

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

中国主要城市土壤重金属累积特征与风险评价

彭驰, 何亚磊, 郭朝晖, 肖细元, 张严



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年1月

第43卷 第1期
Vol.43 No.1

目次

中国主要城市土壤重金属累积特征与风险评价 彭驰, 何亚磊, 郭朝晖, 肖细元, 张严 (1)

植物生长调节剂在土壤中的环境行为综述 陈亮, 侯杰, 胡晓蕾, 张纪兆, 王浩达 (11)

基于铁泥的磁性水处理材料制备及应用进展 曾辉平, 翟龙雪, 李冬, 张杰 (26)

不同臭氧度量指标对我国人群总死亡影响的 Meta 分析 阮芳芳, 刘纪新, 陈芷薇, 曾贤刚 (37)

北京市海坨山冬季不同污染过程下气溶胶化学组分及其潜在来源分析 赵德龙, 王飞, 刘丹彤, 田平, 盛久江, 周崑, 肖伟, 杜远谋, 卢俐, 黄梦宇, 何晖, 丁德平 (46)

武汉冬季大气 PM_{2.5} 小时分辨率源贡献识别及潜在影响域分析 蒋书凝, 孔少飞, 郑煌, 曾昕, 陈楠, 祁士华 (61)

运城市 PM_{2.5} 时空分布特征和潜在源区季节分析 王姝涛, 张强, 温肖宇, 冀乃超, 赵文婷, 罗淑贞, 陈志, 翟程凯 (74)

中国东部冷锋推进中的 PM_{2.5} 三维结构变化特征 牟南南, 朱彬, 卢文 (85)

粤港澳大湾区大气中硝基多环芳烃污染特征与风险评估 李彦希, 谢丹平, 黎玉清, 金梦, 丁紫荣, 闫雅楠, 赵波 (93)

西南地区大型综合工业区和周边区域大气 VOCs 污染特征及健康风险评估 李陵, 张丹, 胡伟, 徐芹, 吴虹, 袁睿, 蒲茜, 郝宇杭, 唐志欣, 赖明敏 (102)

拉萨市挥发性有机物的组成特征、季节变化和来源解析 余家燕, 韩燕, 陈木兰, 张惠芳, 陈阳, 刘建国 (113)

杭州 COVID-19 期间大气 VOCs 体积分数变化特征 林旭, 严仁嫦, 金嘉佳, 许凯儿, 何曦, 叶辉, 何纪平 (123)

上海城郊夏季大气 VOCs 在臭氧生成中的作用 金丹 (132)

铜川市秋冬季大气 VOCs 特征及其 O₃ 和 SOA 形成潜势分析 易宵霄, 李姜豪, 李光华, 路珍珍, 孙智钢, 高健, 邓顺熙 (140)

电子垃圾拆解回收 VOCs 排放特征与排放因子 谢丹平, 黄忠辉, 刘旺, 聂鹏, 黄钟坤, 贺辉, 陈晓燕 (150)

不同传输通道下珠江三角洲臭氧与前体物非线性响应关系 伍永康, 陈伟华, 颜丰华, 毛敬英, 袁斌, 王伟文, 王雪梅 (160)

淄博市城郊臭氧污染特征及影响因素分析 王雨燕, 杨文, 王秀艳, 王帅, 白瑾丰, 程颖 (170)

昭通市周边扬尘重金属污染特征及健康风险 庞晓晨, 韩新宇, 史建武, 包宇斋, 宁平, 张朝能, 向峰 (180)

城市路面积尘微塑料污染特征 方芹, 牛司平, 陈予东, 于江华 (189)

塔里木河流域东部降水稳定同位素特征与水汽来源 宋洋, 王圣杰, 张明军, 石玉东 (199)

赤水河流域水体抗生素污染特征及风险评估 吴天宇, 李江, 杨爱江, 李彦澄, 陈瑀, 何强, 马凯, 胡霞, 王斌, 艾佳, 钟雄 (210)

无定河流域地表水地下水的水化学特征及控制因素 李书鉴, 韩晓, 王文辉, 李志 (220)

白洋淀府河影响区沉积物营养盐和重金属污染特征及风险评估 陈兴宏, 李立青, 张美一, 张伟军, 王东升, 王洪杰 (230)

九龙江口红树林湿地表层沉积物中微塑料赋存特征与重金属的关系 刘倡君, 罗专溪, 闫钰, 林惠荣, 胡恭任, 于瑞莲 (239)

北京市北运河水系底栖动物群落与水环境驱动因子的关系及水生态健康评价 胡小红, 左德鹏, 刘波, 黄振芳, 徐宗学 (247)

城市河道再生水特征水质因子空间变异机制分析 刘全忠, 彭柯, 苏振华, 邸琰茗, 郭道宇 (256)

苏州景观河道表层沉积物间隙水-上覆水中 DOM 特性分析 李超男, 何杰, 朱学惠, 李学艳 (267)

苏州城区雨水管道沉积物典型污染物分布特征 叶蓉, 盛铭军, 姜永波, 武宇圣, 黄天寅 (277)

信号分子强化改性挂膜沸石持续抑制沉积物中氨氮释放 徐金兰, 许洋, 李修民, 国森, 刘成海 (285)

三峡水库调度对支流水体叶绿素 a 和环境因子垂向分布的影响 田盼, 李亚莉, 李莹杰, 李虹, 王丽婧, 宋林旭, 纪道斌, 赵星星 (295)

李家河水库春季分层期 nirS 型反硝化菌群特征分析 梁伟光, 黄廷林, 张海涵, 杨尚业, 刘凯文, 李程遥, 温成成, 李伟涛, 蔡晓春 (306)

岗南水库沉积物好氧反硝化菌群落时空分布特征 张紫薇, 陈召莹, 张甜娜, 周石磊, 崔建升, 罗晓 (314)

宁夏地区地下水金属元素分布特征及健康风险评估 王晓东, 田伟, 张雪艳 (329)

快速城镇化三角洲地区高碘地下水赋存特征及驱动因素;以珠江三角洲为例 吕晓立, 刘景涛, 韩占涛, 周冰, 李备 (339)

长三角一体化示范区青浦区水环境中 22 种 PPCPs 的多介质分布特征及风险评估 张智博, 段艳平, 沈嘉豪, 俞文韬, 罗鹏程, 涂耀仁, 高峻 (349)

洞庭湖及入湖河流中 209 种多氯联苯同类物分布特征与风险评估 黄智峰, 郑丙辉, 尹大强, 崔婷婷, 赵兴茹 (363)

基于流量和溶存浓度的河流水系氧化亚氮释放量估算 李冰清, 胡敏鹏, 王铭烽, 张育福, 吴昊, 周佳, 吴锴彬, 戴之舟, 陈丁江 (369)

三峡库区万州段河流水-气界面 CO₂ 通量支干流对比及影响机制初探 秦宇, 欧阳常悦, 王雨潇, 方鹏 (377)

功能化凹凸棒吸附材料的制备及其对重金属废水中 Pb²⁺ 的吸附行为 廖晓峰, 钟静萍, 陈云嫩, 邱延省, 任嗣利 (387)

铁氮共掺杂生物炭对二级水溶解性有机物的吸附特性与长效性评价 吴晨曦, 许路, 金鑫, 石烜, 金鹏康 (398)

沸石悬浮填料生物移动床的亚硝化特性 邓翠兰, 郭露, 汪晓军, 陈振国 (409)

温度对 ANAMMOX 生物膜工艺的脱氮影响与菌群结构分析 吴珊, 王淑雅, 王芬, 季民 (416)

填料对 ANAMMOX 污泥活性恢复的影响及菌群特征 罗景文, 杨津津, 李绍康, 赵昕宇, 杨一飞, 韩嘉琛, 李翔 (424)

基于 PMF 模型的宁南山区小流域土壤重金属空间分布及来源解析 夏子书, 白一茹, 王幼奇, 高小龙, 阮晓晗, 钟艳霞 (432)

浙中典型硫铁矿田土壤重金属含量特征及健康风险 成晓梦, 孙彬彬, 吴超, 贺灵, 曾道明, 赵辰 (442)

农产品视角的城郊黑土地田土壤重金属风险分区 吴松泽, 王冬艳, 李文博, 王兴佳, 闫卓冉 (454)

基于 DGT 技术的广西碳酸盐岩区稻米镉含量主控因素 宋波, 肖乃川, 马丽钧, 李龙, 陈同斌 (463)

调理剂耦合水分管理对双季稻镉和铅累积的阻控效应 李林峰, 王艳红, 李义纯, 唐明灯, 李奇, 艾绍英 (472)

设施叶菜类蔬菜重金属镉、铅和砷累积特征及健康风险评估 董俊文, 高培培, 孙洪欣, 周昶, 张香玉, 薛培英, 刘文菊 (481)

电子垃圾拆解固废渣-土壤-蔬菜中多氯联苯污染特征与健康风险评估 张亚萍, 吕占禄, 王先良, 张晗, 郭凌川, 丁秀丽, 张金良 (490)

雷州半岛南部典型农用地土壤-作物的有机氯农药残留特征和健康风险评估 梁晓晖, 解启来, 郑芊, 杨北辰, 叶金明, 唐成金 (500)

重金属含量对城市土壤真菌群落结构的影响 郭大陆, 张建, 申思, 余子洁, 杨军顺, 罗红燕 (510)

长期施肥对黄土高原梯田土壤养分特征和微生物资源限制的影响 吴春晓, 高小峰, 闫本帅, 梁彩群, 陈佳瑞, 王国梁, 刘国彬 (521)

土地利用变化后不同种植年限香榧土壤微生物群落的组成及多样性 姜霓雯, 梁辰飞, 张勇, 蒋仲龙, 董佳琦, 吴家森, 傅伟军 (530)

化肥和有机肥配施生物炭对土壤磷酸酶活性和微生物群落的影响 杨文娜, 余添, 罗东海, 熊子怡, 王莹燕, 徐曼, 王子芳, 高明 (540)

秦岭中段撂荒地植被恢复过程中土壤微生物代谢特征 薛悦, 康海斌, 杨航, 冰德叶, 晁志, 张凯, 王得祥 (550)

全生物降解地膜原料颗粒对土壤性质、小麦生长和养分吸收转运的影响 闫文豪, 王春丽, 王莉玮, 易廷辉, 卞京军, 支梅, 孙琪惠, 宿锦锦, 赵秀兰 (560)

秸秆还田对冬小麦-夏玉米农田土壤固碳、氧化亚氮排放和全球增温潜势的影响 万小楠, 赵珂悦, 吴雄伟, 白鹤, 杨学云, 顾江新 (569)

苏州城区雨水管道沉积物典型污染物分布特征

叶蓉¹, 盛铭军², 姜永波¹, 武宇圣¹, 黄天寅^{1*}

(1. 苏州科技大学环境科学与工程学院, 苏州 215009; 2. 苏州市排水管理处, 苏州 215000)

摘要: 分别采集了苏州城区商业区、历史文化保护区、文教区和生活区等典型样点的雨水管道沉积物, 分析沉积物粒径分布和各分级粒度下碳、氮和磷含量及污染负荷的分布特征. 结果表明, 各样点沉积物颗粒的中值粒径(D_{50})为 16.55 ~ 327.50 μm , 从大到小为: 商业区 > 生活区 > 历史文化保护区 > 文教区, D_{50} 与沉积物中总有机碳(TOC)、总氮(TN)、总磷(TP)和氨氮($\text{NH}_4^+\text{-N}$)呈显著正相关. 各样点雨水管道沉积物中 $\omega(\text{TOC})$ 、 $\omega(\text{TN})$ 、 $\omega(\text{TP})$ 和 $\omega(\text{NH}_4^+\text{-N})$ 空间差异性为: 商业区 > 历史文化保护区 > 生活区 > 文教区, 其中 $\omega(\text{TOC})$ 为 0.84% ~ 6.76%, $\omega(\text{TN})$ 、 $\omega(\text{TP})$ 和 $\omega(\text{NH}_4^+\text{-N})$ 分别为: 917.5 ~ 12 707.1、196.1 ~ 2 524.8 和 9.3 ~ 156.8 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, TOC、TP 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 污染负荷主要来源为 $\leq 75 \mu\text{m}$ 和 250 ~ 1 000 μm 颗粒物. TP 和 TN 在管道内呈现一定的富集特性.

关键词: 雨水管道; 沉积物; 粒径分布; 总氮(TN); 总有机碳(TOC); 氨氮($\text{NH}_4^+\text{-N}$)

中图分类号: X52 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)01-0277-08 DOI: 10.13227/j. hjkx. 202104160

Distribution of Typical Pollutants from Rainwater Sewer Sediments in Suzhou City

YE Rong¹, SHENG Ming-jun², JIANG Yong-bo¹, WU Yu-sheng¹, HUANG Tian-yin^{1*}

(1. School of Environmental Science and Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215009, China; 2. Suzhou Drainage Management Office, Suzhou 215000, China)

Abstract: In this study, we separately collected rainwater sewer sediments from typical samples in Suzhou city, such as the urban commercial district, historical and cultural protection area, cultural and educational area, and living area, and analyzed the particle size distribution of the sediments and the characteristics of carbon, nitrogen, phosphorus content, and pollution load distribution under each graded particle size. The median particle size D_{50} of each sample point was 16.55-327.50 μm , and the particle size trend was as follows: commercial area > living area > historical and cultural protection area > cultural and educational area. D_{50} was related to the total organic carbon (TOC). The total nitrogen (TN), total phosphorus (TP), and ammonia nitrogen ($\text{NH}_4^+\text{-N}$) were significantly positively correlated, as were the pollutants. The spatial difference of $\omega(\text{TOC})$, $\omega(\text{TN})$, $\omega(\text{TP})$, and $\omega(\text{NH}_4^+\text{-N})$ in rainwater sewer sediments from different regions was as follows: commercial area > historical and cultural protection area > living area > cultural and educational area, in which $\omega(\text{TOC})$ was 0.84%-6.76%, and $\omega(\text{TN})$, $\omega(\text{TP})$, and $\omega(\text{NH}_4^+\text{-N})$ were 917.5-12 707.1, 196.1-2 524.8, and 9.3-156.8 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, respectively. TOC, TP, and $\text{NH}_4^+\text{-N}$ pollution loads were mainly concentrated on particles $\leq 75 \mu\text{m}$ and 250-1000 μm . Street dust pollutants highly differed spatially, with a high content of attached pollutants on street dust particles with a particle size of $\leq 75 \mu\text{m}$. Various pollutants migrated into the street dust-pipes, and TP and TN showed certain enrichment characteristics in the sewer. Controlling the transportation of street dust and the accumulation of sediments in the sewer can reduce the pollution of sediment into the rivers during the rainy season.

Key words: rainwater sewer; sediments; particle size distribution; total nitrogen(TN); total organic carbon(TOC); ammonia nitrogen($\text{NH}_4^+\text{-N}$)

苏州地处长江、太湖下游, 境内湖泊、河道众多, 城区内地势低平, 河网纵横交错, 河道周边建筑与人居稠密, 服务业发达. 由于苏州城区可渗透地面面积有限, 雨水管道较短且大多为淹没流排河, 降雨时管道内沉积物成为城区河道水质污染的重要来源^[1]. 有研究表明雨季河道水质高锰酸盐指数和氨氮明显高于旱季^[2], 降雨引起的地表径流污染对河道水质起到了恶化作用^[3]. 排水系统中管道沉积现象普遍存在, 有调查发现约 80% 的雨水管道都存在不同程度的沉积现象^[4, 5], 雨水管道内沉积物携带的污染物随径流进入到水体中, 其对管道出流的污染贡献不可忽视^[6~8]. Ahyerre 等^[9]的研究表明, 降雨条件下管道沉积物冲刷释放的污染负荷为径流污染负荷的 30% ~ 80%. Gasperi 等^[10]对多场降雨分析结果表明, 降雨条件下管道沉积物污染负荷中, TSS 和 TOC 贡献率分别高达 40% ~ 80% 和 34% ~

61%. Chang 等^[11]的研究发现, 雨季管道排放的沉积物致使城市河流底泥 $\omega(\text{TN})$ 、 $\omega(\text{TP})$ 和 $\omega(\text{TOC})$ 增加.

目前, 关于管道沉积物污染特性的国内外研究主要集中在合流制管道沉积物污染性质^[12~15]以及沉积物输移和冲刷模型^[16~21]等方面, 对分流制雨水管道沉积物理化性质及污染特征方面的工作成果较少, 关于雨水管道沉积物粒径分布与污染物负荷之间的相关性研究也较缺乏. 本文针对苏州市城区 4 种典型功能区雨水管道沉积物, 研究了粒径特征及其与 $\omega(\text{TOC})$ 、 $\omega(\text{TN})$ 、 $\omega(\text{TP})$ 和 $\omega(\text{NH}_4^+\text{-N})$ 的相关性, 以期雨水管道沉积物的污染控制提供较好

收稿日期: 2021-04-16; 修订日期: 2021-06-09

基金项目: 苏州市科技计划项目(SS202002)

作者简介: 叶蓉(1992~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为环境污染控制理论与技术, E-mail: yerong0401@163.com

* 通信作者, E-mail: huangtianyin111@163.com

的理论依据。

1 材料与方 法

1.1 采样点分布

以苏州市中心城区为背景,选取商业区、历史文化保护区、文教区和生活区这 4 种典型功能区雨水管道沉积物作为研究对象,结合实地调研进行采样点的布设,在每个功能区的雨水干管和支管分别布设采样点。生活区位于古城区道前街西善长巷,周边配套设 施较完善,下垫面水泥道路、砖石铺砌路和绿化比例为 1:0.84:0.29,雨水管底坡度为 1‰~3‰;商业区位于观前商圈,属于商业交通繁忙区域,下垫面水泥道路、砖石铺砌路和绿化比例为 1:2.6:0.4,管底坡度为 1‰~6‰;历史文化保护区为平江路“网红街”,下垫面混凝土道路、砖石铺砌路和绿化比例为 1:1.88:0.13,管底坡度为 1‰~3‰;文教区位于大学城,下垫面混凝土道路、砖石铺砌路和绿化比例为 1:1.27:2.36。

1.2 样品采集

本实验样品于 2020 年 6~8 月(雨季)和 2020 年 11 月~2021 年 1 月(旱季)采集,根据天气情况,在降雨后第 5 个晴天采集雨水管道沉积物。采用抽吸式或抓斗式沉积物采样器,样品为各点位 3 次采集的混合样,同时收集各取样点周边(3 m×1 m)街尘,雨水管道沉积物和街尘样品数各 48 个。样品采集后及时送至实验室冷冻干燥(Scientz-系列 N 型真空冷冻干燥机,宁波新芝生物科技有限公司),弃去大于 2 000 μm 的碎石、树叶等杂物,将管道沉积物和路面街尘依次通过 18 目(1 000 μm)、60 目(250 μm)、100 目(150 μm)和 200 目(75 μm)不锈钢筛,筛分后得到 250~1 000、150~250、75~150 和 ≤75 μm 这 4 个区间的颗粒物样品,其余样品-20℃冰箱保存并及时进行各指标检测分析。

1.3 检测方法

对样品总氮(TN)、总磷(TP)、总有机碳(TOC)和氨氮(NH₄⁺-N)指标及理化特性进行检测,

粒径分布采用丹东百特 BT-9300SE 激光粒度分析仪进行测定;TOC 采用德国耶拿 MultiNC3100TOC 分析仪(GB/T 30740-2014);TN 采用凯氏法(HJ 717-2014);NH₄⁺-N 采用氯化钾溶液提取分光光度法(HJ 634-2012);TP 采用碱熔-钼锑抗分光光度法(HJ 632-2011);pH 采用电位法(HJ 962-2018);密度采用比重瓶法(LY/T 1224-1999);含水率采用重量法(HJ 613-2011)。每个样品检测设置 3 组平行实验。

1.4 数据处理与分析

数据处理使用 Excel 2019,图表制作使用 Origin 2021,统计分析使用 SPSS 22。

各取样点雨水管道沉积物不同粒级污染负荷 M_i (g) 计算采用如下公式:

$$M_i = C_i \times \rho \times V \times k_i \quad (1)$$

式中, M_i 为不同粒级沉积物的污染负荷(g); C_i 为不同粒级沉积物中污染物含量(mg·kg⁻¹); V 为取样点管道沉积物的有效体积(m³), ρ 为取样点沉积物密度(g·cm⁻³), k_i 为取样点各粒级沉积物的质量分数(%)。

2 结果与讨论

2.1 雨水管道沉积物的基本理化性质

经现场调查发现,雨水管道沉积物厚度为 15~40 cm,支管沉积厚度大于干管,雨季较早季管内沉积厚度减少。含水率与密度等性质直接影响沉积物的冲刷、传输和沉积过程,4 个功能区雨水管道沉积物基本性质见表 1,沉积物含水率为 24.26%~88.46%,支管含水率 > 干管,这与各功能区采样点位汇水面积、下垫面类型、管道结构及坡度等有关。含水率反映沉积物堆积状态和颗粒间相互作用的强弱,是影响水流剪切冲刷和临界启动应力的重要因素之一^[22]。密度范围为 1.969~2.815 g·cm⁻³,各功能区沉积物密度相差不大,干管沉积物密度略大于支管。笔者研究区域干管多位于交通干道,车流量大,大量路面街尘被带入管道系统。pH 在 6.80~

表 1 不同功能区雨水管道沉积物基本性质($n=48$)

Table 1 Basic properties of rainwater sewer sediments in different functional areas($n=48$)

区域类型	管道等级	密度/g·cm ⁻³	pH	含水率/%
商业区	干管	2.382±0.210	7.39±0.08	67.07±10.83
	支管	2.262±0.225	6.94±0.16	72.68±12.31
历史文化保护区	干管	2.540±0.222	7.34±0.04	70.07±10.34
	支管	2.483±0.254	7.17±0.05	74.96±3.10
文教区	干管	2.524±0.107	7.83±0.11	45.70±4.51
	支管	2.496±0.058	7.74±0.25	47.61±8.50
生活区	干管	2.664±0.069	7.92±0.20	40.99±12.91
	支管	2.472±0.194	7.57±0.09	73.54±3.12

8.12 之间,均值为 7.46,较重庆雨水管道 pH(7.25~7.63)^[23] 范围大,说明雨水管道沉积物所处理化环境不太稳定,pH 值呈现文教区 > 生活区 > 历史文化保护区 > 商业区的趋势. 有研究表明,pH 值影响沉积物-上覆水界面间氮和磷的释放情况^[24],特别是 pH 在酸性条件下,雨水管道沉积物中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 与 TP 溶出率达到峰值^[25].

粒径是表征颗粒物传输行为的重要参数,图 1(a)反映了雨水管道沉积物和地表街尘颗粒物的粒径分布,从中可知,4 个功能区管道沉积物在 $\leq 75 \mu\text{m}$ 和 $250 \sim 1000 \mu\text{m}$ 两组粒径区间比例较高, $75 \sim 150 \mu\text{m}$ 和 $150 \sim 250 \mu\text{m}$ 粒径范围分布较为均匀,街尘颗粒物粒径集中在 $250 \sim 1000 \mu\text{m}$ 范围内. 文教区粒径 $\leq 75 \mu\text{m}$ 的颗粒占比最多(78.62%),与其绿化面积较大,绿地对街尘中大颗粒物的拦截作用有关. 街尘与雨水管道沉积物为源-汇关系,其粒径分布不仅受道路交通、清扫及开发状况影响,还受降雨强度、雨前晴天数与风速的影响,清扫主要去除大粒径颗粒物,小粒径颗粒物受降雨冲刷进入

管网^[26]. 城市道路降雨径流颗粒物粒径多为 $5 \sim 100 \mu\text{m}$ ^[27],路面街尘以 $180 \sim 750 \mu\text{m}$ 为主^[28],粒径在某种程度上决定颗粒的可移动性和潜在的污染效应. 由图 1(b)可知,管道沉积物 D_{50} (中值粒径)在 $16.55 \sim 327.50 \mu\text{m}$ 之间,生活区、商业区、历史文化区和文教区 D_{50} 分别为 $28.51 \sim 307.60$ 、 $165 \sim 327.50$ 、 $62.11 \sim 223.40$ 和 $16.55 \sim 50.31 \mu\text{m}$. 4 个功能区的干管沉积物 D_{50} 均大于支管,与常海东等^[29]在昆明市排水管道沉积物性质的研究相似. 干管内沉积物大粒径颗粒多于支管,推测这与管道内流速有关,当管内流速 $< 0.6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,颗粒态污染物的沉积作用大于冲刷作用^[30]. 此外,雨季沉积物样品的 D_{50} 明显低于旱季,街尘细颗粒物易随径流输移至管道内造成雨季管道沉积物细颗粒增加. 同时,各粒径颗粒具有不同传输方式,有研究发现管道沉积物粒径在 $50 \sim 200 \mu\text{m}$ 之间以悬移质传输为主^[31],粒径在 $0.2 \sim 1.0 \text{ mm}$ 的颗粒物跳跃运输,粒径 $> 1.0 \text{ mm}$ 则为推移质,本文雨水管道沉积物静态状况下具有悬移质特征.

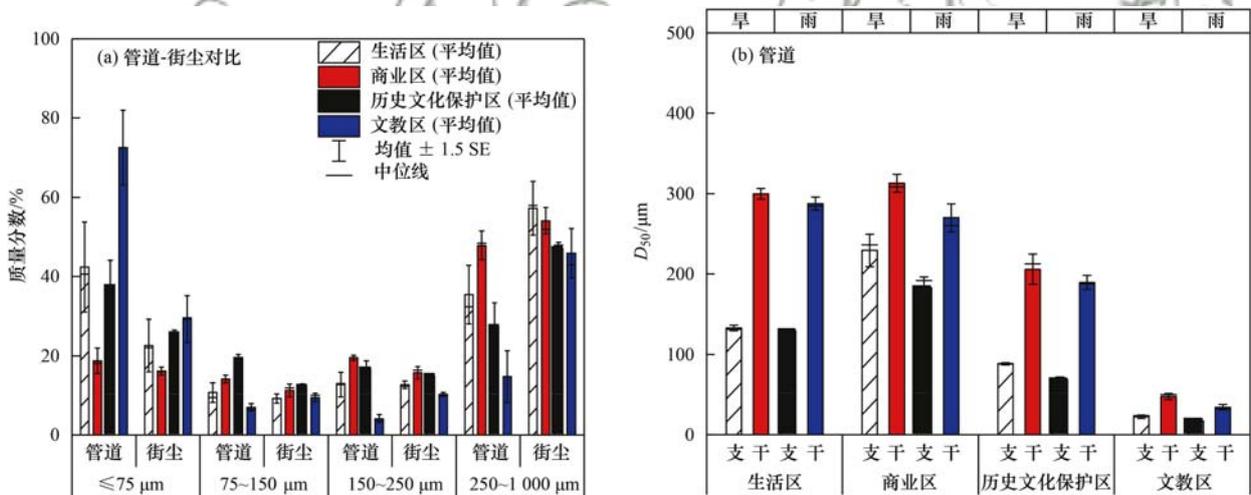


图 1 雨水管道沉积物粒径分布

Fig. 1 Rainwater sewer sediment particle size distribution

2.2 沉积物污染物特征

管道沉积物常规污染物含量分布见图 2, $\omega(\text{TOC})$ 、 $\omega(\text{TN})$ 、 $\omega(\text{TP})$ 和 $\omega(\text{NH}_4^+ - \text{N})$ 存在明显空间差异性,表现为:商业区 > 历史文化保护区 > 生活区 > 文教区. $\omega(\text{TOC})$ 为 $0.84\% \sim 6.76\%$, $\omega(\text{TN})$ 、 $\omega(\text{TP})$ 和 $\omega(\text{NH}_4^+ - \text{N})$ 分别为 $917.5 \sim 12707.1$ 、 $196.1 \sim 2524.8$ 和 $9.3 \sim 156.8 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. $\omega(\text{TOC})$ 、 $\omega(\text{TN})$ 、 $\omega(\text{TP})$ 和 $\omega(\text{NH}_4^+ - \text{N})$ 均值分别为 2.90% 、 $4834.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $950.3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $52.1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,与苏州古城区河道底泥 $\omega(\text{TOC})$ 、 $\omega(\text{TN})$ 、 $\omega(\text{TP})$ 和 $\omega(\text{NH}_4^+ - \text{N})$ (均值分别为 3.4% 、 $2074 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $1765 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $140 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)^[32],

及重庆雨水管道沉积物 $\omega(\text{TN})$ 、 $\omega(\text{TP})$ 和 $\omega(\text{NH}_4^+ - \text{N})$ (均值分别为 3050 、 1890 和 $254 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)^[23] 相比,除 TN 外,各采样点 $\omega(\text{TOC})$ 、 $\omega(\text{TP})$ 和 $\omega(\text{NH}_4^+ - \text{N})$ 相对较低. 管道沉积物中有机物和氮的输出对受纳水体污染风险值得关注,沉积物中的氮又以有机氮为主导,人类外源输入对有机氮影响较大^[33]. 沉积物中氮的形态结构与沉积动力学^[34]和微生物代谢活动有关,硝化和反硝化菌种影响着氮的迁移过程^[35]. $\omega(\text{TOC})$ 、 $\omega(\text{TN})$ 、 $\omega(\text{TP})$ 和 $\omega(\text{NH}_4^+ - \text{N})$ 在 4 组粒径区间上最高值皆出现在粒径 $\leq 75 \mu\text{m}$ 的颗粒物上, $\omega(\text{TOC})$ 在粒径 ≤ 75 、 $75 \sim 150$ 和 $150 \sim 250 \mu\text{m}$ 颗粒上分布较为均匀. 相

较于粒径大于 150 μm 的颗粒,粒径 $\leq 150 \mu\text{m}$ 的样点中 $\omega(\text{TN})$ 、 $\omega(\text{TP})$ 和 $\omega(\text{NH}_4^+ - \text{N})$ 明显较高. 由此说明各污染物与不同粒径颗粒结合能力具有差异, TN 、 TP 和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 易吸附于细微颗粒物上. 广州合流

制排水管道中粒径 $< 147 \mu\text{m}$ 和 $> 841 \mu\text{m}$ 的颗粒物上污染物的含量高于其它粒径^[36], 与本实验结果存在差异, 这主要是由排水体制内污染物的分布特征决定的.

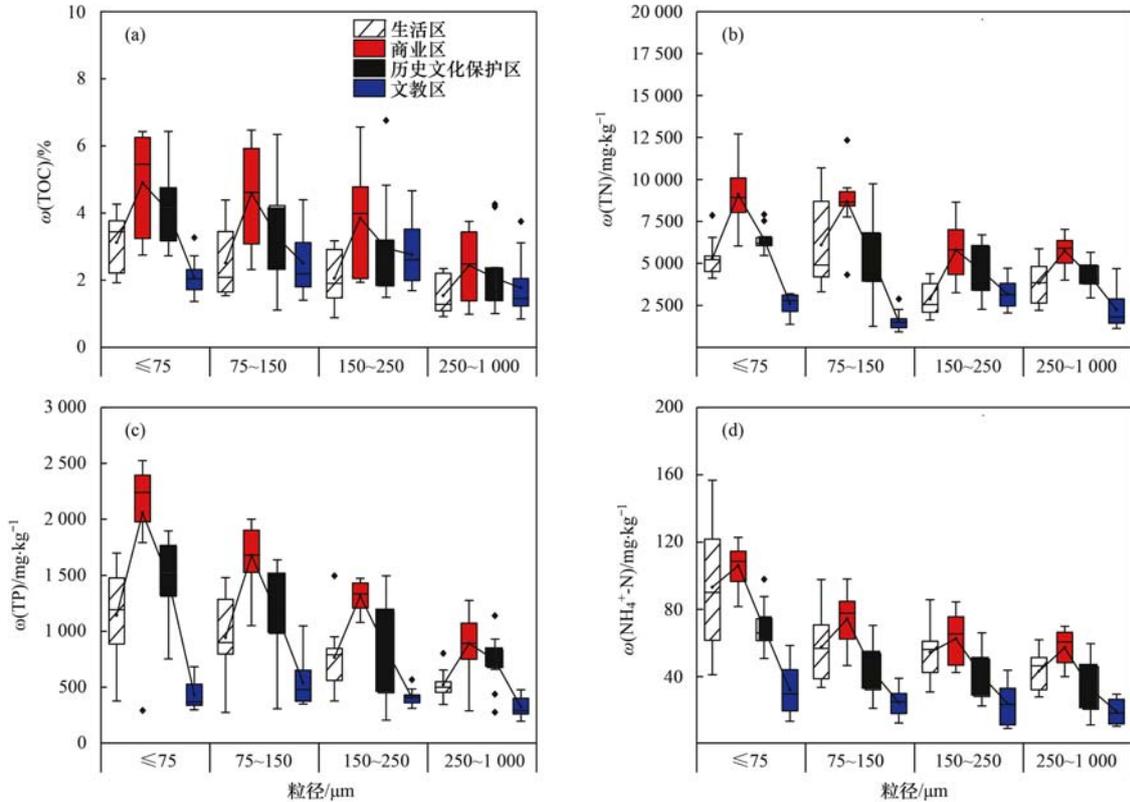


图 2 不同粒径雨水管道沉积物碳、氮和磷含量分布

Fig. 2 Distribution of carbon, nitrogen, and phosphorus contents in rainwater sewer sediments with different sizes

对比污染物在干管和支管上的含量(表 2), 发现干管沉积物 $\omega(\text{TOC})$ 、 $\omega(\text{TN})$ 和 $\omega(\text{TP})$ 在 4 组粒径区间上均低于支管, 支管内细颗粒沉积物较多, 可吸附更多的有机物和磷, 磷主要以颗粒态为主, 相较

于干管, 支管内更易发生沉积. 但 $\omega(\text{NH}_4^+ - \text{N})$ 为干管 $>$ 支管, 氮以溶解态为主, 管道内输送速度及氧含量不同致使沉积物中氮形态分布有差异, 干管内流速和流量大, 沉积物再悬浮也增加氮迁移和转化速率^[37].

表 2 不同粒级雨水管道沉积物中碳、氮和磷分布

Table 2 Distribution of carbon, nitrogen, and phosphorus in rainwater sewer sediments of different grain sizes

项目	$\omega(\text{TOC})/\%$		$\omega(\text{TP})/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$		$\omega(\text{TN})/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$		$\omega(\text{NH}_4^+ - \text{N})/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	
	干管	支管	干管	支管	干管	支管	干管	支管
$\leq 75 \mu\text{m}$	3.35 \pm 1.37	3.72 \pm 1.28	1 241.6 \pm 700.8	1 306.8 \pm 737.3	5 466.7 \pm 2 464.4	6 228.2 \pm 2 745.7	71.3 \pm 29.2	78.6 \pm 41.5
75 ~ 150 μm	3.01 \pm 1.31	3.44 \pm 1.72	1 056.6 \pm 520.0	1 096.8 \pm 543.5	5 496.2 \pm 3 063.7	5 282.8 \pm 3 465.4	51.0 \pm 21.3	48.6 \pm 26.8
150 ~ 250 μm	2.81 \pm 1.01	3.00 \pm 1.70	808.1 \pm 428.5	856.0 \pm 413.7	3 924.4 \pm 1 598.4	4 264.8 \pm 1 919.2	49.6 \pm 17.2	41.2 \pm 22.8
250 ~ 1 000 μm	1.87 \pm 0.72	2.04 \pm 1.15	601.8 \pm 268.9	635.1 \pm 303.4	3 793.3 \pm 1 555.4	4 216.9 \pm 1 658.2	42.3 \pm 18.0	33.9 \pm 17.4
均值	2.76	3.05	927.0	973.7	4 670.2	4 998.2	53.5	50.6
范围	1.07 ~ 6.43	0.84 ~ 6.76	204.5 ~ 2 524.8	196.1 ~ 2 514.1	917.5 ~ 11 453.1	1 113.4 ~ 12 707.1	11.3 ~ 122.7	9.3 ~ 156.8
变异系数/%	45.17	54.37	59.66	59.10	50.74	52.87	45.11	65.07

笔者对各取样点不同粒级管道沉积物污染负荷进行核算见公式(1), 经计算得 TOC 、 TN 、 TP 和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 各粒级污染负荷分别为 7.7 ~ 4 733.9、0.07 ~ 453.6、0.1 ~ 246.6 和 0.004 ~ 10.9 g. 图 3 反映了常规污染物在时间和粒径上的分布情况, TOC 、 TP 和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 这三者污染负荷主要集中在粒径 ≤ 75

μm 和 250 ~ 1 000 μm 的颗粒上, 75 ~ 250 μm 颗粒上污染负荷相对较低, 这是由沉积物粒径组成及污染物分布规律决定的. TN 负荷在粒径 250 ~ 1 000 μm 的颗粒上最大, 与海永龙等^[38] 在北运河上游合流制管网沉积物研究中结论相似, 但 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 负荷分布规律不同, 分析认为与合流制相比, 分流制管道沉

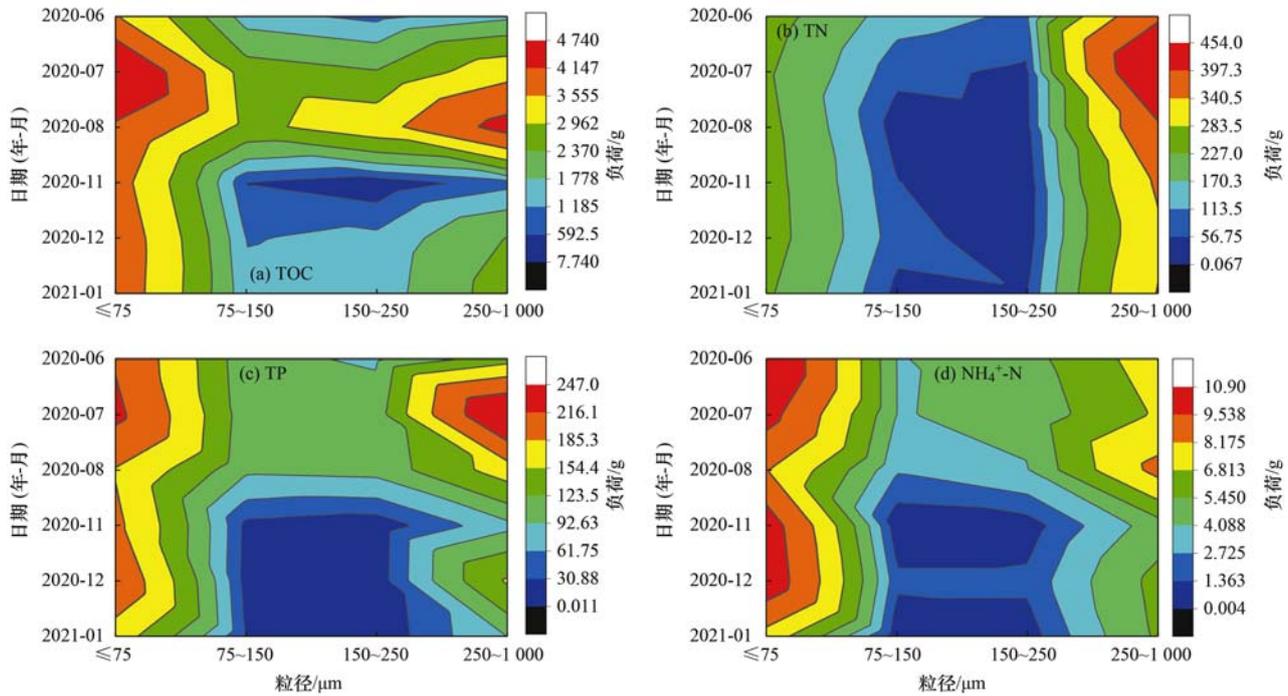


图3 雨水管道沉积物污染负荷

Fig. 3 Sediment pollution load in rainwater sewer

沉积物密度大且细颗粒较多. 从季节上看, 沉积物中 TOC、TN 和 TP 污染负荷雨季高于旱季, 雨季径流冲刷导致管内沉积物粒径分布发生变化, 当径流冲刷产生较大剪切力时, 沉积物上 20%~50% 的污染物可能会被释放^[39]. $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 负荷在旱季和雨季皆有高值出现, 这可能是由于雨季温度高, 微生物活性强, 而旱季雨水管道干期时间长, 有机颗粒间的生物反应时间增加. 有研究发现无机氮分布情况与雨水管道早期的长度及降雨强度有关^[40]. 因此需减少旱季管道沉积物的累积并控制雨季管道沉积物细颗粒的传输, 尤需重视对粒径 $\leq 75 \mu\text{m}$ 细颗粒沉积物的控制. Zeinali 等^[41] 的实验发现, 粒径范围为 $40 \sim 170 \mu\text{m}$ 的颗粒能够在管道水中悬浮并输送的最低流速为 $0.25 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时, 管内水流流速为 $0.34 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时, 粒径 $60 \sim 200 \mu\text{m}$ 的颗粒物可在管内快速迁移, 当管内水流流速达到 $0.39 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时, 可输移粒径 $50 \sim 180 \mu\text{m}$ 的颗粒物. 因此, 在雨季前管网系统的清

淤对有效降低管道沉积物污染负荷进入河道具有重要意义.

2.3 沉积物中碳、氮和磷相关性分析

Pearson 相关分析不仅可以衡量两个变量因素的相互依存程度, 还可发现不同污染物指标间是否存在共同的污染源. 相关性分析结果表明 (表 3), D_{50} 与 TOC ($r = 0.420, P < 0.01$)、TP ($r = 0.534, P < 0.01$)、TN ($r = 0.628, P < 0.01$) 和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ ($r = 0.735, P < 0.01$) 呈现显著正相关, 与 Sansalone 等^[42] 在城市路面径流颗粒物迁移研究中结论相似, 说明污染物含量与粒径有密切关系. pH 与 TOC、TN、TP 和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 呈现显著负相关性, pH 对沉积物溶出、释放和微生物活动均有影响, 密度仅与 TP 呈显著相关, 其原因可能是管道内颗粒物沉积影响着 TP 在沉积物中含量变化, 氮和有机物迁移性强, 磷则具有良好的沉降特性^[43], 沉积物密度越大, 颗粒沉降性越强. 污染指标之间,

表3 碳、氮和磷与基本理化性质间的相关分析¹⁾ ($n = 48$)

Table 3 Correlation analysis between carbon, nitrogen, and phosphorus and basic physical and chemical properties ($n = 48$)

	D_{50}	含水率	密度	pH	TOC	TP	TN	$\text{NH}_4^+ - \text{N}$
D_{50}	1							
含水率	0.653 **	1						
密度	-0.009	0.178	1					
pH	-0.505 **	-0.676 **	0.159	1				
TOC	0.420 **	0.199	-0.253	-0.423 **	1			
TP	0.534 **	0.426 **	-0.361 *	-0.550 **	0.552 **	1		
TN	0.628 **	0.584 **	-0.262	-0.747 **	0.361 *	0.787 **	1	
$\text{NH}_4^+ - \text{N}$	0.735 **	0.442 **	-0.035	-0.425 **	0.276	0.616 **	0.627 **	1

1) * 表示相关性在 0.05 水平上显著相关, ** 表示相关性在 0.01 水平上显著相关

TOC 和 TP($r=0.552$, $P<0.01$)与 TN($r=0.361$, $P<0.05$)为显著正相关, TN 与 TP($r=0.787$, $P<0.01$)相关性最强, NH_4^+-N 和 TN 与 TP 同样显著正相关. 说明沉积物中碳、氮和磷类污染源同源.

2.4 路面街尘-管道沉积物间的迁移特性

街尘中 $\omega(\text{TOC})$ 为 0.46%~4.54%, $\omega(\text{TN})$ 、 $\omega(\text{TP})$ 和 $\omega(\text{NH}_4^+-\text{N})$ 分别为:1 105.3~8 420.9、100.7~1 236.3 和 12.6~171.7 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. TOC、TN、TP 和 NH_4^+-N 的变异系数分别为 54.76%、

52.33%、67.75% 和 67.67%, 根据变异系数分级^[44], 污染物变异性显著, 说明其空间差异性大, 很大程度是人为活动空间差异导致的结果. 各功能区氮、磷和有机物无明显规律, 这与样点区域清扫频率、清扫方式及降雨条件有关. 不同颗粒粒径的污染物含量分布情况(表 4)反映了粒径 $\leq 75 \mu\text{m}$ 街尘颗粒上 $\omega(\text{TOC})$ 、 $\omega(\text{TN})$ 和 $\omega(\text{NH}_4^+-\text{N})$ 大于其它粒径颗粒, TP 主要分布在粒径 150~250 μm 街尘颗粒上.

表 4 不同粒径街尘中碳、氮和磷分布

Table 4 Distribution of carbon, nitrogen, and phosphorus in street dust of different sizes

项目	$\omega(\text{TOC})/\%$	$\omega(\text{TP})/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	$\omega(\text{TN})/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	$\omega(\text{NH}_4^+-\text{N})/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$
$\leq 75 \mu\text{m}$	2.91 \pm 1.26	395.8 \pm 286.2	5 244.8 \pm 2 170.4	92.7 \pm 39.2
75~150 μm	2.69 \pm 0.95	423.4 \pm 245.1	4 137.3 \pm 2 053.9	57.6 \pm 30.6
150~250 μm	1.72 \pm 1.11	616.5 \pm 336.7	2 842.0 \pm 1 364.9	55.2 \pm 41.5
250~1 000 μm	1.40 \pm 0.88	267.0 \pm 203.9	3 019.2 \pm 1 598.6	29.3 \pm 16.3
均值	2.18	425.7	3 810.8	58.7
范围	0.46~4.54	100.7~1 236.3	1 105.3~8 420.9	12.6~171.7
变异系数/%	54.76	67.75	52.33	67.67

图 4 分别揭示了 TOC、TP、TN 和 NH_4^+-N 在雨水管道沉积物-街尘颗粒间的迁移特征, 各管道沉积物中 $\omega(\text{TP})$ 和 $\omega(\text{TN})$ 均高于街尘, 呈现一定的富集特性, 尤其是粒径 $\leq 75 \mu\text{m}$ 颗粒上 $\omega(\text{TP})$ 明显高于同粒径街尘, 说明 TP 更容易在

细颗粒上出现富集, 生活区 TN 较其它功能区的富集特性更为明显. $\omega(\text{TOC})$ 在不同功能区迁移特性具有差异, 商业区和历史文化保护区 TOC 有明显的富集特性. 街尘是城市径流污染与雨水管道沉积物累积的主要来源之一, 应有效控制地表

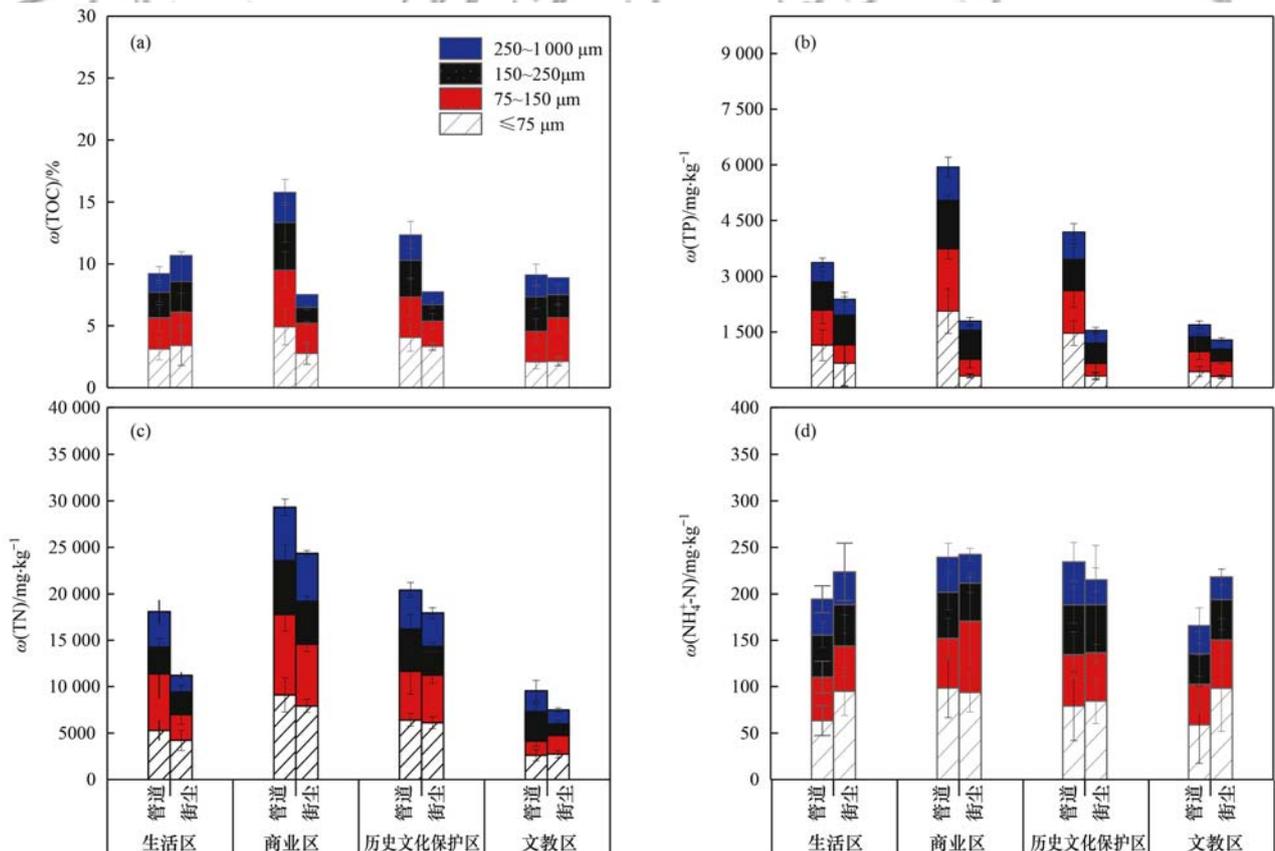


图 4 不同粒径雨水管道沉积物-街尘迁移特征

Fig. 4 Migration characteristics of rainwater sewer sediments-street dust with different particle sizes

街尘的输移和管内沉积物的累积,包括雨水调蓄池以及管道末端截留设施等。

3 结论

(1)各功能区雨水管道沉积物粒径分布差异性明显, D_{50} 由大到小排序为:商业区 > 生活区 > 历史文化保护区 > 文教区,干管沉积物 D_{50} 大于支管,雨季沉积物 D_{50} 明显低于旱季。 D_{50} 与 TOC、TN、TP 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 均为显著正相关。

(2)不同功能区沉积物 $\omega(\text{TOC})$ 、 $\omega(\text{TN})$ 、 $\omega(\text{TP})$ 和 $\omega(\text{NH}_4^+\text{-N})$ 总体表现为:商业区 > 历史文化保护区 > 生活区 > 文教区,4种污染物含量在粒径 $\leq 75 \mu\text{m}$ 颗粒物上最高,干管内沉积物 $\omega(\text{TOC})$ 、 $\omega(\text{TN})$ 和 $\omega(\text{TP})$ 低于支管, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 分布规律则相反。

(3)管道沉积物中 TOC、TP 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 三者污染负荷主要集中在粒径 $\leq 75 \mu\text{m}$ 和 $250 \sim 1000 \mu\text{m}$ 的颗粒物上, TN 负荷主要来源于 $250 \sim 1000 \mu\text{m}$ 的沉积物颗粒, TOC、TN 和 TP 污染负荷雨季高于旱季。

(4)管道沉积物 TP 与 TN 呈现一定的富集特性, TP 在粒径 $\leq 75 \mu\text{m}$ 的沉积物中更容易富集。

参考文献:

- [1] 李海燕, 徐波平, 徐尚玲, 等. 北京城区雨水管道沉积物污染负荷研究[J]. 环境科学, 2013, 34(3): 919-926.
Li H Y, Xu B P, Xu S L, et al. Research on pollution load of sediments in storm sewer in Beijing district[J]. Environmental Science, 2013, 34(3): 919-926.
- [2] 朱红霞, 陈效民, 方堃. 太湖地区旱季、雨季水体污染影响因素分析[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(6): 2396-2400.
Zhu H X, Chen X M, Fang K. Water pollution impact analysis in the dry season and the rainy season of Taihu Lake region[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2008, 27(6): 2396-2400.
- [3] 张岑. 产汇流过程对流域营养物质输出与汇集的影响[D]. 北京: 清华大学, 2015.
Zhang C. Influences of the runoff generation and confluence on nutrients export and transport in the watershed[D]. Beijing: Tsinghua University, 2015.
- [4] 李海燕, 梅慧瑞, 徐波平. 北京城市雨水管道中沉积物的状况调查与分析[J]. 中国给水排水, 2011, 27(6): 36-39.
Li H Y, Mei H R, Xu B P. Investigation and analysis of storm sewer sediments in Beijing[J]. China Water & Wastewater, 2011, 27(6): 36-39.
- [5] 付博文, 金鹏康, 石山, 等. 西安市污水管网中沉积物特性研究[J]. 中国给水排水, 2018, 34(17): 119-122, 127.
Fu B W, Jin P K, Shi S, et al. Sediment characteristics of sewer network in Xi'an City[J]. China Water & Wastewater, 2018, 34(17): 119-122, 127.
- [6] 李海燕, 徐尚玲, 黄延, 等. 合流制排水管道雨季出流污染负荷研究[J]. 环境科学学报, 2013, 33(9): 2522-2530.
Li H Y, Xu S L, Huang Y, et al. Pollution loading of overflow in combined drainage channels during rainy season[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2013, 33(9): 2522-2530.
- [7] 潘国庆, 车伍, 李海燕, 等. 雨水管道沉积物对径流初期冲刷的影响[J]. 环境科学学报, 2009, 29(4): 771-776.
Pan G Q, Che W, Li H Y, et al. Effect of storm sewer sediment on first flush[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2009, 29(4): 771-776.
- [8] Seco R I. In-sewer organic sediment transport; study of the release of sediments during wet-weather from combined sewer systems in the Mediterranean region in Spain[D]. Catalan: Universitat Politècnica de Catalunya, 2014.
- [9] Ahyerre M, Chebbo G, Saad M. Sources and erosion of organic solids in a combined sewer[J]. Urban Water, 2000, 2(4): 305-315.
- [10] Gasperi J, Gromaire M C, Kafi M, et al. Contributions of wastewater, runoff and sewer deposit erosion to wet weather pollutant loads in combined sewer systems[J]. Water Research, 2010, 44(20): 5875-5886.
- [11] Chang S Y, Tang Y Q, Dong L X, et al. Impacts of sewer deposits on the urban river sediment after rainy season and bioremediation of polluted sediment[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2018, 25(13): 12588-12599.
- [12] 房金秀, 谢文霞, 朱玉玺, 等. 合流制面源污染传输过程与污染源解析[J]. 环境科学, 2019, 40(6): 2705-2714.
Fang J X, Xie W X, Zhu Y X, et al. Pollutant transport analysis and source apportionment of the entire non-point source pollution process in combined sewer systems[J]. Environmental Science, 2019, 40(6): 2705-2714.
- [13] 崔爽. 合流制管道沉积物中氮和有机物污染特性研究[D]. 北京: 北京建筑大学, 2014.
Cui S. Research on transformation and pollution characteristics of nitrogen and organics in combined sewer sediments[D]. Beijing: Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2014.
- [14] 潘伟亮, 何强, 李果, 等. 重庆市主城区排水管道沉积物性质研究[J]. 中国环境科学, 2014, 34(6): 1485-1490.
Pan W L, He Q, Li G, et al. Study on characteristics of sewer sediments in a mountainous city[J]. China Environmental Science, 2014, 34(6): 1485-1490.
- [15] Ashley R, Crabtree B, Fraser A, et al. European research into sewer sediments and associated pollutants and processes[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2003, 129(4): 267-275.
- [16] Liu C Y, Tan S, Zhang X H, et al. Deposition regularity in a rainwater pipeline based on variable transport flux[J]. Journal of Environmental Management, 2018, 224: 29-36.
- [17] Al-Ani R R A, Al-Obaidi B H K. Prediction of sediment accumulation model for trunk sewer using multiple linear regression and neural network techniques[J]. Civil Engineering Journal, 2019, 5(1): 82-92.
- [18] Ebtehaj I, Bonakdari H, Safari M J S, et al. Combination of sensitivity and uncertainty analyses for sediment transport modeling in sewer pipes[J]. International Journal of Sediment Research, 2020, 35(2): 157-170.
- [19] Montes C, Berardi L, Kapelan Z, et al. Predicting bedload sediment transport of non-cohesive material in sewer pipes using evolutionary polynomial regression-multi-objective genetic algorithm strategy[J]. Urban Water Journal, 2020, 17(2): 154-162.
- [20] 岳利涛. 基于 SWMM 模拟的排水管道沉积物累积冲刷规律研究[D]. 北京: 北京建筑工程学院, 2012.
Yue L T. Research on principle of storm-water pipeline sediment accumulation and erosion based on SWMM[D]. Beijing: Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2012.
- [21] 张伟. 基于 Info Works CS 模型的排水管道沉积规律研究

- [D]. 长沙: 湖南大学, 2012.
- Zhang W. Research on sediment deposition in drainage pipes using Info Works CS model[D]. Changsha: Hunan University, 2012.
- [22] Bong C H J, Lau T L, Ghani A A, *et al.* Sediment deposit thickness and its effect on critical velocity for incipient motion [J]. *Water Science & Technology*, 2016, **74**(8): 1876-1884.
- [23] 潘伟亮, 何强, 艾海男, 等. 重庆典型区域雨水管道沉积物中氮磷污染特征分析[J]. *环境科学学报*, 2015, **35**(1): 257-261.
- Pan W L, He Q, Ai H N, *et al.* Analysis on characteristics of nitrogen and phosphorus in storm sewer sediments in Chongqing City[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, **35**(1): 257-261.
- [24] 裴佳瑶, 冯民权. 环境因子对雁鸣湖沉积物氮磷释放的影响[J]. *环境工程学报*, 2020, **14**(12): 3447-3459.
- Pei J Y, Feng M Q. Effects of environmental factors on the release of nitrogen and phosphorus from the sediment of the Yanming Lake, China[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2020, **14**(12): 3447-3459.
- [25] 徐强强, 李阳, 马黎, 等. 城市雨水管道沉积物氮磷污染溶出特性试验研究[J]. *环境科学研究*, 2021, **34**(3): 646-654.
- Xu Q Q, Li Y, Ma L, *et al.* Experimental study on leaching characteristics of nitrogen and phosphorus in urban rainwater pipeline sediment [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2021, **34**(3): 646-654.
- [26] 赵剑强. 城市地表径流污染与控制[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [27] 李淮, 吴玮, 田永静, 等. 苏州市老城区降雨径流颗粒物粒径分布及污染物赋存形态[J]. *环境科学*, 2016, **37**(2): 565-572.
- Li H, Wu W, Tian Y J, *et al.* Particle size distribution and pollutant speciation analyses of stormwater runoff in the ancient town of Suzhou[J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(2): 565-572.
- [28] 王倩. 城市道路地表径流颗粒分布及重金属污染特性研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2019.
- Wang Q. Characteristics of particle size distribution and heavy metal pollution in urban road runoff[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2019.
- [29] 常海东, 金鹏康, 付博文, 等. 昆明市不同功能区排水管道沉积物性质[J]. *环境科学*, 2016, **37**(10): 3821-3827.
- Chang H D, Jin P K, Fu B W, *et al.* Sediment characteristics of sewer in different functional areas of Kunming [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(10): 3821-3827.
- [30] 桑浪涛, 石烜, 张彤, 等. 城市污水管网中污染物冲刷与沉积规律[J]. *环境科学*, 2017, **38**(5): 1965-1971.
- Sang L T, Shi X, Zhang T, *et al.* Law of pollutant erosion and deposition in urban sewage network[J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(5): 1965-1971.
- [31] Bertrand-Krajewski J L, Bardin J P, Gibello C. Long term monitoring of sewer sediment accumulation and flushing experiments in a man-entry sewer [J]. *Water Science & Technology*, 2006, **54**(6-7): 109-117.
- [32] 白冬锐, 张涛, 陈坦, 等. 苏州古城区河道碳氮磷类污染物的分布特征[J]. *环境科学*, 2021, **42**(3): 1403-1415.
- Bai D R, Zhang T, Chen T, *et al.* Distribution characteristics of carbon, nitrogen, and phosphorus bearing pollutants in the ancient town rivers of Suzhou[J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(3): 1403-1415.
- [33] Wu Y C, Gan M L, Huang X P, *et al.* Fractions and mineralization potential of the sediment organic nitrogen in Daya Bay, South China Sea; anthropogenic influence and ecological implications[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2020, **160**, doi: 10.1016/j.marpolbul.2020.111594.
- [34] Shi X, Ngo H H, Sang L T, *et al.* Functional evaluation of pollutant transformation in sediment from combined sewer system [J]. *Environmental Pollution*, 2018, **238**: 85-93.
- [35] Liu C Y, Yang Y T, Zhou J Q, *et al.* Migration and transformation of nitrogen in sediment-water system within storm sewers[J]. *Journal of Environmental Management*, 2021, **287**, doi: 10.1016/j.jenvman.2021.112355.
- [36] Allen D, Arthur S, Haynes H, *et al.* Multiple rainfall event pollution transport by sustainable drainage systems; the fate of fine sediment pollution [J]. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 2017, **14**(3): 639-652.
- [37] Xia X H, Liu T, Yang Z F, *et al.* Dissolved organic nitrogen transformation in river water: effects of suspended sediment and organic nitrogen concentration[J]. *Journal of Hydrology*, 2013, **484**: 96-104.
- [38] 海永龙, 佃柳, 梁玉帅, 等. 北运河上游合流制管网沉积物的月变化与污染物赋存特征[J]. *环境科学学报*, 2021, **41**(1): 209-216.
- Hai Y L, Dian L, Liang Y S, *et al.* Characteristics of combined sewer sediment by temporal and granulometric distribution in upper Northern Canal, Beijing [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2021, **41**(1): 209-216.
- [39] Regueiro-Picallo M, Anta J, Suárez J, *et al.* Characterisation of sediments during transport of solids in circular sewer pipes[J]. *Water Science & Technology*, 2018, **2017**(1): 8-15.
- [40] 索鹏程, 王帮国, 陈春伟, 等. 雨水管道沉积物中典型无机氮的干颗粒粒径分布[J]. *中国环境科学*, 2020, **40**(12): 5352-5360.
- Suo P C, Wang B G, Chen C W, *et al.* Particle sizes distribution of typical inorganic nitrogen from rainwater pipeline sediments during dry periods[J]. *China Environmental Science*, 2020, **40**(12): 5352-5360.
- [41] Zeinali H, Toma P, Kuru E. Selective removal of particles and shifting of particle-size distribution during pipeline transport of sediment deposits under turbulent flow[J]. *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*, 2016, **7**(4), doi: 10.1061/(ASCE)PS.1949-1204.0000239.
- [42] Sansalone J J, Kim J Y. Transport of particulate matter fractions in urban source area pavement surface runoff [J]. *Journal of Environmental Quality*, 2008, **37**(5): 1883-1893.
- [43] Grigas D, Lehrter J, Cebrian J, *et al.* Effects of stormwater pipe size and rainfall on sediment and nutrients delivered to a coastal bayou[J]. *Water Environment Research*, 2015, **87**(9): 796-804.
- [44] 王天阳, 王国祥. 昆承湖水水质参数空间分布特征研究[J]. *环境科学学报*, 2007, **27**(8): 1384-1390.
- Wang T Y, Wang G X. Spatial distribution of water quality parameters in Lake Kuncheng [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2007, **27**(8): 1384-1390.

CONTENTS

Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals in Urban Soils of Major Cities in China	PENG Chi, HE Ya-lei, GUO Zhao-hui, <i>et al.</i> (1)
Environmental Behaviors of Plant Growth Regulators in Soil; A Review	CHEN Liang, HOU Jie, HU Xiao-lei, <i>et al.</i> (11)
Preparation and Application of Magnetic Water Treatment Materials Based on Iron Sludge	ZENG Hui-ping, ZHAI Long-xue, LI Dong, <i>et al.</i> (26)
Meta-analysis of the Impact of Different Ozone Metrics on Total Mortality in China	RUAN Fang-fang, LIU Ji-xin, CHEN Zhi-wei, <i>et al.</i> (37)
Variation Characteristics and Potential Sources of the Mt. Haituo Aerosol Chemical Composition in Different Pollution Processes During Winter in Beijing, China	ZHAO De-long, WANG Fei, LIU Dan-tong, <i>et al.</i> (46)
Real-time Source Apportionment of PM _{2.5} and Potential Geographic Origins of Each Source During Winter in Wuhan	JIANG Shu-ning, KONG Shao-fei, ZHENG Huang, <i>et al.</i> (61)
Spatiotemporal Distribution and Seasonal Characteristics of Regional Transport of PM _{2.5} in Yuncheng City	WANG Yun-tao, ZHANG Qiang, WEN Xiao-yu, <i>et al.</i> (74)
Three-dimensional Structure Variation of PM _{2.5} During Cold Front Advance in Eastern China	MOU Nan-nan, ZHU Bin, LU Wen (85)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Nitrated Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Atmosphere of Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area	LI Yan-xi, XIE Dan-ping, LI Yu-qing, <i>et al.</i> (93)
Atmospheric VOCs Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Large-scale Integrated Industrial Area and Surrounding Areas in Southwest China	LI Ling, ZHANG Dan, HU Wei, <i>et al.</i> (102)
Characteristics and Source Apportionment of Ambient VOCs in Lhasa	YU Jia-yan, HAN Yan, CHEN Mu-lan, <i>et al.</i> (113)
Variation Characteristics of Ambient Volatile Organic Compounds (VOCs) Volume Fraction During Hangzhou COVID-19 Period	LIN Xu, YAN Ren-chang, JIN Jia-jia, <i>et al.</i> (123)
Role of Atmospheric VOCs in Ozone Formation in Summer in Shanghai Suburb	FANG Qin, NIU Si-ping, CHEN Yu-dong, <i>et al.</i> (132)
Characteristics of VOCs and Formation Potentials of O ₃ and SOA in Autumn and Winter in Tongchuan, China	YI Xiao-xiao, LI Jiang-hao, LI Guang-hua, <i>et al.</i> (140)
Emission Characteristics and Emission Factors of Volatile Organic Compounds from E-waste Dismantling and Recycling Processes	XIE Dan-ping, HUANG Zhong-hui, LIU Wang, <i>et al.</i> (150)
Nonlinear Response Relationship Between Ozone and Precursor Emissions in the Pearl River Delta Region Under Different Transmission Channels	WU Yong-kang, CHEN Wei-hua, YAN Feng-hua, <i>et al.</i> (160)
Characteristics of Ozone Pollution and Influencing Factors in Urban and Suburban Areas in Zibo	WANG Yu-yan, YANG Wen, WANG Xiu-yan, <i>et al.</i> (170)
Pollution Characteristics and Health Risk of Heavy Metals in Fugitive Dust Around Zhaotong City	PANG Xiao-chen, HAN Xin-yu, SHI Jian-wu, <i>et al.</i> (180)
Characteristics of Microplastic Present in Urban Road Dust	FANG Qin, NIU Si-ping, CHEN Yu-dong, <i>et al.</i> (189)
Stable Isotopes of Precipitation in the Eastern Tarim River Basin and Water Vapor Sources	SONG Yang, WANG Sheng-jie, ZHANG Ming-jun, <i>et al.</i> (199)
Characteristics and Risk Assessment of Antibiotic Contamination in Chishui River Basin, Guizhou Province, China	WU Tian-yu, LI Jiang, YANG Ai-jiang, <i>et al.</i> (210)
Hydrochemical Characteristics and Controlling Factors of Surface Water and Groundwater in Wuding River Basin	LI Shu-jian, HAN Xiao, WANG Wen-hui, <i>et al.</i> (220)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Nutrients and Heavy Metals in Sediments of the Fuhe River Influenced Area, Baiyangdian Lake	CHEN Xing-hong, LI Li-qing, ZHANG Mei-yi, <i>et al.</i> (230)
Occurrence Characteristics of Microplastics in Mangrove Sediments in the Jiulong River Estuary and the Association with Heavy Metals	LIU Chang-jun, LUO Zhuan-xi, YAN Yu, <i>et al.</i> (239)
Quantitative Analysis of the Correlation Between Macroenthos Community and Water Environmental Factors and Aquatic Ecosystem Health Assessment in the North Canal River Basin of Beijing	HU Xiao-hong, ZUO De-peng, LIU Bo, <i>et al.</i> (247)
Analysis on the Spatial Variability Mechanism of the Characteristic Water Quality Factors of Urban River Channel Reclaimed Water	LIU Quan-zhong, PENG Ke, SU Zhen-hua, <i>et al.</i> (256)
DOM Characteristics Analysis of Surface Sediment-overlying Water in Suzhou Landscape River Course	LI Chao-nan, HE Jie, ZHU Xue-hui, <i>et al.</i> (267)
Distribution of Typical Pollutants from Rainwater Sewer Sediments in Suzhou City	YE Rong, SHENG Ming-jun, JIANG Yong-bo, <i>et al.</i> (277)
Persistent Inhibition of Ammonium Released from Contaminated Sediments Through a Modified Zeolite and Biofilm System Enhanced by Signaling Molecules	XU Jin-lan, XU Yang, LI Xiu-min, <i>et al.</i> (285)
Effects of the Three Gorges Reservoir Operation on Vertical Distribution of Chlorophyll a and Environmental Factors in Tributaries	TIAN Pan, LI Ya-li, LI Ying-jie, <i>et al.</i> (295)
Characteristic Analysis of <i>nirS</i> Denitrifying Bacterial Community in Lijiahe Reservoir During Stratification	LIANG Wei-guang, HUANG Ting-lin, ZHANG Hai-han, <i>et al.</i> (306)
Spatial and Temporal Distribution of Aerobic Denitrification Bacterial Community in Sediments of Gangan Reservoir	ZHANG Zi-wei, CHEN Zhao-ying, ZHANG Tian-na, <i>et al.</i> (314)
Distribution Characteristics and Health Risk Assessment of Metal Elements for Groundwater in the Ningxia Region of China	WANG Xiao-dong, TIAN Wei, ZHANG Xue-yan (329)
Geochemical Characteristics and Driving Factors of High-Iodine Groundwater in Rapidly Urbanized Delta Areas: A Case Study of the Pearl River Delta	LU Xiao-li, LIU Jing-tao, HAN Zhan-tao, <i>et al.</i> (339)
Multimedia Distribution Characteristics and Risk Assessment of 22 PPCPs in the Water Environment of Qingpu District, Yangtze River Delta Demonstration Area	ZHANG Zhi-bo, DUAN Yan-ping, SHEN Jia-hao, <i>et al.</i> (349)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of 209 Polychlorinated Biphenyls in Dongting Lake and the Inflow Rivers	HUANG Zhi-feng, ZHENG Bing-hui, YIN Da-qiang, <i>et al.</i> (363)
Estimation of Nitrous Oxide Emission from River System Based on Water Discharge and Dissolved Nitrous Oxide Concentration	LI Bing-qing, HU Min-peng, WANG Ming-feng, <i>et al.</i> (369)
Comparison Between Tributary and Main Stream and Preliminary Influence Mechanism of CO ₂ Flux Across Water-air Interface in Wanzhou in the Three Gorges Reservoir Area	QIN Yu, OUYANG Chang-yue, WANG Yu-xiao, <i>et al.</i> (377)
Preparation of Functional Attapulgite Composite and Its Adsorption Behaviors for Congo Red	LIAO Xiao-feng, ZHONG Jing-ping, CHEN Yun-nen, <i>et al.</i> (387)
Adsorption Characteristics and Long-term Effectiveness Evaluation of Iron-nitrogen Co-doped Biochar for Secondary Water-Soluble Organic Matter	WU Chen-xi, XU Lu, JIN Xin, <i>et al.</i> (398)
Nitritation Performance of Zeolite Moving Bed Biofilm Reactor for Ammonium Wastewater Treatment	DENG Cui-lan, GUO Lu, WANG Xiao-jun, <i>et al.</i> (409)
Effect of Temperature on ANAMMOX Process in Sequencing Batch Biofilm Reactors; Nitrogen Removal Performance and Bacterial Community	WU Shan, WANG Shu-ya, WANG Fen, <i>et al.</i> (416)
Effects of Carriers on ANAMMOX Sludge Activity Recovery and Microbial Flora Characteristics	LUO Jing-wen, YANG Jin-jin, LI Shao-kang, <i>et al.</i> (424)
Spatial Distribution and Source Analysis of Soil Heavy Metals in a Small Watershed in the Mountainous Area of Southern Ningxia Based on PMF Model	XIA Zi-shu, BAI Yi-ru, WANG You-qi, <i>et al.</i> (432)
Heavy Metal Concentration Characteristics and Health Risks of Farmland Soils in Typical Pyrite Mining Area of the Central Zhejiang Province, China	CHENG Xiao-meng, SUN Bin-bin, WU Chao, <i>et al.</i> (442)
Risk Zoning of Heavy Metals in a Peri-urban Area in the Black Soil Farmland Based on Agricultural Products	WU Song-ze, WANG Dong-yan, LI Wen-bo, <i>et al.</i> (454)
Main Control Factors of Cadmium Content in Rice in Carbonate Rock Region of Guangxi Based on the DGT Technique	SONG Bo, XIAO Nai-chuan, MA Li-jun, <i>et al.</i> (463)
Inhibitory Effects of Soil Amendment Coupled with Water Management on the Accumulation of Cd and Pb in Double-Cropping Rice	LI Lin-feng, WANG Yan-hong, LI Yi-chun, <i>et al.</i> (472)
Characteristics and Health Risk Assessment of Cadmium, Lead, and Arsenic Accumulation in Leafy Vegetables Planted in a Greenhouse	DONG Jun-wen, GAO Pei-pe, SUN Hong-xin, <i>et al.</i> (481)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Polychlorinated Biphenyls in E-waste Disposal Residue-Soil-Vegetable	ZHANG Ya-ping, LU Zhan-lu, WANG Xian-jiang, <i>et al.</i> (490)
Soil-crop Distribution and Health Risk Assessment of Organochlorine Pesticides on Typical Agricultural Land in Southern Leizhou Peninsula	LIANG Xiao-hui, XIE Qi-lai, ZHENG Qian, <i>et al.</i> (500)
Effects of Heavy Metal Content on Fungal Community Structure in Urban Soil	GUO Da-lu, ZHANG Jian, SHEN Si, <i>et al.</i> (510)
Effects of Long-term Fertilization on Soil Nutrient Characteristics and Microbial Resource Restrictions in a Terrace on the Loess Plateau	WU Chun-xiao, GAO Xiao-feng, YAN Ben-shuai, <i>et al.</i> (521)
Microbial Composition and Diversity in Soil of <i>Torreya grandis</i> cv. <i>Merrillii</i> Relative to Different Cultivation Years After Land Use Conversion	JIANG Ni-wen, LIANG Chen-fei, ZHANG Yong, <i>et al.</i> (530)
Effect of Combined Application of Biochar with Chemical Fertilizer and Organic Fertilizer on Soil Phosphatase Activity and Microbial Community	YANG Wen-na, YU Luo, LUO Dong-hai, <i>et al.</i> (540)
Extracellular Enzyme Stoichiometry and Microbial Metabolism Limitation During Vegetation Restoration Process in the Middle of the Qinling Mountains, China	XUE Yue, KANG Hai-bin, YANG Hang, <i>et al.</i> (550)
Effects of Biodegradable Film Raw Material Particles on Soil Properties, Wheat Growth, and Nutrient Absorption and Transportation	MIN Wen-hao, WANG Chun-li, WANG Li-wei, <i>et al.</i> (560)
Effects of Stalk Incorporation on Soil Carbon Sequestration, Nitrous Oxide Emissions, and Global Warming Potential of a Winter Wheat-Summer Maize Field in Guanzhong Plain	WAN Xiao-nan, ZHAO Ke-yue, WU Xiong-wei, <i>et al.</i> (569)