

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第10期

Vol.37 No.10

2016

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

北京地区空气重污染下雾凇和偏东风对 PM_{2.5} 清除作用 孙兆彬, 廖晓农, 王占山, 李梓铭, 赵秀娟, 花丛 (3679)

降雨对不同粒径气溶胶粒子碰撞清除能力 董群, 赵普生, 陈一娜 (3686)

北京冬季雾霾频发期 VOCs 源解析及健康风险评价 刘丹, 解强, 张鑫, 王海林, 闫志勇, 杨宏伟, 郝郑平 (3693)

浙江省制鞋行业挥发性有机物污染特征及其排放系数 徐志荣, 姚轶, 蔡卫丹, 李嫣, 许明珠, 王浙明 (3702)

2014 年 APEC 期间北京市 PM₁₀ 和 PM_{2.5} 氧化性损伤能力研究 郭茜, 邵龙义, 王文华, 侯聪, 赵承美, 幸娇萍, 马施民 (3708)

武汉市洪山区夏季 PM_{2.5} 浓度、水溶性离子与 PAHs 成分特征及来源分析 孙焰, 祁士华, 张莉, 邢新丽, 杨丹, 胡天鹏, 翟程凯 (3714)

基于快速聚类方法分析常州市区 PM_{2.5} 的统计特性 王振, 余益军, 徐圃青, 李艳萍, 夏京, 殷磊 (3723)

PM_{2.5} 在线水溶性离子与滤膜采集-实验室检测的比对分析 杨懂艳, 刘保献, 石爱军, 张大伟, 丁萌萌, 周健楠, 富佳明, 景宽 (3730)

树木模拟燃烧排放烟尘中水溶性离子的组成 刘刚, 黄柯, 李久海, 徐慧 (3737)

轻型汽油车排放颗粒物数浓度和粒径分布特征 樊筱筱, 蒋靖坤, 张强, 李振华, 何立强, 吴焯, 胡京南, 郝吉明 (3743)

基于台架测试的我国船用柴油机废气排放因子 邢辉, 段树林, 黄连忠, 韩志涛, 刘勤安 (3750)

西安城区地表灰尘中邻苯二甲酸酯分布、来源及人群暴露 张文娟, 王利军, 王丽, 史兴民, 卢新卫 (3758)

生活垃圾焚烧厂垃圾的汞含量与汞排放特征研究 段振亚, 苏海涛, 王凤阳, 李智坚, 李韶璞, 王书肖 (3766)

三峡库区消落带土壤中硫酸盐还原菌对汞甲基化作用的影响 陈瑞, 陈华, 王定勇, 向玉萍, 申鸿 (3774)

城市化进程对地下河中溶解态正构烷烃来源的影响 廖昱, 孙玉川, 沈立成, 梁作兵, 王尊波 (3781)

基于 PMF 模型的长江流域水体中多环芳烃来源解析及生态风险评价 王成龙, 邹欣庆, 赵一飞, 李宝杰 (3789)

贡嘎山地区地表水化学特征及水环境质量评价 何晓丽, 吴艳宏, 周俊, 邴海健 (3798)

多元数理统计法研究太子河本溪城市段水体 DOM 紫外光谱特征 钱锋, 吴婕贻, 于会彬, 宋永会, 张美, 孔令昊, 何孟常 (3806)

地下水中溶解性有机物的垂直分布特征及成因 何小松, 张慧, 黄彩红, 李敏, 高如泰, 李丹, 席北斗 (3813)

昆明市不同功能区排水管道沉积物性质 常海东, 金鹏康, 付博文, 李雪兵, 贾锐珂 (3821)

滇池水生植物分布对沉积物间隙水磷浓度的影响 丁帅, 王圣瑞, 张蕊, 肖焱波, 焦立新, 李乐, 王忠诚, 尹诗诗 (3828)

紫色母岩覆盖层控制底泥磷释放的效果及机制 黄雪娇, 石纹豪, 倪九派, 李振轮 (3835)

排水循环灌溉下稻田磷素时空分布特征 焦平金, 许迪, 朱建强, 于颖多 (3842)

快速高效去除微囊藻的 GO/QPEI 复合纳米材料 李洁, 肖琳 (3850)

一体式生物净化-沉淀池对微污染水体污染物的强化去除性能 王文东, 刘荟, 马翠, 韩雨, 常妮妮 (3858)

生物粉末活性炭-超滤组合工艺对微污染水源水中嗅味物质的去除效能及其微生物特性 宣雍祺, 周丽, 邓慧萍, 蔡宙, 李大鹏, 刘刚 (3864)

聚硅酸对不同形态铝沉积行为的影响 赵园园, 张玥, 李素英, 石宝友, 李贵伟, 孙改清 (3870)

典型南方水源氨基酸浓度变化与去除 刘伟, 蔡广强, 卢小艳, 刘丽君, 张金松, 刘嘉祺, 曲莹 (3877)

O₃/UV 降解含氮杂环化合物喹啉 陈傲蕾, 常凤民, 汪翠萍, 徐恒, 吴静, 左剑恶, 王凯军 (3884)

蒽醌-2-磺酸钠促进 *Klebsiella oxytoca* GS-4-08 脱色产氢机制与产能分析 胡金梅, 虞磊, 黄天寅 (3891)

2-丁烯醛生产废水中溶解性有机物的分级解析 孙秀梅, 宋广清, 席宏波, 周岳溪, 牛远方 (3899)

不同缺氧段硝酸盐氮浓度条件下连续流单污泥污水处理系统 PHA、TP 代谢 王晓玲, 员东丹, 白莉, 李紫棋, 余勇, 秦旭东, 张晓旭, 赵可 (3906)

长江口邻近海域沉积物中厌氧氨氧化细菌分布特征研究 付璐璐, 甄毓, 贺惠, 张玉, 米铁柱 (3914)

焦化废水活性污泥细菌菌群结构分析 蒙小俊, 李海波, 曹宏斌, 盛宇星 (3923)

黄土高原不同植被类型下土壤细菌群落特征研究 刘洋, 黄懿梅, 曾全超 (3931)

苯酚对活性污泥活性及微型动物群落结构的影响 胡小兵, 饶强, 唐素兰, 姜晶, 谢瑞桃, 郝文静, 钟梅英 (3939)

城市生活污水和生活垃圾渗滤液抗生素抗性基因污染的比较研究 黄福义, 李虎, 安新丽, 欧阳纬莹, 苏建强 (3949)

菌株 *Desulfovibrio* sp. CMX 的 DNRA 性能和影响因素 谢柄柯, 张玉, 王晓伟, 孙超越, 周集体 (3955)

生活污水灌溉对麦秸还田稻田氨挥发排放的影响 徐珊珊, 侯朋福, 范立慧, 薛利红, 杨林章, 王绍华, 李刚华 (3963)

模拟氮沉降对重庆缙云山马尾松林土壤呼吸和酶活性的季节性影响 曾清苹, 何丙辉, 李源, 夏力文, 杨龙龙, 邓雪梅, 李川 (3971)

生物炭添加和灌溉对温室番茄地土壤反硝化损失的影响 张文娟, 余冬立, Gamareldawla H. D. Agbna, 夏永秋 (3979)

土壤质地对自养固碳微生物及其同化碳的影响 王群艳, 吴小红, 祝贞科, 袁红朝, 隋方功, 葛体达, 吴金水 (3987)

土壤-作物系统中重金属元素吸收、迁移和积累过程模拟 施亚星, 吴绍华, 周生路, 王春辉, 陈浩 (3996)

组配改良剂对稻田系统 Pb、Cd 和 As 生物有效性的协同调控 王英杰, 邹佳玲, 杨文强, 周航, 廖柏寒 (4004)

几种有机物料对设施菜田土壤 Cd、Pb 生物有效性的影响 周贵宇, 姜慧敏, 杨俊诚, 张建峰, 张水勤, 梁雷 (4011)

蒙脱石对有机物料施入土壤磷形态和有效性的影响 宋贤威, 赵秀兰, 张进忠, 胡梦坤, 徐艳昭, 王明禹 (4020)

不同镉浓度及 pH 条件下纳米沸石对土壤镉形态及大白菜镉吸收的影响 秦余丽, 熊仕娟, 徐卫红, 赵婉伊, 王卫中, 陈永勤, 迟芬琳, 陈序根, 张进忠, 熊治庭, 王正银, 谢德体 (4030)

黑麦草和牵牛花对铬耐受能力和积累效果的指标表征研究 董冰冰, 陈友媛, 惠红霞, 陆维佳, 杨秀卿, 刘逸凡 (4044)

挥发性甲基硅氧烷的体外代谢行为 黎敏丹, 郑国贸, 万伟, 胡建英 (4054)

中药渣与城市污泥好氧共堆肥的效能 宿程远, 郑鹏, 阮祁华, 覃菁菁, 卢宇翔, 李俊兵 (4062)

《环境科学》征订启事 (3827) 《环境科学》征稿简则 (4053) 信息 (3736, 3930, 4043)

昆明市不同功能区排水管道沉积物性质

常海东, 金鹏康*, 付博文, 李雪兵, 贾锐珂

(西安建筑科技大学环境与市政工程学院, 西安 710055)

摘要: 为了解昆明市主城区排水管道沉积物的性质, 调研和采集了居住区、综合服务区、文教区、商业区等不同功能区的排水管道沉积物, 分析了沉积物的粒径、密度、有机质(VSS/TSS)和污染物含量等指标, 结果表明各功能区沉积物理化性质存在明显差异, 粒径大小关系为商业区 > 文教区 > 居住区 > 综合服务区, VSS/TSS 的关系为居住区 > 文教区 > 商业区 > 综合服务区, 与沉积物干密度呈负相关, 与含水率呈正相关; 对于 COD 而言, 居住区 > 文教区 > 综合服务区 > 商业区, TN 的关系为居住区 > 文教区 > 商业区 > 综合服务区, TP 呈现居住区 > 综合服务区 > 文教区 > 商业区的关系, 由支管至主干管, 沉积物中 COD、TN 无明显规律, TP 略有减小, 且 TP 更易赋存在小颗粒沉积物上; 对于重金属而言, 商业区污染高于其他 3 区, 沉积物中 Cu、Zn、Pb 和 Cd 这 4 种重金属含量分别是背景值的 2.2、4.4、2.5 和 8.6 倍, 建议优先控制 Cd 和 Zn。

关键词: 功能区; 排水管道; 沉积物; 重金属; 粒径

中图分类号: X52 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)10-3821-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.2016.10.020

Sediment Characteristics of Sewer in Different Functional Areas of Kunming

CHANG Hai-dong, JIN Peng-kang*, FU Bo-wen, LI Xue-bing, JIA Rui-ke

(School of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

Abstract: The problem of sediment deposition in urban sewer network in different levels, will not only reduce the sewer flow ability, but also release pollutants and generate secondary pollution. The impact of secondary pollution is more serious in the study area, Kunming, because of the combined sewer overflow in rainy season. In order to obtain the characteristics of the sewer sediments in Kunming, the sewer sediments from residential area, service area, cultural district, and business district were investigated and collected. The particle size, density, organic matter (VSS/TSS) and pollutant content of the sediments were analyzed in this study. The results showed that there were different characteristics for the sediments from different areas. The size of the sediments exhibited business district > cultural district > residential area > service area, and the D_{50} was concentrated in the 20 to 100 μm except the business district. As for VSS/TSS, the order was residential area > cultural district > business district > service area. It was negatively correlated with the dry density with the correlation index of $R^2 = 0.9827$ and positively correlated with the water content. The contents of sediments showed significant differences in different functional areas. The size of COD presented residential area > cultural district > service area > business district, and the size of TN followed residential area > cultural district > business district > service area. As for TP, it exhibited residential area > service area > cultural district > business district. The COD, TN and TP were proportional to the population density of the area and TP was greatly influenced by sediment particle size. From the branch into the Sub-main sewer, COD and TN were irregular, and TP decreased slightly. TP mainly existed as particulate and was more likely to deposit onto the small particle. As for TN, there was no obvious rule about its distribution in different particle size sections. The pollution load was generally on the high side in Kunming. The content of heavy metals in business district was the highest among all functional areas, and the concentrations of Cu, Zn, Pb, Cd were 284.6, 786.4, 201.2, 2.54 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ respectively. The average contents of Cu, Zn, Pb, Cd in urban area were 2.2, 4.4, 2.5, 8.6 times than the background values. It is suggested to control Cd and Zn with priority.

Key words: functional areas; sewer; sediment; heavy metals; particle size

城市排水管网是城市排水系统的重要组成部分, 具有收集、输送雨水和生活污水的功能. 现如今随着城市人口急剧增多, 社会经济的进一步发展, 城市排水管网, 尤其是老城区管网, 均出现了不同程度的淤积和堵塞^[1]. 排水管道沉积物的存在, 不仅大幅度降低了排水管道的过流能力, 还会由于污水对沉积物的冲刷, 释放污染物质, 产生二次污染^[2-4]. 而城市排水管网作为城市水体污染控制过程中的重要环节, 对控制城市水体污染物有着重要意义. 本研究区域昆明市污水收集过程中存在较多的明渠收集, 且各大污水厂出水排往滇池, 氮磷超标

极易形成恶臭水体^[5,6], 在雨季, 污水管网还存在大量的溢流情况, 严重恶化城市环境, 因此污水运输过程中沉积物造成的二次污染影响相对较大, 研究排水管网中沉积物的各项性质显得十分必要.

国外研究排水管道沉积物的性质包括密度、粒

收稿日期: 2016-01-12; 修订日期: 2016-04-29

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2012ZX07313001); 新世纪优秀人才支撑计划项目(NCET-12-1043); 陕西省创新团队项目(IRT-2013KCT-13)

作者简介: 常海东(1994~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为水与废水的深度处理技术, E-mail: 13193347077@163.com

* 通讯联系人, E-mail: pkjin@hotmail.com

径分布^[7]、pH、沉降特性^[8]、污染物^[9]含量等方面,在欧洲,排水管道沉积物的沉积速率达到 $30 \sim 50 \text{ g} \cdot (\text{m} \cdot \text{d})^{-1}$ ^[10]; 基于沉积物中重金属对生物的毒害性, Yuan 等^[11] 建立了一个模型, 利用铅作为预测重金属含量的指示物, 取得了较好的效果; Ahyerre 等^[12] 的研究发现, 暴雨径流中高达 80% 的污染负荷来源于管道沉积物的溢流排放; Bertrand-Krajewski 等^[13] 研究发现排水管道中沉积物的二次悬浮对径流中 SS 和 COD 的贡献率为 60% 左右。

目前国内关于沉积物的研究主要集中在沉积冲刷模型方面^[14], 对沉积物理化及污染性质方面的研究较少, 对不同等级管道沉积物性质和污染物在各粒径段沉积物分布的研究更是鲜见, 对此本文以中国南方城市昆明市为例, 重点研究了不同功能分区以及不同等级排水管道的沉积物性质, 以期为我国排水管网沉积物控制提供依据, 进而为昆明城市管网的管理、规划与改造奠定基础。

1 材料与方法

1.1 样品采集

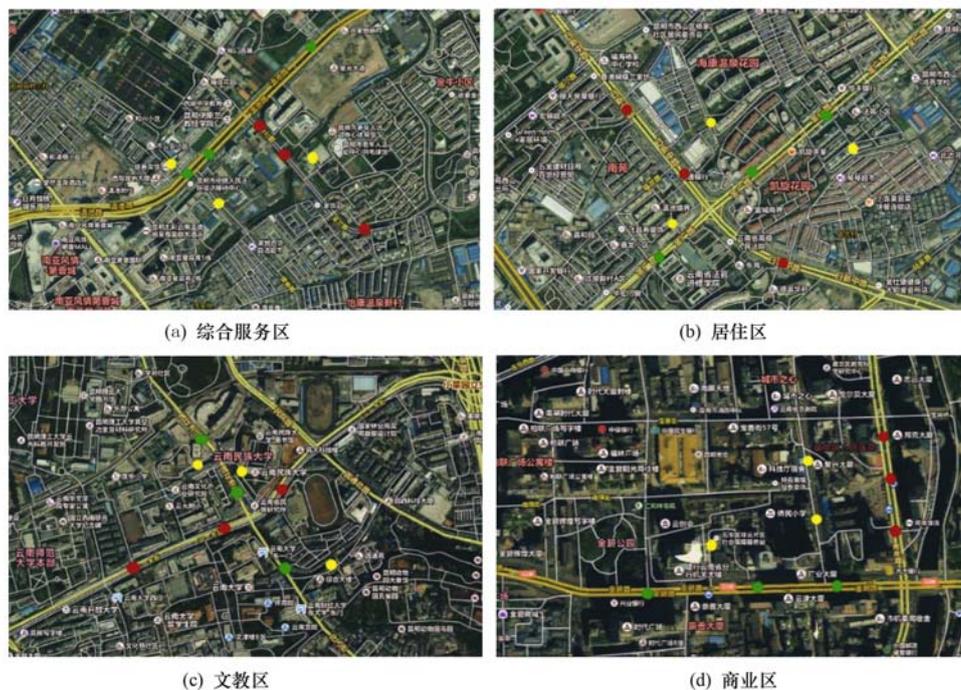
经过大量的实地调查, 在昆明市主城区选取了文教区、商业区、居民区和综合服务区 4 个典型城市功能区进行样品采集, 具体如图 1 所示, 其中文教区位于以云南大学为中心的大学城, 该区域污水主

要是周边 3 所高校的日常污水; 商业区选取在昆明市中心的金马碧鸡坊周边, 该区域交通繁忙, 人口密度大; 居民区选取在日新中路周边, 围绕凯旋花园、南苑等大型小区, 区域污水主要是几个小区的生活污水; 综合服务区位于滇池路附近区域, 周边有水星温泉、青少年及老年活动中心和省人大、法院等场所。每个功能区布设 9 个采样点, 皆为合流制且 9 个采样点所处管道分别包含 3 个主干管、3 个干管和 3 个支管。

具体的取样方法为打开检查井盖, 使用一种城市污水管道沉积物取样设备^[15], 如图 2 所示, 其中图 2(a) 是该装置结构示意图, 图 2(b) 是图 2(a) 中 A 区域的放大视图。使用该装置取管道内表层沉泥约 1 000 g, 带回实验室, 低温保存并及时处理分析。

1.2 测试方法

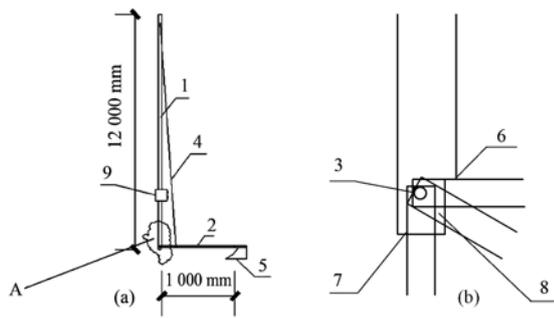
粒径分布采用马尔文 2000 激光粒度仪进行测量; 干密度测定采用比重瓶法; 含水率测定采用重量法; 总固体质量 (total sediment, TS) 在 103°C 下烘至恒重测得, 沉积物在马弗炉中 600°C 烧至恒重的质量即为不可挥发性固体质量 (non-volatile sediment, NVS), 挥发性固体质量 (volatile sediment, VS) 为 TS 和 NVS 之差。化学需氧量 (COD) 采用重铬酸钾法测定; 总氮 (TN) 采用碱性过硫酸钾消解法; 总磷 (TP) 采用钼锑抗分光光度法^[16]; 重金属



红色标记为主干管; 绿色标记为干管; 黄色标记为支管

图 1 不同功能区采样点布设

Fig. 1 Layout of sampling points in different functional areas



1. 竖杆; 2. 横杆; 3. 圆柱销; 4. 牵引绳; 5. 泥铲; 6. 水平限位挡板; 7. 竖直限位挡板; 8. 方形缺口; 9. 摄像设备

图2 一种城市污水管道沉积物取样设备示意

Fig. 2 Diagram of sewer sediment sampler

(Cu、Zn、Ni、Pb) 采用常压消解后原子吸收光度法. 为剔除其他因素对实验的干扰, 每个采样点的样品均设置 3 组平行测定, 最终取平均值作为有效数据.

1.3 数据分析

单项累积指数(I_i)的计算式为:

$$I_i = \frac{C_i}{C_{oi}}$$

式中, C_i 为管道沉积物中污染物实测值, $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$;

C_{oi} 为背景值^[17], $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; I_i 为单项累积指数.

内梅罗综合指数的计算式为:

$$I = \sqrt{\frac{1}{2} \left[\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n I_i \right)^2 + \left(\frac{C_i}{C_{oi \max}} \right)^2 \right]}$$

式中, I_i 为单项累积指数; C_i 、 C_{oi} 分别为沉积物中 i 指标的测定值和背景值; I 为内梅罗综合指数; $\left(\frac{C_i}{C_{oi}} \right)$ 为各单项污染指数的最大值.

2 结果与讨论

2.1 不同功能区管道沉积物的基本性质

不同功能区沉积物基本性质见表 1, 其中 D_{10} 、 D_{50} 、 D_{90} 表示从最大粒径开始算到这些粒径值的颗粒(干重计)含量分别为 10%、50%、90%, 从中知, 不同功能区沉积物干密度存在明显差异, 表现为商业区 > 综合服务区 > 文教区 > 居住区, 在各功能区内部主干管和干管的沉积物密度明显大于支管, 这是由于商业区和综合服务区附近有建筑工地, 建筑扬尘频繁, 大量无机颗粒被带入管网所致, 同样在各功能区内部, 主干管与干管大多分布在交通主干道, 也存在上述因素的影响, 导致沉积物干密度大于支管.

表 1 不同功能区沉积物基本性质

Table 1 Basic properties of sediments in different functional areas

功能区	管道等级	干密度 / $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	含水率 /%	VSS/TSS /%	粒度分布/ μm		
					D_{10}	D_{50}	D_{90}
文教区	主干管	1.801	66.21	20.16	17.61	96.35	441.60
	干管	1.936	56.48	17.03	11.13	76.24	436.05
	支管	1.727	55.35	22.26	7.06	41.23	291.26
商业区	主干管	2.075	36.62	15.60	35.01	394.25	742.05
	干管	2.051	27.52	16.06	26.25	201.63	499.16
	支管	2.237	41.08	11.35	10.28	91.65	452.71
居住区	主干管	1.631	72.07	26.04	6.01	36.03	161.37
	干管	1.736	73.52	22.15	4.95	27.51	169.14
	支管	1.884	71.54	18.09	4.36	23.35	141.05
综合服务区	主干管	2.359	57.53	7.19	3.27	16.29	67.25
	干管	2.417	48.60	7.01	3.06	21.26	79.30
	支管	2.336	50.09	7.31	3.71	24.30	87.56

各功能区之间 VSS/TSS 的关系为居住区 > 文教区 > 商业区 > 综合服务区, 与国内其他研究结果基本一致^[18], 可见生活污水中有机质含量较高且易于沉积. 通过对有机质 γ (以 VSS/TSS 表征) 和干密度 ρ 进行线性分析, 得出 $\rho = -4.1897\gamma + 2.6801$ ($R^2 = 0.9827$), 说明有机质含量与沉积物干密度呈负相关. 同时, 各功能区之间含水率大小关系为居住区 > 文教区 > 综合服务区 > 商业区, 与有机质含量大小关系基本一致, 可见有机质大多与水结合赋

存在沉积物当中.

不同功能区沉积物粒径空间差异性明显, 大小关系为商业区 > 文教区 > 居住区 > 综合服务区, 其中除商业区外其他功能区 D_{50} 多集中在 20 ~ 100 μm , 这是因为商业区交通繁忙, 沥青路面颗粒物较多, 道路清扫更为频繁, 大粒径颗粒物随降雨或道路清扫被带入检查井. 沉积物粒径分布除受路面交通状况、日常清扫影响之外, 还与降雨的雨强、周围地表风速、前期晴天数等因素有关^[19].

2.2 不同功能区管道沉积物常规污染物含量

不同功能区管道沉积物常规污染物含量见图 3。可以看出,不同功能区之间 COD、TN 和 TP 含量存在明显差异,其中 COD 差异表现为居住区 > 文教区 > 综合服务区 > 商业区,与各功能区之间有机质含量大小关系相同,居住区和文教区有机物含量高与该区域污水主要来自于生活污水有关^[20,21]。对于 TN,综合服务区含量明显低于其他 3 个功能区,研究表明城市污水管网污水中氮主要以有机氮形式存在^[22],且管网中超过绝大多数氮元素由占污水总量不足 1% 的尿液贡献^[23,24],可见管网中氮浓度与该区域人口密度呈正相关,而综合服务区较其他三区人口密度最小,沉积物来源以道路扬尘和降雨径流冲刷为主,无机成分较多,因此沉积物中氮的含量较少。各功能区 TP 的含量大小关系表现为居住区 > 综合服务区 > 文教区 > 商业区,沉积物中 TP 的含量一般受两个因素的影响:管道污水中 TP 含量与沉积物颗粒粒径。综合服务区污染状况良好,但沉积物中 TP 含量高,主要是因为该区域沉积物颗粒细腻,粒径较小,利于 TP 吸附,商业区则因为沉积物颗粒粒径较大,TP 吸附较少。除 TP 受沉积物粒径影响,在综合服务区和商业区之间出现变化以外,各功能区之间常规污染物含量的大小关系基本与功能区之间有机质含量大小关系一致。对比国内其他城市的研究^[1,18],昆明市老城区城市污水管网沉积物的 3 项常规污染指标普遍较高,分析原因可能是由于昆明市老城区城市改建不够彻底,城区存在大量城中村,这些地区没有完善的生活污水收集系统,如污水管网、化粪池等,污水未经处理直接进入排水明渠及管道,致使管网中污染负荷偏高。

不同等级管道之间,沉积物的污染物含量也存在差异,其中由支管至主干管,COD、TN 无明显规律,TP 略有减小,这与氮磷在污水管网中的主要迁移形态有关,其中氮元素主要为溶解态,而磷主要为吸附颗粒态,在传输过程中更易沉积^[25]。在城市污水管网中,由支管、干管至主干管,污水流速与流量同步增大^[26],因此相比支管与干管,主干管内部的 TP 迁移效率更高,沉积较少,沉积物中磷的含量也相应较少。

不同功能区管道沉积物 TN 和 TP 在不同粒径段的分布特征见图 4,可以看出,各功能区之间的总氮粒径分布存在差异,但在每个功能区内部各粒径段的分布都较为平均,结合各功能区之间沉积物的粒径大小特征:商业区 > 文教区 > 居住区 > 综合服

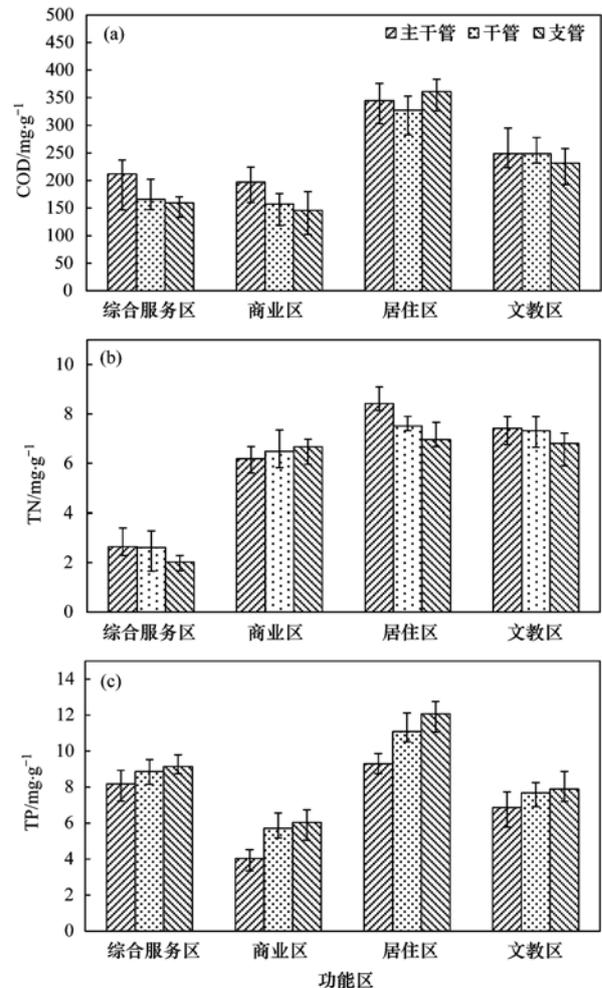


图 3 不同功能区管道沉积物污染物含量

Fig. 3 Pollutant content of sediment in different functional areas

务区,可以得出 TN 的分布并不集中于该功能区的粒径集中段,而是受其他的因素影响^[27,28],可能与该功能区的污水水质有关。而 TP 在不同功能区的粒径分布虽然略有差异,但大多分布在 37 ~ 30 μm 之间的小颗粒有机物上,结合污水中磷主要以颗粒态存在^[29],笔者发现磷容易吸附在粒径较小的沉积物颗粒上。

2.3 不同功能区管道沉积物重金属含量

不同功能区管道沉积物重金属含量见图 5,从中可以看出,不同功能区之间重金属的含量差异较大,对不同功能区重金属污染强度的评价结果见表 2,其中重金属内梅罗指数商业区(8.20) > 居住区(8.18) > 综合服务区(6.13) > 文教区(5.07),污染强度与交通繁忙程度基本呈正相关,居住区与综合服务区受极大值 Cd 含量的影响内梅罗指数偏大,商业区沉积物重金属污染最为严重,Cu、Zn、Pb 和 Cd 这 4 种重金属含量分别为 284.6、786.4、201.2、2.54 mg·kg⁻¹,这些重金属主要来自制动器、轮胎、

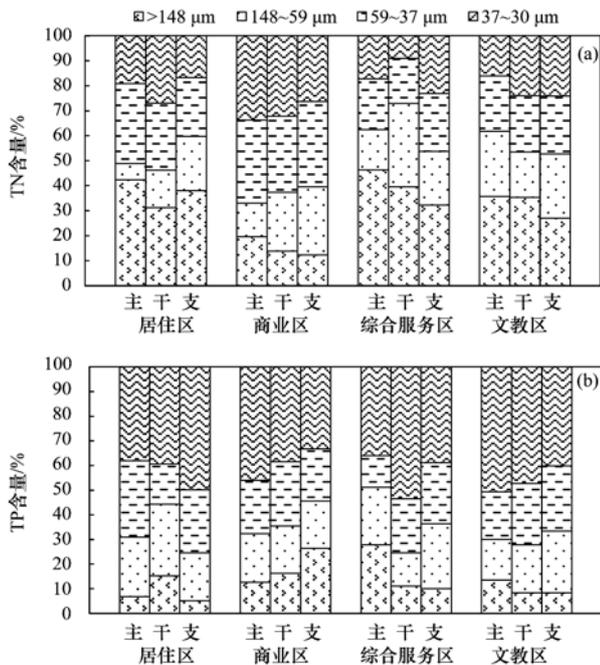


图 4 TN、TP 不同粒径段分布特征

Fig. 4 Distribution characteristics of different particle sizes of TN and TP

车体,燃料及润滑油等^[30],相关研究表明,汽车尾气中的重金属通过吸附到空气中的颗粒物上,沉积下来,再通过道路浇洒、下雨等形成地面径流,汇入污水管道,造成重金属的富集^[31].除商业区之外,剩下3个区域沉积物重金属含量与其有机质含量趋势基本一致,表明有机质对重金属具有较强的络合能力^[32],重金属以不同形式进入或吸附在有机颗粒上,与有机物络合生成复杂的络合态金属,这种络合态金属绝大多数被固定在沉积物中,较稳定,不易释放^[33,34],可见管道沉积物重金属含量主要受汇水区域交通状况和沉积物有机物含量影响.

表 2 排水管道沉积物重金属含量及污染指数

Table 2 Content and pollution index of heavy metals in sediment of sewer

项目	总铅 /mg·kg ⁻¹	总镉 /mg·kg ⁻¹	总锌 /mg·kg ⁻¹	总铜 /mg·kg ⁻¹	内梅罗 指数 I
综合服务区	36.4	2.21	101.2	81.4	6.13
商业区	201.2	2.54	786.4	284.6	8.20
居住区	89.7	2.86	357.2	136.3	8.18
文教区	81.2	1.71	326.5	109.7	5.07
主城区背景值	41	0.27	90	69	—
平均累计指数	2.5	8.6	4.4	2.2	—

Pb、Zn 与 Cu 在不同功能区排水管道沉积物的含量分布规律为商业区 > 居住区 > 文教区 > 综合服务区,说明 Pb、Zn 与 Cu 污染来源可能一致,主要来自道路上的汽车.居住区的 Cd 浓度最高,相关研

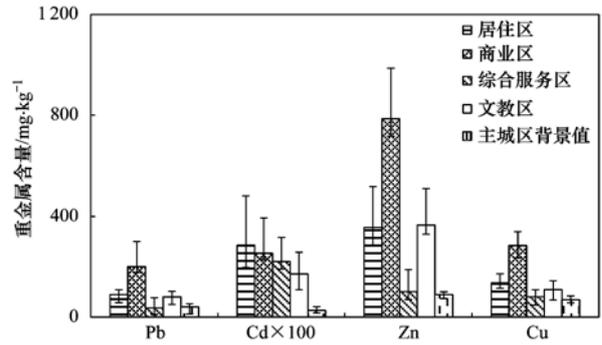


图 5 不同功能区 4 种重金属含量

Fig. 5 Content of four kinds of heavy metals in different functional areas

究显示地下水入渗是 Cd 的补充来源^[35],这在一定程度上表明,居住区排水管道的破损状况更为严重.与主城区背景值相比^[17],Cu、Zn、Pb 和 Cd 的含量分别是背景值的 2.2、4.4、2.5、8.6 倍,Cd 的污染程度最高,其次为 Zn,建议优先控制.

表 3 对比了昆明与北京^[36]、重庆^[18]两市之间排水管道沉积物重金属含量,可以看出这 3 座城市排水管道中沉积物的重金属含量存在明显差异,对于 Pb,北京与重庆较为接近且高于昆明,这与北京重庆两市的汽车保有量远高于昆明有一定关系;Cd 表现为昆明高于北京高于重庆,这表明昆明市老城区管道破损更为严重,存在较多的地下水入渗情况,应当予以重视;Zn 和 Cu 大小关系为:北京远高于昆明与重庆,中国北方城市大气污染普遍严重于南方城市,这是导致北京市重金属污染更为严重的原因之一.总体而言,区域重金属的污染状况主要受城市工业、交通状况和大气降尘的影响,而重庆市管道沉积物总体污染程度低于昆明市,表现出与该市交通工业状况不相符的情况,分析有以下两个原因,一是因为重庆市地形特殊,管网高差较大,污水流速快,重金属悬浮再释放更剧烈^[37];二是因为重庆市地处我国的重酸雨区,而重金属在酸性情况下更易释放^[38].由此可见区域沉积物重金属污染状况还与该区域的地形和气候条件有关.

表 3 不同城市管道沉积物重金属含量对比

Table 3 Content of heavy metals in sewer sediments of different cities

项目	总铅 /mg·kg ⁻¹	总镉 /mg·kg ⁻¹	总锌 /mg·kg ⁻¹	总铜 /mg·kg ⁻¹
北京	154	1.8	2 079	479
重庆	151	0.77	271	77.5
昆明	101.9	2.3	402.6	152.6

3 结论

(1)各功能区沉积物粒径空间差异性明显,表

现为商业区 > 文教区 > 居住区 > 综合服务区, 粒径大小受功能区环境影响; 各功能区之间 VSS/TSS 的关系为居住区 > 文教区 > 商业区 > 综合服务区, 与沉积物干密度呈负相关, 与含水率呈正相关, 且有机质含量与区域废水主要来源密切相关。

(2) 各功能区之间常规污染物含量表现为, COD: 居住区 > 文教区 > 综合服务区 > 商业区; TN: 居住区 > 文教区 > 商业区 > 综合服务区; TP: 居住区 > 综合服务区 > 文教区 > 商业区。除 TP 受沉积物粒径影响, 在综合服务区和商业区之间出现变化以外, 各功能区之间常规污染物含量的大小关系基本与功能区之间有机质含量大小关系一致。由支管至主干管, COD、TN 无明显规律, TP 略有减小。在不同粒径沉积物之间, TN 分布无明显规律, 而 TP 更易赋存在小颗粒沉积物上。

(3) 各功能区重金属污染程度为商业区 > 居住区 > 综合服务区 > 文教区; 与主城区背景值相比, Cu、Zn、Pb 和 Cd 这 4 种金属含量分别是背景值的 2.2、4.4、2.5 和 8.6 倍, Cd 的污染程度最高, 其次为 Zn, 建议优先控制。

参考文献:

- [1] 杨云安, 管运涛, 许光明, 等. 老城区不同功能区排水管道沉积物性质研究[J]. 给水排水, 2011, **37**(9): 159-162.
- [2] 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.
- [3] 揣小明, 杨柳燕, 程书波, 等. 太湖和呼伦湖沉积物对磷的吸附特征及影响因素[J]. 环境科学, 2014, **35**(3): 951-957.
- [4] 卢少勇, 远野, 金相灿, 等. 7 条环太湖河流沉积物氮含量沿程分布规律[J]. 环境科学, 2012, **33**(5): 1497-1502.
- [5] Toothman B R, Cahoon L B, Mallin M A. Phosphorus and carbohydrate limitation of fecal coliform and fecal enterococcus within tidal creek sediments[J]. *Hydrobiologia*, 2009, **636**(1): 401-412.
- [6] Chuai X M, Ding W, Chen X F, *et al.* Phosphorus release from cyanobacterial blooms in Meiliang Bay of Lake Taihu, China[J]. *Ecological Engineering*, 2011, **37**(6): 842-849.
- [7] Sakrabani R, Vollertsen J, Ashley R M, *et al.* Biodegradability of organic matter associated with sewer sediments during first flush[J]. *Science of the Total Environment*, 2009, **407**(8): 2989-2995.
- [8] 李海燕, 徐尚玲, 马玲. 合流制排水管道沉积物的研究进展[J]. 安全与环境学报, 2013, **13**(6): 90-95.
- [9] Gent R, Crabtree B, Ashley R. A review of model development based on sewer sediments research in the UK[J]. *Water Science and Technology*, 1996, **33**(9): 1-7.
- [10] 高原, 王红武, 张善发, 等. 合流制排水管道沉积物及其模型研究进展[J]. 中国给水排水, 2010, **26**(2): 15-18, 27.
- [11] Yuan Y, Hall K, Oldham C. A preliminary model for predicting heavy metal contaminant loading from an urban catchment[J]. *The Science of the Total Environment*, 2001, **266**(1-3): 299-307.
- [12] Ahyerre M, Chebbo G. Identification of in-sewer sources of organic solids contributing to combined sewer overflows [J]. *Environmental Technology*, 2002, **23**(9): 1063-1073.
- [13] 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 and Technology*, 2006, **54**(6-7): 109-117.
- [14] 蒋隽睿. 排水管道内沉积物沉积模拟与分析研究[J]. 中国市政工程, 2014, (2): 35-37, 41.
- [15] 金鹏康, 金鑫, 王宝宝, 等. 一种城市污水管道沉积物取样设备[P]. 中国专利: CN 102937536A, 2103-02-20.
- [16] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. (第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [17] 成杭新, 李括, 李敏, 等. 中国城市土壤化学元素的背景值与基准值[J]. 地学前缘, 2014, **21**(3): 265-306.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] 朱永明. 合流制排水管道沉积物调查研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2011.
- [21] 刘志长. 合流制排水管道沉积物的沉积状况及控制技术研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2011.
- [22] 李海燕, 崔爽, 黄延, 等. 管道沉积物氮及有机物污染特性研究进展[J]. 水利水电科技进展, 2014, **34**(5): 80-85.
- [23] Maurer M, Pronk W, Larsen T A. Treatment processes for source-separated urine [J]. *Water Research*, 2006, **40**(17): 3151-3166.
- [24] Wilsenach J A, Van Loosdrecht M C M. Effects of separate urine collection on advanced nutrient removal processes [J]. *Environmental Science & Technology*, 2004, **38**(4): 1208-1215.
- [25] 王书敏, 何强, 张峻华, 等. 绿色屋顶径流氮磷浓度分布及赋存形态[J]. 生态学报, 2012, **32**(12): 3691-3697.
- [26] 高明, 蔡增基. 管道内污水两相流临界流速浅析[J]. 工程建设与设计, 2006, (2): 44-46.
- [27] 陈红, 卓琼芳, 许振成, 等. 排水管道沉积物氮释放特性的研究[J]. 环境科学, 2015, **36**(8): 2918-2925.
- [28] Fang H W, Chen M H, Chen Z H, *et al.* Effects of sediment particle morphology on adsorption of phosphorus elements [J]. *International Journal of Sediment Research*, 2013, **28**(2): 246-253.
- [29] 李海燕, 李明怡, 崔爽. 流速对雨水管道中沉积物-水界面磷的释放及其释放速率的影响[J]. 环境化学, 2013, **32**(6): 1056-1061.
- [30] 龙永珍, 邹海洋, 戴塔根. 长株潭市区近地表灰尘中重金属分布污染研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2010, **41**(4): 1633-1638.
- [31] Al-Chalabi A S, Hawker D. Retention and exchange behaviour of vehicular lead in street dusts from major roads[J]. *Science of the Total Environment*, 1996, **187**(2): 105-119.
- [32] 李飞, 徐敏. 海州湾表层沉积物重金属的来源特征及风险评价[J]. 环境科学, 2014, **35**(3): 1035-1040.
- [33] de Miguel E, Llamas J F, Chacón E, *et al.* Origin and patterns of distribution of trace elements in street dust; unleaded petrol

- and urban lead[J]. *Atmospheric Environment*, 1997, **31**(17): 2733-2740.
- [34] 叶宏萌, 袁旭音, 赵静. 铜陵矿区河流沉积物重金属的迁移及环境效应[J]. *中国环境科学*, 2012, **32**(10): 1853-1859.
- [35] Houhou J, Lartiges B S, Montarges-Pelletier E, *et al.* Sources, nature, and fate of heavy metal-bearing particles in the sewer system[J]. *Science of the Total Environment*, 2009, **407**(23): 6052-6062.
- [36] 李海燕, 黄延, 王崇臣. 北京市西城区雨水管道沉积物中重金属特征[J]. *环境化学*, 2010, **29**(3): 416-420.
- [37] 俞慎, 历红波. 沉积物再悬浮-重金属释放机制研究进展[J]. *生态环境学报*, 2010, **19**(7): 1724-1731.
- [38] 王丽平, 章明奎. 不同来源重金属污染土壤中重金属的释放行为[J]. *环境科学研究*, 2007, **20**(4): 134-138.

欢迎订阅 2017 年《环境科学》

《环境科学》创刊于 1976 年,由中国科学院主管,中国科学院生态环境研究中心主办,是我国环境科学学科中最早创刊的学术性期刊。

《环境科学》自创刊以来,始终坚持“防治污染,改善生态,促进发展,造福人民”的宗旨,报道我国环境科学领域内具有创新性高水平,有重要意义的基础研究和应用研究成果,以及反映控制污染,清洁生产和生态环境建设等可持续发展的战略思想、理论和实用技术等。

《环境科学》在国内外公开发行人,并在国内外科技界有较大影响,被国内外一些重要检索系统收录,如美国医学索引 MEDLINE;美国化学文摘 CA;俄罗斯文摘杂志 AJ;美国生物学文摘预评 BP;美国医学索引 IM;日本科学技术情报中心数据库 JICST;英国动物学记录 ZR;剑桥科学文摘(CSA):Environmental Sciences;剑桥科学文摘(CSA):Pollution Abstracts;剑桥科学文摘(CAS):Life Sciences Abstracts 等;国内的检索系统有中国科技论文统计与引文数据库(CSTPCD);中文科技期刊数据库(维普);中国期刊全文数据库(CNKI);数字化期刊全文数据库(万方);中国科学引文数据库(CSCD);中国生物学文摘等。

全国各地邮局均可订阅,如有漏订的读者可直接与编辑部联系,办理补订手续。

《环境科学》2017 年为 16 开本,全年 12 期。

国内统一刊号:CN11-1895/X 国际标准刊号:ISSN 0250-3301

国外发行代号:M 205 国内邮发代号:2-821

编辑部地址:北京市海淀区双清路 18 号(2871 信箱) 邮编:100085

电话:010-62941102;传真:010-62849343;E-mail:hjcx@rcees.ac.cn;网址:www.hjcx.ac.cn

CONTENTS

Scavenging Effect of Rime and East Wind on PM _{2.5} Under Air Heavy Pollution in Beijing	SUN Zhao-bin, LIAO Xiao-nong, WANG Zhan-shan, <i>et al.</i> (3679)
Impact of Collision Removal of Rainfall on Aerosol Particles of Different Sizes	DONG Qun, ZHAO Pu-sheng, CHEN Yi-na (3686)
Source Apportionment and Health Risk Assessment of VOCs During the Haze Period in the Winter in Beijing	LIU Dan, XIE Qiang, ZHANG Xin, <i>et al.</i> (3693)
Pollution Characteristics and Emission Coefficient of Volatile Organic Compounds from Shoe-making Industry in Zhejiang Province	XU Zhi-rong, YAO Yi, CAI Wei-dan, <i>et al.</i> (3702)
Oxidative Capacity of the PM ₁₀ and PM _{2.5} in Beijing During 2014 APEC	GUO Qian, SHAO Long-yi, WANG Wen-hua, <i>et al.</i> (3708)
Concentration, Water-Soluble Ionic and Polycyclic Aromatic Hydrocarbons Composition and Sources of PM _{2.5} During Summer in Hongshan District, Wuhan	SUN Yan, QI Shi-hua, ZHANG Li, <i>et al.</i> (3714)
Statistical Characteristics of Urban Changzhou PM _{2.5} Based on <i>k</i> -means Analysis	WANG Zhen, YU Yi-jun, XU Pu-qing, <i>et al.</i> (3723)
Comparison Test Between On-line Monitoring of Water-soluble Ions and Filter-based Manual Methods for PM _{2.5}	YANG Dong-yan, LIU Bao-xian, SHI Ai-jun, <i>et al.</i> (3730)
Chemical Composition of Water-soluble Ions in Smoke Emitted from Tree Branch Combustion	LIU Gang, HUANG Ke, LI Jiu-hai, <i>et al.</i> (3737)
Number Concentration and Size Distribution of Particles Emitted by Light-duty Gasoline Vehicles	FAN Xiao-xiao, JIANG Jing-kun, ZHANG Qiang, <i>et al.</i> (3743)
Testbed-Based Exhaust Emission Factors for Marine Diesel Engines in China	XING Hui, DUAN Shu-lin, HUANG Lian-zhong, <i>et al.</i> (3750)
Distribution, Source and Human Exposure of Phthalic Acid Esters (PAEs) in Surface Dust in Urban Area of Xi'an City, China	ZHANG Wen-juan, WANG Li-jun, WANG Li, <i>et al.</i> (3758)
Mercury Emission Characteristics and Mercury Concentrations of Municipal Solid Waste in Waste Incineration Plants	DUAN Zhen-ya, SU Hai-tao, WANG Feng-yang, <i>et al.</i> (3766)
Role of Sulfate-Reducing Bacteria in Mercury Methylation in Soil of the Water-Level-Fluctuating Zone of the Three Gorges Reservoir Area	CHEN Rui, CHEN Hua, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (3774)
Impact of Urbanization on the Sources of Dissolved <i>n</i> -alkane in Underground River	LIAO Yu, SUN Yu-chuan, SHEN Li-cheng, <i>et al.</i> (3781)
Source Apportionment and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Water from Yangtze River, China; Based on PMF Model	WANG Cheng-long, ZOU Xin-qing, ZHAO Yi-fei, <i>et al.</i> (3789)
Hydro-chemical Characteristics and Quality Assessment of Surface Water in Gongga Mountain Region	HE Xiao-li, WU Yan-hong, ZHOU Jun, <i>et al.</i> (3798)
UV-Visible Spectra Properties of DOM from Taizi River in Benxi City Section by Multivariable Analysis	QIAN Feng, WU Jie-yun, YU Hui-bin, <i>et al.</i> (3806)
Vertical Distribution Characteristics of Dissolved Organic Matter in Groundwater and Its Cause	HE Xiao-song, ZHANG Hui, HUANG Cai-hong, <i>et al.</i> (3813)
Sediment Characteristics of Sewer in Different Functional Areas of Kunming	CHANG Hai-dong, JIN Peng-kang, FU Bo-wen, <i>et al.</i> (3821)
Concentration of Phosphorus in Sediments Interstitial Water as Affected by Distribution of Aquatic Plants in Dianchi Lake	DING Shuai, WANG Sheng-rui, ZHANG Rui, <i>et al.</i> (3828)
Efficiency and Mechanism of Capping with Purple Parent Rocks to Control Phosphorus Release from Sediments	HUANG Xue-jiao, SHI Wen-hao, NI Jiu-pai, <i>et al.</i> (3835)
Temporal and Spatial Distribution of Phosphorus in Paddy Fields Under Cyclic Irrigation of Drainage Water	JIAO Ping-jin, XU Di, ZHU Jian-qiang, <i>et al.</i> (3842)
GO/QPEI Nanocomposite for Fast and High-capacity Removal of <i>M. Aeruginosa</i>	LI Jie, XIAO Lin (3850)
Enhanced Pollutant Removal Performance of an Integrated Biological Settling Tank from Micro-polluted Water Bodies	WANG Wen-dong, LIU Hui, MA Cui, <i>et al.</i> (3858)
Odorants Removal and Microbial Characteristics in Treatment of Micro-polluted Source Water with Biological Powdered Activated Carbon-Ultrafiltration Combined Process	XUAN Yong-qi, ZHOU Li, DENG Hui-ping, <i>et al.</i> (3864)
Effect of Polysilicic Acid on the Deposition Behavior of Different Aluminum Species	ZHAO Yuan-yuan, ZHANG Yue, LI Su-ying, <i>et al.</i> (3870)
Concentration Variation and Removal of Amino Acids in Typical Drinking Sources in the South of China	LIU Wei, CAI Guang-qiang, LU Xiao-yan, <i>et al.</i> (3877)
Degradation of the Nitrogenous Heterocyclic Compound Quinoline by O ₃ /UV	CHEN Ao-lei, CHANG Feng-min, WANG Cui-ping, <i>et al.</i> (3884)
Impact of Anthraquinone-2-sulfonic Acid on the MO Decolorization, Hydrogen Production and Energy Creation During Anaerobic Fermentation of <i>Klebsiella oxytoca</i> GS-4-08 with Sucrose	HU Jin-mei, YU Lei, HUANG Tian-yin (3891)
Classification and Analysis of Dissolved Organic Matter in 2-Buternal Manufacture Wastewater	SUN Xiu-mei, SONG Guang-qing, XI Hong-bo, <i>et al.</i> (3899)
Concentration of Nitrate in Main Anoxic Stage and PHA, TP Metabolism for Nitrogen and Phosphorus Removal in Single Sludge System with Continuous Flow	WANG Xiao-ling, YUAN Dong-dan, BAI Li, <i>et al.</i> (3906)
Distribution Characteristics of Anaerobic Ammonia Oxidation Bacteria in Sediments from the Adjacent Seas of Yangtze Estuary	FU Lu-lu, ZHEN Yu, HE Hui, <i>et al.</i> (3914)
Bacterial Community Composition of Activated Sludge from Coking Wastewater	MENG Xiao-jun, LI Hai-bo, CAO Hong-bin, <i>et al.</i> (3923)
Soil Bacterial Communities Under Different Vegetation Types in the Loess Plateau	LIU Yang, HUANG Yi-mei, ZENG Quan-chao (3931)
Effects of Phenol on Activity and Microfauna Community Structure of Activated Sludge	HU Xiao-bing, RAO Qiang, TANG Su-lan, <i>et al.</i> (3939)
Comparative Investigation of Antibiotic Resistance Genes Between Wastewater and Landfill Leachate	HUANG Fu-yi, LI Hu, AN Xin-li, <i>et al.</i> (3949)
Performance and Influencing Factors of Dissimilatory Nitrate Reduction to Ammonium Process by the Strain <i>Desulfonitrospira</i> sp. CMX	XIE Bing-ke, ZHANG Yu, WANG Xiao-wei, <i>et al.</i> (3955)
Effect of Straw Incorporation and Domestic Sewage Irrigation on Ammonia Volatilization from Paddy Fields	XU Shan-shan, HOU Peng-fu, FAN Li-hui, <i>et al.</i> (3963)
Seasonal Effect of Simulated Nitrogen Deposition on Soil Respiration and Soil Enzyme Activity in Masson Pine Forest in Mt. Jinyun, Chongqing, China	ZENG Qing-ping, HE Bing-hui, LI Yuan, <i>et al.</i> (3971)
Effects of Biochar Amendment and Irrigation on Denitrification Losses in Greenhouse Tomato Fields	ZHANG Wen-juan, SHE Dong-li, Gamareldawla H. D. Agbna, <i>et al.</i> (3979)
Effects of Soil Texture on Autotrophic CO ₂ Fixation Bacterial Communities and Their CO ₂ Assimilation Contents	WANG Qun-yan, WU Xiao-hong, ZHU Zhen-ke, <i>et al.</i> (3987)
Simulation of the Absorption, Migration and Accumulation Process of Heavy Metal Elements in Soil-crop System	SHI Ya-xing, WU Shao-hua, ZHOU Sheng-lu, <i>et al.</i> (3996)
Synergetic Control of Bioavailability of Pb, Cd and As in the Rice Paddy System by Combined Amendments	WANG Ying-jie, ZOU Jia-ling, YANG Wen-tao, <i>et al.</i> (4004)
Effects of Different Organic Materials on Bio-availability of Cd, Pb in a Contaminated Greenhouse Soil	ZHOU Gui-yu, JIANG Hui-min, YANG Jun-cheng, <i>et al.</i> (4011)
Effect of Montmorillonite on Fractions and Availability of Phosphorus in Soils Applied with Organic Fertilizer	SONG Xian-wei, ZHAO Xiu-lan, ZHANG Jin-zhong, <i>et al.</i> (4020)
Effect of Nano Zeolite on Chemical Fractions of Cd in Soil and Uptake by Chinese Cabbage at Different Soil pH and Cadmium Levels	QIN Yu-li, XIONG Shi-juan, XU Wei-hong, <i>et al.</i> (4030)
Characterization of Cr Tolerance and Accumulation in <i>Lolium perenne</i> L. and <i>Pharbitis purpurea</i> (L.) Voigt	DONG Bing-bing, CHEN Yu-yuan, HUI Hong-xia, <i>et al.</i> (4044)
<i>In vitro</i> Metabolism of Volatile Methyl Siloxanes	LI Min-dan, ZHENG Guo-mao, WAN Yi, <i>et al.</i> (4054)
Efficiency of Aerobic Co-composting of Urban Sludge and Chinese Medicinal Herbal Residues	SU Cheng-yuan, ZHENG Peng, RUAN Qi-hua, <i>et al.</i> (4062)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 赵进才

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 刘 毅 汤鸿霄 孟 伟 周宗灿 林金明
赵进才 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2016年10月15日 第37卷 第10期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 10 Oct. 15, 2016

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	赵进才	Editor-in -Chief		ZHAO Jin-cai
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel: 010-62941102, 010-62849343; Fax: 010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel: 010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易集团有限公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行