

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2019

Vol.40 No.4

第40卷 第4期

目次

南京江北新区大气单颗粒来源解析及混合状态	于兴娜, 时政, 马佳, 李梅, 龚克坚(1521)
西安市 PM _{2.5} 中碳质气溶胶污染特征	牟臻, 陈庆彩, 王羽琴, 沈振兴, 华晓羽, 张梓萌, 孙浩堯, 王玛敏, 张立欣(1529)
太原市冬季 PM _{2.5} 化学组分特征与来源解析	刘素, 马彤, 杨艳, 高健, 彭林, 曹力媛, 逢妮妮, 张浩杰(1537)
郑州市大气细颗粒物中水溶性离子季节性变化特征及其源解析	闫广轩, 张靖雯, 雷豪杰, 黄海燕, 唐明双, 曹治国, 李云蓓, 樊静, 王跃思, 李怀刚(1545)
珠海市郊区大气 PM _{2.5} 中元素特征及重金属健康风险评价	杨毅红, 贾燕, 卞国建, 于晓巍, 钟昌琴, 全鼎余(1553)
一次沙尘事件对沿海及海洋大气气溶胶中金属粒径分布的影响	金同俊, 祁建华, 郝梓延, 林学辉(1562)
基于 SOA 转化机制的沧州市重点企业秋冬季大气污染模拟	高爽, 伯鑫, 马岩, 雷团团, 王刚, 李时蓓, 陆朝阳, 毛娜, 郝明亮, 黄向峰(1575)
京津冀大气污染变化规律及其与植被指数相关性分析	孙爽, 李令军, 赵文吉, 齐梦溪, 田欣, 李珊珊(1585)
2015~2017年北京及近周边平房燃煤散烧及其污染排放遥感测算	赵文慧, 李令军, 鹿海峰, 姜磊, 张立坤, 王新辉, 邱昀(1594)
基于地基遥感的杭州地区气溶胶光学特性	齐冰, 车慧正, 徐婷婷, 杜荣光, 胡德云, 梁卓然, 马千里, 姚杰(1604)
四川省人为源挥发性有机物组分清单及其臭氧生成潜势	周子航, 邓也, 谭钦文, 吴柯颖, 宋丹林, 黄凤霞, 周小玲(1613)
餐饮源挥发性有机物组成及排放特征	高雅琴, 王红丽, 许睿哲, 景盛翱, 刘跃辉, 彭亚荣(1627)
广州番禺大气成分站一次典型光化学污染过程 PAN 和 O ₃ 分析	邹宇, 邓雪娇, 李菲, 殷长泰(1634)
北京市典型道路扬尘化学组分特征及年际变化	胡月琪, 李萌, 颜旭, 张超(1645)
南昌市扬尘 PM _{2.5} 中多环芳烃的来源解析及健康风险评价	于瑞莲, 郑权, 刘贤荣, 王珊珊, 赵莉斯, 胡恭任(1656)
道路扬尘排放因子建立方法与应用	樊守彬, 杨涛, 王凯, 李雪峰(1664)
现实工况下挖掘机电尾气排放特征分析	马帅, 张凯山, 王帆, 庞凯莉, 朱怡静, 李臻, 毛红梅, 胡宝梅, 杨锦锦, 王斌(1670)
雾-霾天人体平均呼吸高度处不同粒径气溶胶的微生物特性	杨唐, 韩云平, 李琳, 刘俊新(1680)
霾天能见度参数化方案改进及预报效果评估	赵秀娟, 李梓铭, 徐敬(1688)
支持向量机回归在臭氧预报中的应用	苏筱倩, 安俊琳, 张玉欣, 梁静舒, 刘静达, 王鑫(1697)
基于中国电网结构及一线典型城市车辆出行特征的 PHEV 二氧化碳排放分析	郝旭, 王贺武, 李伟峰, 欧阳明高(1705)
岩溶槽谷区地下河硝酸盐来源及其环境效应: 以重庆龙凤槽谷地下河系统为例	段世辉, 蒋勇军, 张远瞩, 曾泽, 王正雄, 吴韦, 彭学义, 刘九缠(1715)
胶州湾表层水体中邻苯二甲酸酯的污染特征和生态风险	刘成, 孙翠竹, 张智, 唐燎, 邹亚丹, 徐擎擎, 李锋民(1726)
湛江湾沉积物中六六六(HCHs)、滴滴涕(DDTs)有机氯农药的分布特征与风险评估	彭诗云, 彭平安, 孔德明, 陈法锦, 于赤灵, 李嘉诚, 梁宇钊, 宋建中(1734)
生态净化系统中 DOM 光学特性及影响因素分析: 以盐龙湖春季为例	马睿, 李璇, 王莲, 王家新, 马卫星, 丁成, 吴向阳(1742)
溶解性有机物(DOM)与区域土地利用的关系: 基于三维荧光-平行因子分析(EEM-PARAFAC)	李昀, 魏鸿杰, 王侃, 张招招, 于旭彪(1751)
汉丰湖流域农业面源污染氮磷排放特征分析	谢经朝, 赵秀兰, 何丙辉, 李章安(1760)
基于 RZWQM 模型模拟太行山低山丘陵区农田土壤硝态氮迁移及淋溶规律	郑文波, 王仕琴, 刘丙霞, 雷玉平, 曹建生(1770)
澜沧江流域梯级水库建设下水体营养盐和叶绿素 a 的空间分布特征	程豹, 望雪, 马金川, 杨正健, 刘德富, 马骏(1779)
福州地区海湾和河口潮汐沼泽湿地秋季上覆水营养盐分布特征	何露露, 杨平, 谭立山, 仝川, 黄佳芳(1788)
尾水受纳河流中 PhACs 在传统水相中的分布及环境风险	王硕, 刘建超, 郑超亚, 张吉琛, 许嘉诚, 徐莹莹, 陆光华(1797)
绿色屋顶雨洪调控能力与效益评价	李俊生, 尹海伟, 孔繁花, 陈佳宇, 邓金玲(1803)
超声活化过硫酸盐降解水中典型臭味	孙昕, 孙杰, 李鹏飞, 汤加刚, 杨晴, 唐晓(1811)
金属有机框架 MIL-53(Fe) 可见光催化还原水中 U(VI)	闫增元, 刁海玲, 袁立永(1819)
覆盖材料对洱海不同湖区沉积物溶解态有机磷和无机磷释放影响及差异	龚佳健, 倪兆奎, 肖尚斌, 赵海超, 席银, 王圣瑞(1826)
氢氧化铜改性介孔稻壳生物炭除磷性能	许润, 石程好, 唐倩, 石稳民, 康建雄, 任拥政(1834)
改性污泥基生物炭的性质与重金属吸附效果	陈坦, 周泽宇, 孟瑞红, 王洪廷, 陆文静, 金军, 刘颖(1842)
纳米磁性磷酸二氢钙对 Cd 的吸附、回收与再生	李玉娇, 杨志敏, 陈玉成, 黄磊, 唐海燕(1849)
赤铁矿抑制硫酸盐废水厌氧消化产甲烷过程中硫化氢形成与机制	黄绍福, 叶捷, 周顺桂(1857)
微藻膜反应器处理海水养殖废水性能及膜污染特性	马航, 李之鹏, 柳峰, 徐仲, 尤宏, 王芳, 陈其伟(1865)
生活污水预沉淀-SNAD 颗粒污泥工艺小试	李冬, 崔雅倩, 赵世勋, 刘志诚, 张杰(1871)
生活污水与人工配水对好氧颗粒污泥系统的影响	李冬, 王樱桥, 李帅, 张杰, 王玉珊(1878)
硫磺/硫铁矿自养反硝化系统脱氮性能	周娅, 买文宁, 梁家伟, 代吉华, 牛颖, 李伟利, 唐启(1885)
异养硝化细菌 <i>Pseudomonas putida</i> YH 的脱氮特性及降解动力学	汪旭晖, 杨垒, 任勇翔, 陈宁, 肖倩, 崔坤, 鄯丹(1892)
污泥龄及 pH 值对反硝化除磷工艺效能的影响	韦佳敏, 黄慧敏, 程诚, 蒋志云, 刘文如, 沈耀良(1900)
盐度条件下 ANAMMOX-EGSB 反应器颗粒污泥微生物群落	王晗, 李瀚翔, 陈猷鹏, 郭劲松, 晏鹏, 方芳(1906)
内源碳 PHA 的贮存对混合菌耐低温特性的影响	杨建鹏, 张健, 田晴, 朱艳彬, 李方, Wolfgang Sand(1914)
中国市政污泥中磷的含量与形态分布	王超, 刘清伟, 耿音, 程柳, 王宁, 李彩丹, 毛宇翔(1922)
广州市售水产品中全氟烷基化合物的污染特征和安全风险评价	王旭峰, 王强, 黎智广, 黄珂, 李刘冬, 赵东豪(1931)
长江上游典型农业源溪流溶存氧化亚氮(N ₂ O)浓度特征及影响因素	田琳琳, 王正, 胡磊, 任光前, 朱波(1939)
内蒙古河套灌区不同盐碱程度土壤 CH ₄ 吸收规律	杨文柱, 焦燕, 杨铭德, 温慧洋(1950)
水稻光合碳在植株-土壤系统中分配与稳定对施磷的响应	王莹莹, 肖谋良, 张昀, 袁红朝, 祝贞科, 葛体达, 吴金水, 张广才, 高晓丹(1957)
土壤水分和温度对西南喀斯特棕色石灰土无机碳释放的影响	徐学池, 黄媛, 何寻阳, 王桂红, 苏以荣(1965)
黄土丘陵区侵蚀坡面土壤微生物量碳时空动态及影响因素	覃乾, 朱世硕, 夏彬, 赵允格, 许明祥(1973)
农用地土壤抗生素组成特征与积累规律	孔晨晨, 张世文, 聂超甲, 胡青青(1981)
生物发酵制药 VOCs 与臭味治理技术研究与进展	王东升, 朱新梦, 杨晓芳, 焦茹媛, 赵珊, 宋荣娜, 吕明哈, 杨敏(1990)
《环境科学》征订启事(1612)	《环境科学》征稿简则(1787)
信息(1663, 1796, 1833)	

道路扬尘排放因子建立方法与应用

樊守彬^{1,2}, 杨涛^{1,2}, 王凯³, 李雪峰^{1,2*}

(1. 北京市环境保护科学研究院, 北京 100037; 2. 国家城市环境污染控制工程技术研究中心, 北京 100037; 3. 首都师范大学资源环境与旅游学院, 北京 100048)

摘要: 排放因子是分析污染源排放特征和建立排放清单的基础数据, 本研究对典型道路进行积尘负荷采样和实验室筛分分析, 通过再悬浮系统和颗粒物粒径谱仪对道路扬尘粒径分布和粒径乘数进行测量, 调查道路车型构成并计算车重, 以北京市通州区为例应用模型法建立本地化的道路扬尘 $PM_{2.5}$ 排放因子。结果表明, 不同类型道路扬尘颗粒物粒径分布在 $<2.5 \mu m$ 范围内的质量比例较为接近, 道路扬尘中 $PM_{2.5}$ 与 PM_{10} 比值在 0.28 ~ 0.32 之间; 不同类型道路的 $PM_{2.5}$ 粒度乘数在 0.18 ~ 0.20 $g \cdot (km \cdot 辆)^{-1}$ 之间, 高速路、国道、省道、县道和乡道的 $PM_{2.5}$ 排放因子分别为 0.06、0.14、0.31、0.30 和 0.39 $g \cdot (km \cdot 辆)^{-1}$ 。积尘负荷采样、再悬浮粒径分布测量和排放因子模型计算, 是道路扬尘排放因子本地化的可行方法。在建立道路扬尘排放因子过程中, 粒径乘数可以应用默认值, 由于不同类型道路的积尘负荷差异较大, 需要分道路类型或按车流量级别进行积尘负荷采样分析, 对排放因子进行本地化。

关键词: 道路扬尘; 粒径分布; 粒度乘数; 排放因子; 积尘负荷

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)04-1664-06 DOI: 10.13227/j.hjxx.201810012

Methods and Application of Road Fugitive Dust Emission Factor Localization

FAN Shou-bin^{1,2}, YANG Tao^{1,2}, WANG Kai³, LI Xue-feng^{1,2*}

(1. Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection, Beijing 100037, China; 2. National Engineering Research Center of Urban Environmental Pollution Control, Beijing 100037, China; 3. College of Resource Environment and Tourism, Capital Normal University, Beijing 100048, China)

Abstract: Size distribution and emission factors are the basic information used in emission characteristic studies and emission inventory establishment. The silt loadings of typical roads in the Tongzhou district of Beijing were sampled and tested. A particulate matter resuspension and measurement system and a particle size spectrometer were used to measure the size distribution and particle size multiplier of the fugitive road dust in this study. The localized $PM_{2.5}$ emission factors for the fugitive road dust were obtained by experiment and investigation. The results showed that the ratio of the particles with sizes from 0 μm to 2.5 μm was similar for different road types; the ratio of $PM_{2.5}$ to PM_{10} in the fugitive road dust was between 0.28 and 0.32. The particle size multiplier of $PM_{2.5}$ was between 0.18-0.20 $g \cdot (km \cdot vehicle)^{-1}$ for the different types of roads. The $PM_{2.5}$ emission factors for highways, national roads, provincial roads, county roads, and township roads were 0.06, 0.14, 0.31, 0.30, and 0.39 $g \cdot (km \cdot vehicle)^{-1}$, respectively. The silt loadings of different type roads showed great differences; thus, field sampling of the silt loading is necessary in the emission factor localization process.

Key words: fugitive road dust; size distribution; particle size multiplier; emission factor; dust load

污染源清单和颗粒物源解析结果显示道路扬尘细颗粒物的重要来源之一^[1,2], 并且道路积尘中 Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb、Zn 和 Fe 等重金属含量高于背景值^[3,4], 主要来源于发动机、刹车片、轮胎磨损和油漆磨损^[5], 道路尘中较高含量的 PAHs 对人体健康产生影响^[6,7], 道路扬尘排放对城市大气环境 PM_{10} 浓度贡献约为 36%^[8]。

排放因子建立是量化道路扬尘排放的基础, 研发了道路交通扬尘排放因子测量系统进行实测^[9], 或者通过模型计算不同类型道路的排放因子^[10~12]。影响道路扬尘排放的因素较多, 如铺装状况^[13]、交通特征^[14]、气象条件^[15]、周边土地利用^[16]和控制措施^[17]情况等。对北京^[18,19]、天津^[20,21]、珠三角^[22]等城市的道路扬尘排放因子进行修正并建立排放清单。AP-42 文件中道路扬尘排放因子在中国

应用较为广泛, 并对排放因子模型进行了评估^[18]。

排放因子和颗粒物粒径分布是分析污染源排放特征的重要信息, 也是建立精细化排放清单的基础。本研究通过现场采样、再悬浮采样、粒径分布测量和排放因子模型方法, 建立了北京城市副中心地区的道路扬尘排放因子, 以期建立本地化道路扬尘排放因子提供一种技术方法, 并为城市副中心区域道路扬尘排放清单建立提供实测的分粒径排放因子数据。

收稿日期: 2018-10-07; 修订日期: 2018-10-31

基金项目: 大气重污染成因与治理攻关项目(DQGG0201); 北京市环境保护科学研究院科技基金项目(2018B01)

作者简介: 樊守彬(1981~), 男, 博士, 副研究员, 主要研究方向为大气污染控制, E-mail: fanshoubin@163.com

* 通信作者, E-mail: lixuefeng@cee.cn

1 材料与方法

1.1 采样方法

样品采集及实验室分析方法按照美国环保署排放清单文件要求^[23]进行,在实验室对样品进行恒重和筛分分析,获得道路积尘样品,通过再悬浮样品进行粒径分布分析。

2016 年在北京通州区不同道路类型设置采样点,采样道路包括高速路 2 条、国道 1 条、省道 3 条、县道 2 条、乡道 5 条,共采集有效样品数量为 20 个。采样道路的基本情况见表 1。

1.2 粒径分析与粒度乘数测算方法

将采集到的道路积尘样品依据美国环保署(EPA)发布的 AP-42 文件附录中道路积尘处理方法进行实验室处理,颗粒物再悬浮系统对将处理好的道路积尘样品进行再悬浮后进行粒径分布测量,该系统颗粒物粒径分布可靠性经过验证^[24]。应用 Aerodynamic Particle Sizer (APS) 3321 粒径谱仪测试得到样品的粒径数据,对道路扬尘的数浓度和质量浓度粒径分布进行分析。APS-3321 通过测定每一颗粒物通过两束近距离激光束的飞行时间,换算颗粒物的空气动力学粒径,可以测量粒径范围为 0.5 ~ 20 μm。

表 1 采样道路基本情况
Table 1 Basic information of the sampled roads

序号	道路名称	道路类型	双向车道数	路边是否有裸土	是否有工地	是否有路缘石	是否有破损
1	京津高速	高速路	8	无	无	有	无
2	通燕高速	高速路	4	无	无	有	无
3	京塘路	国道	6	有	无	有	无
4	通马路	省道	4	有	无	有	无
5	通顺路	省道	6	有	无	无	无
6	新华南大街	省道	6	无	无	无	无
7	京榆旧线	县道	4	有	无	无	轻微
8	玉带河中路	乡道/其他	4	无	无	无	轻微
9	新华东路	乡道/其他	6	有	无	无	无
10	运河西大街	县道	6	有	有	无	无
11	永顺北路	乡道/其他	2	有	无	有	无
12	玉带河东街	乡道/其他	4	有	无	无	无
13	通惠北路	乡道/其他	6	无	无	有	无
14	北大街	乡道/其他	2	有	无	无	严重
15	西海子西路	乡道/其他	2	无	有	有	轻微
16	梨园路	乡道/其他	4	有	无	无	无
17	召里路	乡道/其他	4	有	无	无	无
18	西大街	乡道/其他	2	无	无	有	无
19	中仓路	乡道/其他	2	有	无	无	无
20	徐宋东四街	乡道/其他	2	有	无	无	无

通过测量道路扬尘颗粒物的粒径分布,计算道路扬尘中 PM_{2.5}与 PM₁₀ 比值 $l_{2.5}/l_{10}$,道路扬尘 PM_{2.5} 粒度乘数用式(1)计算。

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

式中, $K_{2.5}$ 为修正后的 PM_{2.5} 粒度乘数, $g \cdot (km \cdot 辆)^{-1}$; $l_{2.5}$ 和 l_{10} 分别为 PM_{2.5}和 PM₁₀ 颗粒物含量; K_{10} 为美国 AP-42 中给出的 PM₁₀的粒度乘数,推荐值为 $0.62 g \cdot (km \cdot 辆)^{-1}$ ^[25]。

1.3 排放因子计算方法

道路扬尘 PM_{2.5}排放因子按照 AP-42 文件计算方法^[25],粒度乘数、积尘负荷和车重数据根据实测结果进行修正,建立本地化的道路扬尘 PM_{2.5}排放因子,用公式(2)计算:

$$E = K_{2.5} \times (sL)^{0.91} \times W^{1.5} \times \left(1 - \frac{P}{4N}\right) \tag{2}$$

式中, E 为道路扬尘 PM_{2.5} 排放因子, $g \cdot (km \cdot 辆)^{-1}$; $K_{2.5}$ 为修正后的 PM_{2.5} 粒度乘数, $g \cdot (km \cdot 辆)^{-1}$; sL 为路面积尘负荷, $g \cdot m^{-2}$; W 为平均车重, t ; P 为一段时间内降雨量大于 0.254 mm 的天数; N 为清单周期的天数,如 1 a 按 365 d。

2 结果与讨论

2.1 道路扬尘粒径分布

应用空气动力学粒径谱仪对道路积尘进行粒径分布测试,不同类型道路的颗粒物质量浓度空气动力学粒径分布结果见图 1。从图 1(a)中可以看出,不同类型道路的颗粒物粒径分布在 0 ~ 2.5 μm 粒径范围内的质量比例均较小,且不同道路的比例较为一致; 2.5 ~ 10 μm 粒径范围内的颗粒物质量比

例变化幅度较为稳定,且该粒径范围颗粒物的质量比例的峰值出现在 $7.5 \sim 8 \mu\text{m}$ 粒径中,同时也是整个粒径范围内的峰值; $10 \sim 20 \mu\text{m}$ 粒径范围内的颗粒物质量比例变化幅度最大。

从图 1(b) 中可以看出,不同粒径颗粒物的累积质量比例变化趋势一致,省道、县道和乡道的粒径分布曲线几乎重合,高速路和国道在 $0 \sim 2.5 \mu\text{m}$ 粒径范围内与其他类型道路接近,在 $2.5 \sim 10 \mu\text{m}$ 粒径范围内的颗粒物质量比例小于其他道路。这主要与高速路和国道上车流量较大,积尘负荷较低,频繁碾压使得道路积尘粒径较小有关。

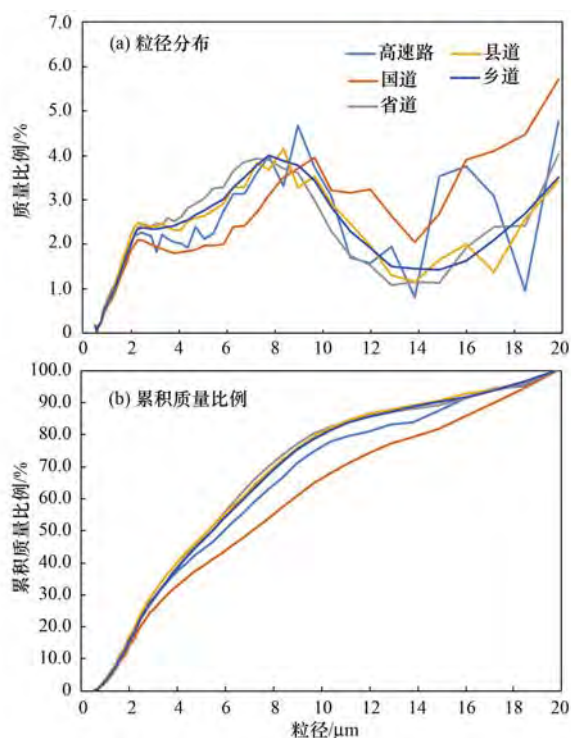


图 1 不同类型道路扬尘粒径分布谱图

Fig. 1 Particle size distribution spectrum of the fugitive road dust for the different road types

影响道路积尘负荷高低的因素较多,包括道路状况^[14]、车流量^[11]、周边尘土来源^[26,27]、控制措施^[17]等。有研究结果显示,车流量越大的道路积尘负荷越低^[11,14],本研究对道路积尘负荷小于 $0.5 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ 和大于 $0.5 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ 的道路扬尘粒径分布进行统计,结果如图 2 所示。从中可以看出,对于空气动力学粒径小于 $2.5 \mu\text{m}$ 部分的颗粒物的比例,不同积尘负荷的道路几乎没有差别,对于空气动力学粒径在 $2.5 \sim 10 \mu\text{m}$ 之间的颗粒物,积尘负荷较高的道路比例越大。

2.2 $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$ 比值分析

不同污染源排放 $\text{PM}_{2.5}$ 与 PM_{10} 的关系是建立排放清单的基础数据,本研究对不同类型道路的扬尘 $\text{PM}_{2.5}$ 与 PM_{10} 浓度比值 R 进行分析,同时对道路积

尘负荷小于 $0.5 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ 和大于 $0.5 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ 的道路扬尘 $\text{PM}_{2.5}$ 与 PM_{10} 比值进行统计,结果见图 3。从中可以看出,不同类型道路的比值 R 在 $0.28 \sim 0.32$ 之

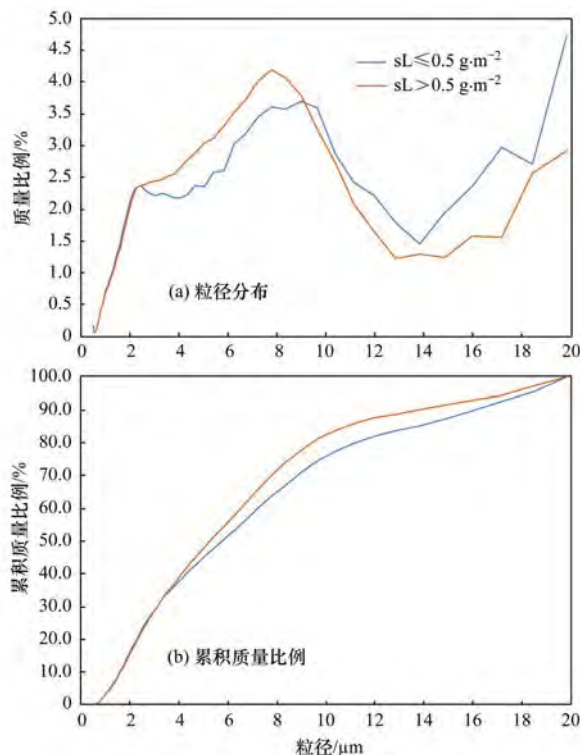


图 2 不同积尘负荷范围道路的扬尘粒径分布谱图
Fig. 2 Particle size distribution spectrum for different ranges of silt loading

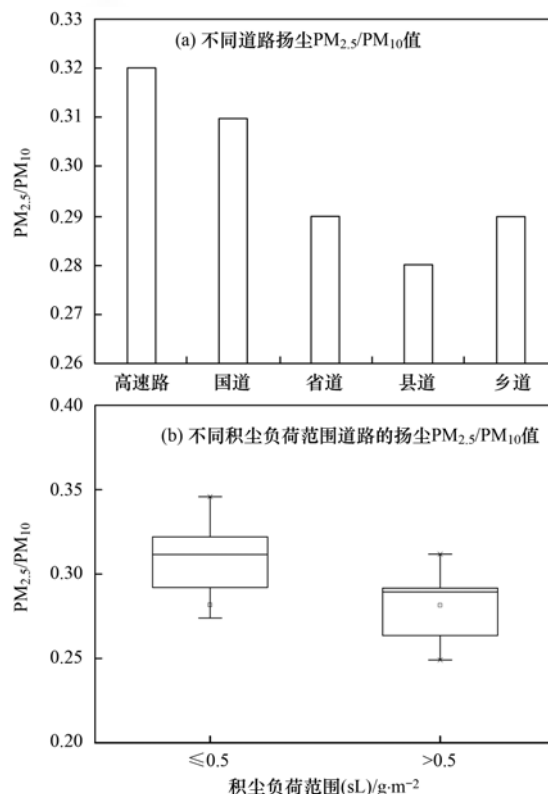


图 3 不同道路的扬尘 $\text{PM}_{2.5}$ 与 PM_{10} 比值

Fig. 3 Ratio of $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$ for the different types of roads

间, 高速路最高, 其次为国道, 之后依次为省道、乡道和县道, 主要是与高速路车流量大、积尘负荷较低, 积尘中细粒子比例较高有关。

对道路积尘负荷小于 $0.5 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ 和大于 $0.5 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ 的道路扬尘中 $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$ 比值进行统计, 可以看出积尘负荷小于 $0.5 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ 的道路扬尘 $\text{PM}_{2.5}$ 占 PM_{10} 的比例更高, 数值为 0.31, 积尘负荷大于 $0.5 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ 的道路扬尘中 $\text{PM}_{2.5}$ 占 PM_{10} 的比例为 0.28。

2.3 $\text{PM}_{2.5}$ 粒度乘数

粒度乘数是计算不同粒径范围颗粒物的排放因子的重要参数, 是排放因子本地化测试工作的主要内容, 对不同类型道路的扬尘 $\text{PM}_{2.5}$ 粒度乘数进行分析, 同时对不同范围积尘负荷道路的 $\text{PM}_{2.5}$ 粒度乘数进行统计, 结果见图 4。从中可以看出, $\text{PM}_{2.5}$ 粒度乘数在 $0.18 \sim 0.20 \text{ g}\cdot(\text{km}\cdot\text{辆})^{-1}$ 之间, 对道路积尘负荷小于 $0.5 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ 和大于 $0.5 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ 的道路扬尘 $\text{PM}_{2.5}$ 粒度乘数进行统计, 可以看出积尘负荷小于 $0.5 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ 的道路扬尘 $\text{PM}_{2.5}$ 粒度乘数更高, 数值为 $0.19 \text{ g}\cdot(\text{km}\cdot\text{辆})^{-1}$, 积尘负荷大于 $0.5 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ 的道路扬尘 $\text{PM}_{2.5}$ 粒度乘数为 $0.17 \text{ g}\cdot(\text{km}\cdot\text{辆})^{-1}$, 均高于 AP-42 文件的推荐值 $0.15 \text{ g}\cdot(\text{km}\cdot\text{辆})^{-1}$ 。

2.4 $\text{PM}_{2.5}$ 排放因子

测试道路的车流量、积尘负荷、 $\text{PM}_{2.5}$ 粒度乘数

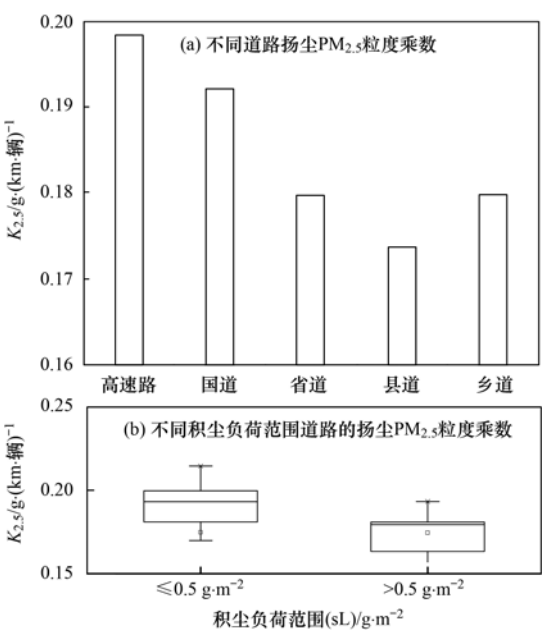


图 4 $\text{PM}_{2.5}$ 粒度乘数

Fig. 4 Particle size multiplier for the different types of roads

和排放因子见表 2。可以看出, 高速路、国道车流量较大, 积尘负荷较低, $\text{PM}_{2.5}$ 排放因子较小。

不同类型道路的 $\text{PM}_{2.5}$ 排放因子如图 5 所示, 高速路、国道、省道、县道和乡道的 $\text{PM}_{2.5}$ 排放因子分别为 0.06、0.14、0.31、0.30 和 $0.39 \text{ g}\cdot(\text{km}\cdot\text{辆})^{-1}$ 。乡道 $\text{PM}_{2.5}$ 排放因子最高, 其次为省道和县道, 国道排放因子较低, 高速路最低。

表 2 不同类型道路 $\text{PM}_{2.5}$ 排放因子及相关参数

Table 2 $\text{PM}_{2.5}$ emission factors and relevant parameters for the different types of roads

道路名称	车流量/辆·d ⁻¹	积尘负荷/g·m ⁻²	$\text{PM}_{2.5}$ 粒度乘数/g·(km·辆) ⁻¹	$\text{PM}_{2.5}$ 排放因子/g·(km·辆) ⁻¹
京津高速	51 362	0.08	0.20	0.05
通燕高速	27 429	0.11	0.20	0.06
京塘路	46 362	0.09	0.20	0.04
通马路	13 769	0.65	0.17	0.76
通顺路	22 992	0.70	0.18	0.36
新华南大街	36 612	0.20	0.18	0.07
京榆旧线	32 689	0.11	0.21	0.09
玉带河中路	14 723	0.16	0.20	0.06
新华东路	29 744	1.40	0.18	0.56
运河西大街	36 264	0.16	0.17	0.05
永顺北路	17 603	1.13	0.19	0.26
玉带河东街	16 563	0.21	0.19	0.08
通惠北路	4 908	0.76	0.18	0.17
北大街	5 623	2.81	0.19	0.81
西海子西路	3 578	3.28	0.16	0.76
梨园路	4 908	0.87	0.16	0.17
召里路	1 103	0.20	0.19	0.10
西大街	1 636	1.61	0.18	0.45
中仓路	1 838	0.11	0.21	0.05
徐宋东四街	1 063	1.37	0.15	0.46

PM_{2.5}排放因子的主要影响因素包括路面积尘负荷、车辆重量、粒度乘数等,同时路面积尘负荷与车流量呈负相关关系^[11],粒度乘数与积尘负荷呈负相关关系。本研究对 20 条采样道路的相关数据相关性进行了分析,结果见表 3。从中可以看出,PM_{2.5}排放因子与积尘负荷和车重呈正相关,与车流量呈负相关,主要因为积尘负荷与车流量呈负相关,同时粒度乘数与积尘负荷呈负相关关系。

在道路扬尘排放因子本地化测试工作中,需要按照不同道路类型或按照不同车流量的道路进行相关样品采样分析和测试,才能获得具有代表性的排放因子数据。

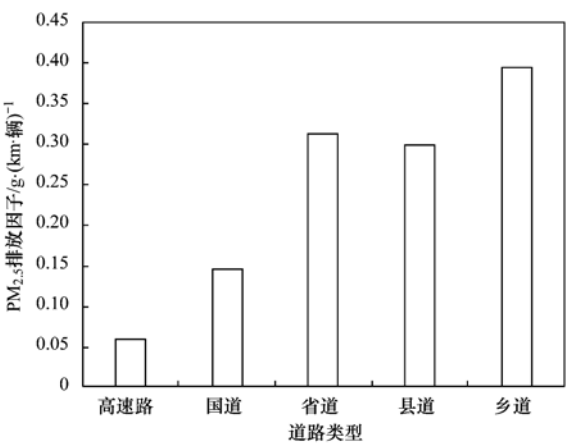


图5 不同类型道路的 PM_{2.5}排放因子

Fig. 5 PM_{2.5} emission factor for the different types of roads

表3 排放因子与相关参数 Pearson 相关性

Table 3 Pearson correlation between the PM_{2.5} emission factors and relevant parameters

	车流量	车重	积尘负荷	粒度乘数	排放因子
车流量	1	0.101	-0.462	0.280	-0.376
车重	-0.101	1	-0.135	-0.111	0.382
积尘负荷	-0.462	-0.135	1	-0.460	0.844
粒度乘数	0.280	-0.111	-0.460	1	-0.495
排放因子	-0.376	0.382	0.844	-0.495	1

3 结论

(1)通过积尘负荷采样和实验室再悬浮分析可以获得道路扬尘粒径分布和粒度乘数参数,不同类型道路的颗粒物粒径分布在 0~2.5 μm 粒径范围内的质量比例较为一致;2.5~10 μm 粒径范围内的颗粒物质量比例变化幅度较为稳定。且该粒径范围颗粒物的质量比例的峰值出现在 7.5~8 μm 粒径中,同时也是整个粒径范围内的峰值。

(2)省道、县道和乡道的粒径分布曲线一致,高速路和国道在 0~2.5 μm 粒径范围内与其它道路接近,在 2.5~10 μm 粒径范围内的颗粒物质量比例小于其他道路,在 >10 μm 粒径范围内的颗粒物质量比例大于其他道路。

(3)不同类型道路的 PM_{2.5}与 PM₁₀ 比值 *R* 差别不大,在 0.28~0.32 之间,高速路最高,其次为国道,之后依次为省道、乡道和县道,主要是与高速路车流量大、积尘负荷较低,积尘中细粒子比例较高有关。

(4)不同类型道路的 PM_{2.5}粒度乘数在 0.18~0.20 g·(km·辆)⁻¹之间,积尘负荷小于 0.5 g·m⁻¹的道路扬尘 PM_{2.5}粒度乘数更高,数值为 0.19 g·(km·辆)⁻¹,积尘负荷大于 0.5 g·m⁻²的道路扬尘 PM_{2.5}粒度乘数为 0.17 g·(km·辆)⁻¹。

(5)PM_{2.5}排放因子与积尘负荷和车重呈正相

关,与车流量呈负相关,主要因为积尘负荷与车流量呈负相关,同时粒度乘数与积尘负荷呈负相关关系。在道路扬尘排放因子本地化测试工作中,需要按照不同道路类型或按照不同车流量的道路进行相关样品采样分析和测试,才能获得具有代表性的排放因子数据。

参考文献:

[1] PriyaDarshini S, Sharma M, Singh D. Synergy of receptor and dispersion modelling: quantification of PM₁₀ emissions from road and soil dust not included in the inventory [J]. Atmospheric Pollution Research, 2016, 7(3): 403-411.

[2] Fan S B, Tian G, Cheng S Y, et al. A new approach to developing a fugitive road dust emission inventory and emission trend from 2006 to 2010 in the Beijing metropolitan area, China [J]. Journal of Environmental Quality, 2013, 42(4): 1039-1045.

[3] Men C, Liu R M, Xu F, et al. Pollution characteristics, risk assessment, and source apportionment of heavy metals in road dust in Beijing, China [J]. Science of the Total Environment, 2018, 612: 138-147.

[4] Pan H Y, Lu X W, Lei K. A comprehensive analysis of heavy metals in urban road dust of Xi'an, China: contamination, source apportionment and spatial distribution [J]. Science of the Total Environment, 2017, 609: 1361-1369.

[5] Zannoni D, Valotto G, Visin F, et al. Sources and distribution of tracer elements in road dust: the Venice mainland case of study [J]. Journal of Geochemical Exploration, 2016, 166: 64-72.

[6] Franco C F J, de Resende M F, de Almeida Furtado L, et al. Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in street dust of Rio de Janeiro and Niterói, Brazil: particle size distribution, sources and cancer risk assessment [J]. Science of the Total Environment,

- 2017, **599-600**: 305-313.
- [7] Ma Y K, Liu A, Egodawatta P, *et al.* Quantitative assessment of human health risk posed by polycyclic aromatic hydrocarbons in urban road dust[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, **575**: 895-904.
- [8] Chen D S, Cheng S Y, Zhou Y, *et al.* Impact of road fugitive dust on air quality in Beijing, China [J]. *Environmental Engineering Science*, 2010, **27**(10): 825-834.
- [9] 樊守彬, 李雪峰, 张东旭, 等. 道路交通扬尘排放因子测量系统研发及应用[J]. *环境科学学报*, 2016, **36**(10): 3569-3575.
- Fan S B, Li X F, Zhang D X, *et al.* Development and application of an emission factor measurement system for road fugitive dust [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2016, **36**(10): 3569-3575.
- [10] Zhu D Z, Kuhns H D, Gillies J A, *et al.* Evaluating vehicle re-entrained road dust and its potential to deposit to Lake Tahoe: a bottom-up inventory approach [J]. *Science of the Total Environment*, 2014, **466-467**: 277-286.
- [11] 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.
- [12] Thouron L, Seigneur C, Kim Y, *et al.* Intercomparison of three modeling approaches for traffic-related road dust resuspension using two experimental data sets [J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2018, **58**: 108-121.
- [13] Padoan E, Ajmone-Marsan F, Querol X, *et al.* An empirical model to predict road dust emissions based on pavement and traffic characteristics[J]. *Environmental Pollution*, 2018, **237**: 713-720.
- [14] Amato F, Pandolfi M, Alastuey A, *et al.* Impact of traffic intensity and pavement aggregate size on road dust particles loading[J]. *Atmospheric Environment*, 2013, **77**: 711-717.
- [15] Amato F, Schaap M, Denier van der Gon H A C, *et al.* Effect of rain events on the mobility of road dust load in two Dutch and Spanish roads[J]. *Atmospheric Environment*, 2012, **62**: 352-358.
- [16] Teng H L, Kwigizile V, James D E. Identifying influencing factors on paved roads silt loading [J]. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 2007, **57**(7): 778-784.
- [17] 张东旭, 樊守彬, 林雅妮, 等. APEC 会议期间北京市交通扬尘控制效果研究[J]. *环境科学学报*, 2016, **36**(2): 684-689.
- Zhang D X, Fan S B, Lin Y N, *et al.* Evaluation of the effectiveness of road fugitive dust control measures during the APEC conference in Beijing[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2016, **36**(2): 684-689.
- [18] 樊守彬, 张东旭, 田灵娣. AP-42 道路交通扬尘排放模型评估及其在北京市的应用[J]. *环境工程学报*, 2016, **10**(5): 2501-2506.
- Fan S B, Zhang D X, Tian L D. Assessment for AP-42 model of road dust emissions and its application in Beijing, China [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2016, **10**(5): 2501-2506.
- [19] 樊守彬, 田刚, 秦建平, 等. 北京道路降尘排放特征研究[J]. *环境工程学报*, 2010, **4**(3): 629-632.
- Fan S B, Tian G, Qin J P, *et al.* Emission characteristics of road dust-fall in Beijing [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2010, **4**(3): 629-632.
- [20] 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.
- [21] 许妍, 周启星. 天津城市交通道路扬尘排放特征及空间分布研究[J]. *中国环境科学*, 2012, **32**(12): 2168-2173.
- Xu Y, Zhou Q X. Emission characteristics and spatial distribution of road fugitive dust in Tianjin, China [J]. *China Environmental Science*, 2012, **32**(12): 2168-2173.
- [22] 彭康, 杨杨, 郑君瑜, 等. 珠江三角洲地区铺装道路扬尘排放因子与排放清单研究[J]. *环境科学学报*, 2013, **33**(10): 2657-2663.
- Peng K, Yang Y, Zheng J Y, *et al.* Emission factor and inventory of paved road fugitive dust sources in the Pearl River Delta region[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2013, **33**(10): 2657-2663.
- [23] EPA. Compilation of air pollutant emission factors, stationary point and area sources. Appendix C.1. procedures for sampling surface/bulk dust loading[R]. Triangle Park, NC: Measurement Policy Group Office of Air Quality Planning and Standards, 1993.
- [24] 黄玉虎, 金大建, 毛华云, 等. 颗粒物再悬浮和检测系统的性能指标[J]. *过程工程学报*, 2009, **9**(5): 860-864.
- Huang Y H, Jin D J, Mao H Y, *et al.* Performance indices of particulate matter resuspension and measurement systems [J]. *The Chinese Journal of Process Engineering*, 2009, **9**(5): 860-864.
- [25] USEPA. Emission factor documentation for AP- 42, Section 13.2.1 paved roads[R]. Triangle Park, NC: Monitoring Policy Group, Office of Air Quality Planning and Standards, U. S. Environmental Protection Agency, 2010.
- [26] 田刚, 樊守彬, 李钢, 等. 施工工地出口附近道路交通扬尘排放特征研究[J]. *环境科学*, 2007, **28**(11): 2626-2629.
- Tian G, Fan S B, Li G, *et al.* Characteristics of fugitive dust emission from paved road near construction activities [J]. *Chinese Journal of Environmental Science*, 2007, **28**(11): 2626-2629.
- [27] 樊守彬, 张东旭, 田灵娣, 等. 北京市交通扬尘 PM_{2.5} 排放清单及空间分布特征[J]. *环境科学研究*, 2016, **29**(1): 20-28.
- Fan S B, Zhang D X, Tian L D, *et al.* Emission inventory and spatial distribution of road fugitive dust PM_{2.5} in Beijing [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2016, **29**(1): 20-28.

CONTENTS

Source Apportionment and Mixing State of Single Particles in the Nanjing Jiangbei New Area	YU Xing-na, SHI Zheng, MA Jia, <i>et al.</i> (1521)
Characteristics of Carbonaceous Aerosol Pollution in PM _{2.5} in Xi'an	MU Zhen, CHEN Qing-cai, WANG Yu-qin, <i>et al.</i> (1529)
Chemical Composition Characteristics and Source Apportionment of PM _{2.5} During Winter in Taiyuan	LIU Su, MA Tong, YANG Yan, <i>et al.</i> (1537)
Seasonal Variation and Source Analysis of Water-soluble Inorganic Ions in Fine Particulate Matter in Zhengzhou	YAN Guang-xuan, ZHANG Jing-wen, LEI Hao-jie, <i>et al.</i> (1545)
Elemental Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Atmospheric PM _{2.5} in a Suburb of Zhuhai City	YANG Yi-hong, JIA Yan, BIAN Guo-jian, <i>et al.</i> (1553)
Impact of a Dust Event on the Size Distribution of Metal Elements in Atmospheric Aerosols at a Coastal Region and over the Ocean	JIN Tong-jun, QI Jian-hua, XI Zi-yan, <i>et al.</i> (1562)
CALPUFF Modeling of the Influence of Typical Industrial Emissions on PM _{2.5} in an Urban Area Considering the SOA Transformation Mechanism	GAO Shuang, BO Xin, MA Yan, <i>et al.</i> (1575)
Variation in Pollutant Concentrations and Correlation Analysis with the Vegetation Index in Beijing-Tianjin-Hebei	SUN Shuang, LI Ling-jun, ZHAO Wen-ji, <i>et al.</i> (1585)
Estimation of Coal Consumption and the Emission of Related Contaminants in the Plain Area Around Beijing During 2015-2017	ZHAO Wen-hui, LI Ling-jun, LU Hai-feng, <i>et al.</i> (1594)
Column-integrated Aerosol Optical Properties Determined Using Ground-based Sun Photometry Measurements in the Hangzhou Region	QI Bing, CHE Hui-zheng, XU Ting-ting, <i>et al.</i> (1604)
Speciated VOCs Emission Inventory and Ozone Formation Potential in Sichuan Province	ZHOU Zi-hang, DENG Ye, TAN Qin-wen, <i>et al.</i> (1613)
Characterization of Volatile Organic Compounds from Cooking Emissions	GAO Ya-qin, WANG Hong-li, XU Rui-zhe, <i>et al.</i> (1627)
Analysis of Peroxyacetyl Nitrate and Ozone During a Typical Photochemical Pollution Process at the Panyu Atmospheric Composition Station	ZOU Yu, DENG Xue-jiao, LI Fei, <i>et al.</i> (1634)
Characteristics and Interannual Variation of Chemical Components in Typical Road Dust in Beijing	HU Yue-qi, LI Meng, YAN Xu, <i>et al.</i> (1645)
Sources Analysis and Health Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the PM _{2.5} Fraction of Fugitive Dust in Nanchang City	YU Rui-lian, ZHENG Quan, LIU Xian-rong, <i>et al.</i> (1656)
Methods and Application of Road Fugitive Dust Emission Factor Localization	FAN Shou-bin, YANG Tao, WANG Kai, <i>et al.</i> (1664)
Characterization of Tailpipe Emissions from in-use Excavators	MA Shuai, ZHANG Kai-shan, WANG Fan, <i>et al.</i> (1670)
Microbial Properties of Different Size Aerosols at Human Average Respiratory Height During Fog-haze Days	YANG Tang, HAN Yun-ping, LI Lin, <i>et al.</i> (1680)
Modification and Performance Tests of Visibility Parameterizations for Haze Days	ZHAO Xiu-juan, LI Zi-ming, XU Jing (1688)
Application of Support Vector Machine Regression in Ozone Forecasting	SU Xiao-qian, AN Jun-lin, ZHANG Yu-xin, <i>et al.</i> (1697)
Analysis of PHEV CO ₂ Emission Based on China's Grid Structure and Travelling Patterns in Mega Cities	HAO Xu, WANG He-wu, LI Wei-feng, <i>et al.</i> (1705)
Sources of Nitrate in Groundwater and Its Environmental Effects in Karst Trough Valleys: A Case Study of an Underground River System in the Longfeng Trough Valley, Chongqing	DUAN Shi-hui, JIANG Yong-jun, ZHANG Yuan-zhu, <i>et al.</i> (1715)
Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Phthalate Esters (PAEs) in the Surface Water of Jiaozhou Bay	LIU Cheng, SUN Cui-zhu, ZHANG Ge, <i>et al.</i> (1726)
Distribution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Organochlorine Pesticides in Sediments of Zhanjiang Bay	PENG Shi-yun, PENG Ping-an, KONG De-ming, <i>et al.</i> (1734)
Analysis of the Optical Properties and Factors Influencing DOM in an Ecological Purification System: A Case Study of Yanlong Lake in Spring	MA Rui, LI Xuan, WANG Lian, <i>et al.</i> (1742)
Analysis of the Relationship Between Dissolved Organic Matter (DOM) and Watershed Land-use Based on Three-dimensional Fluorescence-Parallel Factor (EEM-PARAFAC) Analysis	LI Yun, WEI Hong-jie, WANG Kan, <i>et al.</i> (1751)
Analysis of the Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Emissions from Agricultural Non-point Sources on Hanfeng Lake Basin	XIE Jing-chao, ZHAO Xiu-lan, HE Bing-hui, <i>et al.</i> (1760)
Simulation of the Migration and Leaching of Nitrate Nitrogen in the Farmland Soil Profile in a Hilly Area of Taihang Mountain with the RZWQM Model	ZHENG Wen-bo, WANG Shi-qin, LIU Bing-xia, <i>et al.</i> (1770)
Spatial Distribution Characteristics of Nutrients and Chlorophyll A in the Lancang River Basin Under Cascade Reservoirs	CHENG Bao, WANG Xue, MA Jin-chuan, <i>et al.</i> (1779)
Nutrient Distribution of Overlying Water in Tidal Marshes in Five Estuaries and Bays of the Fuzhou Region in Autumn	HE Lu-lu, YANG Ping, TAN Li-shan, <i>et al.</i> (1788)
Distribution and Environmental Risk of Pharmaceutically Active Compounds in the Traditionally Aqueous Phase of Effluent-receiving Rivers	WANG Shuo, LIU Jian-chao, ZHENG Chao-ya, <i>et al.</i> (1797)
Effects of a Green Roof on Stormwater Regulation and Cost-benefit Analysis	LI Jun-sheng, YIN Hai-wei, KONG Fan-hua, <i>et al.</i> (1803)
Ultrasonically Activated Persulfate Degrades Typical Odors in Water	SUN Xin, SUN Jie, LI Peng-fei, <i>et al.</i> (1811)
Metal Organic Framework MIL-53(Fe) as a Photocatalyst for Visible-light Catalytic Reduction of U(VI) in Aqueous Solution	YAN Zeng-yuan, XI Hai-ling, YUAN Li-yong (1819)
Effects and Differences of the Release of Dissolved Organic and Inorganic Phosphorus in Different Sediments Covered by Different Materials of Erhai Lake	GONG Jia-jian, NI Zhao-kui, XIAO Shang-bin, <i>et al.</i> (1826)
Phosphate Removal Using Rice Husk Biochars Modified with Lanthanum Hydroxide	XU Run, SHI Cheng-hao, TANG Qian, <i>et al.</i> (1834)
Characteristics and Heavy Metal Adsorption Performance of Sewage Sludge-derived Biochar from Co-pyrolysis with Transition Metals	CHEN Tan, ZHOU Ze-yu, MENG Rui-hong, <i>et al.</i> (1842)
Adsorption, Reclaim, and Regeneration of Cd by Magnetic Calcium Dihydrogen Phosphate Nanoparticles	LI Yu-jiao, YANG Zhi-min, CHEN Yu-cheng, <i>et al.</i> (1849)
Effect of Hematite on the Inhibition of Hydrogen Sulfide Formation and Its Mechanism During Anaerobic Digestion and Methanogenesis of Sulfate Wastewater	HUANG Shao-fu, YE Jie, ZHOU Shun-gui (1857)
Pollutant Removal Performance and Membrane Fouling Characteristics in Marine Aquaculture Wastewater Treatment by a Microalgae Membrane Reactor	MA Hang, LI Zhi-peng, LIU Feng, <i>et al.</i> (1865)
Pre-precipitation of Sewage-SNAD Granular Sludge Process Test	LI Dong, CUI Ya-qian, ZHAO Shi-xun, <i>et al.</i> (1871)
Impact of Actual Domestic Sewage and Simulated Wastewater on an Aerobic Granular Sludge System	LI Dong, WANG Ying-qiao, LI Shuai, <i>et al.</i> (1878)
Nitrogen Removal Performance of a Sulfur/Pyrite Autotrophic Denitrification System	ZHOU Ya, MAI Wen-ning, LIANG Jia-wei, <i>et al.</i> (1885)
Nitrogen Removal by Heterotrophic Nitrifying Bacterium <i>Pseudomonas putida</i> YH and Its Kinetic Characteristics	WANG Xu-hui, YANG Lei, REN Yong-xiang, <i>et al.</i> (1892)
Effect of Sludge Retention Time and pH on the Denitrifying Phosphorus Removal Process	WEI Jia-min, HUANG Hui-min, CHENG Cheng, <i>et al.</i> (1900)
Microbial Community of Granular Sludge in an ANAMMOX-EGSB Reactor Under Saline Conditions	WANG Han, LI Han-xiang, CHEN You-peng, <i>et al.</i> (1906)
Effect of Intracellular Carbon Source (PHA) Storage on the Mixed Growth Microbial Community Resistance to Low Temperature	YANG Jian-peng, ZHANG Jian, TIAN Qing, <i>et al.</i> (1914)
Contents and Forms of Phosphorus in the Municipal Sewage Sludge of China	WANG Chao, LIU Qing-wei, ZHI Yin, <i>et al.</i> (1922)
Contamination Characteristics and Safety Risk Assessment of Perfluorinated Alkylated Substances in Aquatic Products from Guangzhou	WANG Xu-feng, WANG Qiang, LI Zhi-guang, <i>et al.</i> (1931)
Characteristics of the Dissolved Nitrous Oxide (N ₂ O) Concentrations and Influencing Factors in a Representative Agricultural Headwater Stream in the Upper Reach of the Yangtze River	TIAN Lin-lin, WANG Zheng, HU Lei, <i>et al.</i> (1939)
CH ₄ Uptake in Different Saline-alkaline Soils in Hetao Irrigation District, Inner Mongolia	YANG Wen-zhu, JIAO Yan, YANG Ming-de, <i>et al.</i> (1950)
Allocation and Stabilization Responses of Rice Photosynthetic Carbon in the Plant-Soil System to Phosphorus Application	WANG Ying-ying, XIAO Mou-liang, ZHANG Yun, <i>et al.</i> (1957)
Effect of Soil Moisture and Temperature on the Soil Inorganic Carbon Release of Brown Limestone Soil in the Karst Region of Southwestern China	XU Xue-chi, HUANG Yuan, HE Xun-yang, <i>et al.</i> (1965)
Temporal and Spatial Dynamics of Soil Microbial Biomass Carbon and Its Influencing Factors on an Eroded Slope in the Hilly Loess Plateau Region	QIN Qian, ZHU Shi-shuo, XIA Bin, <i>et al.</i> (1973)
Composition, Characteristics, and Accumulation of Antibiotics in the Soil in Agricultural Land	KONG Chen-chen, ZHANG Shi-wen, NIE Chao-jia, <i>et al.</i> (1981)
VOCs and Odors Control and Development in Pharmaceutical Fermentation Industry	WANG Dong-sheng, ZHU Xin-meng, YANG Xiao-fang, <i>et al.</i> (1990)