

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第9期

Vol.39 No.9

2018

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

长三角区域非道路移动机械排放清单及预测	黄成, 安静宇, 鲁君 (3965)
基于 COPERT 模型的江苏省机动车时空排放特征与分担率	李荔, 张洁, 赵秋月, 李慧鹏, 韩军赞 (3976)
上海典型燃烧源铅和汞大气排放趋势分析	杨静, 陈龙, 刘敏, 孟祥周, 张希 (3987)
广东省秸秆燃烧大气污染物及 VOCs 物种排放清单	孙西勃, 廖程浩, 曾武涛, 张永波, 梁小明, 叶代启 (3995)
重庆市北碚城区气溶胶中水溶性无机离子的质量浓度及其粒径分布	李彦沛, 郝庆菊, 温天雪, 吉东生, 刘子锐, 王跃思, 江长胜 (4002)
济南市夏、冬季 PM _{2.5} 中化学组分的季节变化特征及来源解析	刘晓迪, 孟静静, 侯战方, 李静, 邢继钊, 魏本杰, 张二勋, 刘加珍, 董杰 (4014)
聊城冬季一重污染过程 PM _{2.5} 污染特征及成因分析	张敬巧, 吴亚君, 张萌, 王涵, 陈振兴, 胡君, 李慧, 范晓龙, 柴发合, 王淑兰 (4026)
夏季青岛大气气溶胶中不同形态磷的浓度、来源及沉降通量	王楠, 马森, 石金辉, 高会旺, 姚小红 (4034)
晋城市冬季环境空气中挥发性有机物的污染特征及来源解析	杨帆, 闫雨龙, 戈云飞, 李如梅, 李颖慧, 余化龙, 彭林 (4042)
北京冬季降尘重金属富集程度及综合污染评价	熊秋林, 赵文吉, 李大军, 周涛 (4051)
合肥市典型交通干道大气苯系物的特征分析	孟凡昊, 秦敏, 梁帅西, 谢品华, 夏晖晖, 段俊, 方武, 唐科, 李昂, 魏桢, 王凤 (4060)
填埋场作业面 NMOCs 臭氧生成潜势及高贡献物质	李昊, 刘彦君, 陈坦, 闫秋鹤, 代辉祥, 王洪涛, 陆文静 (4070)
北京市混凝土搅拌站风蚀扬尘排放特征	李贝贝, 韩凯丽, 秦建平, 王鑫, 宋博, 黄玉虎, 张春来 (4078)
基于源解析的傍河水源地污染风险季节性变化特征分析	高翔, 左锐, 郭学茹, 孟利, 刘鑫, 王膜, 滕彦国, 王金生 (4086)
透水路面-生物滞留池组合道路的城市面源污染控制效果评估	官曼莉, 左俊杰, 任心欣, 赵洪涛, 罗茜, 廖云杰, 李叙勇 (4096)
黄河兰州段水体中有色溶解性有机质组成、空间分布特征及来源分析	赵夏婷, 李珊, 王兆炜, 谢晓芸 (4105)
黄河干流宁蒙段溶解性有机物组分特征及其与金属离子的相关性	席玥, 王婷, 倪晋仁, 韩鹏, 仪马兰, 郑彤, 蒋咏, 马若绮, 崔锋 (4114)
伊洛河和浑太河春季水体光学吸收特征的对比	李柳阳, 邵田田, 张鑫, 宋炎炎, 苏东辉, 王涛 (4122)
马莲河流域化学风化的季节变化和影响因素	王雨山, 韩双宝, 邓启军, 祁晓凡 (4132)
柳江盆地浅层地下水硝化型水特征和成因分析	徐进, 何江涛, 彭聪, 曾颖 (4142)
地下水氮污染原位修复缓释碳源材料的研发与物化-生境协同特性	张雯, 尹琳, 周念清 (4150)
三峡水库干流沉积物及消落带土壤磷形态及其分布特征	张志永, 万成炎, 胡红青, 彭建华, 侯娟, 丁庆秋, 袁玉洁 (4161)
蓄水前后三峡库区香溪河沉积物磷形态分布特征及释放通量估算	刘心愿, 宋林旭, 纪道斌, 刘德富, 李欣, 黄佳维, 赵冲, 唐咏春, 平明明 (4169)
锆改性沸石添加对重污染河道底泥磷释放和钝化的影响	何思琪, 张薇, 林建伟, 詹艳慧, 李娟英, 邢云青, 高春梅, 黄宏, 梁舒静 (4179)
洱海流域乡镇尺度上人类活动对净氮输入量的影响	李影, 刘宏斌, 雷秋良, 胡万里, 王洪媛, 翟丽梅, 任天志, 连慧妹 (4189)
我国典型潮间带沉积物-水界面无机氮源汇效应	聂家琴, 王东启, 陈杰, 李杨杰, 陈姝, 陈振楼 (4199)
东太湖水产养殖对沉积物中氨氧化原核生物的影响	储瑜, 何肖微, 曾巾, 赵大勇, 孙强, 曹萍, 吴庆龙 (4206)
处理采矿废水湿地沉积物中厌氧氨氧化过程	汪海波, 马丁, 岳正波, 陶巍, 陈天虎, 王进 (4215)
华东地区某饮用水源地中磺胺类抗性基因的分布特征	胡亚茹, 姜蕾, 张天阳, 雷丹丹, 姜巍巍, 张东, 林匡飞, 崔长征 (4222)
制革废水处理过程中磺胺类抗生素和抗性细菌的分布特征	花莉, 李璐, 杨春燕 (4229)
人工湿地不同基质和粒径对污水净化效果的比较	赵林丽, 邵学新, 吴明, 姜小三, 陆琳莹 (4236)
城市污水管网中不同生化作用的基质流向	姚翔译, 石烜, 桑浪涛, 金鹏康, 王晓昌 (4242)
微絮凝对腐殖酸超滤过程膜污染的减缓特性	王旭东, 石彩霞, 廖正伟, 贺毓淑, 王磊 (4249)
UV 强化草酸络合 Fe ³⁺ 活化过硫酸盐氧化降解苯胺	韩东晖, 李瑛, 李开明, 应光国 (4257)
焦化废水 A/O ² 和 A/O/H/O 处理工艺中多环芳烃的削减行为分析	吴海珍, 孙胜利, 刘国新, 韦景悦, 吴超飞, 韦朝海, 钟练文, 彭亚环 (4265)
长期侧流提取对 EBPR 系统除磷及其磷回收性能的影响	俞小军, 李杰, 周猛, 宋璐, 李维维, 王亚娥, 马娟, 吕慧 (4274)
NaCl 盐度对 A ² /O 工艺缺氧区胞外聚合物及生物絮凝性的影响	张兰河, 田蕊, 郭静波, 贾艳萍, 张海丰, 李正, 陈子成 (4281)
温度和 pH 值对铁盐型氨氧化过程氮素转化的影响	陈方敏, 金润, 袁琨, 李祥, 黄勇, 顾澄伟 (4289)
游离氨 (FA) 对氨氧化菌 (AOB) 活性抑制动力学试验	孙洪伟, 于雪, 高宇学, 李维维, 祁国平, 许涓 (4294)
HRT 对厌氧氨氧化协同异养反硝化脱氮的影响	安芳娇, 赵智超, 黄利, 黄剑明, 邵兆伟, 陈永志 (4302)
长期储存亚硝化絮状污泥活性的恢复	李田, 魏凡凯, 汪裕昌, 沈耀良, 吴鹏, 宋吟玲 (4310)
广西西江流域农田土壤重金属含量特征及来源解析	宋波, 张云霞, 庞瑞, 杨子杰, 宾娟, 周子阳, 陈同斌 (4317)
紫色土壤有机碳活性组分对生物炭施用量的响应	罗梅, 田冬, 高明, 黄容 (4327)
秸秆及生物炭还田对油菜/玉米轮作系统碳平衡和生态效益的影响	李娇, 田冬, 黄容, 徐国鑫, 黎嘉成, 高明, 王子芳 (4338)
低积累水稻品种联合腐殖酸、海泡石保障重镉污染稻田安全生产的潜力	谢晓梅, 方至萍, 廖敏, 黄宇, 黄小辉 (4348)
臭氧和干旱交互作用对杨树叶片抗氧化酶活性的影响	周慧敏, 李品, 高峰, 冯兆忠, 张殷波 (4359)
再生水不同灌水水平对土壤酶活性及耐热大肠菌群分布的影响	韩洋, 李平, 齐学斌, 崔丙健, 常迪, 马欢欢 (4366)
黄淮海地区鸡粪有机肥重金属含量特征及环境风险	李发, 徐应明, 王林, 梁学峰, 孙约兵, 纪艺凝, 栾润宇 (4375)
村镇生活垃圾重金属含量及其来源分析	靳琪, 高红, 岳波, 黄启飞, 王瑜堂, 吴小丹, 於俊颖, 杨惠媛 (4385)
《环境科学》征订启事 (3986)	《环境科学》征订简则 (4050) 信息 (4085, 4104, 4337)

透水路面-生物滞留池组合道路的城市面源污染控制效果评估

宫曼莉^{1,2}, 左俊杰³, 任心欣⁴, 赵洪涛^{1,2*}, 罗茜^{1,2}, 廖云杰^{1,2}, 李叙勇^{1,2}

(1. 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; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 江苏大学环境设计系, 镇江 212000; 4. 深圳市城市规划设计研究院, 深圳 518028)

摘要: 不同低影响开发 (LID) 技术组合对于控制城市面源污染具有重要应用价值, 但是其对城市面源污染形成过程 (污染物累积-冲刷-输送) 的影响及污染负荷削减效果的评估鲜见报道. 本研究以深圳市国际低碳城为例, 分析了 6 场降雨事件下透水路面-生物滞留池组合对城市面源晴天污染物累积量、降雨径流冲刷量、不同 LID 设施的削减量、溢流的负荷量的影响. 结果表明, 研究区地表颗粒物平均累积量为 $(15.80 \pm 3.79) \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$, 粒径 $> 250 \mu\text{m}$ 的颗粒物质量占比约为 65.14%; 6 场不同强度降雨对地表颗粒物的平均冲刷率为 17.15%, 粒径 $< 105 \mu\text{m}$ 的颗粒物冲刷率为 62.71% ~ 74.94%; 降雨冲刷地表径流污染物 SS、TN、TP 的平均污染负荷分别为 2.02、0.025、0.0013 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$; 透水路面下渗、过滤作用对污染物 SS、TN、TP 的去除率分别为 70.26%、46.29%、19.27%; 生物滞留池对径流二次净化去除率分别为 85.25%、20.22%、70.27%; 入河径流污染物 SS、TN、TP 的平均污染负荷分别为 0.08、0.011、0.0003 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$, 是地表冲刷污染负荷的 4.05%、43.47%、24.39%. 透水路面-生物滞留池组合应用对道路径流中污染物的净化效果显著. 通过量化表征透水路面-生物滞留池组合应用道路的城市面源污染形成过程, 以期为城市面源污染形成过程的污染负荷估算及 LID 工程绩效评估提供科学依据, 为 LID 在国内的推广应用和海绵城市设计提供参考.

关键词: 透水路面; 生物滞留池; 污染负荷; 累积; 冲刷; 净化效果

中图分类号: X52 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)09-4096-09 DOI: 10.13227/j.hjks.201712213

Evaluation of Effect of Urban Non-point Source Pollution Control on Porous Asphalt-Bio-retention Combined Roads

GONG Man-li^{1,2}, ZUO Jun-jie³, REN Xin-xin⁴, ZHAO Hong-tao^{1,2*}, LUO Xi^{1,2}, LIAO Yun-jie^{1,2}, LI Xu-yong^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Department of Environmental Design, Jiangsu University, Zhenjiang 212000, China; 4. Urban Planning and Design Institute of Shenzhen, Shenzhen 518028, China)

Abstract: Different combinations of low impact development (LID) technologies can be applied for control of urban non-point source pollution. There are currently few evaluations of urban non-point source pollution and pollution load reduction based on a combination of porous asphalt and bio-retention. Taking Shenzhen International Low Carbon City as an example, road-deposited sediments were collected prior to and after rainfall events. Runoff was monitored under six typical rainfall events, from porous asphalt and the inlet/outlet of bio-retention. Through analysis of changes in the process of “build-up—wash-off—transport” of pollutant loads, the average build-up of road-deposited sediments in the study area was found to be $(15.80 \pm 3.79) \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$; the mass percentage of road-deposited sediments (size $> 250 \mu\text{m}$) was approximately 65.14%. The average wash-off percentage of six different intensity rainfall events was 17.15%, and road-deposited sediments (size $< 105 \mu\text{m}$) were carried by 62.71% - 74.94%. The average pollution loads of surface runoff pollutants SS, TN, and TP were 2.02, 0.025, and 0.0013 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$, respectively. The removal rates of SS, TN, and TP through porous asphalt under infiltration and filtration were 70.26%, 46.29%, and 19.27%, respectively. The secondary purification removal rates of runoff water in bio-retention were 85.25%, 20.22%, and 70.27%, respectively. Pollutant loads into Dingshan River totaled 0.08, 0.011, and 0.0003 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$, representing 4.05%, 43.47%, and 24.39% of runoff. The combination thus had a significant effect on runoff purification. Through quantitative research on the formation of non-point source pollution, this paper provides a scientific basis for estimating pollution loads of urban non-point source pollution and evaluating the performance of LID projects. It makes suggestions for the popularization and application of LID and sponge city design in China.

Key words: porous asphalt; bio-retention; pollution loads; build-up; wash-off; purification effect

收稿日期: 2017-12-26; 修订日期: 2018-03-15

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41771529, 41471417); 国家水体污染控制与治理科技重大专项 (2015ZX07206-006-02)

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

* 通信作者, E-mail: htzhao@rcees.ac.cn

随着城市化进程的快速发展,城市水环境恶化、洪涝灾害频发、径流污染严重等一系列问题日益显现。人们逐渐认识到,城市面源污染是导致城市水体水质退化的重要原因之一^[1]。城市面源污染是指地表沉积物与大气沉降物等在降雨的淋溶和冲刷作用下,以广域、扩散的形式通过输入(污染物累积)、转化(污染物冲刷)、输出(污染物输送)这3个过程最终进入受纳水体引发的水体污染^[2]。与点源污染相比,面源污染的时空范围更广,不确定性更大,成分、过程更复杂^[3]。道路作为城市汇水面的重要组成部分,始终与排水设施紧密联系,是城市面源污染的关键源区^[4]。为了有效解决城市化带来的道路雨水系统问题,基于源头的分散式、小规模的低影响开发(LID)雨水控制措施在西方国家已得到广泛运用并且效果显著^[5~7]。我国借鉴国外先进的雨水管理经验,将低影响开发作为“海绵城市”建设的基本理念,在全国各地纷纷开展试点^[8]。

基于“源头-中途-末端”处理城市道路雨水的LID措施主要包括:透水铺装、雨水花园、生态树池、滞留槽、植被浅沟、湿塘等。透水路面和生物滞留池作为应用相对广泛的低影响开发措施,不仅可以有效地削减径流和洪峰,而且可以减少降雨径流造成的面源污染,已成为城市道路径流雨水控制系统的核心技术^[9]。如今透水路面和生物滞留池越来越多地开展组合应用。相比于生物滞留池,透水路面具有较大的设施表面积,但其滞蓄容积较小;相对于单一的生物滞留池,组合应用的生物滞留池进水来自透水路面下渗、过滤后的产流,透水路面使其入流变得平缓,间接提高设施的设计标准。因此,透水路面-生物滞留组合应用可能对地表径流的调控效果更为明显。

目前,国内外学者对道路径流水质及其控制效果开展了许多研究,主要集中在:道路污染物的来源、径流中污染物的迁移过程、径流污染物对受纳水体的影响及城市道路径流污染控制措施等方面^[10~12],而对于已经建成LID设施的海绵城市试点区域内城市面源污染形成过程及污染输出规律的研究少有报道。同时,污染物通过在透水路面的累积、降雨冲刷,经过透水路面-生物滞留池进行输送,最终排入河道是一个连续的过程,目前鲜见将以上过程作为一个整体进行量化研究;由于我国尚未建立全面的LID技术标准和完善的评价体系,开展针对透水路面-生物滞留池组合应用的产汇流机制及其净化效果研究显得尤为迫切。

鉴于此,本研究通过采集深圳市国际低碳城透水沥青路面晴天累积和降雨冲刷后的地表颗粒物,并监测6场降雨事件下降雨径流中污染物的冲刷量,分析不同LID设施的径流污染负荷削减量以及溢流的污染负荷量,量化表征地表污染物在透水路面-生物滞留池系统的“累积-冲刷-输送”过程,以期城市面源污染形成过程的污染负荷估算提供科学依据,并为LID在国内的推广和应用和海绵城市设计提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

深圳市国际低碳城是“国家低碳产业发展示范区”,肩负着低碳实验的使命,工程设计中采用多种低碳新技术,如透水沥青路面、初期雨水处理设施、生物滞留池、绿色屋顶等。低碳城启动区采用双层透水沥青路面,孔隙率约为20%,比普通道路明显提高排水量与排水速度。透水路面边缘采用聚树脂混凝土排水路缘石,既可以排出透水沥青层的雨水,又可以起到立道牙的作用。车行道透水沥青层的雨水经过横向排至路缘石中,路缘石中的雨水纵向排至道路生物滞留池的初期雨水处理设施中,初期雨水处理设施将雨水收集经过滤、吸油等处理后进行下渗,超过截污能力的雨水通过处理池溢流口漫流进入生物滞留带中,通过填料的吸附与过滤及植物根系吸收作用减少洪峰流量,净化雨水。生物滞留池的雨水径流下渗后通过穿孔管排入设置在绿化带内的溢流井中,继而进入市政雨水管道,排入毗邻的丁山河。透水沥青道路与生物滞留池的结构横断面见图1,初期雨水处理设施的横断面见图2。采样点选择在启动区内的塘桥西路,全长330 m,路宽20 m,为双向车道,平均车流量30辆·h⁻¹。透水沥青道路采样点汇水面积为35 m²,采样点具体情况见图3。

1.2 样品采集与处理

为研究地表污染物在透水路面-生物滞留池系统的“累积-冲刷-输送”过程,采集的样品包括:透水沥青道路累积晴天数一周以上的地表颗粒物、降雨冲刷后的地表颗粒物;降雨过程中产生的地表径流;生物滞留池的进水及溢流口穿孔管的出水。

地表颗粒物采集:于2017年5月~2017年7月观测的6场降雨前、后在塘桥西路透水沥青道路距离边坎1 m以内各随机布设6个1×1 m²的采样点,使用真空吸尘器(Philips FC8760)采集样

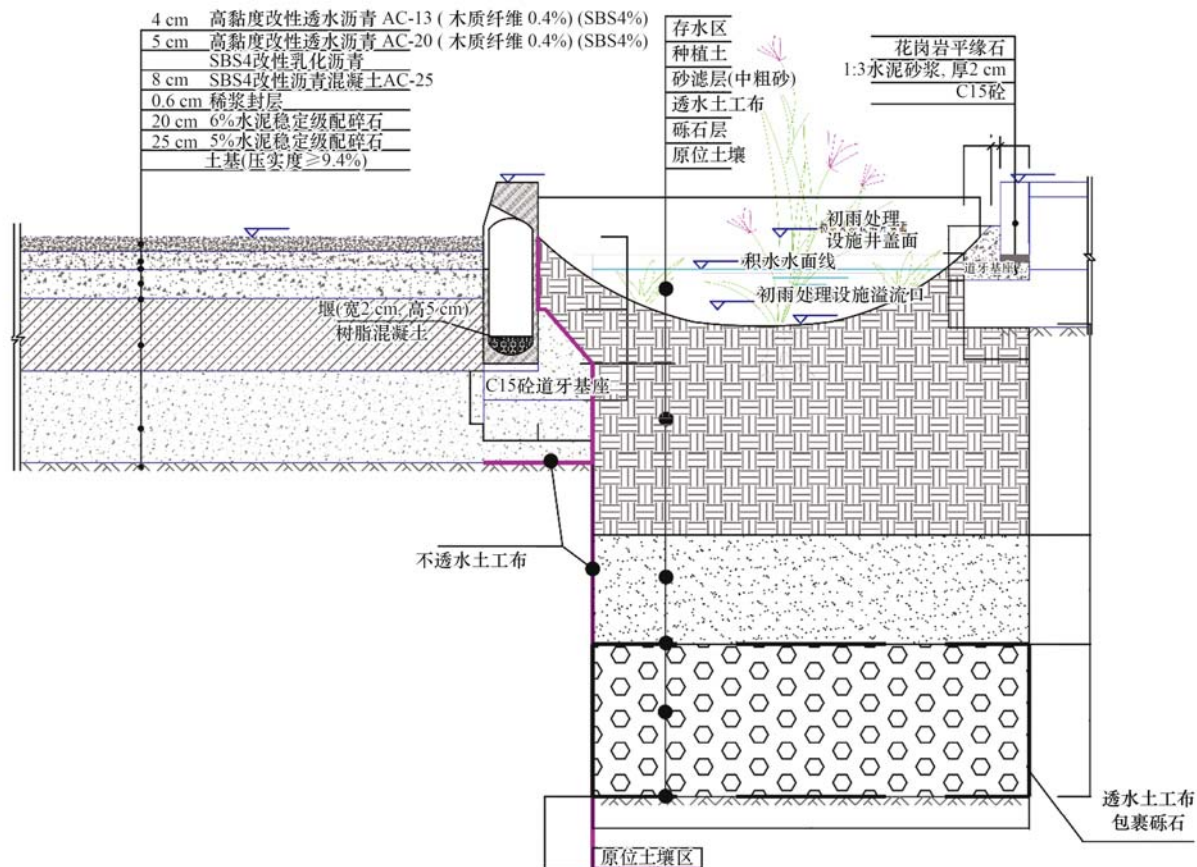


图 1 透水沥青道路与生物滞留池横断面

Fig. 1 Porous asphalt and bio-retention cross-sectional view

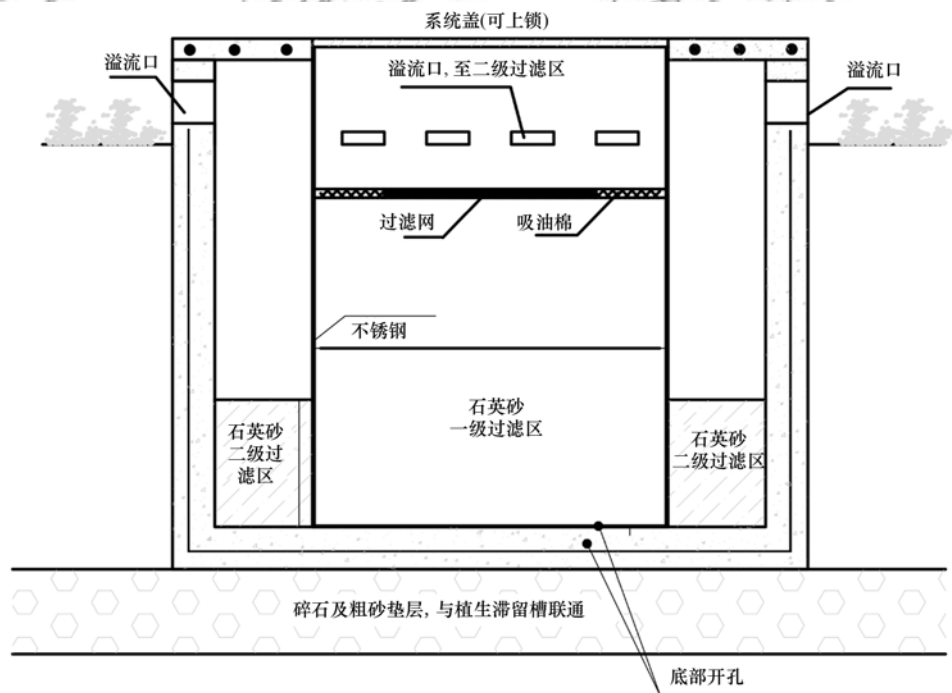


图 2 初期雨水处理设施横断面

Fig. 2 Initial storm water treatment facility cross-sectional view

方内全部地表颗粒物样品, 密封保存并记录. 取 约 300 g 采集好的样品通过粒径形态分析仪

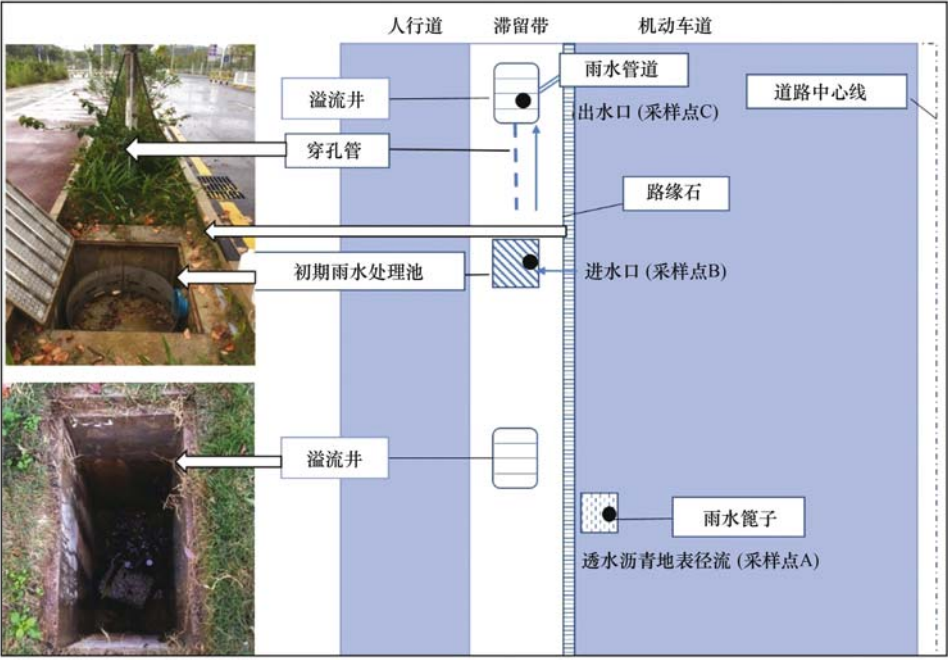


图3 研究区概化及采样点布设

Fig. 3 Study area overview and layout of sampling points

(Retsch AS200jet) 筛分为: < 44、44 ~ 62、62 ~ 105、105 ~ 149、149 ~ 250、250 ~ 450、450 ~ 1 000 μm 这 7 个粒径段, 并将每个粒径段的样品进行称重记录, 以备检测各粒径段颗粒物对 TN、TP 的负荷量^[13]。

降雨径流的采集: 为了观测降雨量, 在采样点附近安装 RG3-M 型翻斗式雨量计(Onset Computer Corporation, 美国 HOBO)。降雨时采用自制的取样工具用聚乙烯瓶在透水沥青道路雨水篦子(采样点

A)、生物滞留池进水口(采样点 B)和出水口(采样点 C)处收集径流样品。当透水沥青道路降雨径流产生时, 即开始采样, 地表径流按 1、5、10、20、30、50、70 min 分别采样, 生物滞留池进水口和出水口根据汇水量选择 10、20、30 min 为采样间隔进行采样, 各场次降雨特征如表 1 所示。样品采集后, 检测径流中 SS、TN、TP 的浓度, 用以分析透水路面-生物滞留池组合系统“累积-冲刷-输送”过程中污染物的浓度变化。

表 1 降雨事件基本特征

Table 1 Basic characteristics of rainfall events

监测编号	降雨事件类型 ¹⁾	降雨量 /mm	降雨时间 /min	平均雨强 /mm·h ⁻¹	干期长度 /h
20170504	暴雨	35.4	205	10.36	30
20170506	小雨	4.9	35	8.40	24
20170515	中雨	8.2	87	5.66	48
20170620	大雨	21.4	230	5.58	72
20170702	中雨	6.2	96	3.88	200
20170703	暴雨	30.4	69	26.43	5

1) 降雨事件类型参照中国气象局颁布的降水强度等级划分标准(12 h 降水总量): 小雨 ≤4.9 mm; 中雨 5.0 ~ 14.9 mm; 大雨 15.0 ~ 29.9 mm; 暴雨 30.0 ~ 69.9 mm; 大暴雨 70.0 ~ 139.9 mm; 特大暴雨 ≥140.0 mm^[14]

1.3 数据分析方法

1.3.1 场次降雨平均浓度

由于降雨特征和污染物本身性质的影响, 一场降雨过程中地表径流污染物浓度随时间变化很大。借鉴美国环保署(EPA)的经验, 采用场次降雨径流的平均浓度 EMC(event mean concentration)来表示

一场降雨地表径流全过程排放的某污染物的平均浓度, 可用下式表示^[15]:

$$EMC = \frac{M}{V} = \frac{\int_0^T c_t Q_t dt}{\int_0^T Q_t dt} \cong \frac{\sum c_t Q_t \Delta t}{\sum Q_t \Delta t} \quad (2)$$

式中, EMC 为场径流污染的平均浓度(mg·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).

1.3.2 径流污染负荷

城市降雨径流污染负荷是指一场降雨或多场降雨所引起的径流排放的污染物总量. 某种污染物的单位面积径流污染负荷可用下式表示^[16]:

$$L = 0.001 \sum_{i=1}^m \text{EMC}_i \times R_i \times P_i \quad (3)$$

式中, L 为某污染物单位面积径流污染负荷($\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$); 0.001 为单位转换系数; m 为采样次数; R_i 为第 i 场降雨的径流系数, 根据经验透水路面径流系数取 0.8^[17]; P_i 为第 i 场降雨的降雨量(mm).

本研究使用 OriginLab 公司研发的 Origin 9.0 软件进行作图.

2 结果与分析

2.1 地表颗粒物粒径分布及其污染特征分析

地表颗粒物是降雨径流中携带污染物的主要载体, 颗粒物的累积是形成地表径流污染的必要条件. 粒径作为表征颗粒行为的参数, 对污染物的迁移、转化有重要影响. 地表颗粒物的粒径分布是综合作用的结果, 与地面粗糙度、前期干旱天数、污染源分布、清扫频率、风速等因素有关^[18]. 经采样调查, 研究区域地表颗粒物平均累积量为 $(15.80 \pm 3.79) \text{g}\cdot\text{m}^{-2}$, 各个粒径段地表颗粒物累积量及其所吸附的污染物 TN、TP 的含量如图 4 所示. 结果表明, 透水沥青路面粗粒径 ($>250 \mu\text{m}$) 颗粒物单位面积累积量为 $(10.29 \pm 2.25) \text{g}\cdot\text{m}^{-2}$, 质量占比约为 65.14%, 这与透水沥青路面的建筑材料有关. 透水沥青路面粗集料多采用单一粒径碎石, 具有足够的表面粗糙度及构造深度^[19], 导致地表粗粒径颗粒物占比较大. 不同粒径颗粒物对污染物的吸附能力不同, 随着粒径的增加, 污染物的吸附能力逐渐降低. 粒径 $<44 \mu\text{m}$ 的颗粒物所吸附的污染物 TN、TP 的含量最高, 分别为 $1.35 \text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 、 $0.35 \text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$; 粒径 $<105 \mu\text{m}$ 的颗粒物所吸附的 TN、TP 含量和分别是 $105 \sim 1000 \mu\text{m}$ 颗粒物吸附污染物含量和的 2.14、3.34 倍. 大部分污染物被小粒径颗粒物吸附, 主要与小粒径颗粒物具有较大的比表面积有关.

2.2 降雨径流对地表颗粒物及污染物的冲刷作用

降雨冲刷是地表径流污染发生的驱动力, 而地

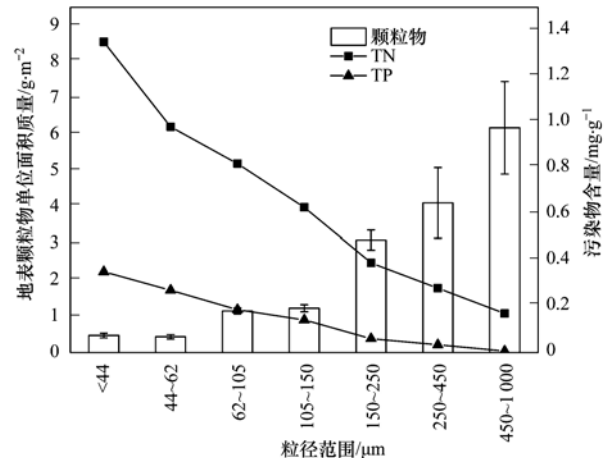


图 4 地表颗粒物粒径分布及其吸附的污染物含量

Fig. 4 Size distribution of road deposited sediments and their pollutant content

表颗粒物对城市面源污染产生的贡献取决于被径流冲刷进入水体的颗粒物所负载的污染物^[20]. 通过采集 6 场降雨前、后地表累积的颗粒物, 对比各个粒径段颗粒物的单位面积质量, 并计算降雨径流对各个粒径段颗粒物的平均冲刷率如图 5 所示. 结果显示, 6 场降雨径流对地表颗粒物的平均冲刷率为 17.15%, 对于粒径 $<105 \mu\text{m}$ 的颗粒物冲刷作用明显, 平均累积量从 $2.05 \text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ 减少至 $0.62 \text{g}\cdot\text{m}^{-2}$, 冲刷率可达到 62.71% ~ 74.94%. 随着粒径的增加, 颗粒物的冲刷率逐渐下降, 处于 $450 \sim 1000 \mu\text{m}$ 粒径段颗粒物仅被冲刷 3.29%, 由此可见, 不同粒径颗粒物在降雨径流冲刷作用下的迁移能力不同, 颗粒物粒径越小, 减少比率越大, 这与小粒径颗粒物比表面积较大, 吸附态较多, 在水化学条件下更易发生解析现象有关^[21].

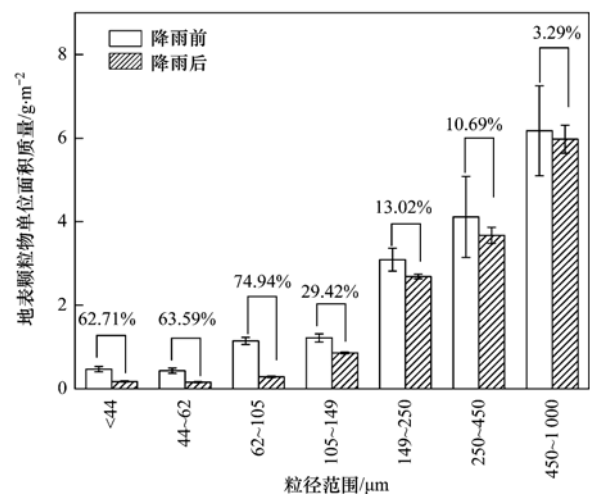


图 5 降雨前后各个粒径段地表颗粒物累积量及冲刷率

Fig. 5 Comparison of build-up load and wash-off percentage of different sized road-deposited sediments before and after rainfall events

2.3 透水路面-生物滞留池组合应用对地表径流水质的影响

透水沥青路面和生物滞留池是两种常见的低影响开发(LID)措施,其中透水路面只接受降水,而生物滞留池既接受降雨又接受客水.表2对比了6场降雨事件下透水路面地表径流(采样点A)、经过透水路面下渗、过滤并汇集至生物滞留池入口的径流(采样点B)和生物滞留池出口的径流(采样点C)水质情况,其中由于20170702降雨量较少,透水路面径流下渗汇集至B口处无产流.结果表明:通过透水路面的一次净化和生物滞留池的二次净化,径流水质改善效果显著,3个采样点SS场地平均浓度分别为142.63、42.42、6.26 mg·L⁻¹.由于透水沥青路面孔隙率高,内部有较好的空间网络结构,地表颗粒物通过滞留在孔隙中使得径流水体中的悬浮固体颗粒减少,氮、磷、有机物等污染物因吸附在小颗粒上或直接吸附在结构层表面而被去除^[22],透水路面对于SS、TN、TP的平均去除率分别为70.26%、46.29%、19.27%,其中,TP的去除率较低可能与研究区地表颗粒物所含TP浓度较低有关.

通过透水路面的一次净化,在进水浓度较低的情况下,生物滞留池对径流污染物仍然具有良好的净化效果,对SS、TN、TP的平均去除率分别为85.25%、20.22%、70.27%.由于生物滞留池中安装初期雨水处理设施,可以过滤径流中的粗颗粒物或碎叶等,对SS去除效果明显;当降雨事件大于25 mm·h⁻¹时,初期雨水处理装置容易发生溢流现象,溢流的径流污染物通过土壤的渗滤与植被的截

留得以净化.生物滞留池对于TN的去除效果不太稳定,这可能是由于雨水溢流渗入生物滞留带将填料中的营养物质冲出所导致的.对透水沥青道路雨水篦子(采样点A)、生物滞留池进水口(采样点B)和出水口(采样点C)这3个采样点的径流水质污染负荷进行比较,结果如图6所示.经过透水路面地表冲刷、透水路面下渗过滤汇集至生物滞留池入口、生物滞留池下渗过滤排入雨水管道最终排入河道这3个过程,地表径流SS的污染负荷分别为2.02、0.60、0.08 g·m⁻²;TN的污染负荷分别为0.025、0.013、0.011 g·m⁻²;总磷的污染负荷分别为0.0013、0.0011、0.0003 g·m⁻².排入河道的SS、TN、TP径流污染负荷分别为地表冲刷污染负荷的4.05%、43.47%、24.39%.可见,透水路面-生物滞留池二次净化对于地表径流水质的改善效果十分显著.

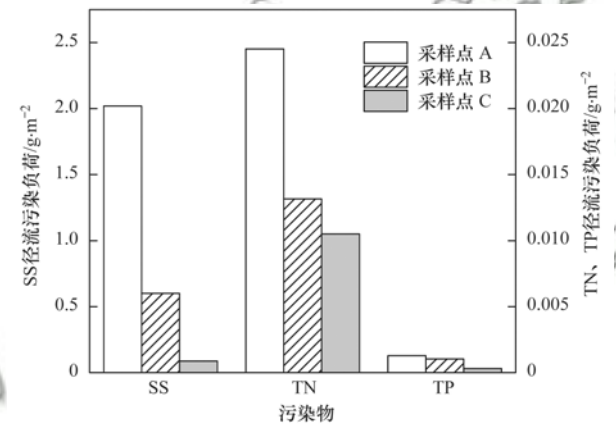


图6 3个采样点径流污染负荷比较
Fig. 6 Comparison of runoff pollution loads at three sampling points

表2 透水路面-生物滞留池组合应用对径流水质的净化效果

降雨编号	SS/mg·L ⁻¹			TN/mg·L ⁻¹			TP/mg·L ⁻¹			COD/mg·L ⁻¹		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C
20170504	230.20	56.83	9.80	2.07	0.89	0.63	0.15	0.12	0.03	80.30	47.44	29.67
20170506	64.60	34.62	10.42	1.35	1.04	0.99	0.12	0.09	0.04	59.80	50.00	25.73
20170515	150.70	38.87	2.26	1.09	0.89	0.70	0.09	0.08	0.01	70.40	37.80	30.71
20170620	190.60	33.42	4.67	2.23	0.87	0.75	0.07	0.05	0.01	60.90	34.73	19.76
20170702	130.50	— ¹⁾	—	1.76	—	—	0.07	—	—	67.30	—	—
20170703	89.20	48.34	4.13	1.89	0.96	0.64	0.05	0.03	0.02	77.80	37.35	15.87
平均 EMC/mg·L ⁻¹	142.63	42.42	6.26	1.73	0.93	0.74	0.09	0.07	0.02	69.42	41.46	24.35

1) 表示没测到相关数据

3 讨论

3.1 LID 建成道路的污染物“累积-冲刷-输送”特点

LID 作为我国海绵城市建设中最为重要的技术手段,能够有效解决大概率小降雨事件带来的面源污染问题.目前,国内外学者对单一 LID 设施的水

质净化效果及其机制有了较为深入的研究. Hatt 等^[23]在野外观测生物滞留池对径流污染负荷的去除效果,SS 的去除率超过 90%; Davis 等^[24]在实验室观测生物滞留池对污染物的迁移能力,揭示出其对磷的削减范围是 70%~85%,而对氮的削减能力不稳定,去除率为 15%~65%; Sansalone 等^[22]对

比不同类型路面对径流污染物的去除效果,结果表明经过透水路面渗流后,氮的浓度显著低于密实沥青道路.然而,以往的研究主要集中在 LID 设施对径流水质的净化效果,很少关注 LID 作用下污染物“累积-冲刷-输送”之间的关系;当前不同 LID 串联组合在中国海绵城市建设中普遍存在^[25],针对不同 LID 组合下城市面源污染全过程的研究更为罕见.本研究发现深圳国际低碳城 LID 已建成道路的干燥颗粒物累积量为 $12.01 \sim 19.59 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$,粒径分布以粗粒径($>250 \text{ }\mu\text{m}$)为主;多场降雨冲刷地表径流污染物 SS 浓度为 $33.42 \sim 56.83 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,降雨对地表颗粒物的平均冲刷率约为 17.15%;在进水浓度较低的情况下,透水沥青-生物滞留池组合对径流污染物 SS 的去除效果明显,可达到 95.61%.国内学者对传统城市面源污染调查发现:不同土地利用类型地表颗粒物粒径分布均以小于 $250 \text{ }\mu\text{m}$ 为主^[26].受排水形式及下垫面条件差异的影响,传统管道排水设施背景下的城市面源污染形成规律未必适用于以 LID 设施为主的海绵城市试点区域.海绵城市试点区域内地表颗粒物少是由于试点区域内车流量较少,污染源少,导致污染物累积量也少;透水沥青路面采用粗粒径碎石建造,细粒径大多嵌入结构深处,表面累积以粗粒径为主.由于降雨对粗粒径的地表颗粒物冲刷迁移的能力较弱,并且透水性对径流污染物的冲刷效应有直接影响,当雨水下渗能力增强时,产生的径流量减少,污染物的削减能力减弱,部分污染物被路面孔隙滞留,因此,污染物浓度远远低于传统道路.当前如何将试点区的 LID 设施推广应用到城市不同土地利用类型场地是

海绵城市设计的重点与难点,在 LID 设计时应结合场地降雨特点、污染物累积情况、下垫面类型等,因地制宜地进行海绵城市推广.

3.2 多种 LID 设施组合应用对径流污染控制的影响

在研究区域内,根据下垫面的特点和使用功能添加多种 LID 设施,既能最大限度发挥 LID 的功效,又能节省空间资源,是 LID 在城市使用中的最佳办法.由于实地监测海绵城市试点区域内多个 LID 组合作用下的径流污染物输送规律需要长期的降雨观测,存在一定的难度,目前国内对于多种 LID 设施组合应用的水质净化效果大多基于国外较成熟的模型模拟.表 3 对部分模拟结果进行了总结归纳^[27~29],结果表明多种 LID 设施组合布设对污染物的累积量削减效果明显.胡爱兵等^[30]使用 SWMM 模型优化模拟得出深圳国际低碳城示范区 LID 设施布局方案,示范区总面积 24 hm^2 ,其中透水铺装面积 3.6 hm^2 ,道路生物滞留池面积 0.12 hm^2 ,分别占示范区总面积的 15% 和 0.5%,LID 模型输出总径流量为 441.6 mm .若按照此方案进行 LID 组合布局,且只考虑透水路面,结合表 3 所示的多场降雨事件监测结果可知,深圳国际低碳城试点区每年道路径流总量可减少 $1.58 \times 10^4 \text{ m}^3$,SS、TN、TP 的年污染负荷至少可减少 1 583.3、12.65、0.27 kg;若经过透水路面的径流全部下渗并汇流至生物滞留池,同时生物滞留池不发生溢流现象,则 SS、TN、TP 的年污染负荷分别减少 2 154.7、15.45、1.08 kg,这必将有效缓解丁山河的非点源污染负荷,改善其水环境质量.

表 3 多种 LID 设施组合应用的水质净化模拟效果

Table 3 Water purification simulation effects for multiple LID facilities

研究区域	LID 布设方案	模型	降雨径流条件	污染物浓度削减率/%			文献
				SS	TN	TP	
天津市空港经济区,面积: 1.92 km^2	生物滞留池 3%,绿色屋顶 10%,透水路面 5%,植草沟 1.5%	SWMM	采用 1 年一遇设计暴雨降雨历时 120 min,降雨量 42.20 mm	9.6	10.2	13.6	[27]
嘉兴市晴湾佳苑,面积: 8.3 hm^2	雨水花园 6.25%,植被浅沟 40.18%,透水铺装 53.57%	SUSTAIN	采用 2014 年全年每日每小时降雨量 $1\,438 \text{ mm}$,最大小时降雨量为 125.4 mm	59	52	52	[28]
张家港市某住宅区,面积: 4.99 hm^2	绿色屋顶 48%,渗透路面 11%,植被浅沟 10%	SWMM	采用 5 年一遇设计暴雨降雨历时 120 min	36.5	33.7	35.6	[29]

4 结论

(1)透水沥青路面地表颗粒物平均累积量为 $(15.80 \pm 3.79) \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$,粗粒径($>250 \text{ }\mu\text{m}$)颗粒物质量占比大,约为 64.14%,这与透水沥青路面构

造和粗糙度有关.

(2)随着粒径的增加,降雨径流对地表颗粒物的冲刷率逐渐下降.6 场不同强度的降雨径流对地表颗粒物的平均冲刷率为 17.5%,对于细粒径($<105 \text{ }\mu\text{m}$)颗粒物冲刷作用明显,冲刷率为

62.71% ~ 74.94%。

(3) 透水路面-生物滞留池组合应用可有效削减径流中 SS、TN、TP 的污染负荷。透水沥青道路对地表径流中污染物 SS、TN、TP 的去除率分别为 70.26%、46.29%、19.27%；生物滞留池对透水沥青道路汇集进水污染物 SS、TN、TP 的去除率分别为 85.25%、20.22%、70.27%；排入河道的 SS、TN、TP 径流污染负荷分别为地表冲刷污染负荷的 4.05%、43.47%、24.39%。

参考文献:

- [1] 杨柳, 马克明, 郭青海, 等. 城市化对水体非点源污染的影响[J]. 环境科学, 2004, **25**(6): 32-39.
Yang L, Ma K M, Guo Q H, *et al.* Impacts of the urbanization on waters non-point source pollution[J]. Environmental Science, 2004, **25**(6): 32-39.
- [2] Wang L, Wei J H, Huang Y F, *et al.* Urban nonpoint source pollution buildup and washoff models for simulating storm runoff quality in the Los Angeles County[J]. Environmental Pollution, 2011, **159**(7): 1932-1940.
- [3] 赵建伟, 单保庆, 尹澄清. 城市面源污染控制工程技术的应用及进展[J]. 中国给水排水, 2007, **23**(12): 1-5.
Zhao J W, Shan B Q, Yin C Q. Application and progress in engineering technologies for controlling urban non-point source pollution[J]. China Water & Wastewater, 2007, **23**(12): 1-5.
- [4] Mahbub P, Ayoko G A, Goonetilleke A, *et al.* Impacts of traffic and rainfall characteristics on heavy metals build-up and wash-off from urban roads[J]. Environmental Science & Technology, 2010, **44**(23): 8904-8910.
- [5] Dietz M E. Low impact development practices: a review of current research and recommendations for future directions[J]. Water, Air, and Soil Pollution, 2007, **186**(1-4): 351-363.
- [6] Ahiablame L M, Engel B A, Chaubey I. Effectiveness of low impact development practices: literature review and suggestions for future research[J]. Water, Air, & Soil Pollution, 2012, **223**(7): 4253-4273.
- [7] Bedan E S, Clausen J C. Stormwater runoff quality and quantity from traditional and low impact development watersheds[J]. Journal of the American Water Resources Association, 2009, **45**(4): 998-1008.
- [8] Li H, Ding L Q, Ren M L, *et al.* Sponge city construction in China: a survey of the challenges and opportunities[J]. Water, 2017, **9**(9): 594.
- [9] Eckart K, McPhee Z, Bolisetti T. Performance and implementation of low impact development-A review[J]. Science of the Total Environment, 2017, **607-608**: 413-432.
- [10] Kim G, Yur J, Kim J. Diffuse pollution loading from urban stormwater runoff in Daejeon city, Korea[J]. Journal of Environmental Management, 2007, **85**(1): 9-16.
- [11] Ellis J B, Revitt D M. Quantifying diffuse pollution sources and loads for environmental quality standards in urban catchments[J]. Water, Air, & Soil Pollution: Focus, 2008, **8**(5-6): 577-585.
- [12] Panizza M, Cerisola G. Direct and mediated anodic oxidation of organic pollutants[J]. Chemical Reviews, 2009, **109**(12): 6541-6569.
- [13] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [14] 孔锋, 方建, 吕丽莉, 等. 1961—2015 年中国不同强度降雨的变化趋势和波动特征[J]. 热带地理, 2017, **37**(4): 473-483.
Kong F, Fang J, Lyu L L, *et al.* Tendency and fluctuation of different rainfall intensities in China during 1961-2015[J]. Tropical Geography, 2017, **37**(4): 473-483.
- [15] Kayhanian M, Suverkropp C, Ruby A, *et al.* Characterization and prediction of highway runoff constituent event mean concentration[J]. Journal of Environmental Management, 2007, **85**(2): 279-295.
- [16] 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.
- [17] 许萍, 孙昆鹏, 张雅君, 等. 深圳市光明新区城区径流污染负荷估算研究[J]. 环境保护科学, 2014, **40**(5): 19-23.
Xu P, Sun K P, Zhang Y J, *et al.* Study of pollution load estimation of urban runoff located in Guangming new district of Shenzhen city[J]. Environmental Protection Science, 2014, **40**(5): 19-23.
- [18] Sutherland R A. Lead in grain size fractions of road-deposited sediment[J]. Environmental Pollution, 2003, **121**(2): 229-237.
- [19] Mo L T, Huurman M, Woldekidan M F, *et al.* Investigation into material optimization and development for improved travelling resistant porous asphalt concrete[J]. Materials & Design, 2010, **31**(7): 3194-3206.
- [20] 赵洪涛, 李叙勇, 尹澄清. 街尘与城市降雨径流污染的关系综述[J]. 生态学报, 2012, **32**(24): 8001-8007.
Zhao H T, Li X Y, Yin C Q. Research progress on the relationship of pollutants between road-deposited sediments and its washoff[J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, **32**(24): 8001-8007.
- [21] Zhao H T, Li X Y, Wang X M, *et al.* Grain size distribution of road-deposited sediment and its contribution to heavy metal pollution in urban runoff in Beijing, China[J]. Journal of Hazardous Materials, 2010, **183**(1-3): 203-210.
- [22] Sansalone J, Kuang X, Ranieri V. Permeable pavement as a hydraulic and filtration interface for urban drainage[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2008, **134**(5): 666-674.
- [23] Hatt B E, Fletcher T D, Deletic A. Hydrologic and pollutant removal performance of stormwater biofiltration systems at the field scale[J]. Journal of Hydrology, 2009, **365**(3-4): 310-321.
- [24] Davis A P, Shokouhian M, Sharma H, *et al.* Water quality improvement through bioretention media: nitrogen and phosphorus removal[J]. Water Environment Research, 2006, **78**(3): 284-293.
- [25] Jia H F, Wang X W, Ti C P, *et al.* Field monitoring of a LID-BMP treatment train system in China[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2015, **187**(6): 373.
- [26] 朱伟, 边博, 李磊. 镇江城市径流颗粒粒径分布及其与污染物的关系[J]. 环境科学学报, 2008, **28**(4): 764-771.
Zhu W, Bian B, Li L. Particle size distribution and associated pollutants in urban runoff in Zhenjiang[J]. Acta Scientiae

- Circumstantiae, 2008, **28**(4): 764-771.
- [27] 胡作鹏, 刘志强, 彭森, 等. 低影响开发(LID)雨水径流控制效果模拟[J]. 环境工程学报, 2016, **10**(7): 3956-3960.
Hu Z P, Liu Z Q, Peng S, *et al.* Simulation of storm water runoff control effect by low impact development (LID) [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2016, **10**(7): 3956-3960.
- [28] 陈韬, 李研, 曹凯琳, 等. 基于 SUSTAIN 的小区 LID 对径流污染控制效果评价[J]. 中国给水排水, 2016, **32**(9): 144-148.
Chen T, Li Y, Cao K L, *et al.* Application of SUSTAIN to Evaluate runoff control effect of LID practices in a residential area [J]. China Water & Wastewater, 2016, **23**(9): 144-148.
- [29] 马箭, 沙晓军, 徐向阳, 等. 基于 SWMM 模型的低影响开发对城市住宅区非点源污染负荷的控制效果模拟[J]. 水电能源科学, 2015, **33**(9): 53-57, 52.
- [30] 胡爱兵, 任心欣, 丁年, 等. 基于 SWMM 的深圳市某区域 LID 设施布局与优化[J]. 中国给水排水, 2015, **31**(21): 96-100.
Hu A B, Ren X X, Ding N, *et al.* LID facilities layout and optimization in an area in Shenzhen based on SWMM [J]. China Water & Wastewater, 2015, **31**(21): 96-100.

《环境科学》再获“百种中国杰出学术期刊”称号

2017 年 10 月 31 日, 中国科技论文统计结果发布会在北京举行, 会议公布了“百种中国杰出学术期刊”获奖名单。《环境科学》连续 16 次荣获“百种中国杰出学术期刊”称号。“百种中国杰出学术期刊”是根据中国科技学术期刊综合评价指标体系进行评定。该体系利用总被引频次、影响因子、基金论文比、他引总引比等多个文献计量学指标进行统计分析, 对期刊分学科进行评比, 其评价结果客观公正, 为我国科技界公认, 并具有广泛影响。



CONTENTS

Emission Inventory and Prediction of Non-road Machineries in the Yangtze River Delta Region, China	HUANG Cheng, AN Jing-yu, LU Jun (3965)
Vehicle Exhaust Emission Characteristics and Their Contributions in Jiangsu Province	LI Li, ZHANG Jie, ZHAO Qiu-yue, <i>et al.</i> (3976)
Historical Trends of Atmospheric Pb and Hg Emissions from Fossil Fuel Combustion in Shanghai	YANG Jing, CHEN Long, LIU Min, <i>et al.</i> (3987)
Emission Inventory of Atmospheric Pollutants and VOC Species from Crop Residue Burning in Guangdong Province	SUN Xi-bo, LIAO Cheng-hao, ZENG Wu-tao, <i>et al.</i> (3995)
Mass Concentrations and Size Distributions of Water-soluble Inorganic Ions in Atmospheric Aerosols in Beibei District, Chongqing	LI Yan-pei, HAO Qing-ju, WEN Tian-xue, <i>et al.</i> (4002)
Analysis of Seasonal Variations in Chemical Characteristics and Sources of PM _{2.5} During Summer and Winter in Ji'nan City	LIU Xiao-di, MENG Jing-jing, HOU Zhan-fang, <i>et al.</i> (4014)
PM _{2.5} Pollution Characterization and Cause Analysis of a Winter Heavy Pollution Event, Liaocheng City	ZHANG Jing-qiao, WU Ya-jun, ZHANG Meng, <i>et al.</i> (4026)
Concentrations, Sources, and Dry Deposition Fluxes of Different Forms of Phosphorus in Qingdao Aerosols in Summer	WANG Nan, MA Miao, SHI Jin-hui, <i>et al.</i> (4034)
Characteristics and Source Apportionment of Ambient Volatile Organic Compounds in Winter in Jincheng	YANG Fan, YAN Yu-long, GE Yun-fei, <i>et al.</i> (4042)
Enrichment Levels and Comprehensive Pollution Assessment of Dust Heavy Metals in Winter in Beijing	XIONG Qiu-lin, ZHAO Wen-ji, LI Da-jun, <i>et al.</i> (4051)
Characteristics of Atmospheric BTX near a Main Road in Hefei City	MENG Fan-hao, QIN Min, LIANG Shuai-xi, <i>et al.</i> (4060)
Ozone Generation Potential and Highly Contributing Substances of NMOCs from Landfill Working Face	LI Hao, LIU Yan-jun, CHEN Tan, <i>et al.</i> (4070)
Emission Characteristics of Wind-Eroded Dust from Concrete Batching Plants in Beijing	LI Bei-bei, HAN Kai-li, QIN Jian-ping, <i>et al.</i> (4078)
Seasonal Variation Characteristics of Pollution Risk in a Riverside Source Area Based on Source Apportionment	GAO Xiang, ZUO Rui, GUO Xue-ru, <i>et al.</i> (4086)
Evaluation of Effect of Urban Non-point Source Pollution Control on Porous Asphalt-Bio-retention Combined Roads	GONG Man-li, ZUO Jun-jie, REN Xin-xin, <i>et al.</i> (4096)
Composition, Spatial Distribution Characteristics and Source Analysis of Chromophoric Dissolved Organic Matter in the Lanzhou Reach of the Yellow River	 ZHAO Xia-ting, LI Shan, WANG Zhao-wei, <i>et al.</i> (4105)
Characterization of Dissolved Organic Matter Fractions in the Ning-Meng Section of the Yellow River and Relationship with Metal Ions	XI Yue, WANG Ting, NI Jin-ren, <i>et al.</i> (4114)
Comparative Characteristics of Optical Absorption in Waters from Yiluo River and Huntai River in Spring	LI Liu-yang, SHAO Tian-tian, ZHANG Xin, <i>et al.</i> (4122)
Seasonal Variations in River Water Chemical Weathering and Its Influence Factors in the Malian River Basin	WANG Yu-shan, HAN Shuang-bao, DENG Qi-jun, <i>et al.</i> (4132)
Characteristics and Genesis of NO ₃ Type Water in Shallow Groundwater in Liujiang Basin	XU Jin, HE Jiang-tao, PENG Cong, <i>et al.</i> (4142)
Development and Evaluation of a Sustainable Long-release Carbon Material Applied for In-Situ Remediation of Groundwater Nitrogen Pollution	 ZHANG Wen, YIN Lin, ZHOU Nian-qing (4150)
Phosphorus Forms and Distribution Characteristics in the Sediment and Soil of the Water-Level-fluctuating Zone in the Main Stream of the Three Gorges Reservoir	 ZHANG Zhi-yong, WAN Cheng-yan, HU Hong-qing, <i>et al.</i> (4161)
Distribution Characteristics and Release Fluxes of Phosphorus Forms in Xiangxi Bay Sediments in the Three Gorges Reservoir Before and After Impoundment	 LIU Xin-yuan, SONG Lin-xu, JI Dao-bin, <i>et al.</i> (4169)
Effect of Zirconium-modified Zeolite Addition on Phosphorus Release and Immobilization in Heavily Polluted River Sediment	HE Si-qi, ZHANG Wei, LIN Jian-wei, <i>et al.</i> (4179)
Impact of Human Activities on Net Anthropogenic Nitrogen Inputs (NANI) at Township Scale in Erhai Lake Basin	LI Ying, LIU Hong-bin, LEI Qiu-liang, <i>et al.</i> (4189)
Simulation of Inorganic Nitrogen Fluxes at the Sediment-water Interface in a Typical Intertidal Zone, Eastern China	NIE Jia-qin, WANG Dong-qi, CHEN Jie, <i>et al.</i> (4199)
Effects of Aquaculture on Ammonia-oxidizing Prokaryotes in Sediments of Eastern Lake Taihu	CHU Yu, HE Xiao-wei, ZENG Jin, <i>et al.</i> (4206)
Transformation of Ammonia in Wetland Sediments for Treatment of Mining Wastewater	WANG Hai-bo, MA Ding, YUE Zheng-bo, <i>et al.</i> (4215)
Distribution Characteristics of Sulfonamide Antibiotic Resistance Genes in a Drinking Water Source in East China	HU Ya-ru, JIANG Lei, ZHANG Tian-yang, <i>et al.</i> (4222)
Distribution Characteristics of Sulfonamides and Sulfamethoxazole-Resistant Bacteria in Tannery Wastewater Treatment Processes	HUA Li, LI Lu, YANG Chun-yan (4229)
Effects of Different Substrates and Particle Sizes on Wastewater Purification	ZHAO Lin-li, SHAO Xue-xin, WU Ming, <i>et al.</i> (4236)
Substrate Flow by Different Biochemical Activities in the Urban Sewage Network	YAO Xiang-yi, SHI Xuan, SANG Lang-tao, <i>et al.</i> (4242)
Reducing Membrane Fouling from Micro-Flocculation in a Humic Acid Ultrafiltration Process	WANG Xu-dong, SHI Cai-xia, LIAO Zheng-wei, <i>et al.</i> (4249)
Enhanced Degradation of Aniline by PS Oxidation in the Presence of UV and Ferric Oxalate	HAN Dong-hui, LI Ying, LI Kai-ming, <i>et al.</i> (4257)
Behavior and Degradation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Coking Wastewater of A/O ² and A/O/H/O Processes	WU Hai-zhen, SUN Sheng-li, LIU Guo-xin, <i>et al.</i> (4265)
Effects of Long-term Side Stream Extracton on Phosphorus Removal and Recovery Performance of EBPR System	YU Xiao-jun, LI Jie, ZHOU Meng, <i>et al.</i> (4274)
Effect of NaCl Salinity on Extracellular Polymeric Substances and Bioflocculation of Anoxic Sludge in A ² /O Process	ZHANG Lan-he, TIAN Rui, GUO Jing-bo, <i>et al.</i> (4281)
Effect of Temperature and pH on Nitrogen Conversion in Feammox Process	CHEN Fang-min, JIN Run, YUAN Yan, <i>et al.</i> (4289)
Inhibitory Kinetics of Free Ammonia (FA) on Ammonia-oxidizing Bacteria (AOB)	SUN Hong-wei, YU Xue, GAO Yu-xue, <i>et al.</i> (4294)
Effect of HRT on Nitrogen Removal Using ANAMMOX and Heterotrophic Denitrification	AN Fang-jiao, ZHAO Zhi-chao, HUANG Li, <i>et al.</i> (4302)
Reactivation Performance of Nitrosation Flocculent Sludge After Long-term Storage	LI Tian, WEI Fan-kai, WANG Yu-chang, <i>et al.</i> (4310)
Analysis of Characteristics and Sources of Heavy Metals in Farmland Soils in the Xijiang River Draining of Guangxi	SONG Bo, ZHANG Yun-xia, PANG Rui, <i>et al.</i> (4317)
Soil Organic Carbon of Purple Soil as Affected by Different Application of Biochar	LUO Mei, TIAN Dong, GAO Ming, <i>et al.</i> (4327)
Effects of Straw and Biochar Addition on Soil Carbon Balance and Ecological Benefits in a Rape-maize Rotation Planting System	LI Jiao, TIAN Dong, HUANG Rong, <i>et al.</i> (4338)
Potential to Ensure Safe Production from Rice Fields Polluted with Heavy Cadmium by Combining a Rice Variety with Low Cadmium Accumulation, Humic Acid, and Sepiolite	 XIE Xiao-mei, FANG Zhi-ping, LIAO Min, <i>et al.</i> (4348)
Interactive Effects of Ozone and Drought on Antioxidant Enzyme Activities of Poplar Leaves	ZHOU Hui-min, LI Pin, GAO Feng, <i>et al.</i> (4359)
Effects of Different Levels of Irrigation with Reclaimed Water on Soil Enzyme Activity and Distribution of Thermotolerant Coliforms	HAN Yang, LI Ping, QI Xue-bin, <i>et al.</i> (4366)
Characteristics of Heavy Metals in Chicken Manure Organic Fertilizers in the Huang-Huai-Hai Region and related Environmental Risk Assessment	 LI Fa, XU Ying-ming, WANG Lin, <i>et al.</i> (4375)
Heavy Metal Content of Rural Living Solid Waste and Related Source and Distribution Analysis	JIN Qi, GAO Hong, YUE Bo, <i>et al.</i> (4385)