

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



2020

Vol.41 No.2
第41卷 第2期

目次

基于GAM模型分析中国典型区域网格化PM_{2.5}长期变化影响因素 南洋, 张倩倩, 张碧辉(499)

我国PCDD/Fs网格化大气排放清单 陈露露, 黄韬, 陈凯杰, 宋世杰, 高宏, 马建民(510)

成都平原PM_{2.5}中碳质组分时空分布特征与来源 史芳天, 罗彬, 张巍, 刘培川, 郝宇放, 杨文文, 谢绍东(520)

南京江北新区冬季PM_{2.5}中化学组分的昼夜变化特征及其来源解析 邱晨晨, 于兴娜, 丁铖, 时政, 张瑞芳, 侯思宇, 侯新红(529)

南京北郊四季PM_{2.5}中有机物的污染特征及来源解析 李栩婕, 施晓雯, 马嫣, 郑军(537)

长三角背景点夏季大气PM_{2.5}中正构烷烃和多环芳烃的污染特征和来源解析 薛国艳, 王榕慧, 吴灿, 谢郁宁, 陈玉宝, 李杏茹, 王心培, 李大鹏, 张思, 葛双双, 丁志健(554)

2017年秋季长春市PM_{2.5}中多环芳烃的污染来源及健康风险评价 张艺璇, 曹芳, 郑涵, 张东东, 翟晓瑶, 范美益, 章炎麟(564)

京津冀及周边区域PM_{2.5}叠加沙尘重污染过程特征及预报效果分析 朱媛媛, 高愈霄, 柴文轩, 王帅, 李亮, 王威, 王光, 刘冰, 王晓彦, 李健军(574)

河南省臭氧污染特征与气象因子影响分析 齐艳杰, 于世杰, 杨健, 尹沙沙, 程家合, 张瑞芹(587)

河南省气溶胶光学特性的时空变化特征 张瑞芳, 于兴娜(600)

黑炭气溶胶质谱仪(SP-AMS)分析春季PM_{2.5}中水溶性有机气溶胶 黄雯倩, 陈彦彤, 李旭东, 赵竹子, 马帅帅, 叶招莲, 盖鑫磊(609)

南京市黑碳气溶胶时间演变特征及其主要影响因素 杨晓旻, 施双双, 张晨, 王红磊, 王振彬, 朱彬(620)

连云港不同功能区挥发性有机物污染特征及臭氧生成潜势 乔月珍, 陈凤, 李慧鹏, 赵秋月(630)

挥发性有机物污染控制方案的运行费用效能比较 羌宁, 史天哲, 缪海超(638)

西安市大气降水污染和沉降特征及其来源解析 丁铖, 于兴娜, 侯思宇(647)

4种动物养殖场空气中抗生素耐药菌的多样性及群落结构 沙云菲, 孙兴滨, 辛文鹏, 高浩泽, 程首涛, 高敏, 王旭明(656)

辽宁省2000~2030年机动车排放清单及情景分析 金嘉欣, 孙世达, 王芃, 林应超, 王婷, 吴琳, 魏宁, 常俊雨, 毛洪钧(665)

国六柴油机DPF再生时VOCs排放特性 钱枫, 薛常鑫, 许小伟, 马东, 李朋, 祝能(674)

南小水流域地表水和地下水的稳定同位素和水化学特征及其指示意义 郭亚文, 田富强, 胡宏昌, 刘亚平, 赵思晗(682)

乐安河中下游重金属时空分布特征及风险评价 余杨, 吕雅宁, 王伟杰, 渠晓东, 刘聚涛, 温春云(691)

温榆河水环境质量与浮游植物群落结构的时空变化及其相互关系 朱利英, 陈媛媛, 刘静, 王亚炜, 王春荣, 魏源送, 张育新(702)

新安江水库河口区水质及藻类群落结构高频变化 笪文怡, 朱广伟, 黎云祥, 吴志旭, 郑文婷, 兰佳, 王裕成, 许海, 朱梦圆(713)

环渤海芦苇湿地磷的吸附容量及释放风险评估 宋佳伟, 徐刚, 张扬, 吕迎春(728)

洱海藻类水华高风险期沉积物氮磷释放通量时空变化 刘思儒, 赵继东, 肖尚斌, 倪兆奎, 王圣瑞(734)

西安市降雪中DOM荧光特性和来源分析 杨毅, 韩丽媛, 刘焕武, 雷颖, 李斌, 徐会宁(743)

透水砖铺装的设施构造对运行效果的影响 张佳炜, 刘勇, 金建荣, 李田(750)

微米SiC/石墨烯复合物光催化降解罗丹明B 朱红庆, 杨兵, 魏世强, 杨静静, 张进忠(756)

锰铁改性针簇莫来石对水中BPA和EE2的去除 周秋红, 龙天渝, 何靖, 郭劲松, 高俊敏(763)

载钼磁性水热生物炭的制备及其除磷性能 宋小宝, 何世颖, 冯彦房, 花昀, 唐婉莹, 朱秋蓉, 薛利红, 杨林章(773)

复合金属改性生物炭对水体中低浓度磷的吸附性能 孙婷婷, 高菲, 李莉, 黎睿, 董勇(784)

磁性硅藻土负载纳米氧化钙对水中磷酸盐吸附 徐楚天, 李大鹏, 张帅, 耿雪, 陈丽媛, 宋小君, 郭超然, 黄勇(792)

污水厂尾水受纳河段沉积物磷形态及释放风险效应 汤宁, 李如忠, 王聿庆, 何瑞亮, 刘超(801)

生物膜生态浮床对城市尾水净化特征分析 赵志瑞, 张佳瑶, 李铎, 李方红(809)

磁凝凝对市政污水中抗生素抗性基因和重金属抗性基因的削减效能 于雯超, 郑利兵, 魏源送, 王哲晓, 张鹤清, 黄光华, 焦赞仪, 吴振军(815)

四环素抗生素对污泥中四环素抗性基因丰度和表达水平的作用影响 阮晓慧, 钱雅洁, 薛罡, 高品(823)

异养硝化细菌*Pseudomonas aeruginosa* YL的脱氮过程及N₂O产生特性 杨垒, 崔坤, 任勇翔, 郭淋凯, 张志昊, 肖倩, 陈宁, 汪旭晖(831)

包埋厌氧氨氧化菌的环境因子影响特性及群落结构分析 王晓瞳, 杨宏, 苏扬, 刘旭妍(839)

包埋反硝化填料强化二级出水深度脱氮性能研究及中试应用 周亚坤, 杨宏, 王少伦, 何海超, 刘宗跃, 苏扬, 张辉(849)

厌氧时间对间歇进水-间歇曝气的好氧颗粒污泥系统影响 张杰, 王玉颖, 李冬, 曹思雨, 李帅(856)

除磷颗粒诱导的同步短程硝化反硝化除磷颗粒污泥工艺 李冬, 刘博, 王文琪, 张杰(867)

桂西南地球化学异常区农田重金属空间分布特征及污染评价 王佛鹏, 肖乃川, 周浪, 庞瑞, 宋波(876)

青藏高原表土重金属污染评价与来源解析 杨安, 王艺涵, 胡健, 刘小龙, 李军(886)

黄河三角洲不同植物群落土壤酶活性特征及影响因子分析 莫雪, 陈斐杰, 游冲, 刘福德(895)

管理措施对黄土高原油松人工林土壤水溶性碳氮及其三维荧光特征的影响 宋亚辉, 张娇阳, 刘鸿飞, 薛蕙, 李秧秧(905)

生物炭输入对不同滨岸带土壤营养元素有效态变化的影响 周慧华, 袁旭音, 熊钰婷, 韩年, 叶宏萌, 陈耀祖(914)

水热炭减少稻田氨挥发损失的效果与机制 余姗, 薛利红, 花昀, 李德天, 谢斐, 冯彦房, 孙庆业, 杨林章(922)

接种菌根真菌对湿生植物根际土壤硝化反硝化活性的影响及其微生物机制 刘焱, 王磊, 曹湛波, 段灏(932)

基于漂浮箱法和扩散模型测定淡水养殖鱼塘甲烷排放通量的比较 胡涛, 黄健, 丁颖, 孙志荣, 徐梦凡, 刘树伟, 邹建文, 吴双(941)

超高效液相色谱串联质谱法同时测定叶菜中13种抗生素 陈乾, 刘洋, 肖丽君, 邹德玉, 刘海学, 吴惠惠(952)

青菜中镉的吸收和累积对晒的响应规律 余焱, 罗丽韵, 刘哲, 付平南, 李花粉(962)

两种不同镉富集能力油菜品种耐性机制 卞建林, 郭俊梅, 王学东, 杨俊兴, 杨军, 陈同斌, 曹柳, 成永霞, 任战红, 王杰, 周小勇(970)

可生物降解螯合剂GLDA强化三叶草修复镉污染土壤 贺玉龙, 余江, 谢世前, 李佩柔, 周宽, 何欢(979)

我国畜禽粪便重金属含量特征及土壤累积风险分析 穆虹宇, 庄重, 李彦明, 乔玉辉, 陈清, 熊静, 郭丽莉, 江荣风, 李花粉(986)

畜禽粪便和桃树枝工业化堆肥过程中微生物群落演替及其与环境因子的关系 蔡涵冰, 冯雯雯, 董永华, 马中良, 曹慧锦, 孙俊松, 张保国(997)

4种粪便堆肥过程中抗生素的降解特性 朱为静, 朱凤香, 王卫平, 洪春来, 姚燕来(1005)

《环境科学》征订启事(553) 《环境科学》征稿简则(655) 信息(664, 755, 885)

透水砖铺装的设施构造对运行效果的影响

张佳炜, 刘勇, 金建荣, 李田*

(同济大学环境科学与工程学院, 上海 200092)

摘要:为考察缝隙透水砖铺装的基层构造与材料对设施运行效果的影响, 在上海市区建造了2个缝隙透水砖铺装(permeable interlocking concrete pavement, PICP)与1个不透水混凝土铺装(concrete pavement, CP)停车场, 其中2个缝隙透水砖铺装分别采用水泥稳定碎石(PICP1)和普通碎石(PICP2)作为基层结构. 在2018年实际降雨条件下对2个设施的水文效果及底部出流水质进行了长期监测. 结果表明PICP1与PICP2的年径流总量控制率相近, 分别为37.0%和38.7%, PICP1的峰值削减率及峰现延迟时间略优于PICP2. 水质控制效果方面, PICP1比PICP2有更好地 NH_4^+ -N转化效果, 两种设施底部出流均存在 NO_3^- -N淋出现象; PICP1底部出流的TSS、TP、颗粒态磷和溶解态磷浓度均低于PICP2. 采用水泥稳定碎石作为基层有助于提高设施的水质净化效果, 并改善设施的水文控制效果.

关键词:透水铺装(PICP); 设施构造; 水泥稳定碎石; 水文效应; 水质效果

中图分类号: X52 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)02-0750-06 DOI: 10.13227/j.hjkk.201908085

Performance Assessment of Permeable Interlocking Concrete Pavement Facility Structure

ZHANG Jia-wei, LIU Yong, JIN Jian-rong, LI Tian*

(College of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Two permeable parking lots and one impervious concrete pavement were constructed in Shanghai to study the hydrological and water quality performance of permeable interlocking concrete pavements (PICP) with different base course materials. The hydrological performance and water quality of the influent and effluent under actual precipitation conditions in 2018 were monitored, and the two PICPs used cement-stabilized crushed stones (PICP1) and crushed stones (PICP2) as the base course, respectively. Results show that the annual total volume reduction rates of PICP1 and PICP2 are 37.0% and 38.7%, respectively. The peak flow reduction rate and the time to the peak flow of PICP1 are slightly better than PICP2. PICP1 has better transformation efficiency on NH_4^+ -N in comparison to PICP2, and the release of NO_3^- -N occurs in both PICPs. Moreover, PICP1 has lower effluent concentrations than PICP2 on pollutants like TSS, TP, PP, and DP. The PICP with cement-stabilized crushed stones as base course is helpful to improve the hydrological performance and water quality of the effluent.

Key words: permeable pavement; facility structure; cement stabilized crushed stones; hydrological effect; water quality improvement

城市化进程的推进改变了城市原有土地利用形式, 导致道路径流在水质和水量上发生了巨大变化^[1,2]. 透水铺装作为一种源头分散应用的低影响开发技术, 在不额外占用城市土地的情况下可以削减径流量、减少洪峰流量^[3], 并削减面源污染, 已在国外受到广泛认可^[4,5].

级配碎石是透水铺装基本的基层材料. 通过在碎石中掺加少量水泥可弥补碎石基层强度低和稳定性差的弊端. 文献[6]指出, 选用水泥稳定碎石作为透水铺装基层材料不会影响设施的透水性能, 且有利于提高设施的承压能力. 根据发达国家相关技术规程规定^[7,8], 简单型透水铺装仅可应用于设施底部距地下水位高于1 m的地区, 国内文献[9]也提出了透水铺装的土基距离地下水位宜大于1 m的要求. 因此在透水铺装建造过程中, 选用水泥稳定碎石作为基层材料, 不仅有利于提高设施的荷载能力, 在结构方面还能够适当减少设施厚度, 适合上海等地下水位地区城市的应用.

本课题组前期的研究结果表明^[10], 缝隙透水砖铺装对下渗雨水的水质具有明显改善作用. 然而迄今为止, 国内对不同基层构造的透水砖铺装长期运行中的效果评价鲜有报道. 为比较以水泥稳定碎石和普通级配碎石为基层结构的透水砖铺装对底部出流的水质控制效果及水文效果, 本文建造了两个基层构造不同的透水砖铺装停车场, 通过现场实验确定两种基层结构的透水砖铺装在实际降雨条件下的长期运行效果, 以期对透水砖铺装在上海及其周边地区的工程应用提供技术支撑.

1 材料与方法

1.1 实验设施

在同济大学校内某停车场搭建2个实验性缝隙

收稿日期: 2019-08-10; 修订日期: 2019-09-17

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2017ZX07207001)

作者简介: 张佳炜(1995~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为城市面源污染控制, E-mail: jiaweizhang0322@163.com

* 通信作者, E-mail: tianli@tongji.edu.cn

透水砖铺装设施(PICP)与1个不透水混凝土铺面对照(CP). 3个设施规格均为6 m×6 m,均无额外汇水面积,并设置混凝土镶边以消除大雨条件下相邻地块径流的影响. 其中2个透水铺装设施面层材料均为混凝土缝隙透水砖,基层分别为水泥稳定碎石基层(PICP1)和普通碎石基层(PICP2),底部均铺有HDPE防渗膜,相关设施的构造与材料如表1所示. 其中各设施面层均做出1%~2%的坡度,并于低端设宽约10 cm的排水边沟以收集表面径流,设施PICP1和PICP2找平层下均垫有透水土工布,于底部设穿孔排水管. 各设施的表面径流与底部出流通过监测井连接至30°三角堰,结合超声波液位计和数据记录仪对降雨径流过程进行监测,参照规程^[11]

计算设施底部出流及表面径流的产流情况. 在距实验现场约100 m处屋顶安装SL3-A翻斗式雨量计,对同期场地降雨情况进行实时监测.

本实验以前期无雨期大于6 h,降雨量大于2.0 mm的降雨视为一场有效降雨事件. 参照文献[9]中相关定义,通过公式(1)对监测期内所有降雨事件计算各设施的年径流总量控制率;针对监测期间所有产生出流的降雨事件,以设施出流过程中第一个出峰值为对象,计算每场降雨透水铺装设施相对于对照设施的峰值削减率及峰现延迟时间.

$$\text{年径流总量控制率} = \frac{\text{降雨量} - \text{底部出流} - \text{表面产流}}{\text{降雨量}} \times 100\% \quad (1)$$

表1 实验设施结构

Table 1 Facility structures used in experiment

设施名称	结构	构造	深度/mm	结构材料
CP	不透水对照	面层	150	普通水泥混凝土
		结构层	300	粒径20~40 mm碎石
PICP1	底部不透型	面层	60	混凝土缝隙透水砖
		找平层	20	粒径0.5~1.0 mm粗砂
		基层	200	5%水泥+骨料15 mm以下碎石的水泥稳定碎石
		垫层	350	粒径20~40 mm碎石
PICP2	底部不透型	面层	60	混凝土缝隙透水砖
		找平层	20	粒径0.5~1.0 mm粗砂
		基层	200	粒径15 mm以下碎石
		垫层	350	粒径20~40 mm碎石

1.2 样品采集与数据分析

3个单元设施相邻并列,CP设施的表面径流水质与产流过程可作为设施PICP1和PICP2的空白对照. 在CP产生表面径流以及PICP设施底部发生出流的初期,在监测井三角堰出口每隔5~10 min人工采集一次表面径流与底部出流样品,后期视具体降雨强度每隔30~60 min采集一次样品. 所采集水样存放在1 L聚乙烯采样瓶中并于4℃冰箱贮存,于采样后24 h内尽快检测. 本实验所考察的水质指标均采集过程样品,结合三角堰系统提供的瞬时流量,计算单场降雨的事件平均浓度(EMC). 具体水质指标均采用国家标准检测方法测定,其中溶解态磷(DP)浓度由总磷(TP)浓度减去颗粒态磷(PP)浓度所得,检测指标包括TSS、COD、TP、DP、PP、TN、NH₄⁺-N和NO₃⁻-N. 本实验采用SPSS 22软件对实验数据进行统计,由于相关数据呈现正态分布但方差不齐,故采用Games-Howell法对设施表面径流和底部出流的EMC均值进行单因素方差分析,并利用Pearson相关系数法进行相关性分析.

2 结果与讨论

2.1 降雨事件监测

2018年1~12月监测期间的累积降雨量为1 051.3 mm,PICP1和PICP2发生底部出流的场次分别为32场和30场,其相关降雨特征如表2所示.

对2018年4~9月所发生降雨事件中的8场降雨进行水质监测,其中降雨量小于10.0 mm的降雨事件2场,10.0~24.9 mm的3场,25.0~49.9 mm的1场,大于50.0 mm的2场,降雨事件包括不同类型降雨,相关水质检测结果具有代表性.

表2 2018年设施发生出流降雨事件特征统计

Table 2 Characteristics of monitored rainfall events with outflow in 2018

项目	最大值	最小值	中值	平均值
降雨量/mm	65.8	2.0	9.3	14.9
降雨历时/h	48.6	0.5	9.7	12.0
平均降雨强度/mm·h ⁻¹	11.4	2.2	2.6	4.2
前期晴天数/d	24.7	0.3	3.3	4.3

2.2 设施水文控制效果

本课题组前期实验结果表明,设施PICP1与

PICP2 在 2016 年的监测过程中年径流总量控制率相近,不存在显著差异^[12]. 本文以 2018 年各设施表面产流以及 2 个 PICP 设施底部出流过程的实测数据进行对照,评价 PICP1 和 PICP2 的水文效果,并采用双环渗透仪测定了 2 个 PICP 设施的表面渗透速率.

整个实验期间,设施 CP、PICP1 与 PICP2 分别产生表面径流 811.2、31.6 和 28.4 mm. 与空白设施 CP 相比,PICP1 与 PICP2 表面径流削减率分别为 96.1% 和 96.5%. PICP1 与 PICP2 的年径流总量控制率相近,分别为 37.0% 和 38.7%. 监测结果表明两个不透型透水铺装设施对年径流总量均有较好地控制效果,水泥稳定碎石基层的设置不会影响设施的水量控制能力. 如表 3 所示,2017 年 9 月的测定结果表明两种设施的表面渗透速率相近,分别为 $0.13 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 $0.14 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$;至 2019 年 3 月,测定值分别降至 $0.07 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 $0.10 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$. 设施在运行一年多后,PICP2 的渗透速率仍达到相关规范所要求的 $10^{-4} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ^[13],表现出较好的渗透性能;而 PICP1 的渗透速率在运行一年多后低于 PICP2,这可

能是由于该设施在 2017 年进行面层翻修时,找平层的部分杂质落入基层,经降雨冲刷后产生堵塞,因而设施的渗透性能稍差于 PICP2. 但表 3 中 PICP1 的渗透速率仍达到规范对新建设施要求值的 70%,与多数投入实际使用中的 PICP 设施相比^[14],其渗透速率仍令人满意.

表 3 设施表面渗透速率测定结果

时间(年-月)	表面渗透速率/ $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$	
	PICP1	PICP2
2017-09	0.13	0.14
2019-03	0.07	0.10

PICP1 与 PICP2 在峰现延迟时间和峰值削减率方面无显著性差异($P > 0.05$),PICP1 的效果略优于 PICP2(图 1). 上述结果的可能原因是含 5% 水泥的稳定碎石基层通过灰浆对骨料空隙的填充,降低了碎石基质的孔隙度,因而降低了基层的渗透速率,有利于实现对峰值的削减. 两种设施年表面径流量相当,表明采用水泥稳定碎石基层不会影响实际降雨条件下径流的下渗.

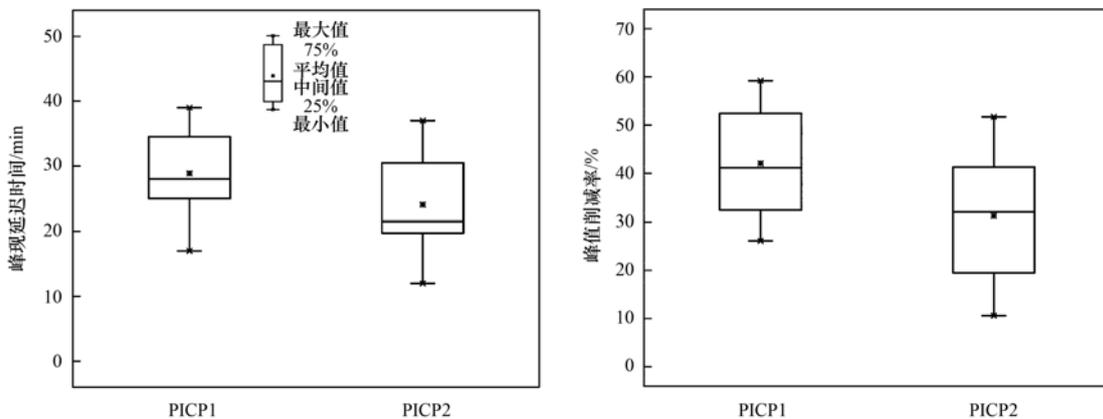


图 1 设施峰现延迟时间和峰值削减率

Fig. 1 Time to peak rate and peak reduction rate for each facility

2.3 设施的水质净化效果

2.3.1 TSS 与 COD

TSS 和 COD 经雨水冲刷后大量释放,是街道路径流中的主要污染物^[15]. 2018 年对出流水质进行检测的 8 场降雨事件中,有关 TSS 和 COD 的 EMC 四分位如图 2 所示,其中 2 个 PICP 设施底部出流的 TSS 呈显著性差异($P < 0.05$). 在下渗过程中,雨水中 TSS 首先被找平层粗砂拦截^[16],水泥的掺杂使得 PICP1 的基层与 PICP2 相比存在更多微小细缝,有利于 TSS 进一步截留沉淀,故 PICP1 对 TSS 的去除效果优于 PICP2;COD 主要通过设施找平层的拦截吸附得到去除,找平层拦截的 COD 在粗砂表面得到降解^[17].

2.3.2 含氮污染物的去除效果

监测降雨事件中设施 CP 的表面径流与 2 个 PICP 设施底部出流的 TN、 NH_4^+ -N 和 NO_3^- -N 的 EMC 分布如图 3 所示. PICP1 和 PICP2 均对 NH_4^+ -N 有明显去除效果,且 PICP1 的去除效果明显优于 PICP2,两者存在显著性差异($P < 0.05$);PICP1 和 PICP2 底部出流的 NO_3^- -N 均存在释放现象,PICP1 出流的 NO_3^- -N 浓度显著高于 PICP2($P < 0.05$),这与 2 个设施对 NH_4^+ -N 的去除效果差异相对应. NH_4^+ 的硝化主要发生在找平层及下方所垫的透水土工布, NH_4^+ -N 在流经找平层时通过离子交换实现部分吸附^[17]. 降水过程中 NH_4^+ -N 在硝化菌作用下发生硝化^[18],由于设施找平层厚度较薄,仅为 20 ~ 30 mm,故 NH_4^+ -N 硝

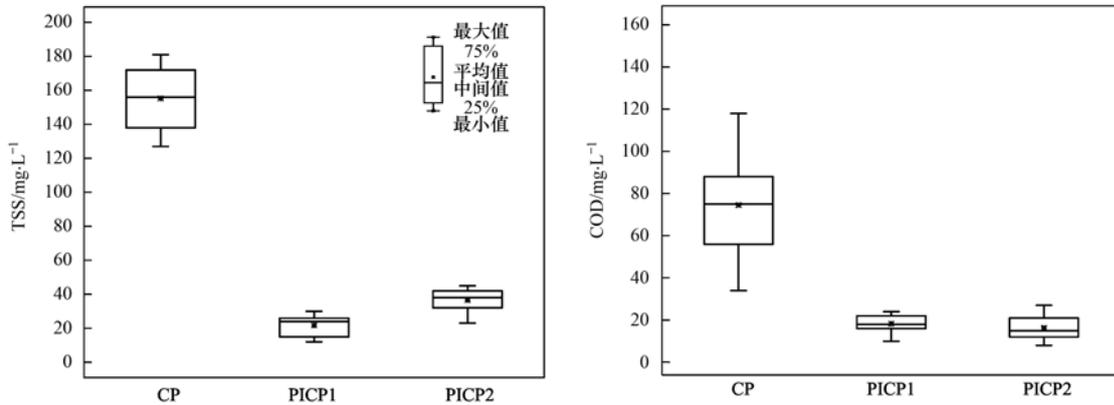


图2 TSS 和 COD 的 EMC 浓度分布

Fig. 2 EMC of TSS and COD in influent and effluent of each facility

化程度有限. PICP1 基层由于 5% 水泥的掺杂, 能创造出适合微生物生长的多孔粗糙表面及碱性环境, 有利于硝化菌的生长^[19, 20]. 在此条件下部分 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 继续转化为 $\text{NO}_3^- - \text{N}$, 使得最终 PICP1 底部出流的 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度高于 PICP2. 本实验的渗透铺装缺乏形成反硝化的环境条件, 设施无法实现对 TN 的有效去除^[21], PICP1 和 PICP2 底部出流的 TN 浓度均高于 CP, 这与缝隙透水砖表面粗糙度明显高于混凝土面层, PICP 设施实际的干沉降污染负荷也高于 CP 设施有关^[19].

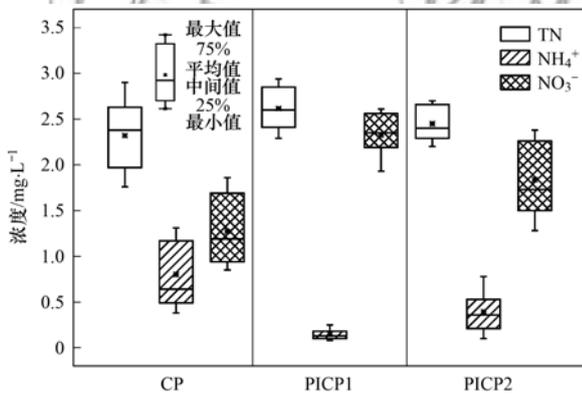


图3 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 和 TN 的 EMC 浓度分布

Fig. 3 EMC of $\text{NH}_4^+ - \text{N}$, $\text{NO}_3^- - \text{N}$, and TN in influent and effluent of each facility

2.3.3 含磷污染物的去除效果

TSS 不仅本身是道路径流的重要污染物, 也是其它污染物的载体^[22]. 道路径流中 PP 在 TP 中占比高达 70%~90%^[23], 图 4 为实验期间 CP 设施表面径流中 TSS 和 TP 的相关性拟合直线, 结果表明 TSS 和 TP 呈显著相关 ($r = 0.83$), 即表面径流中 TP 大多以颗粒态形式存在并附着于水中悬浮颗粒上^[24]. 国外的研究表明, 降雨径流中 PP 主要通过设施面层和基层的吸附、过滤以及沉淀作用截留在设施中, 而 DP 则易与透水材料中的钙、铝金属离子发生

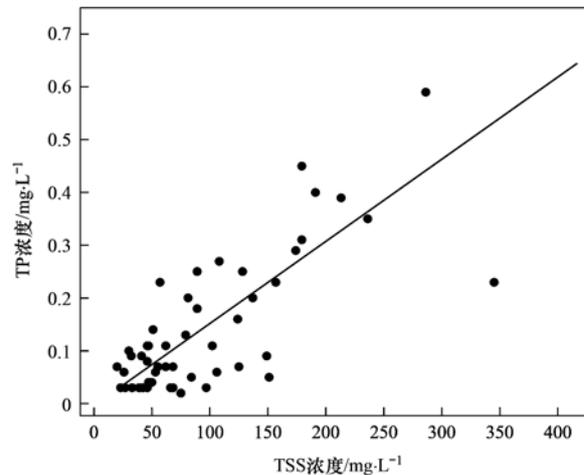


图4 表面径流中 TSS 和 TP 的相关性拟合

Fig. 4 Correlation between TSS and TP in surface runoff

反应去除^[25].

设施 CP 的表面径流与 2 个 PICP 设施底部出流的 TP、PP 和 DP 的 EMC 分布如图 5 所示, PICP1 与 PICP2 底部出流的 TP 浓度存在显著差异 ($P < 0.05$). PICP1 基层采用了水泥稳定碎石, 水泥的掺杂使得其基层结构相比于普通碎石基层存在更多弯曲的细缝, 随着悬浮颗粒被设施截留, PP 得到有效

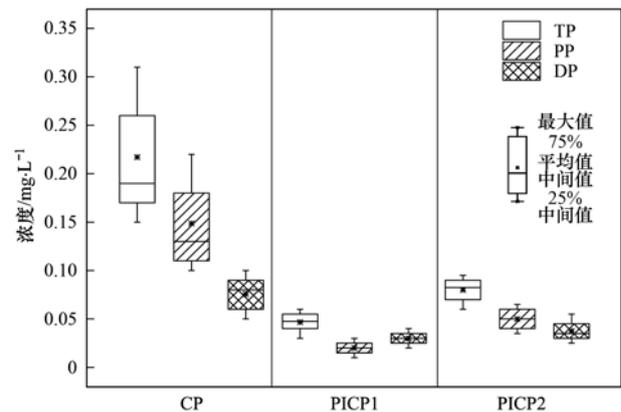


图5 TP、PP 和 DP 的 EMC 浓度分布

Fig. 5 EMC of TP, PP and DP in influent and effluent for each facility

去除,因此 PICP1 对 PP 的截留效果优于 PICP2 并存在显著差异($P < 0.05$). 由于表面径流中 DP 所占比例有限,经设施处理后浓度进一步降低,故 2 个 PICP 设施的底部出流中未发现 DP 存在显著差异($P > 0.05$). 从图 5 可知 PICP1 对 DP 去除效果仍优于 PICP2,水泥稳定碎石中水泥成分包含无定型硅酸盐,其所含的 Si—O—Si 和 Si—O—Al—O 键能利用较大的表面积和表面能与极性分子产生化学吸附^[26],导致 PICP1 底部出流的 DP 浓度低于 PICP2.

综上,以水泥稳定碎石作为基层结构的 PICP1 相比 PICP2 拥有更好的除磷、特别是去除颗粒态磷的能力.

3 结论

(1) 在 2018 年实际降雨条件下,两种不同结构层的缝隙透水砖铺装的年径流总量控制率分别为 37.0% 和 38.7%,基层采用的水泥稳定碎石结构不影响设施的年径流总量控制率. 水泥稳定碎石结构层在峰值削减能力和峰现延迟时间方面的效果略优于普通碎石结构层.

(2) PICP1 对停车场径流中 TSS 与 NH_4^+-N 的去除效果优于 PICP2,两种设施底部出流的 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 均存在明显淋出. PICP1 对 TP 尤其是 PP 的去除效果优于采用普通碎石基层的 PICP2.

(3) 在对设施结构层强度以及出流水质有更高要求的场合,缝隙透水砖铺装的基层建议采用水泥稳定碎石.

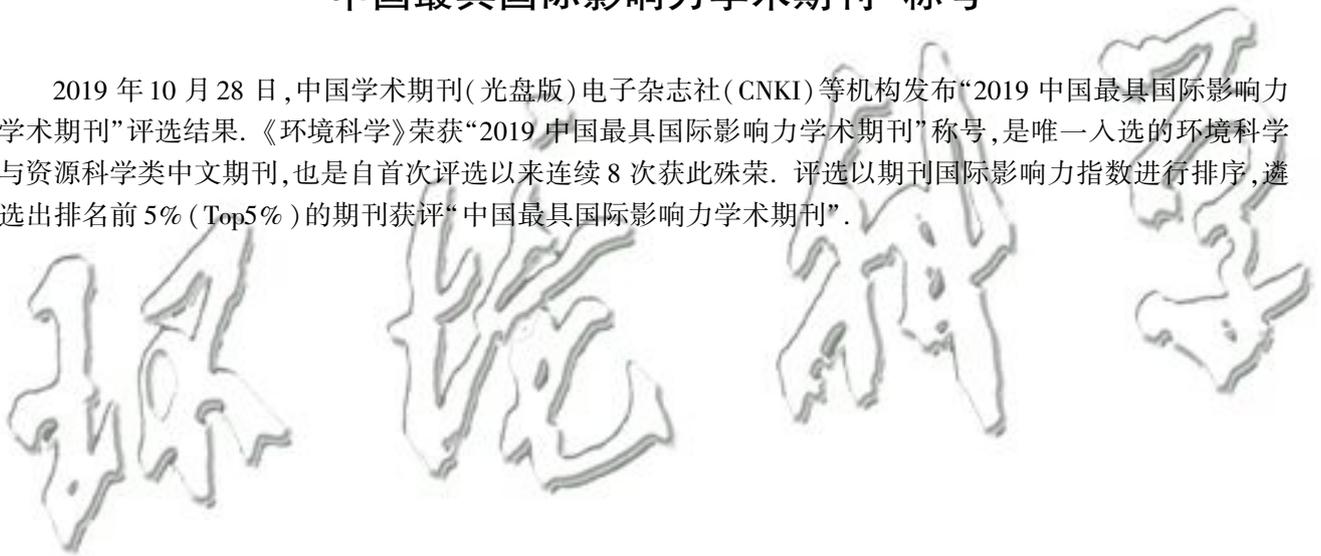
参考文献:

- [1] 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.
- [2] Winston R J, Dorsey J D, Smolek A P, *et al.* Hydrologic performance of four permeable pavement systems constructed over low-permeability soils in northeast Ohio [J]. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2018, **23**(4): 1-13.
- [3] Brown R A, Borst M. Evaluation of surface infiltration testing procedures in permeable pavement systems [J]. *Journal of Environmental Engineering*, 2014, **140**(3): 1-12.
- [4] Imran H M, Akib S, Karim M R. Permeable pavement and stormwater management systems: a review [J]. *Environmental Technology*, 2013, **34**(18): 2649-2656.
- [5] Braswell A S, Winston R J, Hunt W F. Hydrologic and water quality performance of permeable pavement with internal water storage over a clay soil in Durham, North Carolina [J]. *Journal of Environmental Management*, 2018, **224**: 277-287.
- [6] CJJ/T 188-2012, 透水砖路面技术规程[S]. CJJ/T 188-2012, Technical specification for pavement of water permeable brick[S].
- [7] Woods-Ballard B, Kellagher R, Martin P, *et al.* The SuDS manual[M]. London: CIRIA, 2007.
- [8] Environmental Protection Agency. Storm water technology fact sheet porous pavement[M]. Washington, DC: Office of Water, 1999.
- [9] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 海绵城市建设技术指南——低影响开发雨水系统构建(试行)[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014.
- [10] 金建荣, 李田, 时珍宝. 高地下水水位地区透水铺装控制径流污染的现场实验[J]. *环境科学*, 2017, **38**(6): 2379-2384. Jin J R, Li T, Shi Z B. Performance of applying scale permeable pavements for control of runoff pollution in an area with high groundwater level [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(6): 2379-2384.
- [11] JJG 711-1990, 明渠堰槽流量计试行检定规程[S]. JJG 711-1990, Verification regulation of weirs and flumes for flow measurement[S].
- [12] 金建荣, 李田, 王圣思, 等. 高地下水水位地区透水停车场的水文控制效果[J]. *环境科学*, 2017, **38**(9): 3689-3695. Jin J R, Li T, Wang S S, *et al.* Hydrological performance assessment of permeable parking lots in high water areas [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(9): 3689-3695.
- [13] GB 50400-2006, 建筑与小区雨水利用工程技术规范[S]. GB 50400-2006, Engineering technical code for rain utilization in building and sub-district[S].
- [14] 孟莹莹, 李田, 王溯, 等. 上海市区透水性路面渗透性能的实测与应用分析[J]. *中国给水排水*, 2009, **25**(6): 29-33. Meng Y Y, Li T, Wang S, *et al.* Field survey and application analysis of infiltration performance of permeable pavements in Shanghai city [J]. *China Water & Wastewater*, 2009, **25**(6): 29-33.
- [15] 李立青, 吕书丛, 朱仁肖, 等. 北京市新建城区不透水地表径流 N、P 输出形态特征研究 [J]. *环境科学*, 2012, **33**(11): 3760-3767. Li L Q, Lü S C, Zhu R X, *et al.* Nitrogen and phosphorus composition in urban runoff from the new development area in Beijing [J]. *Environmental Science*, 2012, **33**(11): 3760-3767.
- [16] Brown C, Chu A, van Duin B, *et al.* Characteristics of sediment removal in two types of permeable pavement [J]. *Water Quality Research Journal*, 2009, **44**(1): 59-70.
- [17] Niu Z G, Lv Z W, Zhang Y, *et al.* Stormwater infiltration and surface runoff pollution reduction performance of permeable pavement layers [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2016, **23**(3): 2576-2587.
- [18] Drake J, Bradford A, van Seters T. Stormwater quality of spring-summer-fall effluent from three partial-infiltration permeable pavement systems and conventional asphalt pavement [J]. *Journal of Environmental Management*, 2014, **139**(15): 69-79.
- [19] Collins K A, Hunt W F, Hathaway J M. Side-by-Side comparison of nitrogen species removal for four types of permeable pavement and standard asphalt in eastern North Carolina [J]. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2010, **15**(6): 512-521.
- [20] Payne E G I, Fletcher T D, Cook P L M, *et al.* Processes and drivers of nitrogen removal in stormwater biofiltration [J]. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 2014, **44**(7): 796-846.
- [21] Tota-Maharaj K, Scholz M. Efficiency of permeable pavement systems for the removal of urban runoff pollutants under varying environmental conditions [J]. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 2010, **29**(3): 358-369.
- [22] 张千千, 李向全, 王效科, 等. 城市路面降雨径流污染特征及源解析的研究进展 [J]. *生态环境学报*, 2014, **23**(2): 352-358.

- Zhang Q Q, Li X Q, Wang X K, *et al.* Research advance in the characterization and source apportionment of pollutants in urban roadway runoff[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2014, **23**(2): 352-358.
- [23] 武俊良, 任玉芬, 王雪梅, 等. 城市道路径流的排污特征[J]. *环境科学*, 2015, **36**(10): 3691-3696.
- Wu J L, Ren Y F, Wang X M, *et al.* Characterization of pollutant wash-off in the urban stormwater [J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(10): 3691-3696.
- [24] Eck B J, Winston R J, Hunt W F, *et al.* Water quality of drainage from permeable friction course [J]. *Journal of Environmental Engineering*, 2012, **138**(2): 174-181.
- [25] Kamali M, Delkash M, Tajrishy M. Evaluation of permeable pavement responses to urban surface runoff [J]. *Journal of Environmental Management*, 2017, **187**: 43-53.
- [26] 曾丽璇, 李伟杰, 庄奕洁, 等. 粉煤灰深度处理低浓度的磷[J]. *环境工程学报*, 2015, **9**(4): 1778-1782.
- Zeng L X, Li W J, Zhuang Y J, *et al.* Deep treatment of low concentrated phosphorus by fly ash [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2015, **9**(4): 1778-1782.

《环境科学》连续 8 次荣获 “中国最具国际影响力学术期刊”称号

2019 年 10 月 28 日,中国学术期刊(光盘版)电子杂志社(CNKI)等机构发布“2019 中国最具国际影响力学术期刊”评选结果。《环境科学》荣获“2019 中国最具国际影响力学术期刊”称号,是唯一入选的环境科学与资源科学类中文期刊,也是自首次评选以来连续 8 次获此殊荣。评选以期刊国际影响力指数进行排序,遴选出排名前 5% (Top5%) 的期刊获评“中国最具国际影响力学术期刊”。



CONTENTS

Influencing Factors of Long-term Variations on Gridded PM _{2.5} of Typical Regions in China Based on GAM Model	NAN Yang, ZHANG Qian-qian, ZHANG Bi-hui (499)
Gridded Atmospheric Emission Inventory of PCDD/Fs in China	CHEN Lu-lu, HUANG Tao, CHEN Kai-jie, et al. (510)
Spatio-Temporal Variations and Source Apportionment of Carbonaceous Species in PM _{2.5} Across Multiple Sampling Locations in the Chengdu Plain	SHI Fang-tian, LUO Bin, ZHANG Wei, et al. (520)
Diurnal Variations and Source Apportionment of Water-soluble Ions in PM _{2.5} During Winter in Nanjing Jiangbei New Area	QIU Chen-chen, YU Xing-na, DING Cheng, et al. (529)
Characterization, Seasonal Variation, and Source Apportionments of Particulate Amines (PM _{2.5}) in Northern Suburb of Nanjing	LI Xu-jie, SHI Xiao-wen, MA Yan, et al. (537)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of <i>n</i> -Alkanes and PAHs in Summertime PM _{2.5} at Background Site of Yangtze River Delta	XUE Guo-yan, WANG Ge-hui, WU Can, et al. (554)
Source Apportionment and Health Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in PM _{2.5} in Changchun City, Autumn of 2017	ZHANG Yi-xuan, CAO Fang, ZHENG Han, et al. (564)
Heavy Pollution Characteristics and Assessment of PM _{2.5} Predicted Model Results in Beijing-Tianjin-Hebei Region and Surrounding Areas During November 23 to December 4, 2018	ZHU Yuan-yuan, GAO Yu-xiao, CHAI Wen-xuan, et al. (574)
Analysis of Characteristics and Meteorological Influence Factors of Ozone Pollution in Henan Province	QI Yan-jie, YU Shi-jie, YANG Jian, et al. (587)
Spatio-Temporal Distribution and Variation Characteristics of Aerosol Optical Properties in Henan Province	ZHANG Rui-fang, YU Xing-na (600)
Analysis of Water Soluble Organic Aerosol in Spring PM _{2.5} with Soot Particle Aerosol Mass Spectrometry (SP-AMS)	HUANG Wen-qian, CHEN Yan-tong, LI Xu-dong, et al. (609)
Temporal Evolution and Main Influencing Factors of Black Carbon Aerosol in Nanjing	YANG Xiao-min, SHI Shuang-shuang, ZHANG Chen, et al. (620)
Pollution Characteristics and Ozone Formation Potential of Ambient Volatile Organic Compounds(VOCs) in Summer and Autumn in Different Functional Zones of Lianyungang, China	QIAO Yue-zhen, CHEN Feng, LI Hui-peng, et al. (630)
Operation and Maintenance of Cost-Effective Volatile Organic Compounds Abatement Alternatives	QIANG Ning, SHI Tian-zhe, MIAO Hai-chao (638)
Pollution and Deposition Characteristics of Precipitation and Its Source Apportionment in Xi'an City	DING Cheng, YU Xing-na, HOU Si-yu (647)
Bacterial Diversity and Community Structure Antibiotic-resistant Bacteria in Bioaerosol of Animal Farms	SHA Yun-fei, SUN Xing-bin, XIN Wen-peng, et al. (656)
Vehicle Emission Inventory and Scenario Analysis in Liaoning from 2000 to 2030	JIN Jia-xin, SUN Shi-da, WANG Peng, et al. (665)
VOCs Emission Characteristics of DPF Regeneration in National VI Diesel Engine	QIAN Feng, XUE Chang-xin, XU Xiao-wei, et al. (674)
Characteristics and Significance of Stable Isotopes and Hydrochemistry in Surface Water and Groundwater in Nanxiaohogou Basin	GUO Ya-wen, TIAN Fu-qiang, HU Hong-chang, et al. (682)
Spatio-Temporal Distribution and Risk Assessment of Heavy Metals in Middle and Lower Reaches of Le'an River	YU Yang, LÜ Ya-ning, WANG Wei-jie, et al. (691)
Spatio-temporal Evolution and Relationship of Water Environment Quality and Phytoplankton Community in Wenyu River	ZHU Li-ying, CHEN Yuan-yuan, LIU Jing, et al. (702)
High-Frequency Dynamics of Water Quality and Phytoplankton Community in Inflowing River Mouth of Xin'anjiang Reservoir, China	DA Wen-yi, ZHU Guang-wei, LI Yun-xiang, et al. (713)
Phosphorus Storage Capacity and Loss Risk in Coastal Reed Wetland Surrounding Bohai Sea	SONG Jia-wei, XU Gang, ZHANG Yang, et al. (728)
Spatio-Temporal Variation of Release Flux of Sediment Nitrogen and Phosphorus in High-Risk Period of Algal Bloom in Lake Erhai	LIU Si-ru, ZHAO Ji-dong, XIAO Shang-bin, et al. (734)
Fluorescence Characteristics and Source Analysis of DOM in Snowfall of Xi'an	YANG Yi, HAN Li-yuan, LIU Huan-wu, et al. (743)
Performance Assessment of Permeable Interlocking Concrete Pavement Facility Structure	ZHANG Jia-wei, LIU Yong, JIN Jian-rong, et al. (750)
Photocatalytic Degradation of Rhodamine B with Micro-SiC/Graphene Composite Under Visible Light Irradiation	ZHU Hong-qing, YANG Bing, WEI Shi-qiang, et al. (756)
Removal of BPA and EE2 from Water by Mn-Fe Embedded in Acicular Mullite	ZHOU Qiu-hong, LONG Tian-yu, HE Jing, et al. (763)
Fabrication of La-MHTC Composites for Phosphate Removal; Adsorption Behavior and Mechanism	SONG Xiao-bao, HE Shi-ying, FENG Yan-fang, et al. (773)
Adsorption of Low-Concentration Phosphorus from Water by Composite Metal Modified Biochar	SUN Ting-ting, GAO Fei, LIN Li, et al. (784)
Phosphate Adsorption from Water on CaO ₂ -loaded Magnetic Diatomite	XU Chu-tian, LI Da-peng, ZHANG Shuai, et al. (792)
Phosphorus Forms and Release Risk of Sediments in Urban Sewage Treatment Plant Effluent and Receiving Stream Reach	TANG Ning, LI Ru-zhong, WANG Yu-qing, et al. (801)
Purification Characteristics of Urban Tail Water from Sewage Treatment Plant by Biofilm Ecological Floating Bed	ZHAO Zhi-rui, ZHANG Jia-yao, LI Duo, et al. (809)
Removal Performance of Antibiotic Resistance Genes and Heavy Metal Resistance Genes in Municipal Wastewater by Magnetic-Coagulation Process	YU Wen-chao, ZHENG Li-bing, WEI Yuan-song, et al. (815)
Effect of Tetracycline Antibiotic on Abundance and Transcriptional Expression Level of Tetracycline Resistance Genes in Activated Sludge	RUAN Xiao-hui, QIAN Ya-jie, XUE Gang, et al. (823)
Denitrification Process and N ₂ O Production Characteristics of Heterotrophic Nitrifying Bacterium <i>Pseudomonas aeruginosa</i> YL	YANG Lei, CUI Shen, REN Yong-xiang, et al. (831)
Environmental Factors Influence and Microbial Community Structure Analysis of Entrapped Anaerobic Ammonium Oxidizing Bacteria	WANG Xiao-tong, YANG Hong, SU Yang, et al. (839)
Research on Denitrification Performance of Enhanced Secondary Effluent by Embedded Denitrification Filler and Pilot Application	ZHOU Ya-kun, YANG Hong, WANG Shao-lun, et al. (849)
Temporal Anaerobic Effect on Aerobic Granular Sludge with Intermittent Influent-Intermittent Aeration	ZHANG Jie, WANG Yu-ying, LI Dong, et al. (856)
Simultaneous Short-Cut Nitrification-Denitrification Phosphorus Removal Granules Induced by Phosphorus Removal Granules	LI Dong, LIU Bo, WANG Wen-qi, et al. (867)
Spatial Distribution Characteristics and Pollution Assessment of Heavy Metals on Farmland of Geochemical Anomaly Area in Southwest Guangxi	WANG Fo-peng, XIAO Nai-chuan, ZHOU Lang, et al. (876)
Evaluation and Source of Heavy Metal Pollution in Surface Soil of Qinghai-Tibet Plateau	YANG An, WANG Yi-han, HU Jian, et al. (886)
Characteristics and Factors of Soil Enzyme Activity for Different Plant Communities in Yellow River Delta	MO Xue, CHEN Fei-jie, YOU Chong, et al. (895)
Effects of Management Measures on Soil Water-soluble Carbon and Nitrogen and Their Three-Dimensional Fluorescence Characteristics of <i>Pinus tabulaeformis</i> Plantations on Loess Plateau	SONG Ya-hui, ZHANG Jiao-xiang, LIU Hong-fei, et al. (905)
Effects of Biochar Input on Changes of Available Nutrient Elements in Riparian Soils with Different Landuse Types	ZHOU Hui-hua, YUAN Xu-yin, XIONG Yu-ting, et al. (914)
Effect of Applying Hydrochar for Reduction of Ammonia Volatilization and Mechanisms in Paddy Soil	YU Shan, XUE Li-hong, HUA Yun, et al. (922)
Effects of Mycorrhizal Fungi on Nitrification and Denitrification in the Rhizospheric Soil of Aquatic Plants and Its Microbial Mechanism	LIU Duo, WANG Lei, CAO Zhan-bo, et al. (932)
Comparison of Floating Chamber and Diffusion Model Methods for Measuring Methane Emissions from Inland Fish-Aquaculture Ponds	HU Tao, HUANG Jian, DING Ying, et al. (941)
Simultaneous Quantitative Detection of Thirteen Common Antibiotics in Leafy Vegetables by Ultra-High Performance Liquid Chromatography-Tandem Mass Spectrometry	CHEN Qian, LIU Yang, XIAO Li-jun, et al. (952)
Accumulation and Translocation of Cd in <i>Brassica rapa</i> Under the Influence of Selenium	YU Yao, LUO Li-yun, LIU Zhe, et al. (962)
Tolerance Mechanism and Cadmium Enrichment Abilities in Two <i>Brassica napus</i> L. Cultivars	BIAN Jian-lin, GUO Jun-mei, WANG Xue-dong, et al. (970)
Enhanced Phytoextraction of Cadmium Contaminated Soil by <i>Trifolium Repens</i> with Biodegradable Chelate GLDA	HE Yu-long, YU Jiang, XIE Shi-qian, et al. (979)
Heavy Metal Contents in Animal Manure in China and the Related Soil Accumulation Risks	MU Hong-yu, ZHUANG Zhong, LI Yan-ming, et al. (986)
Microbial Community Succession in Industrial Composting with Livestock Manure and Peach Branches and Relations with Environmental Factors	CAI Han-bing, FENG Wen-wen, DONG Yong-hua, et al. (997)
Degradation Characteristics of Antibiotics During Composting of Four Types of Feces	ZHU Wei-jing, ZHU Feng-xiang, WANG Wei-ping, et al. (1005)