

百方知库
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.6
第40卷 第6期

目次

北京城区大气金属元素干湿沉降特征 张国忠, 潘月鹏, 田世丽, 王永宏, 熊秋林, 李广, 顾梦娜, 吕雪梅, 倪雪, 何月欣, 黄威, 刘博文, 王跃思 (2493)

北京城郊 PM_{2.5} 中金属元素的污染特征及潜在生态风险评价 徐静, 李杏茹, 张兰, 陈曦, 杨阳, 刘水桥, 赵清 (2501)

上海城区二次气溶胶的形成: 光化学氧化与液相反应对二次气溶胶形成的影响 高杰, 乔利平, 楼晟荣, 严茹莎, 周敏, 刘瑜存, 冯加良, 黄丹丹 (2510)

天津市 2017 年重污染过程二次无机化学污染特征分析 徐虹, 肖致美, 陈魁, 李立伟, 杨宁, 高璟赞, 李源, 孔君, 毕温凯, 邓小文 (2519)

典型非金属矿物制造工艺过程源成分谱特征 赵雪艳, 于高峰, 王信梧, 张向炎, 殷宝辉, 刘盈盈, 王歆华, 杨文, 赵若杰 (2526)

垃圾焚烧厂排放颗粒物组分粒径分布特征 余卓君, 吴建会, 张裕芬, 张进生, 冯银厂, 李蒲 (2533)

天津市春季样方法道路扬尘碳组分特征及来源分析 马妍, 姬亚芹, 国纪良, 赵静琦, 李越洋, 王士宝, 张蕾 (2540)

霾天气下城市气溶胶吸湿性的观测 杨素英, 田芷洁, 张铁凝, 于兴娜, 李艳伟, 安俊琳, 赵秀勇, 李岩, 王梓航, 吴尚 (2546)

宁东能源化工基地大气 PM_{2.5} 中硝基多环芳烃污染特征及呼吸暴露风险 刘攀亮, 剧媛丽, 毛满萱, 黄韬, 高宏, 马建民 (2556)

2014 ~ 2016 年间郑州市控制 PM₁₀ 和 PM_{2.5} 污染的健康效益评估 韩士杰, 王佳, 燕启社, 杨留明, 赵庆炎, 王申博, 李晨, 张轶舜, 张瑞芹 (2565)

1990 ~ 2017 年中国地区气溶胶光学厚度的时空分布及其主要影响类型 刘莹, 林爱文, 覃文敏, 何利杰, 李霄 (2572)

北京春季一次霾-沙天气污染特性与成因分析 王耀庭, 李青春, 郑祚芳, 窦有俊 (2582)

江苏省内河船舶大气污染物排放清单及特征 徐文文, 殷承启, 许雪记, 张玮 (2595)

亚热带稻区大气 NO₂、HNO₃ 及硝态氮污染特征及干湿沉降 欧阳秀琴, 王波, 沈健林, 朱潇, 王杰飞, 李勇, 吴金水 (2607)

长江源区降水氢氧稳定同位素特征及水汽来源 汪少勇, 王巧丽, 吴锦奎, 何晓波, 丁永建, 王利辉, 胡召富 (2615)

基于高山湖泊沉积记录的贵州北部大气重金属污染历史重建 梁梦瑶, 刘恩峰, 张恩楼, 纪明, 李小林 (2624)

青岛 4 个海水浴场微塑料的分布特征 罗雅丹, 林千惠, 贾芳丽, 徐功娣, 李锋民 (2631)

鄱阳湖湿地候鸟栖息地微塑料污染特征 刘淑丽, 简敏菲, 周隆胤, 李文华, 吴希恩, 饶丹 (2639)

三峡库区消落带土壤溶解性有机质溯源: 基于氮/碳比值的线性双端元源负荷分析 江韬, Joeri Kaal, 梁俭, 刘江, 张耀玲, 王定勇, 魏世强, 赵铮 (2647)

水生生物光合作用对雪玉洞岩溶水体中 CDOM 的影响 范佳鑫, 蒋勇军, 贺秋芳, 王家楠, 何瑞亮, 张彩云, 马丽娜, 汪睿容 (2657)

水化学和环境同位素对济南东源饮用水源地地下水演化过程的指示 张雅, 苏春利, 马燕华, 刘伟江 (2667)

崇左响水地区地下水水质分析及健康风险评价 周巾枚, 蒋忠诚, 徐光黎, 覃小群, 黄奇波, 张连凯 (2675)

云南荞麦地流域地下水水化学特征及物质来源分析 张勇, 郭纯青, 朱彦光, 于爽 (2686)

鄱阳湖流域多尺度 C、N 输送通量及其水质参数变化特征 陆瑶, 高扬, 贾珺杰, 宋贤威, 陈世博, 马明真, 郝卓 (2696)

合流制面源污染传输过程与污染源解析 房金秀, 谢文霞, 朱玉玺, 沈雷, 马玉坤, 李佳, 姜智绘, 李叙勇, 赵洪涛 (2705)

强化浅基质层干植草沟对道路径流的脱氮效果 段进凯, 李田, 张佳炜 (2715)

水源水库暴雨径流过程水体锰的迁移及其影响 邓立凡, 黄廷林, 李楠, 李凯, 吕晓龙, 毛雪静 (2722)

巢湖十五里河沉积物磷吸附潜力及对外源碳的响应 李如忠, 鲍琴, 张瑞钢, 陈志 (2730)

金盆水库沉积物磷的来源及分布特征 毛雪静, 黄廷林, 李楠, 徐金兰, 苏露, 吕晓龙, 邓立凡 (2738)

水库水体热分层的水质及细菌群落分布特征 王禹冰, 王晓燕, 庞树江, 杨晓明, 刘洋 (2745)

不同水温分层水库沉积物间隙水营养盐垂向分布与细菌群落结构的关系 王慎, 张思思, 许允, 官卓宇, 杨正健, 刘德富, 马骏 (2753)

表面流人工湿地长期运行后的底泥营养盐累积特征与释放规律 朱伊梦, 姜翠玲, 朱立琴, 杜观超, 高旭, 陈红卫, 李峰东, 张海阔, 张雪, 秦文凯, 李一平 (2764)

针铁矿改性生物炭对砷吸附性能 朱司航, 赵晶晶, 尹英杰, 商建英, 陈冲, 瞿婷 (2773)

改性稻壳生物炭对水溶液中甲基橙的吸附效果与机制 史月月, 单锐, 袁浩然 (2783)

厌氧膜生物反应器处理含盐废水运行效能及膜污染特性 闫欢沙, 许振钰, 金春姬, 邵梦雨, 郭亮, 赵阳国 (2793)

污水处理厂出水有机磷污染特征及强化去除 王小东, 王子文, 陈明飞, 王燕, 王硕, 李激 (2800)

碱度对沸石序批式反应器亚硝化的影响 王瑞鑫, 陈婧, 汪晓军, 胡浩林, Karasuta Chayangkun (2807)

活性污泥物理结构对呼吸过程的影响 郭耀, 李志华, 杨成建, 王慧娟, 李亚明, 姜阳 (2813)

好氧颗粒污泥处理畜禽养殖沼液污染物的特性 廖杰, 叶嘉琦, 曾志超, 刘琳, 徐开钦, 刘超翔 (2821)

快速城市化区河流温室气体排放的时空特征及驱动因素 刘婷婷, 王晓锋, 袁兴中, 龚小杰, 侯春丽 (2827)

生物炭对潜流人工湿地污染物去除及NO_x排放影响 邓朝仁, 梁银坤, 黄磊, 方丹丹, 陈玉成, 杜刚 (2840)

曾用抗生素磺胺二甲嘧啶对稻田N₂O排放的影响及其微生物机制 吴杰, 李志琳, 徐佳迎, 王珏, 蒋静艳 (2847)

不同施氮水平对紫花苜蓿草地土壤呼吸和土壤生化性质的影响 胡伟, 张亚红, 李鹏, 张鹏, 李满友, 尤璟涛, 田水泉 (2858)

典型城市化区域土壤重金属污染的空间特征与风险评价 何博, 赵慧, 王铁宇, 孟晶, 肖荣波, 刘胜然, 周云桥, 史斌 (2869)

西南高镉地质背景区农田土壤与农作物的重金属富集特征 刘意章, 肖唐付, 熊燕, 宁增平, 双燕, 李航, 马良, 陈海燕 (2877)

基于 GIS 和受体模型的枸杞地土壤重金属空间分布特征及来源解析 白一茹, 张兴, 赵云鹏, 王幼奇, 钟艳霞 (2885)

喀斯特地区小尺度农业土壤砷的空间分布及污染评价 汪花, 刘秀明, 刘方, 唐启琳, 王世杰 (2895)

黄土高原不同植被带人工刺槐林土壤团聚体稳定性及其化学计量特征 瞿晴, 徐红伟, 吴旋, 孟敏, 王国梁, 薛蓁 (2904)

秸秆还田配施氮肥对喀斯特农田微生物群落及有机碳矿化的影响 徐学池, 苏以荣, 王桂红, 刘坤平, 胡亚军, 陈香碧, 郑小东, 何寻阳 (2912)

生物炭施用及老化对紫色土中抗生素吸附特征的影响 阴文敏, 关卓, 刘琛, 何杨, 杨飞, 唐翔宇 (2920)

稳定性同位素 DNA-SIP 示踪中性紫色土的氮氧化过程 刘天琳, 王智慧, 闫小娟, 赵永鹏, 贾仲君, 蒋先军 (2930)

纳米银和银离子对土壤中硝化微生物及其氮氧化速率的影响 伍玲丽, 张旭, 舒昆慧, 张丽, 司友斌 (2939)

农田沟道土壤中锰氨氧化(Mn-ANAMMOX)过程的探究 陈湜, 李正魁, 覃云斌, 丁帮琛, 陈志浩 (2948)

污泥四环素含量对蚯蚓堆肥中氨氧化菌群的影响 吴颖, 黄魁, 夏慧, 陈景阳 (2954)

《环境科学》征订启事(2929) 《环境科学》征稿简则(2947) 信息(2646, 2656, 2857)

合流制面源污染传输过程与污染源解析

房金秀^{1,2}, 谢文霞¹, 朱玉玺³, 沈雷³, 马玉坤^{2,4}, 李佳^{1,2}, 姜智绘^{1,2}, 李叙勇², 赵洪涛^{2*}

(1. 青岛大学环境科学与工程学院, 青岛 266071; 2. 中国科学院生态环境研究中心, 城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085; 3. 珠海市规划设计研究院, 珠海 519000; 4. 北京师范大学环境学院, 北京 100875)

摘要: 科学认识和全面理解合流制面源污染发生路径和污染贡献源对于治理和改善城市水环境至关重要。本研究以珠海市典型老城区的合流制小排水区为例, 分析了污染物在地表与管道中的累积-冲刷过程, 并运用质量守恒法解析了污染物的贡献源。结果表明, 地表街尘累积量为 $(28.81 \pm 10.69) \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$, 多场降雨事件中地表街尘冲刷量为 $(19.27 \pm 10.90) \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$, 冲刷率为 $(52.69 \pm 13.3)\%$, 其冲刷形成的地表径流中SS场降雨浓度为 $52 \sim 109 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 管道径流中SS的浓度为 $68 \sim 158 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$; 地表径流对SS的贡献率为 $39\% \sim 72\%$, 早流污水对SS的贡献率 $< 20\%$, 管道沉积物再悬浮对SS的贡献率为 $13\% \sim 56\%$; 管道沉积物的厚度在小雨和中雨时增加 $1 \sim 14 \text{ cm}$, 大雨和暴雨时, 减少 $7 \sim 17 \text{ cm}$; 降雨特征影响了污染源贡献比率, 其中地表径流对各污染物的贡献范围为 $2\% \sim 52\%$, 早流污水对各污染物的贡献率范围为 $9\% \sim 65\%$, 管道沉积物对各污染物的贡献范围为 $8\% \sim 81\%$ 。基于上述研究结果, 为合流制面源污染提出控制措施, 以期为我国城市接纳水体污染的解决提供参考。

关键词: 合流制排水体制; 地表径流; 管道径流; 管道沉积物; 源解析; 污染控制

中图分类号: X52 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)06-2705-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.201812073

Pollutant Transport Analysis and Source Apportionment of the Entire Non-point Source Pollution Process in Combined Sewer Systems

FANG Jin-xiu^{1,2}, XIE Wen-xia¹, ZHU Yu-xi³, SHEN Lei³, MA Yu-kun^{2,4}, LI Jia^{1,2}, JIANG Zhi-hui^{1,2}, LI Xu-yong², ZHAO Hong-tao^{2*}

(1. College of Environmental Science and Engineering, Qingdao University, Qingdao 266071, China; 2. State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 3. Zhuhai Institute of Urban Planning and Design, Zhuhai 519000, China; 4. School of Environment, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: A comprehensive and scientific understanding of non-point source pollutant transport pathways and source apportionment in combined sewer systems is essential for managing and improving the urban water environment. This study analyzed build-up and wash-off processes of pollutants on road surfaces and in sewers within a catchment of combined sewer systems in a typical old district in Zhuhai. Besides, source apportionment of the entire urban non-point source pollution was investigated by using the mass conservation method. The outcomes revealed that the build-up load of road deposited sediments in the study area was $(28.81 \pm 10.69) \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$. The average wash-off load of road deposited sediments during five different rainfall events was $(19.27 \pm 10.90) \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ and the wash-off percentage was $(52.69 \pm 13.3)\%$. The event mean concentrations of suspended solids (SS) in road runoff were $52 \sim 109 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, and the event mean concentrations of SS in sewer runoff were $68 \sim 158 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. Source apportionment analysis showed that road runoff, domestic wastewater, and sewer sediments contributed $39\% \sim 72\%$, $< 20\%$, and $13\% \sim 56\%$ to SS, respectively. The thickness of sewer sediments increased by $1 \sim 14 \text{ cm}$ during light and moderate rains, and the thickness decreased by $7 \sim 17 \text{ cm}$ during heavy rains. It was found that rainfall characteristics affected the contribution percentages of pollution sources. The contribution of pollution from road runoff, domestic sewage, and sewer sediments in combined sewer systems were $2\% \sim 52\%$, $9\% \sim 65\%$, and $8\% \sim 81\%$, respectively. The derived outcomes should be useful for developing recommendations to control non-point source pollution in combined sewer systems and improve urban receiving water quality in China.

Key words: combined sewer system; road runoff; sewer runoff; sewer sediments; source analysis; pollution control

随着我国工业点源的初步控制, 城市污水处理与收集系统的逐步完善, 城市区域降雨冲刷造成的面源污染对接纳水体的危害日益突出^[1]。城市降雨径流污染过程受到排水体制、降雨特征、区域气候、土地利用类型等多种因素的影响, 其中排水体制在城市径流污染过程中尤其重要^[2]。有研究表明, 在我国两种排水体制下由合流制引起的城市面源污染问题对城市接纳水体的危害尤为严重, 其引

起的水体黑臭问题受到国内外社会的广泛关注^[3,4]。因此, 对合流制排水体制引起的污染问题

收稿日期: 2018-12-08; 修订日期: 2019-01-07

基金项目: 国家自然科学基金项目(41771529); 雨水径流污染传输特征及合流制污染控制措施研究项目(ZHPZ2018FW089); 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2015ZX07206-006-02)

作者简介: 房金秀(1993~), 女, 硕士, 主要研究方向为城市面源污染, E-mail: xiuxiu318@163.com

* 通信作者, E-mail: htzhao@ceees.ac.cn

进行系统治理非常必要。

对合流制污染物输移过程的了解以及污染物源贡献的解析是治理合流制面源污染问题的关键。当前国内外学者对合流制污染的研究主要集中在:污染物的来源分配^[5~7]、污染物径流特征^[8~10]、污染控制策略等方面^[11~13]。而基于粒径分布的合流制污染物输移的系统分析鲜见报道,这就限制了合流制污染治理的科学性。科学治理合流制污染需要结合城市具体情况,对其进行系统研究并提供科学依据及数据支撑^[14]。

鉴于此,本研究针对我国老城区合流制排水系统现状,基于不同降雨特征下地表、管道径流污染物的累积-冲刷规律,以珠海市金湾区直排式合流制排水管渠为例,对地表与管道污染物的输移过程及污染源贡献进行分析,以期为合流制面源污染治理提供科学依据,并为污染控制措施的选择提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

珠海市金湾区地处亚热带季风气候区,面积为 190.3 km²,下辖红旗镇(96 km²)和三灶镇(94.3 km²)两个镇,本次研究区位于金湾区北部红旗镇境内。该地多年平均降水量为 2 294 mm,每年 4~9 月为降雨集中期,占全年降雨量的 83.4%。研究区为珠海市老城区,除几条主要的道路(如:珠海大道、南翔路等)配套有污水主干管外,其他路段仍为雨污合流管道。本次研究点布设在红旗镇藤山一路暗渠(0.8 m×1 m),该渠由于管径相对较大,旱季基本不会堵塞,清淤周期较长。研究区汇水面积为 1.5 hm²,暗渠两侧土地利用类型主要为学校、居民区、商业区。据现场调查统计,该渠所在道路日机动车交通流量约为 8 000 辆。该渠由东往西接入藤山二路 2.5 m×2.0 m 雨水渠,最终经过三板雨水泵站排至幸福河。

1.2 样品采集与处理

地表街尘样品:于 2018 年 5~8 月观测的降雨前、后分别在样点附近道路两侧随机布设一个 3×1 m² 的采样点,使用戴森吸尘器采集样方内全部地表颗粒物,用塑封袋密封并记录。取采集好的样品通过空气动力筛分仪(Retsch AS200 jet)筛分为:<20、20~44、44~63、63~105、105~150、150~250、250~450 和 450~1 000 μm 这 8 个粒径段,并将筛分后的样品称重并记录,分别测定不同粒径段街尘携带的 TOC、TN 和 TP 的含量,其中 TOC 采用煅烧法测定、TN 采用元素分析仪测定、TP 的测定

方法参照文献[15]。

径流样品采集:雨天径流样品采集点如图 1 所示,降雨事件特征如表 1 所示。在降雨径流初期每 5 min 采集一个样品,其后采样时间间隔根据降雨情况增加为 10 min、20 min、30 min 或者 1 h。管道径流样品采集与地表径流样品同步进行。采样过程中用超声波明渠流量计测定管道中的径流流量。用 RG3-M 型翻斗式雨量计(Onset Computer Corporation, 美国 HOBO)测定降雨量。径流样品采集后存放于聚乙烯瓶中,用马尔文激光粒度仪 2000 检测样品的粒度分布,并测定其 SS、COD、TN、TP 和 NH₄⁺-N 的浓度。

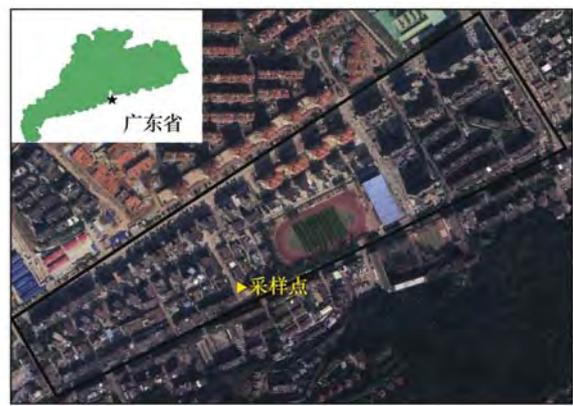


图 1 研究区及采样点示意

Fig. 1 Study area and sampling locations

表 1 降雨事件特征

Table 1 Basic characteristics of rainfall events

降雨日期 (年-月-日)	降雨量 /mm	降雨历时 /h	平均降雨强度 /mm·h ⁻¹	降雨时间间隔 /d
2018-05-08	2.8	1.3	2.2	1
2018-05-26	6.2	0.25	24.8	18
2018-06-13	24.8	3	8.3	1
2018-06-22	25.3	6	4.2	1
2018-06-27	9	1	9	2
2018-07-02	14.6	3	4.9	5
2018-07-05	42	4	10.5	3
2018-07-26	13	0.3	43	3
2018-07-29	6.2	1	6.2	3
2018-08-07	1.5	0.3	5	9
2018-08-10	134	22	6.09	3
2018-08-17	58.6	7	8.37	7

早流样品采集:于 2018 年 5~8 月期间先后监测了晴天天数超过 3 d 的非降雨日早流污水水质 3 次。早流污水水量监测采用超声波明渠流量计。早流污水样品的采集为 0.5 h 等间距采集。样品采集后,测定其 SS、COD、TN、TP 和 NH₄⁺-N 的浓度。

管道沉积物的采集:为了更好地了解采样区管渠的淤积情况和管道沉积物的特性,于 2018 年 6~8 月测定降雨前、后管道沉积物的厚度(管渠深度

减去泥水分界面到地表的深度), 同时采集管道沉积物样品, 为保证数据的代表性, 每次采集管道沉积物样品两个, 样品采集后装入塑封袋中, 带回实验室测定其粒径与携带的 TOC、TN 和 TP 的含量, 管道沉积物样品粒径的测定采用湿筛分的方法^[16], 筛分后的管道沉积物粒径被分为 <40、40~63、63~105、105~150、150~250、250~450 和 450~1 000 μm 这 7 个粒径等级. TOC、TN 和 TP 的测定方法与街尘中各污染物的测定方法相同.

1.3 数据分析

降雨事件中污染物会受到其本身特点和降雨特征的影响, 时刻之间的浓度存在着变化, 所以通常采用次降雨径流的平均浓度表示一场降雨地表径流全过程排放的某污染物的平均浓度 EMC (event mean concentration, EMC), 公式如下^[17]:

$$\text{EMC} = \frac{M}{V} = \frac{\int_0^t c_i Q_i dt}{\int_0^t Q_i dt} \cong \frac{\sum c_i Q_i \Delta t}{\sum Q_i \Delta t} \quad (1)$$

式中, EMC 为场径流污染的平均浓度 ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$); M 为整个径流过程中污染物的量 (mg); V 为径流总量 (L); c_i 为 t 时刻污染物的浓度 ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$); Q_i 为 t 时刻径流流量 ($\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$); Δt 为采样间隔时间 (min); t 为降雨径流持续时间 (min).

地表径流、管道沉积物及早流污水是合流制径流污染的 3 个主要来源^[18]. 根据污染物质量平衡公式可以计算管道沉积物的贡献, 公式如下^[19]:

$$M_{\text{PT}} = M_{\text{PS}} + M_{\text{PR}} + M_{\text{PW}} \quad (2)$$

式中, M_{PT} 为管道径流总污染负荷 (kg), M_{PS} 为管道沉积物污染负荷 (kg), M_{PR} 为地表径流污染负荷 (kg), M_{PW} 为早流污水中污染物污染负荷 (kg).

街尘中各粒径段污染物负荷比的计算采用如下公式^[20]:

$$\text{GSF}_{\text{Load}} = \frac{C_i \times \text{GS}_i}{\sum_{i=1}^m C_i \times \text{GS}_i} \times 100\% \quad (3)$$

式中, GSF_{Load} 表示单个粒径段所含污染物对全部粒径段污染物含量的贡献 (%); C_i 是单个粒径段污染物的含量 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$); GS_i 是单个粒径段占全部粒径段街尘的质量比 (%); m 是筛分粒径段的总个数.

2 结果与分析

2.1 地表污染物的晴天累积

城市地表往往吸附了大量的污染物, 是城市面源污染的重要贡献源之一, 地表街尘的静态累积量决定了其对城市水环境的污染潜力. 经采样调查,

研究区街尘的静态累积量为 $12.89 \sim 50.52 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$, 平均为 $(28.81 \pm 10.69) \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ (图 2), 与其它相似地区 ($0.95 \sim 8.24 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$) 相比该区域街尘累积量较高^[21], 这主要是因为研究区附近有医院与学校, 交通负荷较高且人员密集导致街尘累积量大于一小城镇. 研究区单位面积上 TOC、TN 和 TP 的污染负荷分别为 $337 \sim 1\,316$ 、 $19 \sim 76$ 和 $3 \sim 13 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2}$.

粒径是表征颗粒物行为的重要参数, 对污染物的迁移转化有重要的影响, 同时粒径分布特征也影响了地表颗粒物对污染物的贡献能力 (图 3). 结果表明细粒径颗粒物吸附的污染物浓度明显高于粗粒径颗粒物, 不同粒径颗粒物对整体颗粒物污染负荷贡献也不同, 如 <150 μm 颗粒物对 3 种污染物 TOC、TN 和 TP 的贡献能力最高, 分别为 68%、51% 和 56%. 这表明细颗粒物对地表径流污染有着重要潜在贡献.

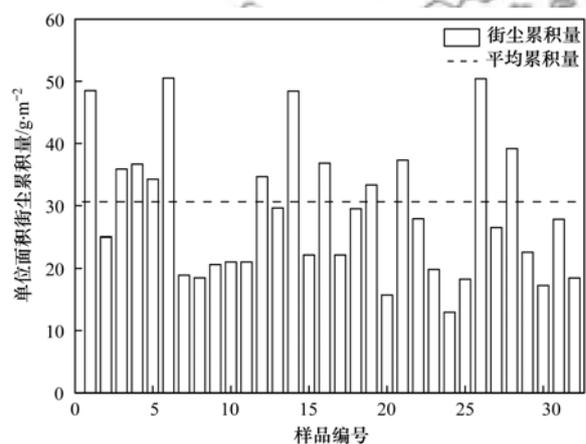


图 2 单位面积街尘累积量

Fig. 2 Build-up load of road deposited sediments per unit area

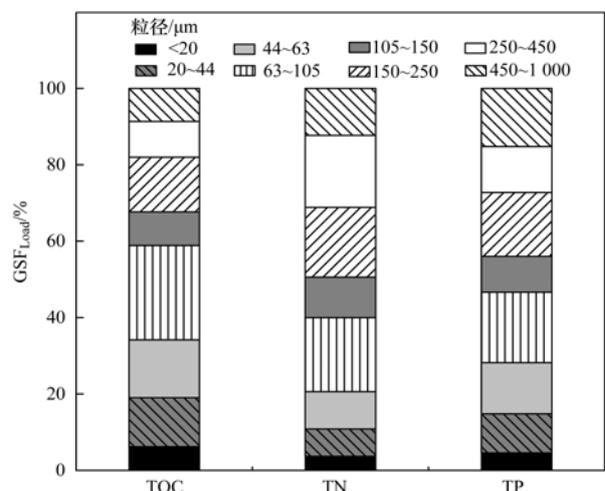


图 3 地表街尘粒径负荷比 (GSF_{Load})

Fig. 3 Particle size ratio of road deposited sediments

2.2 地表污染物的冲刷

地表街尘是城市地表径流污染物最广泛的载

体,同时也是地表径流中 SS 的重要来源,街尘特征与降雨特征共同影响了其向 SS 的迁移.对比 5 场降雨事件前、后地表街尘的累积量发现,地表街尘冲刷量为 $(19.27 \pm 10.90) \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$,冲刷率为 $(52.69 \pm 13.3)\%$ (图 4),其冲刷形成的地表径流中 SS 场降雨浓度为 $52 \sim 109 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$.其中,极细颗粒物($<20 \mu\text{m}$)转变为 SS 的能力最强,其在静态累积中的质量分数仅为 $1.41\% \sim 3.80\%$,而在地表径流中的体积分数高达 $62.77\% \sim 78.32\%$ (图

5).上述结果表明,极细颗粒物($<20 \mu\text{m}$)在地表街尘中累积较少,但其对城市水环境的威胁不容忽视.

降雨径流冲刷是地表污染物传输的动力,降雨特征往往决定着其对城市地表径流污染发生历程的影响,科学地认识其发生规律为有效控制污染提供依据.如图 4 所示,雨峰的位置和多少决定着地表径流中 SS 的浓度变化过程,同时决定径流冲刷过程属于源限制还是传输限制.

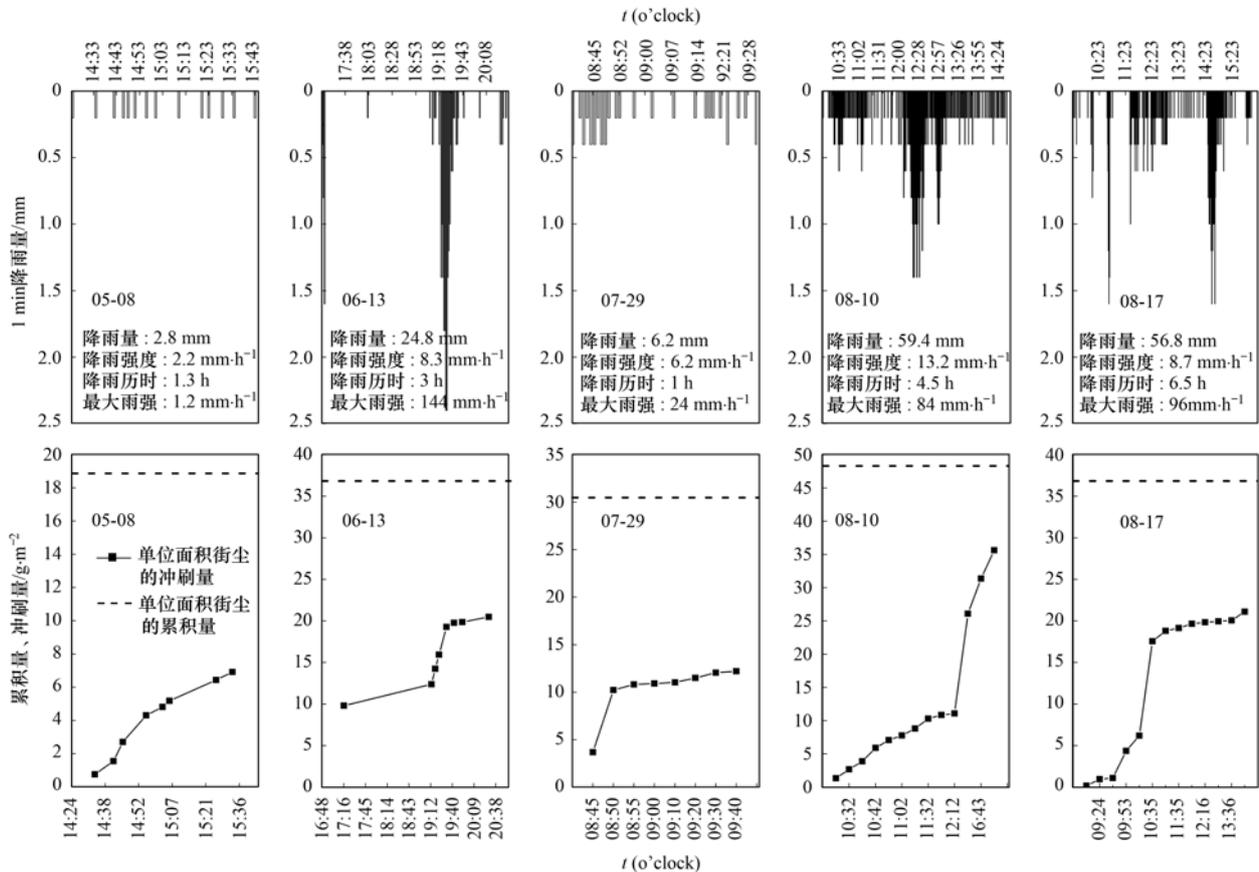


图 4 降雨特征及其单位面积街尘的累积量与冲刷量

Fig. 4 Rainfall characteristics and comparisons of build-up and wash-off of street dust per unit area

2.3 管道污染物的累积

管道沉积物往往是管道出流污染的重要贡献者之一,其物理性质与携带污染物含量决定着其对出流污染贡献的大小.经现场调查发现,管道沉积物厚度为 $30 \sim 45 \text{ cm}$,深黑色砂质颗粒物,并伴有一种难闻的气味,这可能与管道沉积物的厌氧反应有关.将管道沉积物进行湿筛分后,发现细粒径颗粒物($<150 \mu\text{m}$)仅占 8.21% ,而粗粒径颗粒物占 91.79% (图 6),表明管道中所占比例最大的为粗粒径颗粒物.这可能是由于细粒径颗粒物容易随径流传输移,而粗粒径容易沉降.

通过对比管道沉积物与地表街尘携带的污染物(图 7),发现管道沉积物中 TOC 与 TN 的浓度在

$<105 \mu\text{m}$ 的颗粒物中明显高于街尘,而在 $>150 \mu\text{m}$ 的颗粒物中含量略低于街尘.管道沉积物中 TP 则表现出高富集特性,其在各粒径段颗粒物中的含量均高于街尘,且是街尘 TP 的 $1.2 \sim 5$ 倍,这主要与其来源与存在形态有关.为了进一步了解管道沉积物对出流污染的贡献,本研究对管道沉积物的静态潜在污染量进行核算,沉积物的密度约为 $2 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ [22],经计算 3 种污染物 TOC、TN 和 TP 的静态污染负荷分别为 $6.10 \sim 11.43$ 、 $0.38 \sim 0.58$ 和 $0.26 \sim 0.40 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1}$,其中细粒径颗粒物($<150 \mu\text{m}$)对 3 种污染物 TOC、TN 和 TP 的贡献率最高(图 8),分别为 63% 、 46% 和 29% .综合以上结果表明细粒径颗粒物往往富集了更多污染物,同时细

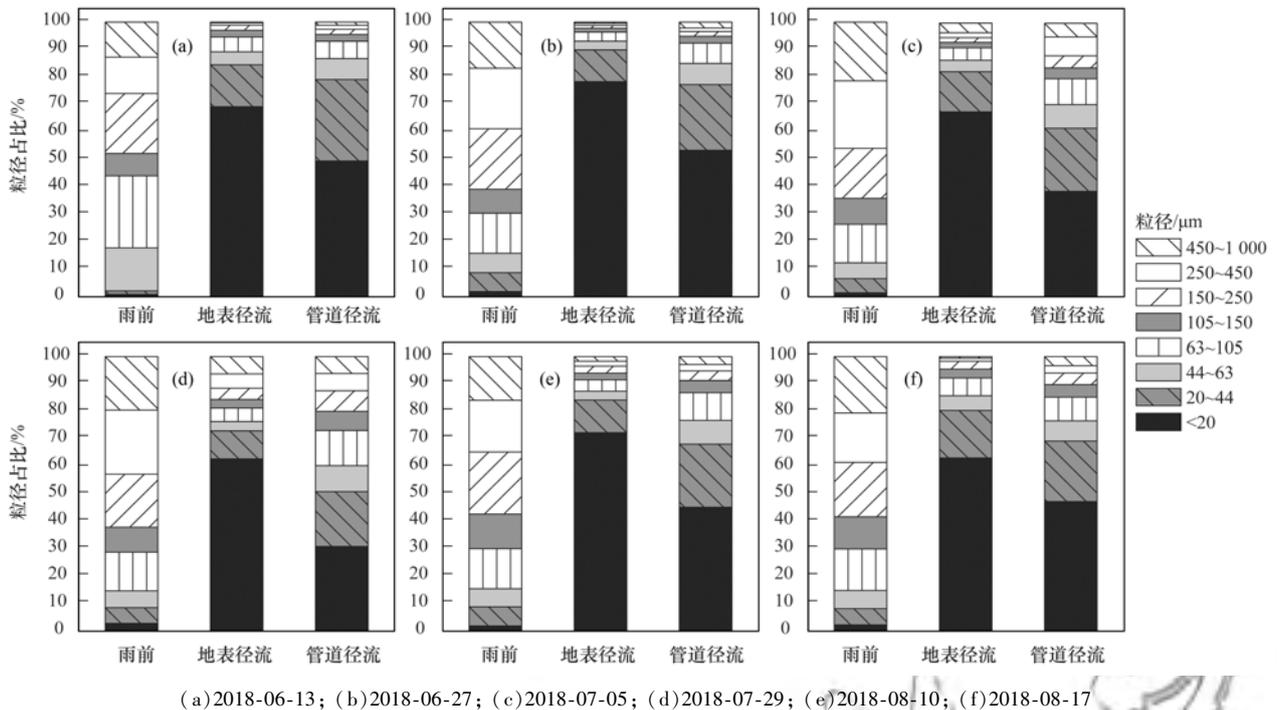


图5 颗粒物在道路累积、地表径流、管道径流的粒径分布

Fig. 5 Percentage of different particle sizes in road deposited sediments, road runoff and sewer runoff

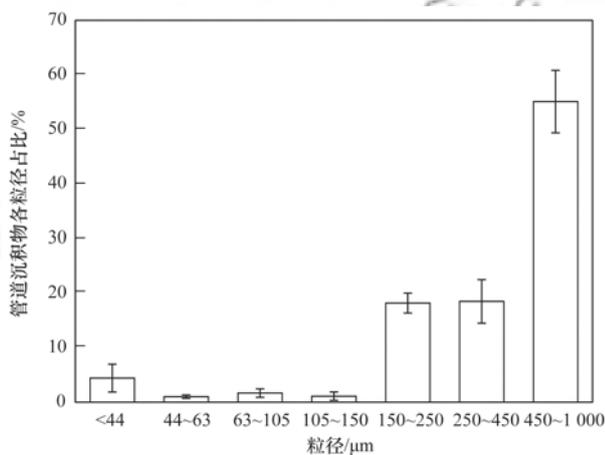


图6 管道沉积物中颗粒物的分布

Fig. 6 Particle size distributions of sewer sediments

粒径颗粒物易被水流冲走, 故降雨时管道沉积物中细粒径颗粒物成为城市接纳水体污染的重要来源。

2.4 管道污染物的冲刷

对管道污染物冲刷与沉积规律的研究是管道污染治理的关键。通过对比降雨事件前后管道沉积物厚度(图9), 发现管道沉积物厚度的是一个动态变化的过程, 在小雨和中雨情况下, 管道沉积物厚度增加1~14 cm, 3种污染物 TOC、TN 和 TP 的增加量分别为 (2.34 ± 1.07) 、 (0.15 ± 0.07) 和 $(0.10 \pm 0.05) \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1}$, 淤积率为 $(15 \pm 10)\%$; 在大雨和大暴雨情况下, 管道沉积物厚度减少7~17 cm, 3种污染物 TOC、TN 和 TP 的冲刷量为 (1.32 ± 1.03) 、

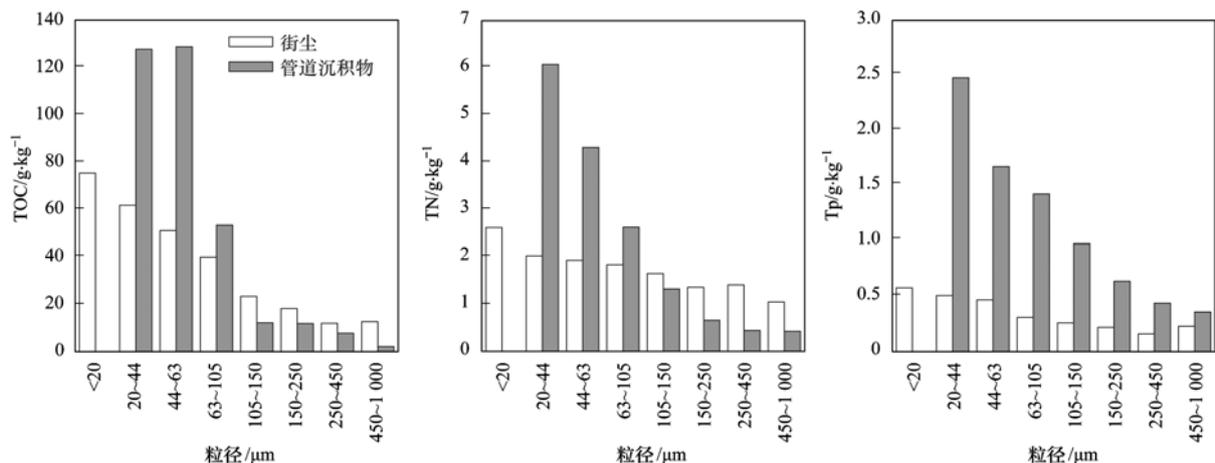


图7 管道沉积物与街尘携带污染物含量

Fig. 7 Concentration of pollutants in road deposited sediments and sewer sediments

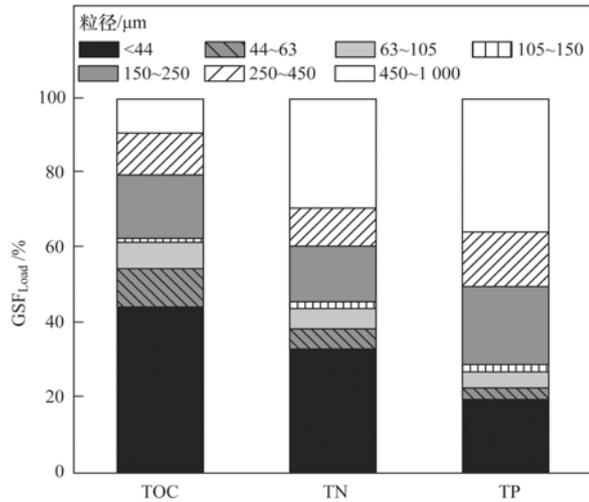
图8 管道粒径负荷比 (GSF_{Load})

Fig. 8 Particle size ratios of sewer sediments

(0.08 ± 0.06) 和 (0.06 ± 0.04) $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1}$, 冲刷率为 (30 ± 23)%, 管道径流 SS 的浓度为 $68 \sim 158 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 其中仍是极细颗粒物 ($< 20 \mu\text{m}$) 的迁移能力最强.

降雨特征影响着街尘冲刷形成的地表径流 SS 与管道沉积物再悬浮形成的管道径流 SS 中的比例, 同时也影响污染物对出流污染的贡献. 通过对比五场降雨事件中污染物在地表径流与管道径流中的 EMC (图 10), 发现管道径流污染物 TN 和 TP 的 EMC 明显高于地表径流, 而 SS 与 COD 在不同的降雨事件中则表现出不同规律. 这表明合流制排水系统中管道沉积物是氮磷等营养物质的主要来源, COD 与 SS 在不同的降雨条件下主导污染源有所不同.

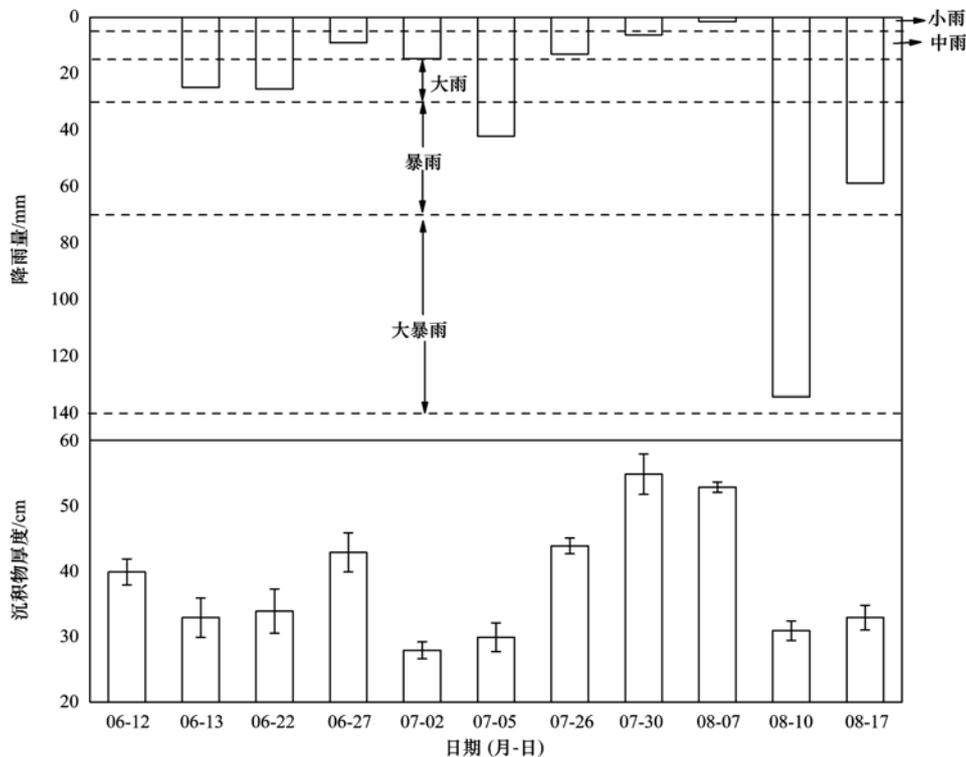
降雨等级划分参照 GB/T 28592-2012^[23]

图9 管道沉积物厚度变化

Fig. 9 Thickness variation of sewer sediments

3 讨论

3.1 城市面源污染中颗粒物的传输

粒径是影响城市面源污染的一个重要指标, 也是低影响开发措施建设的重要参数, 其影响着颗粒物在径流冲刷过程中的迁移能力^[24, 25]、对污染物的吸附能力^[26, 27]以及径流中 SS 的浓度等^[28]. 然而以往的研究极少关注降雨过程中颗粒物的迁移过程与空间变异, 这就影响了污染治理的有效性与适用性. 因此, 了解不同降雨特征条件下颗粒物的传输

特征对当地城市面源污染的治理具有重要意义. 本研究用 D_{90} (一个样品的累计粒度分布数达到 90% 时所对应的粒径) 的变化来表征颗粒物在降雨中的迁移过程. 结果如图 11 所示, 地表径流冲刷 90% 颗粒物的粒径多集中在 $100 \mu\text{m}$ 以下, 而管道径流冲刷的颗粒物粒径波动范围较大, 其对大粒径颗粒物的冲刷能力大于地表径流, 这主要是因为大粒径颗粒物的迁移需要更高的动能, 往往管道径流中的流速大于地表径流, 增强了管道沉积物的再悬浮能力. 因此, 在城市面源污染的管控过程中, 需结合

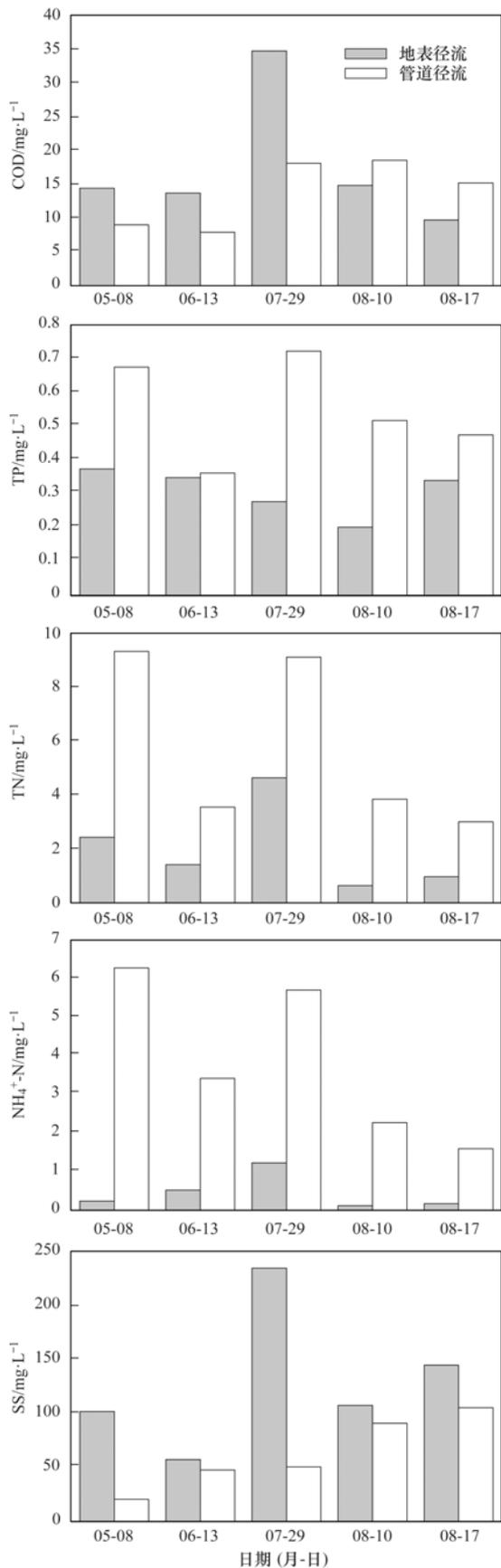


图 10 地表径流与管道径流中污染物的 EMC

Fig. 10 Event mean concentrations of pollution in road and sewer runoff

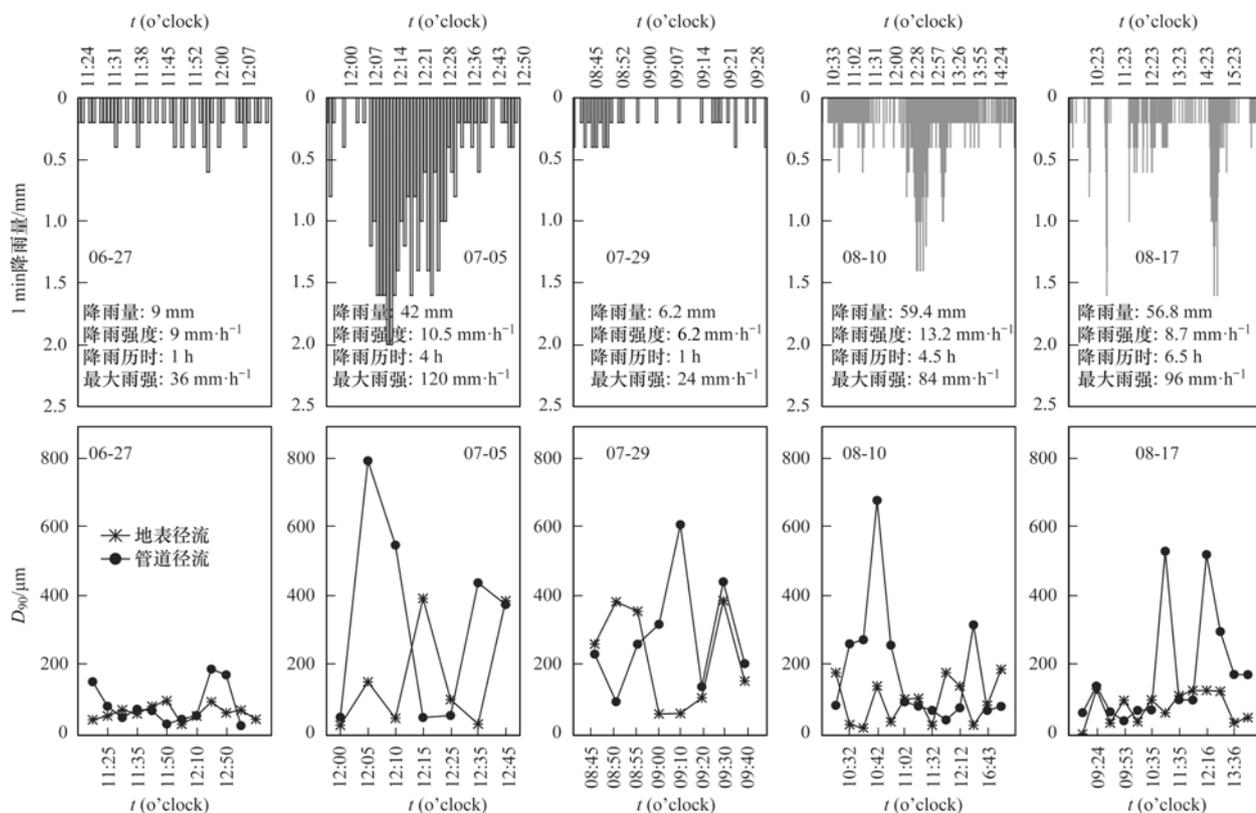
3.2 污染物传输路径及污染源解析

污染物输移过程与污染源分配对于城市水污染治理具有重要的科学意义. 本研究采用质量守恒法对不同污染源贡献进行分析(图 12), 其中地表径流对 SS 的贡献率为 39% ~ 72%, 对 TN、TP 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的贡献率小于 35%, 对 COD 的贡献率小于 55%; 旱流污水对 SS 的贡献率较小(小于 20%), 对其它污染物的贡献率与降雨量有关, 贡献率范围为 9% ~ 65%; 根据以上计算结果, 可计算管道沉积物对各污染物的贡献率, 其对 SS 的贡献率为 13% ~ 56%, TN 的贡献率为 14% ~ 81%, TP 的贡献率为 37% ~ 63%, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的贡献率为 54% ~ 67%, COD 的贡献率为 8% ~ 57%. 降雨特征影响了各污染物的主导污染源, 小雨与中雨时 (< 14.9 mm), 旱流污水对于富营养化污染物贡献率较高, 并且各污染物的贡献率随着降雨量的增大逐渐减小, 例如, TN 的贡献率由 81% 减少到 14%; 大雨和大暴雨 (> 15 mm) 时, 管道沉积物对各污染物的贡献率较高, 且随着降雨量增加对各污染物的贡献率增大; 在不同降雨条件下, 地表径流的增减规律虽不明显, 但其仍是城市面源污染的重要贡献源. 由此可见, 大雨和暴雨可导致管道沉积物的再悬浮能力增强, 从而对城市接纳水体造成危害, 而在小雨和中雨的情况下, 地表街尘的贡献又会造成管道沉积物的淤积, 影响管道的过流能力, 因此在合流制面源污染的治理的过程中一方面要控制地表街尘的传输, 例如建设低影响开发措施; 另一方面要控制管道沉积物的再悬浮, 例如进行雨污分流改造、截流管道修建、调蓄池及隧道建设等.

3.3 合流制管道中污染物截流估算

直排式合流制管道对城市水环境造成的污染影响非常严重, 对其治理变得非常迫切和关键. 目前, 对直排式合流制排水系统的改造主要有“合改分”与截流式改造^[29]. 根据研究区域管网具体情况, 初步建议将直排式合流制管道改为初期雨水截流. 由于初期径流截流设置与目标小汇水区的径流冲刷输送规律密切相关^[30], 本研究基于 5 场不同类型降雨事件的地表径流冲刷与管道输移规律的实地观测(图 13), 结果表明小雨与中雨时, 控制地表 5mm 径流深的降雨即可控制地表径流与管道径流中全部污染物; 大雨与暴雨时, 当地表与管道污染物累积率为 80% 时, 地表与管道对应的径流深范围分别为 8.5 ~ 23.5 mm 与 14.1 ~ 25.2 mm. 同时, 结合珠海市 1981 ~ 2016 年降雨特征的实际情况(多数降雨事件的降雨量 < 60 mm), 针对地表污染, 建议截流 12 mm 径流深的初期降雨, 针对整个排水分区

降雨特征加强对重点粒径段颗粒物的传输控制.

图 11 地表径流与管道径流中 D_{90} 的变化Fig. 11 Variation of D_{90} in road runoff and sewer runoff

污染, 建议管道总排口截流 25 mm 径流深的初期降雨以控制径流污染中 80% 的污染物, 该值略高于文献[31]中 4~8 mm 的初期雨水控制指标. 由于本研究观测降雨场次有限, 降雨数据可能存在较大误差, 如需工程实际需要, 还需要对其开展进一步深入地研究.

4 结论

(1) 该地地表街尘的累积量为 $(28.81 \pm 10.69) \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$, 冲刷量为 $(19.27 \pm 10.90) \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$, 其中极细颗粒物 ($< 20 \mu\text{m}$) 吸附的污染物浓度最高, 同时其转化为 SS 的能力也最强.

(2) 管道沉积物厚度是一个动态变化的过程. 小雨和中雨时增加 1~14 cm, 3 种污染物 TOC、TN 和 TP 的增加量分别为 (2.34 ± 1.07) 、 (0.15 ± 0.07) 、 $(0.10 \pm 0.05) \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1}$; 大雨和暴雨时减少 7~17 cm; 3 种污染物的减少量分别为 (1.32 ± 1.03) 、 (0.08 ± 0.06) 、 $(0.06 \pm 0.04) \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1}$.

(3) 降雨特征影响了污染源贡献比率, 其中地表径流对各污染物的贡献范围为 2%~52%, 旱流污水对各污染物的贡献范围为 9%~65%, 管道沉积物对各污染物的贡献范围为 8%~81%.

(4) 合流制管道改为初期雨水截流可减少其对城市面源污染的危害. 针对地表污染, 建议截流 12

mm 径流深的初期降雨, 针对整个排水分区污染, 建议管道总排口截流 25 mm 径流深的初期降雨以控制径流污染中 80% 的污染物.

参考文献:

- [1] 陈吉宁, 李广贺, 王洪涛. 滇池流域面源污染控制技术研究[J]. 中国水利, 2004, (9): 47-50.
Chen J N, Li G H, Wang H T. Reseach on area source pollution controlling technology for the Dianchi Lake[J]. China Water Resources, 2004, (9): 47-50.
- [2] 李立青, 尹澄清, 何庆慈, 等. 武汉市城区降雨径流污染负荷对受纳水体的贡献[J]. 中国环境科学, 2007, 27(3): 312-316.
Li L Q, Yin C Q, He Q C, et al. Contribution of pollution load of storm runoff in urban areas of Hanyang, Wuhan city on the receiving water[J]. China Environmental Science, 2007, 27(3): 312-316.
- [3] Zhang L Y, Rao B Q, Xiong Y, et al. The micobial mechanism of horizontal constructed wetland used to treated black-odor river[J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2010, 34(2): 256-261.
- [4] 赵越, 姚瑞华, 徐敏, 等. 我国城市黑臭水体治理实践及思路探讨[J]. 环境保护, 2015, 43(13): 27-29.
Zhao Y, Yao R H, Xu M, et al. Study on the practice and route of combating urban black-and-malodorous water body [J]. Environmental Protection, 2015, 43(13): 27-29.
- [5] Soonthornnonda P, Christensen E R. Source apportionment of pollutants and flows of combined sewer wastewater [J]. Water Research, 2008, 42(8-9): 1989-1998.
- [6] 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,

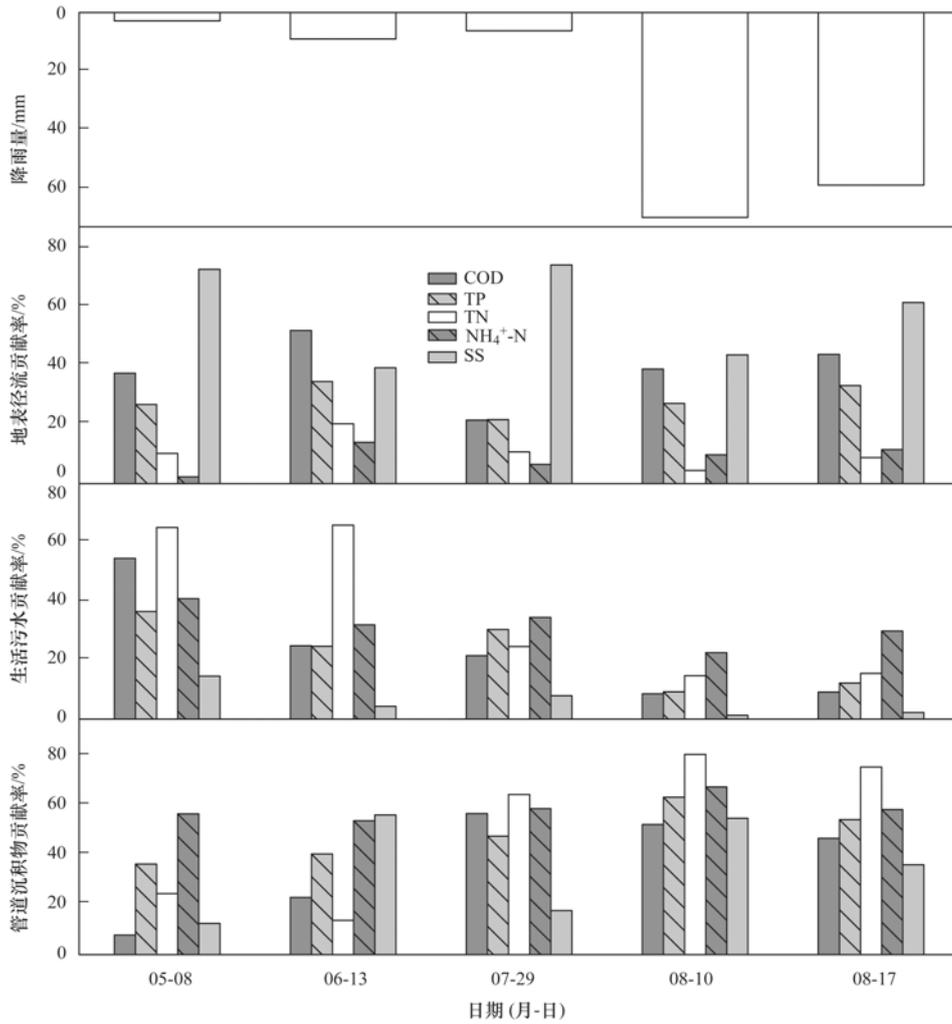


图 12 地表径流、旱流污水、管道沉积物对各污染物的贡献率

Fig. 12 Pollutant contribution rates in road runoff, domestic sewage, and sewer sediment

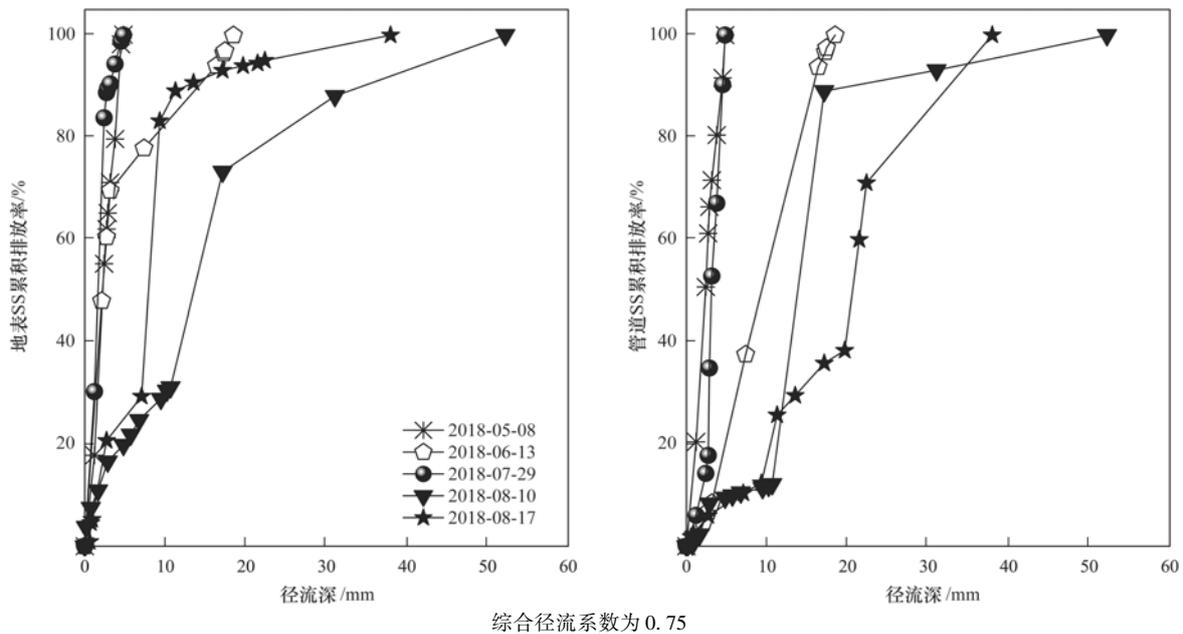


图 13 径流深与污染物累积排放率关系

Fig. 13 Relationship between the runoff depth and cumulative runoff rate of pollutants

- 2010, **44**(20): 5875-5886.
- [7] 戴梅红, 李田, 张伟. 合流制排水系统雨天溢流污染 CMB 法源解析[J]. 环境科学, 2013, **34**(11): 4226-4230.
Dai M H, Li T, Zhang W. Pollutant source apportionment of combined sewer overflows using chemical mass balance method [J]. *Environmental Science*, 2013, **34**(11): 4226-4230.
- [8] 汉京超. 城市雨水径流污染特征及排水系统模拟优化研究[D]. 上海: 复旦大学, 2013.
Han J C. Characteristics of urban rainwater runoff pollution and simulation & optimization of discharge systems [D]. Shanghai: Fudan University, 2013.
- [9] 杨逢乐, 赵磊. 合流制排水系统降雨径流污染物特征及初期冲刷效应[J]. 生态环境学报, 2007, **16**(6): 1627-1632.
Yang F L, Zhao L. Pollutant characteristics and first flush effect of runoff in combined sewer system [J]. *Ecology and Environment*, 2007, **16**(6): 1627-1632.
- [10] Mouri G, Oki T. Modelling sewer sediment deposition, erosion, and transport processes to predict acute influent and reduce combined sewer overflows and CO₂ emissions[J]. *Water Science & Technology*, 2010, **62**(10): 2346-2356.
- [11] 赵泽坤, 车伍, 赵杨, 等. 中美合流制溢流污染控制概要比较[J]. 给水排水, 2018, **54**(11): 128-134.
Zhao Z K, Che W, Zhao Y, *et al.* Summary comparison of combined sewer overflow control between China and the United States [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2018, **54**(11): 128-134.
- [12] 王家卓, 胡应均, 张春洋, 王晨. 对我国合流制排水系统及其溢流污染控制的思考[J]. 环境保护, 2018, **46**(17): 14-19.
Wang J Z, Hu Y J, Zhang C Y, *et al.* Some perspectives on combined sewer system and its overflow control in China [J]. *Environmental Protection*, 2018, **46**(17): 14-19.
- [13] 唐磊. 合流制改造及溢流污染控制技术与策略研究[D]. 北京: 北京建筑大学, 2013.
Tang L. Research on Technology and strategy of combined sewer system retrofits and overflow pollution control [D]. Beijing: Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2013.
- [14] 车伍, 唐磊. 中国城市合流制改造及溢流污染控制策略研究[J]. 给水排水, 2012, **48**(3): 1-5.
- [15] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. (第三版). 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [16] 贾可欣, 麦碧娴, 盛国英, 等. 珠江广州河段不同粒径沉积物中多氯联苯(PCBs)的分布特征[J]. 地球化学, 2003, **32**(6): 606-612.
Jia K X, Mai B X, Sheng G Y, *et al.* Grain-size distribution of polychlorobiphenyls in sediments of the Pearl River [J]. *Geochimica*, 2003, **32**(6): 606-612.
- [17] Kayhanian M, Suverkrupp C, Ruby A, *et al.* Characterization and prediction of highway runoff constituent event mean concentration[J]. *Journal of Environmental Management*, 2006, **85**(2): 279-295.
- [18] 李立青, 尹澄清. 雨、污合流制城区降雨径流污染的迁移转化过程与来源研究[J]. 环境科学, 2009, **30**(2): 368-375.
Li L Q, Yin C Q. Transport and sources of runoff pollution from urban area with combined sewer system [J]. *Environmental Science*, 2009, **30**(2): 368-375.
- [19] Gromaire M C, Garnaud S, Saad M, *et al.* Contribution of different sources to the pollution of wet weather flows in combined sewers[J]. *Water Research*, 2001, **35**(2): 521-533.
- [20] Sutherland R A. Lead in grain size fractions of road-deposited sediment[J]. *Environmental Pollution*, 2003, **121**(2): 229-237.
- [21] 王书敏, 蒋山泉, 孔花, 等. 小城镇街尘污染特征及控制对策[J]. 环境化学, 2013, **32**(6): 1009-1015.
Wang S M, Jiang S Q, Kong H, *et al.* Pollution characteristic and control measures of street dust in small towns [J]. *Environmental Chemistry*, 2013, **32**(6): 1009-1015.
- [22] 汤霞, 陈卫兵, 李怀正. 城市排水系统沉积物特性及清淤方式研究进展[J]. 城市道桥与防洪, 2013, (3): 106-110.
Tang X, Chen W B, Li H Z. Study on characteristics of sediments in urban sewer system and its desilting mode [J]. *Urban Roads Bridges & Flood Control*, 2013, (3): 106-110.
- [23] GB/T 28592-2012, 降水量等级[S].
- [24] Al-Khashman O A. Determination of metal accumulation in deposited street dusts in Amman, Jordan [J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 2007, **29**(1): 1-10.
- [25] Zhao H T, Zhao J, Yin C Q, *et al.* Index models to evaluate the potential metal pollution contribution from washoff of road-deposited sediment[J]. *Water Research*, 2014, **59**: 71-79.
- [26] Ma Y K, Hao S N, Zhao H T, *et al.* Pollutant transport analysis and source apportionment of the entire non-point source pollution process in separate sewer systems [J]. *Chemosphere*, 2018, **211**: 557-565.
- [27] Zhao H T, Li X Y, Wang X M. Heavy metal contents of road-deposited sediment along the urban-rural gradient around Beijing and its potential contribution to runoff pollution [J]. *Environmental Science & Technology*, 2011, **45**(17): 7120-7127.
- [28] 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.
- [29] 车伍, 葛裕坤, 唐磊, 等. 我国城市排水(雨水)防涝综合规划剖析[J]. 中国给水排水, 2016, **32**(10): 15-21.
Che W, Ge Y K, Tang L, *et al.* Analysis of integrated plan for urban drainage (stormwater) and flood control [J]. *China Water & Wastewater*, 2016, **32**(10): 15-21.
- [30] 车伍, 张鸥, 张伟, 等. 初期雨水与径流总量控制的关系及其应用分析[J]. 中国给水排水, 2016 **32**(6): 9-14.
Che W, Zhang K, Zhang W, *et al.* Analysis of initial rainfall and total runoff volume control [J]. *China Water & Wastewater*, 2016, **32**(6): 9-14.
- [31] 新版规范局部修订编制组. 2014 版《室外排水设计规范》局部修订解读[J]. 给水排水, 2014, **40**(4): 7-11.

CONTENTS

Concurrent Measurement of Wet and Bulk Deposition of Trace Metals in Urban Beijing	ZHANG Guo-zhong, PAN Yue-peng, TIAN Shi-li, <i>et al.</i> (2493)
Concentration and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in PM _{2.5} Collected in Urban and Suburban Areas of Beijing	XU Jing, LI Xing-ru, ZHANG Lan, <i>et al.</i> (2501)
Secondary Aerosol Formation in Urban Shanghai: Insights into the Roles of Photochemical Oxidation and Aqueous-Phase Reaction	GAO Jie, QIAO Li-ping, LOU Sheng-rong, <i>et al.</i> (2510)
Secondary Inorganic Pollution Characteristics During Heavy Pollution Episodes of 2017 in Tianjin	XU Hong, XIAO Zhi-mei, CHEN Kui, <i>et al.</i> (2519)
Characterization of PM ₁₀ and PM _{2.5} Source Profiles for Emissions from Nonmetal Mineral Products Manufacturing Processes	ZHAO Xue-yan, YU Gao-feng, WANG Xin-wu, <i>et al.</i> (2526)
Characteristics of Component Particle Size Distributions of Particulate Matter Emitted from a Waste Incineration Plant	YU Zhuo-jun, WU Jian-hui, ZHANG Yu-fen, <i>et al.</i> (2533)
Characteristics and Source Apportionment of Carbon Components in Road Dust PM _{2.5} and PM ₁₀ During Spring in Tianjin Derived by Using the Quadrat Sampling Method	MA Yan, JI Ya-qin, GUO Ji-liang, <i>et al.</i> (2540)
Urban Aerosol Hygroscopicity During Haze Weather	YANG Su-ying, TIAN Zhi-jie, ZHANG Tie-ning, <i>et al.</i> (2546)
Atmospheric Pollution Characteristics and Inhalation Exposure Risk of Nitrated Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in PM _{2.5} at the Ningdong Energy and Chemical Industry Base, Northwest China	LIU Pan-liang, JU Yuan-li, MAO Xiao-xuan, <i>et al.</i> (2556)
Health Benefit Evaluation for PM ₁₀ and PM _{2.5} Pollution Control in Zhengzhou, China, 2014-2016	HAN Shi-jie, WANG Jia, YAN Qi-she, <i>et al.</i> (2565)
Spatial-temporal Distribution of Aerosol Optical Depth and Its Main Influence Types in China During 1990-2017	LIU Ying, LIN Ai-wen, QIN Wen-min, <i>et al.</i> (2572)
Research on the Pollution Characteristics and Causality of Haze-sand Air Pollution in Beijing in Spring	WANG Yao-ting, LI Qing-chun, ZHENG Zuo-fang, <i>et al.</i> (2582)
Vessel Emission Inventories and Emission Characteristics for Inland Rivers in Jiangsu Province	XU Wen-wen, YIN Cheng-qi, XU Xue-ji, <i>et al.</i> (2595)
Atmospheric Nitrogen Dioxide, Nitric Acid, Nitrate Nitrogen Concentrations, and Wet and Dry Deposition Rates in a Double Rice Region in Subtropical China	OUYANG Xiu-qin, WANG Bo, SHEN Jian-lin, <i>et al.</i> (2607)
Characteristics of Stable Isotopes in Precipitation and Moisture Sources in the Headwaters of the Yangtze River	WANG Shao-yong, WANG Qiao-li, WU Jin-kui, <i>et al.</i> (2615)
Historical Trends of Atmospheric Trace Metal Pollution in Northern Guizhou Province as Reconstructed from Alpine Lake Sediments	LIANG Meng-yao, LIU En-feng, ZHANG En-lou, <i>et al.</i> (2624)
Distribution Characteristics of Microplastics in Qingdao Coastal Beaches	LUO Ya-dan, LIN Qian-hui, JIA Fang-li, <i>et al.</i> (2631)
Pollution Characteristics of Microplastics in Migratory Bird Habitats Located Within Poyang Lake Wetlands	LIU Shu-li, JIAN Min-fei, ZHOU Long-yin, <i>et al.</i> (2639)
Use of the Nitrogen/Carbon Ratio (N/C) and Two End-Member Sources Mixing Model to Identify the Origins of Dissolved Organic Matter from Soils in the Water-Level Fluctuation Zones of the Three Gorges Reservoir	JIANG Tao, JOERI Kaal, LIANG Jian, <i>et al.</i> (2647)
Effects of Photosynthesis of Submerged Aquatic Plants on CDOM in a Karst Water System: A Case Study from Xueyu Cave, Chongqing, China	FAN Jia-xin, JIANG Yong-jun, HE Qiu-fang, <i>et al.</i> (2657)
Indicators of Groundwater Evolution Processes Based on Hydrochemistry and Environmental Isotopes: A Case Study of the Dongyuan Drinking Water Source Area in Ji'nan City	ZHANG Ya, SU Chun-li, MA Yan-hua, <i>et al.</i> (2667)
Water Quality Analysis and Health Risk Assessment for Groundwater at Xiangshui, Chongzuo	ZHOU Jin-mei, JIANG Zhong-cheng, XU Guang-li, <i>et al.</i> (2675)
Chemical Characteristics of Groundwater and Material Sources Analysis in Buckwheat Field, Yunnan Province	ZHANG Yong, GUO Chun-qing, ZHU Yan-guang, <i>et al.</i> (2686)
C and N Transport Flux and Associated Changes of Water Quality Parameters from a Multiscale Subtropical Watershed in the Poyang Lake Area	LU Yao, GAO Yang, JIA Jun-jie, <i>et al.</i> (2696)
Pollutant Transport Analysis and Source Apportionment of the Entire Non-point Source Pollution Process in Combined Sewer Systems	FANG Jin-xiu, XIE Wen-xia, ZHOU Yu-xi, <i>et al.</i> (2705)
Nitrogen Removal Efficiencies from Road Runoff by Dry Grass Swales with a Shallow Substrate Layer	DUAN Jin-kai, LI Tian, ZHANG Jia-wei (2715)
Migration Characteristics of Manganese During Rainfall Events and Its Impacts on Water Quality in a Drinking Water Source Reservoir	DENG Li-fan, HUANG Ting-lin, LI Nan, <i>et al.</i> (2722)
Potential for Phosphorus Uptake by Bed Sediments and Its Response to Carbon Additions in the Shiwuli River, Chaohu Lake Basin	LI Ru-zhong, BAO Qin, ZHANG Rui-gang, <i>et al.</i> (2730)
Sources and Distribution of Phosphorus in Sediments of the Jimpen Reservoir	MAO Xue-jing, HUANG Ting-lin, LI Nan, <i>et al.</i> (2738)
Water Quality Characteristics and Distribution of Bacterial Communities During Thermal Stratification in the Miyun Reservoir	WANG Yu-bing, WANG Xiao-yan, PANG Shu-jiang, <i>et al.</i> (2745)
Relationship Between the Vertical Distribution of Nutrients and Bacterial Community Structures in Sediment Interstitial Waters of Stratified Reservoirs with Different Water Temperatures	WANG Shen, ZHANG Si-si, XU You, <i>et al.</i> (2753)
Accumulation Characteristics and Release Regularity of Nutrients in Sediments of a Surface-flow Constructed Wetland After Long-term Operation	ZHU Yi-meng, JIANG Cui-ling, ZHU Li-qin, <i>et al.</i> (2764)
Application of Goethite Modified Biochar for Arsenic Removal from Aqueous Solution	ZHU Si-hang, ZHAO Jing-jing, YIN Ying-jie, <i>et al.</i> (2773)
Effects and Mechanisms of Methyl Orange Removal from Aqueous Solutions by Modified Rice Shell Biochar	SHI Yue-yue, SHAN Riu, YUAN Hao-ran (2783)
Performance and Membrane Fouling Properties in an Anaerobic Membrane Bioreactor for Salty Wastewater	YAN Huan-xi, XU Zhen-yu, JIN Chun-ji, <i>et al.</i> (2793)
Pollution Characteristics and Enhanced Removal of Organic Phosphorus in Effluent from a Wastewater Treatment Plant	WANG Xiao-dong, WANG Zi-wen, CHEN Ming-fei, <i>et al.</i> (2800)
Effects of Alkalinity on Partial Nitrification in a Zeolite Sequencing Batch Reactor	WANG Rui-xin, CHEN Jing, WANG Xiao-jun, <i>et al.</i> (2807)
Effects of the Physical Structure of Activated Sludge on Respiration Processes	GUO Yao, LI Zhi-hua, YANG Cheng-jian, <i>et al.</i> (2813)
Performance of an Aerobic Granular Reactor Treating Biogas Slurry from Pig Farm	LIAO Jie, YE Jia-qi, ZENG Zhi-chao, <i>et al.</i> (2821)
Spatial-temporal Characteristics and Driving Factors of Greenhouse Gas Emissions from Rivers in a Rapidly Urbanizing Area	LIU Ting-ting, WANG Xiao-feng, YUAN Xing-zhong, <i>et al.</i> (2827)
Influences of Biochar on Pollutant Removal Efficiencies and Nitrous Oxide Emissions in a Subsurface Flow Constructed Wetland	DENG Chao-ren, LIANG Yin-kun, HUANG Lei, <i>et al.</i> (2840)
Effects of the Veterinary Antibiotic Sulfamethazine on N ₂ O Emissions and the Associated Microbiological Mechanism in a Rice Field	WU Jie, LI Zhi-lin, XU Jia-ying, <i>et al.</i> (2847)
Effects of Different Levels of Nitrogen Fertilization on Soil Respiration Rates and Soil Biochemical Properties in an Alfalfa Grassland	HU Wei, ZHANG Ya-hong, LI Peng, <i>et al.</i> (2858)
Spatial Distribution and Risk Assessment of Heavy Metals in Soils from a Typical Urbanized Area	HE Bo, ZHAO Hui, WANG Tie-yu, <i>et al.</i> (2869)
Accumulation of Heavy Metals in Agricultural Soils and Crops from an Area with a High Geochemical Background of Cadmium, Southwestern China	LIU Yi-zhang, XIAO Tang-fu, XIIONG Yan, <i>et al.</i> (2877)
Spatial Distribution Characteristics and Source Apportionment of Soil Heavy Metals in Chinese Wolfberry Land Based on GIS and the Receptor Model	BAI Yi-ru, ZHANG Xing, ZHAO Yun-peng, <i>et al.</i> (2885)
Spatial Distribution and Pollution Assessment of As at a Small Scale in Agricultural Soils of the Karst Region	WANG Hua, LIU Xiu-ming, LIU Fang, <i>et al.</i> (2895)
Soil Aggregate Stability and Its Stoichiometric Characteristics in <i>Robinia pseudoacacia</i> Forest within Different Vegetation Zones on the Loess Plateau, China	QU Qing, XU Hong-wei, WU Xuan, <i>et al.</i> (2904)
Straw Returning Plus Nitrogen Fertilizer Affects the Soil Microbial Community and Organic Carbon Mineralization in Karst Farmland	XU Xue-chi, SU Yi-rong, WANG Gui-hong, <i>et al.</i> (2912)
Effects of Biochar Application and Ageing on the Adsorption of Antibiotics in Purple Soil	YIN Wen-min, GUAN Zhuo, LIU Chen, <i>et al.</i> (2920)
Ammonia Oxidation in a Neutral Purple Soil Measured by the ¹⁵ N-DNA-SIP Method	LIU Tian-lin, WANG Zhi-hui, YAN Xiao-juan, <i>et al.</i> (2930)
Effects of Silver Nanoparticles and Silver Ions on Soil Nitrification Microorganisms and Ammonification	WU Ling-li, ZHANG Xu, SHU Kun-hui, <i>et al.</i> (2939)
Insight into the Process of Mn-ANAMMOX in Soils of Agricultural Drainage Ditches	CHEN Shi, LI Zheng-kui, QIN Yun-bin, <i>et al.</i> (2948)
Effects of Different Concentrations of Tetracycline in Sludge on Ammonia Oxidizers During Vermicomposting	WU Ying, HUANG Kui, XIA Hui, <i>et al.</i> (2954)