匀对于获取道路积尘的粒度乘数十分关键.

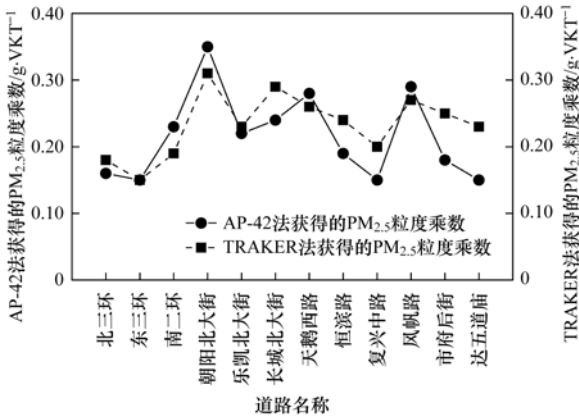


图6 基于两种不同方法获得的 $K_{2.5}$ 的结果对比

Fig. 6 Comparison of $K_{2.5}$ results based on two different methods

为进一步定量研究两种不同方法获得的道路积尘 $K_{2.5}$, 对两组数据进行拟合分析, 结果显示, 采用

两种方法获得的道路积尘 $K_{2.5}$ 具有较高的线性相关性,相关系数约为 0.6(图 7),说明利用基于激光传感器的 TRAKER 法能够满足测量并计算道路扬尘 $K_{2.5}$ 的要求,可直接利用 TRAKER 获取粒度乘数或利用经验公式转换.该方法将使得 $PM_{2.5}$ 粒度乘数的测定更加快速、简便和高效.

2.1.4 两种不同方法获得的道路扬尘 $PM_{2.5}$ 排放因子对比

为对比两种方法获得的粒度乘数对排放因子的影响,结合道路的平均车重、实测的道路积尘负荷和 $K_{2.5}$,参照文献[24]可计算道路扬尘排放因子,见表 1.结果表明,根据两种不同方法获得的 $K_{2.5}$ 计算排放因子,其值差异较小,说明基于激光传感器的

TRAKER 法是获得道路扬尘 $K_{2.5}$ 的有效替代方法.

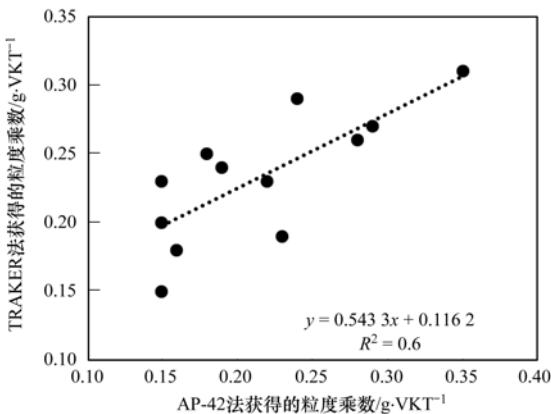


图 7 基于两种不同方法获得的 $K_{2.5}$ 的相关性

Fig. 7 Correlation of $K_{2.5}$ values of two different methods

表 1 不同类型道路 $PM_{2.5}$ 排放因子及相关参数

Table 1 $PM_{2.5}$ emissions factors and their relevant parameters for the different types of roads						
道路类型	平均车重 /t	积尘负荷 /g·m ⁻²	$PM_{2.5}$ 粒度乘数/g·VKT ⁻¹		$PM_{2.5}$ 排放因子/g·(km·辆) ⁻¹	
			AP-42 法采样及再悬浮法	TRAKER 法	AP-42 法采样及再悬浮法	TRAKER 法
快速路	7	0.6	0.19	0.18	0.87	0.82
主干道	4.5	0.6	0.29	0.28	0.84	0.82
次干道	4.5	1.9	0.22	0.23	1.83	1.91
支路	3	7.6	0.22	0.26	4.27	5.04

2.2 保定市道路积尘 $K_{2.5}$ 特征

2.2.1 保定市不同类型道路积尘 $K_{2.5}$ 特征

保定市不同类型道路积尘 $K_{2.5}$ 按其值大小排序表现为:快速路 < 次干道 < 支路 < 主干道,存在显著差异.结合 TRAKER 法测定结果、AP-42 法现场采样调研及相关研究,对不同类型道路积尘 $K_{2.5}$ 进行分析.

保定市城区快速路的 $PM_{2.5}$ 粒度乘数最小,说明快速路的积尘颗粒物中大粒径颗粒物含量较多.这与张伟等^[12]在天津研究的结果较为一致.一方面,快速路上的车流量大、行驶速度快,不利于颗粒物的积累,特别是小颗粒物在机动车的快速带动下,极易被激发并飘散.另一方面,保定市快速路多位于城市边缘的空旷地带,自然风力相对城区中心较强,不利于小颗粒污染物在路面的积累.

主干道的 $PM_{2.5}$ 粒度乘数最大,说明主干道的颗粒物中小粒径颗粒物含量较多.主干道的车流量相对较大、车速也相对较快,由于路面积尘相对较多,在机动车的碾压下也极易产生小粒径颗粒物.此外,主干道路面复杂,积尘来源相对较广,行驶的重型车辆相对较多,汽车尾气排放的细小颗粒物随之增多.而主干道车辆的速度又不如快速路快,相对来说易于小粒径颗粒物的积累,所以整体上小粒径颗粒物含量相对较多.

次干道的 $K_{2.5}$ 相对较高的原因与主干道类似.

此外,实际调研发现,复兴中路等次干道附近存在较多施工活动,渣土车运输过程中的颗粒物散落以及施工过程引起的扬尘均会对 $K_{2.5}$ 产生较大影响,这与王士宝等^[11]在乌鲁木齐市的研究结果较为一致.

支路与次干道的 $PM_{2.5}$ 粒度乘数中位值近似.实际调研发现,支路附近存在大量的社区和餐饮行业等,人为活动较多和烹饪产生的油烟等细小颗粒物成分相对较多,因此会导致 $K_{2.5}$ 相对较高.

2.2.2 保定市道路积尘 $K_{2.5}$ 的均值特征

保定市道路积尘 $K_{2.5}$ 的均值在 $0.15\text{ g}\cdot\text{VKT}^{-1}$ 以上,说明在计算排放清单时,若直接借鉴美国环保署的推荐值($K_{2.5} = 0.15\text{ g}\cdot\text{VKT}^{-1}$)进行计算,将会低估保定市的道路扬尘排放量,进而增加排放清单的不确定性.因此,准确地测定保定市道路积尘的 $PM_{2.5}$ 粒度乘数对保定市道路扬尘排放清单的建立具有积极意义.此外,黄嫣旻^[25]通过校正公式得到的上海市道路扬尘 $K_{2.5}$ 为 $0.9\sim1.2\text{ g}\cdot\text{VKT}^{-1}$;张伟等^[12]研究了天津市春季道路扬尘的 $PM_{2.5}$ 粒度乘数,结果为 $0.04\sim0.09\text{ g}\cdot\text{VKT}^{-1}$;王士宝等^[11]通过校正公式得到的乌鲁木齐市道路扬尘 $K_{2.5}$ 为 $0.064\sim0.091\text{ g}\cdot\text{VKT}^{-1}$.与上述城市相比,保定市 $PM_{2.5}$ 粒度乘数相对较高,说明保定市道路积尘中微颗粒物含量较多,道路扬尘对城市 $PM_{2.5}$ 的贡献可能较大.

3 结论

(1) 基于 AP-42 法和 TRAKER 法获取的保定市道路积尘的 $K_{2.5}$ 平均值分别为 $0.21 \text{ g} \cdot \text{VKT}^{-1}$ 和 $0.23 \text{ g} \cdot \text{VKT}^{-1}$. 采用两种方法获得的道路积尘的 $K_{2.5}$ 结果具有较好地一致性; 定量分析发现其具有较高的线性相关性, 相关系数约为 0.6. 根据两种不同方法获得的 $K_{2.5}$ 计算排放因子值差异较小, 说明基于激光传感器的 TRAKER 法可以作为测定道路扬尘 $K_{2.5}$ 的有效替代方法.

(2) 保定市不同类型道路积尘 $K_{2.5}$ 特征按其值大小排序表现为: 快速路 < 次干道 < 支路 < 主干道, 存在显著差异.

(3) 保定市道路积尘 $K_{2.5}$ 的均值在 $0.15 \text{ g} \cdot \text{VKT}^{-1}$ 以上, 说明在计算排放清单时, 若直接借鉴美国环保署的推荐值 ($K_{2.5} = 0.15 \text{ g} \cdot \text{VKT}^{-1}$) 进行计算, 将会低估保定市的道路扬尘排放量, 进而增加排放清单的不确定性. 与相关文献已报道城市相比, 保定市 $K_{2.5}$ 相对较高, 说明保定市道路积尘中微颗粒物含量较多, 道路扬尘对城市 $PM_{2.5}$ 的贡献可能较大.

参考文献:

- [1] 薛志钢, 杜谨宏, 任岩军, 等. 我国大气污染源排放清单发展历程和对策建议[J]. 环境科学研究, 2019, **32**(10): 1678-1686.
- Xue Z G, Du J H, Ren Y J, *et al.* Development course and suggestion of air pollutant emission inventory in China[J]. Research of Environmental Sciences, 2019, **32**(10): 1678-1686.
- [2] 叶贤满, 徐昶, 洪盛茂, 等. 杭州市大气污染物排放清单及特征[J]. 中国环境监测, 2015, **31**(2): 5-11.
- Ye X M, Xu C, Hong M S, *et al.* Emission inventory and characteristics of air pollutants in Hangzhou[J]. Environmental Monitoring in China, 2015, **31**(2): 5-11.
- [3] 陈露露, 黄韬, 陈凯杰, 等. 我国 PCDD/Fs 网格化大气排放清单[J]. 环境科学, 2020, **41**(2): 510-519.
- Chen L L, Huang T, Chen K J, *et al.* Gridded atmospheric emission inventory of PCDD/Fs in China[J]. Environmental Science, 2020, **41**(2): 510-519.
- [4] 杨强, 黄成, 卢滨, 等. 基于本地污染源调查的杭州市大气污染物排放清单研究[J]. 环境科学学报, 2017, **37**(9): 3240-3254.
- Yang Q, Huang C, Lu B, *et al.* Air pollutant emission inventory based on local emission source surveys in Hangzhou, China[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2017, **37**(9): 3240-3254.
- [5] 樊守彬, 田刚, 李钢, 等. 北京铺装道路交通扬尘排放规律研究[J]. 环境科学, 2007, **28**(10): 2396-2399.
- Fan S B, Tian G, Li G, *et al.* Emission characteristics of paved roads fugitive dust in Beijing[J]. Environmental Science, 2007, **28**(10): 2396-2399.
- [6] 刘泽常, 张猛, 郝长瑞, 等. 济南市道路扬尘排放因子估算及其影响因素研究[J]. 环境科学与技术, 2012, **35**(1): 150-154.
- Liu Z C, Zhang M, Hao C R, *et al.* Road dust emission factors in Jinan City[J]. Environmental Science & Technology, 2012, **35**(1): 150-154.
- [7] 彭康. 珠江三角洲铺装道路扬尘源污染物排放及特征研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2013. 5-10.
- [8] US EPA. Emission factor documentation for AP-42, section 13. 2.1 paved roads [R]. Washington DC. Office of Air Quality Planning and Standards U. S. Environmental Protection Agency, 2011.
- [9] 郑宏锋, 陈建华, 王玮, 等. 交通扬尘排放量及排放特征的研究方法[A]. 见: 大气气溶胶科学技术研究进展[C]. 南京: 中国颗粒学会, 2005. 366-370.
- [10] 李树立, 姬亚芹, 朱振宇, 等. 天津市秋季道路降尘粒度乘数的分布特征[J]. 环境化学, 2017, **36**(3): 480-485.
- Li S L, Ji Y Q, Zhu Z Y, *et al.* Distribution of the particle size multiplier of road dust fall during autumn in Tianjin [J]. Environmental Chemistry, 2017, **36**(3): 480-485.
- [11] 王士宝, 姬亚芹, 张伟, 等. 乌鲁木齐道路扬尘 $PM_{2.5}$ 粒度乘数特征[J]. 环境科学研究, 2018, **31**(7): 1201-1206.
- Wang S B, Ji Y Q, Zhang W, *et al.* $PM_{2.5}$ particle size multiplier feature of road dust in Urumqi City[J]. Research of Environmental Sciences, 2018, **31**(7): 1201-1206.
- [12] 张伟, 姬亚芹, 李树立, 等. 天津市春季样方法道路扬尘 $PM_{2.5}$ 粒度乘数特征[J]. 中国环境科学, 2016, **36**(7): 1955-1959.
- Zhang W, Ji Y Q, Li S L, *et al.* $PM_{2.5}$ size multiplier feature of road dust in Tianjin during spring with quadrat sampling method [J]. China Environmental Science, 2016, **36**(7): 1955-1959.
- [13] Kuhns H, Etyemezian V, Landwehr D, *et al.* Testing re-entrained aerosol kinetic emissions from roads: a new approach to infer silt loading on roadways[J]. Atmospheric Environment, 2001, **35**(16): 2815-2825.
- [14] Etyemezian V, Kuhns H, Gillies J, *et al.* Vehicle-based road dust emission measurement (III): effect of speed, traffic volume, location, and season on PM_{10} road dust emissions in the Treasure Valley, ID[J]. Atmospheric Environment, 2003, **37**(32): 4583-4593.
- [15] Etyemezian V, Kuhns H, Nikolich G. Precision and repeatability of the TRAKER vehicle-based paved road dust emission measurement[J]. Atmospheric Environment, 2005, **40**(16): 2953-2958.
- [16] Gillies J A, Watson J G, Rogers C F, *et al.* Long-term efficiencies of dust suppressants to reduce PM_{10} emissions from unpaved roads[J]. Journal of the Air & Waste Management Association, 1999, **49**(1): 3-16.
- [17] Zhu D Z, Kuhns H D, Brown S, *et al.* Fugitive dust emissions from paved road travel in the lake Tahoe basin[J]. Journal of the Air & Waste Management Association, 2009, **59**(10): 1219-1229.
- [18] Zhang W, Ji Y Q, Zhang S J, *et al.* Determination of silt loading distribution characteristics using a rapid silt loading testing system in Tianjin, China[J]. Aerosol and Air Quality Research, 2017, **17**(9): 2129-2138.
- [19] 朱振宇, 张诗建, 张亚飞, 等. 道路交通扬尘采样方法研究进展[J]. 环境与可持续发展, 2014, **39**(1): 41-45.
- Zhu Z Y, Zhang S J, Zhang Y F, *et al.* Research progress on the sampling methods of road traffic dust [J]. Environment and Sustainable Development, 2014, **39**(1): 41-45.
- [20] 秦孝良, 高健, 王永敏, 等. 传感器技术在环境空气监测与污染治理中的应用现状、问题与展望[J]. 中国环境监测, 2019, **35**(4): 162-172.

- Qin X L, Gao J, Wang Y M, *et al.* Application of sensor technology in environmental air monitoring and pollution control: status, problems and prospects[J]. *Environmental Monitoring in China*, 2019, **35**(4): 162-172.
- [21] Qin X L, Hou L J, Gao J, *et al.* The evaluation and optimization of calibration methods for low-cost particulate matter sensors: inter-comparison between fixed and mobile methods[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **175**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.136791.
- [22] 郭硕, 肖捷颖, 安塞, 等. 利用快速检测法研究石家庄道路交通扬尘排放特征[J]. *环境污染与防治*, 2019, **41**(2): 206-210.
- Guo S, Xiao J Y, An S, *et al.* Characteristics of road dust emission in Shijiazhuang based on TRAKER system [J]. *Environmental Pollution & Control*, 2019, **41**(2): 206-210.
- [23] 张诗建, 姬亚芹, 朱振宇, 等. 机动车车速对道路交通扬尘排放特征的影响[J]. *环境污染与防治*, 2016, **38**(4): 82-84, 90.
- Zhang S J, Ji Y Q, Zhu Z Y, *et al.* Influence on emission characteristics of road traffic dust caused by vehicle speed[J]. *Environmental Pollution & Control*, 2016, **38**(4): 82-84, 90.
- [24] 樊守彬, 杨涛, 王凯, 等. 道路扬尘排放因子建立方法与应用[J]. *环境科学*, 2019, **40**(4): 1664-1669.
- Fan S B, Yang T, Wang K, *et al.* Methods and application of road fugitive dust emission factor localization[J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(4): 1664-1669.
- [25] 黄嫣旻. 城市地面扬尘的估算与分布特征研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2006. 1-20.

环 境 科 学

CONTENTS

Contributors to Air Pollutant Emission Changes in Autumn and Winter in Beijing-Tianjin-Hebei and Surrounding Areas	TANG Qian, ZHENG Bo, XUE Wen-bo, <i>et al.</i> (1591)
Characteristics and Meteorological Factors of Complex Nonattainment Pollution of Atmospheric Photochemical Oxidant (O_x) and $PM_{2.5}$ in the Pearl River Delta Region, China	YAN Feng-hua, CHEN Wei-hua, CHANG Ming, <i>et al.</i> (1600)
Source Apportionment of Ozone Pollution in Guangzhou; Case Study with the Application of Lagrangian Photochemical Trajectory Model	PEI Cheng-lei, MU Jiang-shan, ZHANG Ying-nan, <i>et al.</i> (1615)
Chemical Composition and Source Analysis of $PM_{2.5}$ in Yuncheng, Shanxi Province in Autumn and Winter	ZHAO Qing, LI Xing-ru, WANG Guo-xuan, <i>et al.</i> (1626)
Temporal Trend of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Atmosphere Within 24 Hours After Snowfall	FAN Hui-ze, ZHU Fu-jie, HU Peng-tuan, <i>et al.</i> (1636)
Determination Method and Characteristics of Particle Size Multiplier of $PM_{2.5}$ in Road Dust	LI Dong, CHEN Jian-hua, ZHANG Yue-fan, <i>et al.</i> (1642)
Source Profiles and Impact of VOCs Based on Production Processes in Foundry Industries	GAO Shuang, LI Shi-bei, BO Xin, <i>et al.</i> (1649)
Emission Characteristics and Toxicity Effects of Halogenated Polycyclic Aromatic Hydrocarbons from Coal-Fired and Waste Incineration Power Plants	NI Xiu-feng, WANG Ru-wei, CAI Fei-xuan, <i>et al.</i> (1660)
Concentration and Particle Size Distribution Characteristics of Microbial Aerosol and Bacterial Community Structure During Spring in Lanzhou City, China	ZHAO Wei, LI Jie, XIE Hui-na, <i>et al.</i> (1668)
Optimization Method and Case Study of Air Pollution Emission Spatial Pattern	LI Min-hui, LIAO Cheng-hao, CHANG Shu-cheng, <i>et al.</i> (1679)
Influence of $PM_{2.5}$ Pollution on Health Burden and Economic Loss in China	LI Yong, LIAO Qin, ZHAO Xiu-ge, <i>et al.</i> (1688)
Identify the Nitrate Sources in Different Land Use Areas Based on Multiple Isotopes	JIN Zan-fang, HU Jing, WU Ai-jing, <i>et al.</i> (1696)
Hydrochemical Characteristic and Their Controlling Factors in the Yarkant River Basin of Xinjiang	ZHANG Jie, ZHOU Jin-long, ZENG Yan-yan, <i>et al.</i> (1706)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in the Water of Lijiang River Basin	HUANG Hong-wei, XIAO He, WANG Dun-qiu, <i>et al.</i> (1714)
Changes in Concentrations and Pollution Levels of Trace Elements of Floodplain Sediments of Poyang Lake Basin in Recent Twenty Years	LI Kuo, YANG Ke, PENG Min, <i>et al.</i> (1724)
Hydrochemical and Isotopic Characteristics in the Shallow Groundwater of the Fenhe River Basin and Indicative Significance	LIU Xin, XIANG Wei, SI Bing-cheng (1739)
Major Ionic Characteristics and Factors of Karst Groundwater at Huixian Karst Wetland, China	LI Jun, ZOU Sheng-zhang, ZHAO Yi, <i>et al.</i> (1750)
Hydrochemistry Characteristics and Estimation of the Dissolved Inorganic Carbon Flux in the Caohai Lake Wetland Catchment of Guizhou Province	CAO Xing-xing, WU Pan, YANG Shi-di, <i>et al.</i> (1761)
Concentration Levels and Potential Ecological Risks of Current Use Pesticides in the Surface Seawater of Typical Liaoning Sea Areas	DU Jing, HU Chao-kui, XIE Huai-jun, <i>et al.</i> (1772)
Levels, Characteristics, and Potential Source of Micro(meso)plastic Pollution of Soil in Liaohe River Basin	HAN Li-hua, XU Li, LI Qiao-ling, <i>et al.</i> (1781)
PAHs Pollution Characteristics and Source Analysis of Typical Lake and Reservoir Sediments in Jin-Ji-Liao Area	WU Peng, LU Yi-ren, LI Hui, <i>et al.</i> (1791)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Organophosphate Esters in Rivers and Water Body Around Taihu Lake	ZHANG Wen-ping, ZHANG Zhen-fei, GUO Chang-sheng, <i>et al.</i> (1801)
Spatiotemporal Distributions and Ecological Risk Assessments of Typical Antibiotics in Surface Water of Taihu Lake	DING Jian-nan, LIU Shu-jiao, ZOU Jie-ming, <i>et al.</i> (1811)
Characteristics of Volatile Organic Compounds Pollution and Risk Assessment of Nansi Lake in Huaihe River Basin	CHENG Yun-xuan, GAO Qiu-sheng, LI Jie, <i>et al.</i> (1820)
Distribution, Source, and Ecological Risk Evaluation of the PAHs and PCBs in the Sediments from Sanya River	ZHAN Yong, WEI Ting-ting, YE Hui-bin, <i>et al.</i> (1830)
Spatiotemporal Change and Source Apportionment of Non-point Source Nitrogen and Phosphorus Pollution Loads in the Three Gorges Reservoir Area	LI Ming-long, JIA Meng-dan, SUN Tian-cheng, <i>et al.</i> (1839)
Effect of the Combined Use of Denitrifying Bacteria, Calcium Nitrate, and Zirconium-Modified Zeolite on the Mobilization of Nitrogen and Phosphorus in Sediments and Evaluation of Its Nitrate-Nitrogen Releasing Risk	XIN Hui-min, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui (1847)
Combined Remediation of Eutrophic Water by Phoslock® and Aerobic Denitrifying Bacteria	LI Bing-tang, ZHOU Zhi-qin, Ravi Naidu, <i>et al.</i> (1861)
Biodegradation of Algae-derived Organic Matter (I-DOM) from Lake Taihu	ZHANG Qiao-ying, SUN Wei, DU Ying-xun, <i>et al.</i> (1870)
Structure Characteristics and Driving Variables of Epilithic Algae Community in Lhasa River Basin of Qinghai-Tibet Plateau	WEI Jun-wei, LI Hong-ran, WANG Xing-zhong, <i>et al.</i> (1879)
Spectral Characteristics and Sources of Dissolved Organic Matter from Landscape River During Flood Season in Suzhou Based on EEMs and UV-vis	HE Jie, ZHU Xue-hui, WEI Bin, <i>et al.</i> (1889)
Adsorption and Desorption Behaviors of Antibiotics on TWP and PVC Particles Before and After Aging	FAN Xiu-lei, ZOU Ye-feng, LIU Jia-qiang, <i>et al.</i> (1901)
Synthesis of Magnetic Iron Modifying Biochar for Ammonia Nitrogen Removal from Water	WANG Fang-jun, SANG Qian-qian, DENG Ying, <i>et al.</i> (1913)
Seasonal Effects of Influent Ammonia Oxidizing Bacteria of Municipal Wastewater Treatment Plants on Activated Sludge System	YU Li-fang, WANG Yu, HUA Si-si, <i>et al.</i> (1923)
Analysis of Performance and Microbial Diversity of ANAMMOX Sludge Based on Particle Size Differentiation	WANG Xiao-tong, YANG Hong (1930)
Effects of Chlorine Dioxide Disinfection on the Profile of the Super Antibiotic Resistance Genes in a Wastewater Treatment Plant	CHENG Chun-yan, LI Hai-bei, LIANG Yong-bing, <i>et al.</i> (1939)
Effects of PES and 2,4-DCP on the Extracellular Polymeric Substances and Microbial Community of Anaerobic Granular Sludge	LIN Xu-meng, SU Cheng-yuan, WU Shu-min, <i>et al.</i> (1946)
Characteristics of Sludge and Associated Risk Assessment of Urban Sewage Treatment Plants	LI Juan, LI Jin-xiang, YANG Yan-yan (1956)
Effects of Climate Warming on the Key Process and Index of Black Soil Carbon and Nitrogen Cycle During Freezing Period	WANG Zi-long, LIU Chuan-xing, JIANG Qiu-xiang, <i>et al.</i> (1967)
Effects of Combined Application of Biogas Slurry and Straw on the Migration and Fractions of Soil Heavy Metals in Rice-wheat Rotation System in Coastal Reclamation Areas	WANG Wei, ZHOU Jun-nan, TANG Yi-fan, <i>et al.</i> (1979)
Geochemical Survey Method of Land Quality in Land Parcel Scale City: A Case Study of the Initial Area of the Xiong'an New District	ZHOU Ya-long, GUO Zhi-juan, LIU Fei, <i>et al.</i> (1989)
Potential Ecological Risk Assessment and Source Analysis of Heavy Metals in Soil-crop System in Xiong'an New District	ZHOU Ya-long, YANG Zhi-bin, WANG Qiao-lin, <i>et al.</i> (2003)
Cadmium Accumulation Characteristics and Impacting Factors of Different Rice Varieties Under Paddy Soils with High Geological Backgrounds	DAI Zi-wen, FANG Cheng, SUN Bin, <i>et al.</i> (2016)
Effects of Different Exogenous Selenium Species Application on Growth and Cadmium Uptake of Pak Choi in Cadmium Contaminated Soil	LIU Yang, QI Ming-xing, WANG Min, <i>et al.</i> (2024)
Influencing Factors of Cadmium Bioaccumulation Factor in Crops	CHEN Jie, WANG Juan, WANG Yi-wen, <i>et al.</i> (2031)
Effects of Different Exogenous Plant Hormones on the Antioxidant System and Cd Absorption and Accumulation of Rice Seedlings Under Cd Stress	ZHANG Sheng-nan, HUANG Yi-zong, LI Yan, <i>et al.</i> (2040)
Effects of Different Organic Materials on Absorption and Translocation of Arsenic and Cadmium in Rice	LI Kai-ye, ZHAO Ting-ting, CHEN Jia, <i>et al.</i> (2047)
Soil Fungal Community Structure and Functional Diversity in a Copper Tailing Dam and Its Surrounding Areas	CHEN Jian-wen, ZHANG Hong, LI Jun-jian, <i>et al.</i> (2056)
Potential of Arbuscular Mycorrhizal Fungi, Biochar, and Combined Amendment on Sandy Soil Improvement Driven by Microbial Community	ZHANG Zhe-chao, YANG Jiu-yang, HAO Bai-hui, <i>et al.</i> (2066)
Animal Manure Fertilization Promotes Antibiotic Resistance Gene Dissemination Among Manure, Soil, and Vegetables	ZHANG Hong-na, DONG Meng-jie, ZHOU Yu-fa, <i>et al.</i> (2080)
Establishment and Application of Performance Evaluation and Obstacle Diagnosis Model for Regional Water Ecological Civilization Construction	WAN Bing-tong, BAO Xue-ying, ZHAO Jian-chang, <i>et al.</i> (2089)