

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第7期

Vol.39 No.7

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

近20年来中国典型区域PM _{2.5} 时空演变过程	罗毅,邓琼飞,杨昆,杨扬,商春雪,喻臻钰 (3003)
西安市PM _{2.5} 健康损害价值评估	魏国茹,史兴民 (3014)
河北香河亚微米气溶胶组分特性、来源及其演变规律分析	江琪,王飞,孙业乐 (3022)
南京北郊秋季PM _{2.5} 碳质组分污染特征及来源分析	徐足飞,曹芳,高嵩,鲍孟盈,石一凡,章炎麟,刘晓妍,范美益,张雯淇,卞航,刘寿东 (3033)
临安夏季霾和清洁天气PM _{2.5} 化学组成特征比较	梁林林,孙俊英,张养梅,刘畅,徐婉筠,张根,刘旭艳,马千里 (3042)
盘锦市秋冬季节PM _{2.5} 中碳组分特征及来源解析	张蕾,姬亚芹,张军,王士宝,李越洋,赵静琦,张伟 (3051)
南京冬季气溶胶光学特性及黑碳光吸收增强效应	黄聪聪,马嫣,郑军 (3057)
夏季青岛大气粗细粒子中微量元素的浓度、溶解度及干沉降通量	李鹏志,李茜,石金辉,高会旺,姚小红 (3067)
太原市夏季降水中溶解态重金属特征及来源	叶艾玲,程明超,张璐,何秋生,郭利利,王新明 (3075)
杭州地区大气CO ₂ 体积分数变化特征及影响因素	浦静姣,徐宏辉,姜瑜君,杜荣光,齐冰 (3082)
典型工业源VOCs治理现状及排放组成特征	景盛翱,王红丽,朱海林,杨强,卢滨,夏阳,余传冠,陶士康,李莉,楼晟荣,黄成,唐伟,井宝莉 (3090)
地级市域工业VOCs排放源产排特性及其控制技术应用现状:以秦皇岛市为例	胡旭睿,虎啸宇,王灿 (3096)
青霉素发酵尾气VOCs污染特征及健康风险评价	郭斌,么瑞静,张硕,马磊,康江,王姗姗 (3102)
轻型汽油车尾气OC和EC排放因子实测研究	黄成,胡馨遥,鲁君 (3110)
南京市大气降尘重金属污染水平及风险评价	田春晖,杨若杼,古丽扎尔·依力哈木,钱新,王金花,李慧明 (3118)
西安城区路面细颗粒灰尘重金属污染水平及来源分析	石栋奇,卢新卫 (3126)
三峡库区主要河流秋季pCO ₂ 及其影响因素	罗佳宸,毛蓉,李思悦 (3134)
泾河支流地表水地下水的水化学特征及其控制因素	寇永朝,华琨,李洲,李志 (3142)
生物滞留对城市地表径流磷的去除途径	李立青,刘雨倩,杨佳敏,王娟 (3150)
淀山湖浮游植物功能群演替特征及其与环境因子的关系	杨丽,张玮,尚光霞,张军毅,王丽卿,魏华 (3158)
抚仙湖硅藻群落的时空变化特征及其与水环境的关系	李蕊,陈光杰,康文刚,陈丽,王教元,陈小林,刘园园,冯钟,张涛 (3168)
蓝藻水华及其降解对沉积物-水微界面的影响	王永平,谢瑞,晁建颖,姬昌辉,于剑 (3179)
生物炭对人工湿地植物根系形态特征及净化能力的影响	徐德福,潘潜澄,李映雪,陈晓艺,王佳俊,周磊 (3187)
Mn-Co/蜂窝陶瓷催化剂制备及催化臭氧化对苯二酚效能	张兰河,高伟国,陈子成,张海丰,王旭明 (3194)
Fe/Cu双金属活化过一硫酸盐降解四环素的机制	李晶,鲍建国,杜江坤,冷一非,孔淑琼 (3203)
铈酸盐改性钛酸纳米片对水中Cd(II)的吸附行为及机制	康丽,刘文,刘晓娜,刘宏芳,李一菲 (3212)
铁锰原位氧化产物吸附微量磷的实验	蔡言安,毕学军,张嘉凝,董杨,刘文哲 (3222)
制备方法对铁钛复合氧化物磷吸附性能的影响:共沉淀法与机械物理混合法	仲艳,王建燕,陈静,张高生 (3230)
电导率对厌氧产酸、正渗透与微生物燃料电池耦合工艺运行性能的影响	陆宇琴,刘金梦,王新华,李秀芬,李晔 (3240)
不同磷浓度下生物除磷颗粒系统的COD需求	李冬,曹美忠,郭跃洲,梅宁,李帅,张杰 (3247)
基质浓度对ABR反应器SAD协同脱氮除碳效能影响	张敏,姜滢,汪瑶琪,韦佳敏,陈重军,沈耀良 (3254)
采用含硫铁化学污泥作为反硝化电子供体进行焦化废水中总氮深度去除	付炳炳,潘建新,马景德,王丰,吴海珍,韦朝海 (3262)
间歇曝气下短程硝化耦合污泥微膨胀稳定性	高春娣,孙大阳,安冉,赵楠,焦二龙,祝海兵 (3271)
基于高通量测序的SBR反应器丝状膨胀污泥菌群分析	洪颖,姚俊芹,马斌,徐双,张彦江 (3279)
纳米零价铁(NZVI)对厌氧产甲烷活性、污泥特性和微生物群落结构的影响	苏润华,丁丽雨,任洪强 (3286)
气水比对后置固相反硝化滤池工艺脱氮及微生物群落影响	张千,吉芳英,付旭芳,陈晴空 (3297)
活性污泥胞外多聚物提取方法的比较	孙秀玥,唐珠,杨新萍 (3306)
耐冷嗜碱蒙氏假单胞菌H97的鉴定及其好氧反硝化特性	蔡茜,何腾霞,冶青,李振轮 (3314)
PFOS前体物质(PreFOSs)降解菌的分离鉴定及其降解特性	赵淑艳,周涛,王博慧,梁田坤,柳丽芬 (3321)
采油井场土壤微生物群落结构分布	蔡萍萍,宁卓,何泽,张敏,石建省 (3329)
铜尾矿坝不同恢复年限土壤理化性质和酶活性的特征	王瑞宏,贾彤,曹苗文,柴宝峰 (3339)
广西某赤泥堆场周边土壤重金属污染风险	郭颖,李玉冰,薛生国,廖嘉欣,王琼丽,吴川 (3349)
邻苯二甲酸酯在重庆市城市土壤中的污染分布特征及来源分析	杨志豪,何明靖,杨婷,卢俊峰,魏世强 (3358)
成都平原区水稻土有机碳剖面分布特征及影响因素	李珊,李启权,王昌全,张浩,肖怡,唐嘉玲,代天飞,李一丁 (3365)
塔里木盆地北缘绿洲不同连作年限棉田土壤有机碳、无机碳含量与环境因子的相关性	赵晶晶,贡璐,安申群,李杨梅,陈新 (3373)
塔里木盆地北缘绿洲4种土地利用方式土壤有机碳组分分布特征及其与土壤环境因子的关系	安申群,贡璐,李杨梅,陈新,孙力 (3382)
高原喀斯特土壤有机碳短期稳定的温度作用机制	唐国勇,张春华,刘方炎,马艳 (3391)
施硼对水稻幼苗吸收和分泌砷的影响	朱毅,孙国新,陈正,胡莹,郑瑞伦 (3400)
不同改良剂对铅镉污染农田水稻重金属积累和产量影响的比较分析	胡雪芳,田志清,梁亮,陈俊德,张志民,朱祥民,王士奎 (3409)
南京大气臭氧浓度的季节变化及其对主要作物影响的评估	赵辉,郑有飞,魏莉,关清 (3418)
三峡库区涪陵和忠县两地居民发汞含量水平及影响因素分析	程楠,谢青,樊宇飞,王永敏,张成,王定勇 (3426)
人粪便好氧堆肥过程中典型抗生素的消减特性	时红蕾,王文昌,李倩 (3434)
COD/SO ₄ ²⁻ 对青霉素菌渣厌氧消化影响	强虹,李玉友,裴梦富 (3443)
果蔬类垃圾主发酵堆肥产物储放和利用的恶臭释放特征	何品晶,蒋宁玲,徐贤,韦顺艳,邵立明,吕凡 (3452)
曾用抗生素磺胺二甲嘧啶对稻田NH ₃ 挥发的影响	庞炳坤,张敬沙,吴杰,李志琳,蒋静艳 (3460)
《环境科学》征订启事(3141)	
《环境科学》征稿简则(3202)	
信息(3229, 3433, 3451)	

生物滞留对城市地表径流磷的去除途径

李立青, 刘雨情, 杨佳敏, 王娟

(中国地质大学(武汉)环境学院, 武汉 430074)

摘要: 根据武汉城市地表径流水文变化以及磷污染特征, 通过 1 a 模拟运行监测, 研究了生物滞留种植植物(狼尾草)、设置饱和带对城市地表径流溶解性磷($\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$)去除的影响及去除途径。结果表明, 生物滞留采用 75% 河砂与 25% 当地黄棕壤混合基质, 对地表径流 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的平均去除率可达到 90% 以上。生物滞留种植狼尾草可显著降低出水 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 浓度。生物滞留设置饱和带可进一步提高对 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的去除, 不影响出水 TP 浓度。生物滞留通过基质吸附去除地表径流中的磷, 表现为 0 ~ 22.5 cm 基质剖面中植物有效磷的增加, 约占试验期间进水磷负荷的 50%。从生物滞留系统磷输入(进水)与输出(出水与植物地上部分)角度分析, 种植狼尾草一个生长周期地上部分吸收的磷可占进水磷负荷 57.1% ~ 76.1%, 定期收割植物地上部分可作为城市地表径流磷可持续管理的主要途径。

关键词: 生物滞留; 磷; 植物吸收; 紫穗狼尾草; 城市地表径流

中图分类号: X52 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)07-3150-08 DOI: 10.13227/j.hjks.201711252

Urban Runoff Phosphorus Removal Pathways in Bioretention Systems

LI Li-qing, LIU Yu-qing, YANG Jia-min, WANG Juan

(School of Environmental Studies, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

Abstract: The role of vegetation and saturated zones in stormwater-dissolved phosphorus ($\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$) removal was investigated using bioretention microcosms. Nine bioretention columns were dosed with synthetic stormwater under various hydrological conditions and phosphorus loading rates and monitored over a 12-month period. Remarkable phosphorus removal (>90%) was achieved using the mixed filter media of sand and local soil, with or without vegetation. Bioretention columns in which *P. alopecuroides* was planted could significantly enhance $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ removal. The saturated zones could also reduce the effluent $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ concentrations, but had no significant effect on total phosphorus removal. Approximately 50% of the input phosphorus retained in the filter media was extracted in the top 0-22.5 cm, where it could be available for uptake by plants. Further, 57.1% to 76.1% of the total phosphorus input recovered in the total plant biomass was stored in the above-ground shoots. Thus, periodic harvesting of shoots can be a sustainable method of phosphorus removal from stormwater bioretention systems.

Key words: bioretention systems; phosphorus; plant uptake; *P. alopecuroides*; urban stormwater runoff

近年来随着我国城市化进程的加速, 城市地表径流产生的雨洪与污染问题凸显。2014 年中国在借鉴国际城市地表径流管理措施: 低影响开发、可持续排水系统、水敏感设计等经验的基础上, 提出建设海绵城市理念, 用于减轻城市化对水文、地表径流污染的影响^[1]。作为新一代城市地表径流控制措施, 生物滞留技术对改善城市地表径流水质受到广泛关注。根据国内城市地表径流量、水质变化, 开展生物滞留配置与设计研究, 对其在实践中的应用具有重要的意义。

生物滞留是以砂土为混合基质的植物过滤系统, 通过优化设计生物滞留对城市地表径流中营养盐(氮和磷)、重金属、有机污染物具有显著的去除作用^[2,3]。有研究表明生物滞留通过配置磷含量低、黏粒含量高或铁、铝含量高的材料作为过滤基质, 可显著提高对地表径流磷的去除, 沉淀与基质吸附是生物滞留去除地表径流磷的主要途径^[4~7]。但是

也有研究表明与不种植植物相比, 生物滞留种植植物可显著提高地表径流磷的去除率, 与植物直接吸收营养盐、改善基质渗透性和影响土壤微生物活性有关, 而且植物种类影响对地表径流磷的去除^[8~10]。可见过滤基质对磷的吸附能力与植物对磷的吸收能力是影响生物滞留去除城市地表径流磷的主要机制。同时城市地表径流磷浓度与磷形态组成也是影响其去除的主要因素^[11]。还有的研究表明为了提高生物滞留对地表径流氮的去除, 在过滤基质底部设置饱和带形成缺氧或厌氧环境增加 NO_3^- -N 还原去除, 但同时会增加基质释放磷的风险^[12]。目前多数研究主要针对过滤基质、植物以及饱和带对城市地表径流出水磷浓度或去除率的影响, 很少开

收稿日期: 2017-11-28; 修订日期: 2018-01-30

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2012ZX07307001); 中央高校基本科研业务费专项

作者简介: 李立青(1977~), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为城市地表径流污染控制, E-mail: li-liqing@163.com

展植物吸收对磷的去除能力,特别是一个生长周期植物地上生物量对地表径流磷的固定能力. 另外基质对磷的吸附会随着时间的延长趋于饱和,通过植物地上部分的周期性收割可能作为城市地表径流磷可持续管理的重要途径^[13, 14].

本研究根据武汉城市地表径流磷浓度以及磷负荷,选择当地土壤与河砂混合作为生物滞留基质,种植城市绿地景观植物狼尾草,通过 1 a 运行监测,在模拟研究生物滞留种植植物与设置饱和带对城市地表径流磷去除的影响基础上,重点评估一个生长周期狼尾草对磷的吸收能力,以期在城市地表径流磷污染控制生物滞留设计与植物选择提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 模拟生物滞留柱构建

模拟生物滞留柱采用 PVC 管和有机玻璃管构建. 以直径 300 mm 的 PVC 管和有机玻璃管组合而成,其中 PVC 管高度 90 cm,顶部接 30 cm 有机玻璃管. 2015 年 5 月在湖北省林业科学院温室共建设模

拟生物滞留柱 9 个,分别设计了对照 (Ctrl)、传统生物滞留 (不设饱和带) (CB) 和改进生物滞留 (设置饱和带并添加碳源) (MB) 3 个处理 (见图 1),每个处理设置 3 个重复. Ctrl 和 CB 处理从底部出水,MB 处理从距底部 45 cm 处出水,MB 下部 45 cm 长期处于饱水状态. 生物滞留模拟柱自上而下配置 3 层: 45 cm 过滤基质层、15 cm 过渡层 [10 cm 河砂、5 cm 砾石 (直径 0.6 cm)] 和储排水层 30 cm 卵石 (直径 1.6 cm). 生物滞留过滤种植基质采用武汉当地黄棕壤 (25%) 与河砂 (75%) 混合形成,其理化性质见文献^[15]. 改进生物滞留 (MB) 处理设计饱和带,高度为 45 cm,并添加杨木块 (直径 1.6 cm, 10%, 体积比) 为碳源. 选择景观植物紫穗狼尾草 (*Pennisetum alopecuroides*) 作为生物滞留种植植物. 紫穗狼尾草为多年生草本植物,生长速率快,须根发达,可适应地表径流周期性变化^[16]. 其中对照 (Ctrl) 不种植植物,传统生物滞留 (不设饱和带) (CB) 和改进生物滞留 (设置饱和带并添加碳源) (MB) 都种植紫穗狼尾草 1 丛 (50 株).

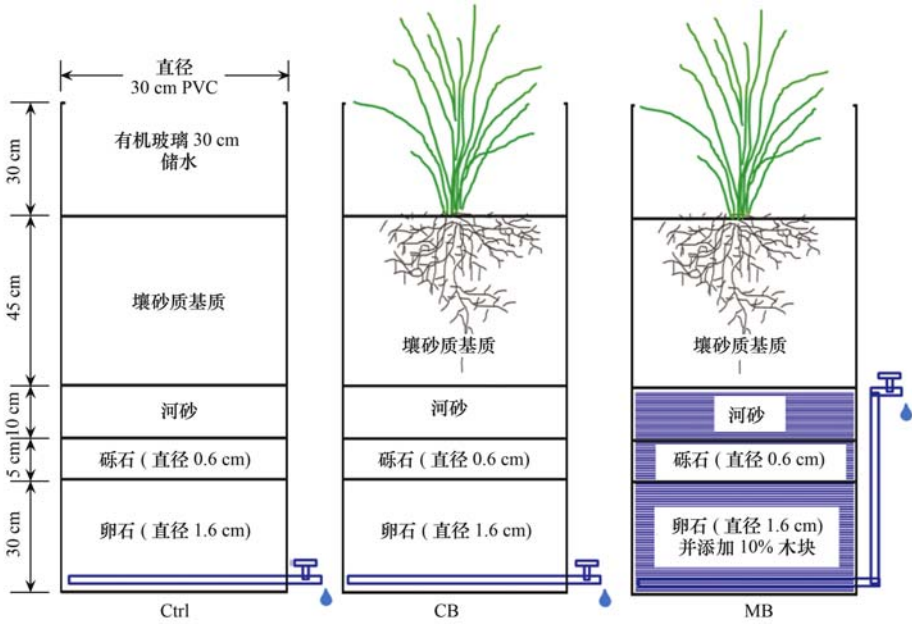


图 1 生物滞留模拟柱结构配置示意

Fig. 1 Schematic diagram of the bioretention columns

1.2 模拟城市地表径流与试验运行

模拟城市地表径流磷和氮浓度主要参考武汉、上海和重庆地表径流监测结果^[17~19],主要研究溶解性磷 ($\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$) 的去除,溶解性氮的去除 ($\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$) 见文献^[15]. 模拟城市地表径流溶解性磷 ($\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$) 浓度设计了 3 个水平,分别为 0.50、1.0、1.5 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,代表城市地表径流水

质变化范围. 模拟城市地表径流采用放置 24 h 自来水,通过添加分析纯 KH_2PO_4 、 NH_4Cl 和 KNO_3 达到设计的磷浓度.

以生物滞留设施面积为不透水地表面面积的 10% 计算进水水量,设计 3 个进水量水平: 5、10 和 15 L,分别对应武汉 7.5、15.0 和 22.5 mm 降雨事件,可考察地表径流量变化对 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 去除的影

响. 其中武汉 60% 降雨事件 ≤ 15.0 mm, 日降雨量 ≥ 5.0 mm 降雨事件的平均间隔时间为 6 d. 模拟运行间隔天数设置 3 个水平: 3、6、12 d, 可研究干湿交替对 PO_4^{3-} -P 去除的影响.

自 2015 年 6 月种植狼尾草之后, 每周 1 次用 5 L 自来水一次性浇灌, 自来水中 TP 浓度为 $(0.039 \pm 0.018) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ($n=27$), 培育 2 个月植物逐渐长成后, 在 2015 年 9 ~ 11 月开始正式试验运行监测. 采用正交表 $\text{L}_9(3^4)$ 安排了 9 次试验 (表 1), 考察进水浓度、间隔天数、进水水量各 3 水平对 PO_4^{3-} -P 去除的影响. 试验根据试验编号依次进行, 每次试验进水浓度、间隔天数、进水量见表 1. 2016 年 3 月植物返青后, 进行了第二轮试验, 同样根据表 1 进行了 9 次试验运行监测. 2016 年 7 ~ 9 月在保持进水量 (10 L) 和间隔天数 (6 d) 不变的情况下, 对进水浓度 3 个水平分别重复 3 次运行监测, 共 9 次, 保证在植物 1 个生长周期内都在运行监测. 同时在整个试验期间运行 27 次, 累积进水量达到 270 L, 相当于处理降雨量 405 mm, 接近武汉多年平均降雨量 1/3, 相当于处理不透水地表初期 10 ~ 15 mm 径流.

表 1 生物滞留试验模拟运行设计
Table 1 Bioretention experimental design

试验编号	操作变量		
	进水 PO_4^{3-} -P 浓度 $/\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	间隔天数/d	进水量/L
1	0.5	3	5
2	0.5	6	10
3	0.5	12	15
4	1.0	3	10
5	1.0	6	15
6	1.0	12	5
7	1.5	3	15
8	1.5	6	5
9	1.5	12	10

1.3 样品采集与测定

试验期间 (2015 ~ 2016 年) 共运行监测 27 次. 进水方式为一次性浇灌. 收集测定每个模拟柱出水量, 混匀采集 1 个水样. 现场采用 YSI 便携式多参数水质仪 (ProPlus) 测定 pH 和氧化还原电位 (ORP). 按照文献 [20], 未过滤水样直接测定 TP, 水样经过滤后测定 DP 和 PO_4^{3-} -P.

2016 年 11 月在所有运行监测结束后, 对每个模拟柱植物地上生物量、地下生物量分别进行收集, 烘干 (60°C , 72 h), 称重. 随机选取 3 个烘干后的地上、地下生物样各 3 个, 研磨, 过筛 (0.75 mm), 进行植物样全磷 (TP) 测定. 同时对每个模拟

柱过滤基质 (0 ~ 45 cm) 每 7.5 cm 采集 1 个样品, 每个柱子采集 6 个样品. 采集的过滤基质样品经风干、去除根系, 研磨过筛 (2 mm), 采用 $0.05 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ HCl- $0.025 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ ($1/2\text{H}_2\text{SO}_4$) 浸提 (土水比 1:5) 测定有效磷 [21], 表征过滤基质对地表径流磷吸附去除后累积情况, 同时表征基质中植物可利用磷状况.

1.4 数据处理

利用 Origin 8.5 与 SPSS 21.0 对数据分析处理. 对照 (Ctrl) 与 2 种生物滞留 (CB 与 MB) 设计每次运行监测出水磷浓度取 3 个平行模拟柱出水磷浓度的均值. 采用累积概率分布图比较对照 Ctrl、CB 和 MB 出水与进水磷浓度, 同时比较 Ctrl、CB 和 MB 出水磷浓度差异. 利用方差分析研究生物滞留不同处理之间对出水 PO_4^{3-} -P 影响的差异 ($P=0.05$), 分析生物滞留进水量、间隔天数、水质变化对出水 PO_4^{3-} -P 的影响 ($P=0.01$, $P=0.05$).

试验期间生物滞留进水、出水累积负荷 (M_{in} 、 M_{out} , $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$) 计算公式为:

$$M_{\text{in}} = \frac{\sum_{i=1}^a c_{\text{in},i} \times v_{\text{in},i}}{1000 \times A} \quad (1)$$

$$M_{\text{out}} = \frac{\sum_{i=1}^a c_{\text{out},i} \times v_{\text{out},i}}{1000 \times A} \quad (2)$$

$$M_{\text{R}} = M_{\text{in}} - M_{\text{out}} \quad (3)$$

式中, $c_{\text{in},i}$ 和 $c_{\text{out},i}$ 分别为生物滞留第 i 次进水、出水磷浓度 ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$), $V_{\text{in},i}$ 和 $V_{\text{out},i}$ 分别为生物滞留第 i 次进水、出水水量 (L), a 为试验期间总运行监测次数 (27), A 为生物滞留模拟柱横截面积 (m^2), M_{R} 为试验期间生物滞留去除的磷负荷 ($\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$). 试验期间对进水磷负荷去除率 (LR) 计算公式为:

$$\text{LR} = \left(1 - \frac{M_{\text{out}}}{M_{\text{in}}}\right) \times 100\% \quad (4)$$

2 结果与分析

2.1 种植植物与设置饱和带对磷去除的影响

试验期间 27 次运行监测 Ctrl、CB 和 MB 进水、出水 PO_4^{3-} -P、DP 和 TP 浓度 (3 个重复均值) 的概率分布见图 2. 由于模拟进水中磷全部为 PO_4^{3-} -P, 所以重点分析比较 PO_4^{3-} -P 进出水浓度. 由图 2 可直观看出, Ctrl、CB 和 MB 均可显著降低地表径流中的 PO_4^{3-} -P 浓度. 与对照 Ctrl 出水 PO_4^{3-} -P 浓度比, 种植狼尾草 CB 可明显提高对进水 PO_4^{3-} -P 的去除. 生物

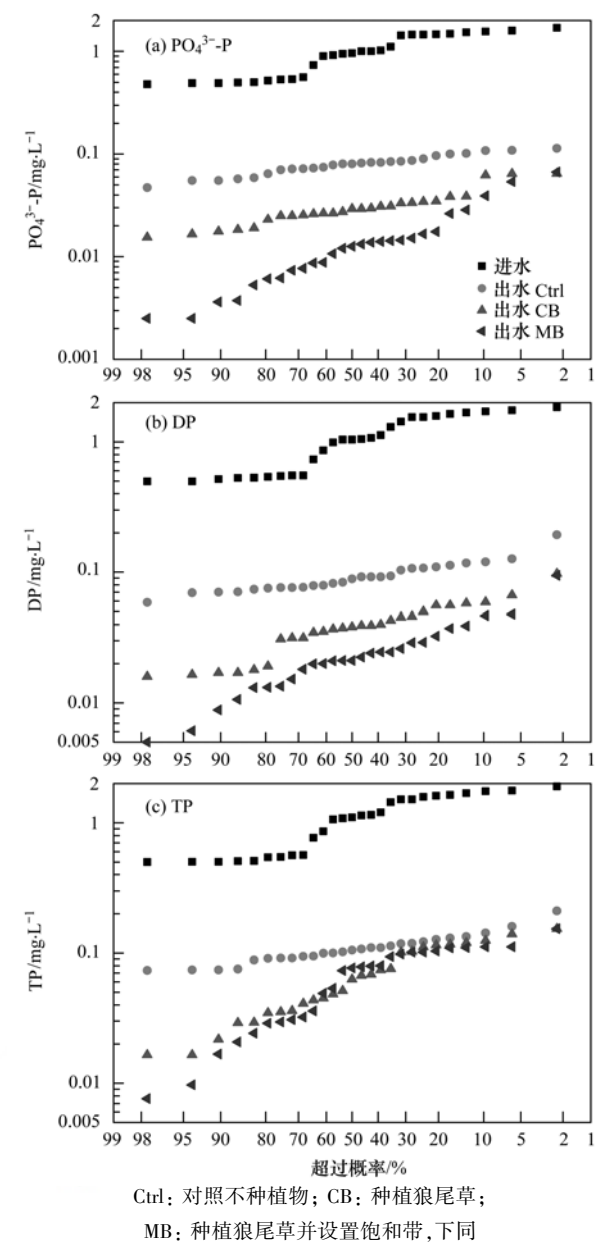


图2 Ctrl、CB和MB进水、出水中 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 、DP和TP浓度的概率分布

Fig. 2 Influent and effluent $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$, DP and TP probability plots for Ctrl, CB, and MB

滞留设置饱和带可进一步提高对进水 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的去除. 试验期间进水 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 浓度平均值为 $(0.996 \pm 0.428) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 情况下,对照 Ctrl、CB 和 MB 出水 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 浓度平均值分别为 (0.080 ± 0.017) 、 (0.031 ± 0.013) 和 $(0.016 \pm 0.015) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,对进水 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 均具有显著的去除作用($P < 0.05$),去除率分别为92.0%、96.9%和98.4%(表2). 生物滞留种植植物(CB)与对照 Ctrl 比,可以使出水磷浓度从0.080 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 降至0.031 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$,种植狼尾草可显著降低出水 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ ($P < 0.05$)(表2).

生物滞留设置饱和带 MB 与不设置饱和带 CB 比,设置饱和带可以使出水 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 浓度从0.031 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 显著降低至0.016 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ($P < 0.05$)(表2). 生物滞留设置饱和带(MB)形成厌氧或缺氧条件,饱和带 ORP 为 $(-131.4 \pm 36.0) \text{ mV}$ (图3),饱和带设置碳源不会降低对 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的去除,而且会增加对 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的去除. 但是从 CB 和 MB 出水 TP、DP 浓度来看,出水 TP 浓度相近,而 MB 出水 DP 浓度 $(0.025 \pm 0.018) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 明显低于 CB 出水 DP 浓度 $(0.040 \pm 0.018) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,饱和带设置碳源添加略增加了出水颗粒态磷(PP). 综合来看,生物滞留设置饱和带添加碳源不影响对地表径流 TP 的去除.

2.2 进水水文、水质变化对磷去除的影响

为了考察操作条件:进水 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 浓度、水文变化(水量、间隔天数)对生物滞留出水磷浓度的影响,根据正交试验设计的运行监测结果,利用方差分析研究了进水 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 浓度、水文变化(水量、间隔天数)对不同生物滞留处理(Ctrl、CB、MB)出水 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 浓度的影响,方差分析结果见表3. 进水 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 浓度变化对 Ctrl 出水 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 浓度存在极显著影响($P < 0.01$). 进水水量变化对 Ctrl 出水 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 浓度存在显著影响($P < 0.05$). 两次运行间

表2 生物滞留种植植物与设置饱和带进水、出水平均磷浓度与去除作用¹⁾(n=27)

Table 2 Average stormwater inflow and outflow nitrogen concentrations and removal rates for the three bioretention treatments and control

项目	进水	出水		
		Ctrl	CB	MB
水量/L	10.0 ± 4.2a	7.2 ± 4.1(27.8)b	6.7 ± 4.2(32.6)b	7.2 ± 4.2(28.4)b
TP/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	1.093 ± 0.491a	0.109 ± 0.029(90.0)b	0.070 ± 0.041(93.6)b	0.067 ± 0.040(93.9)b
DP/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	1.064 ± 0.477a	0.093 ± 0.027(91.3)b	0.040 ± 0.018(96.2)c	0.025 ± 0.018(97.7)d
$\text{PO}_4^{3-}\text{-P}/\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	0.996 ± 0.428a	0.080 ± 0.017(92.0)b	0.031 ± 0.013(96.9)c	0.016 ± 0.015(98.4)d
pH	7.63 ± 0.10a	7.86 ± 0.16a	7.55 ± 0.19a	6.91 ± 0.10b
ORP/mV	170.3 ± 39.3a	183.8 ± 44.2a	216.7 ± 38.0a	-131.4 ± 36.0b

1) Ctrl: 对照不种植物; CB: 种植狼尾草; MB: 种植狼尾草并设置饱和带,下同; 不同小写字母代表不同处理间差异性显著($P < 0.05$),括号内代表平均去除率

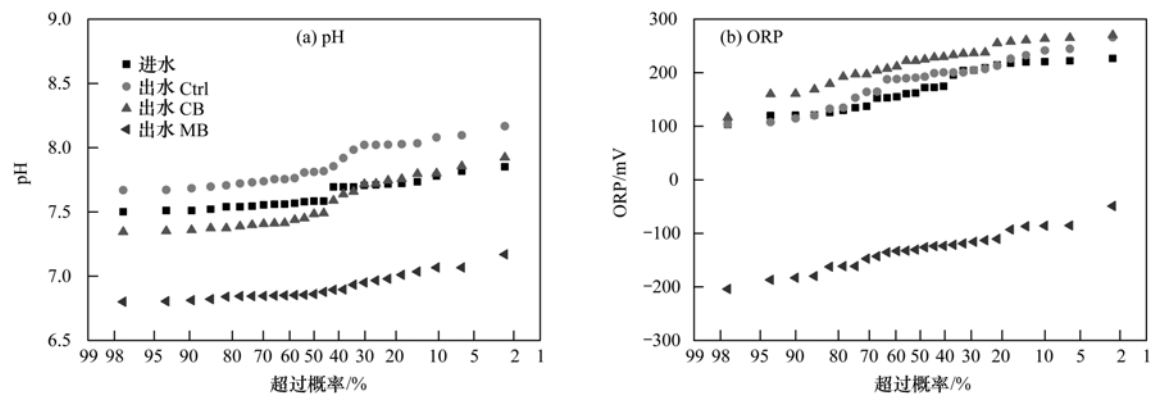


图3 Ctrl、CB 和 MB 进水、出水 pH 与 ORP 概率分布

Fig. 3 Influent and effluent pH and ORP probability plots for Ctrl, CB, and MB

隔天数不影响 Ctrl 出水 PO_4^{3-} -P浓度. CB 和 MB出水 PO_4^{3-} -P浓度几乎不受进水 PO_4^{3-} -P浓度、水文变化(水量、间隔天数)影响. 由此可间接说明生物滞留对地表径流中 PO_4^{3-} -P的去除主要以吸附为主,进水量、间隔天数等水文特征不影响过滤基质对磷的吸附去除.

表3 进水水文、水质变化对2种设计生物滞留与对照出水 PO_4^{3-} -P浓度影响方差分析¹⁾(F值)

Table 3 The F values from analysis of variance (ANOVA) of phosphate concentrations in effluent in terms of inflow phosphate concentration, inflow volume, and antecedent dry days in the two bioretention treatments and control

项目	Ctrl	CB	MB
进水浓度	22.79 **	5.42 *	3.79
间隔天数	1.50	3.34	2.86
进水量	6.13 *	4.12	1.09

1) * * 表示差异极显著($P < 0.01$), * 表示差异显著($P < 0.05$)

表4 试验期间(27次)对照与2种设计生物滞留对进水磷负荷去除比较(均值±标准差, $n=3$)

Table 4 Comparison of the influent and effluent water quality and pollutant mass loads for the three bioretention treatments (mean ± SD, $n=3$)

项目	M_{in} / $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$	$M_R/\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$			负荷去除率/%		
		Ctrl	CB	MB	Ctrl	CB	MB
TP	4.23 ± 0.01	3.93 ± 0.01	4.05 ± 0.02	4.05 ± 0.02	92.7 ± 0.3	95.6 ± 0.5	95.6 ± 0.5
DP	4.09 ± 0.09	3.82 ± 0.02	3.98 ± 0.002	4.01 ± 0.005	93.5 ± 0.5	97.4 ± 0.1	98.2 ± 0.1
PO_4^{3-} -P	3.79 ± 0.05	3.57 ± 0.003	3.71 ± 0.002	3.75 ± 0.004	94.2 ± 0.1	97.8 ± 0.04	98.8 ± 0.1

对照(Ctrl)与2种生物滞留(CB与MB)过滤基质中有效磷垂直分布见图4. 从剖面分布看,3种处理基质有效磷含量没有显著差异. 3种处理有效磷在0~45 cm范围内,表层基质中有效磷含量最高,随深度逐渐降低,在30~45 cm基质中有效磷基本不变,反映基质有效磷背景值. 3种处理表层过滤

2.3 生物滞留对磷负荷削减与去除途径

表4总结了试验期间(27次)对照(Ctrl)与2种生物滞留(CB与MB)累积进水与去除TP、DP和 PO_4^{3-} -P负荷以及去除率. 以生物滞留设施面积为不透水地表面积的10%设计,累积进水量为270 L相当于处理降雨量405 mm,接近武汉多年平均降雨量1/3,相当于处理不透水地表初期10~15 mm径流. Ctrl、CB和MB对水量的削减分别为 (76.0 ± 5.0) L、 (89.2 ± 2.8) L和 (78.5 ± 2.1) L,减少率分别为28.2%、33.0%和29.1%. 种植植物可增加5%水量削减,饱和带的设置略减少水量削减. PO_4^{3-} -P累积进水负荷为 $3.79 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$, Ctrl、CB和MB去除的 PO_4^{3-} -P负荷分别为 3.57 、 3.71 和 $3.75 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$,相应去除率分别为94.2%、97.8%和98.8%. 生物滞留采用河砂与黄棕壤混合基质可有效去除进水中 PO_4^{3-} -P负荷. 种植植物略增加了对 PO_4^{3-} -P负荷的去除. 饱和带设置几乎不影响对 PO_4^{3-} -P负荷的去除.

基质(0~22.5 cm)有效磷显著增加,是过滤基质对地表径流磷去除的结果. 对照(Ctrl)与2种生物滞留(CB与MB)0~22.5 cm过滤基质中有效磷含量分别为 (12.50 ± 2.02) 、 (14.27 ± 0.53) 和 $(13.62 \pm 3.52) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 22.5~45 cm过滤基质中有效磷含量分别为 (7.53 ± 1.90) 、 (9.51 ± 1.28) 和 $(7.29$

± 1.22) $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. 由此可说明,生物滞留通过基质吸附去除地表径流中的磷,表现为基质剖面中有效磷的增加,且表层 0~22.5 cm 基质是吸附去除磷的主要作用区. 对照 (Ctrl) 与 2 种生物滞留 (CB 与 MB) 0~22.5 cm 过滤基质有效磷增加量分别为 (1.95 ± 0.45) 、 (1.86 ± 0.48) 和 (2.48 ± 1.11) $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$, 分别占试验期间进水总磷 $(4.23 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2})$ 的 $(46.0 \pm 10.7)\%$ 、 $(44.0 \pm 11.3)\%$ 和 $(58.7 \pm 26.2)\%$, 可见生物滞留基质剖面增加的这部分磷, 可以被植物吸收利用.

表 5 总结了 2 种生物滞留设计种植狼尾草一个生长季地上、地下生物量结果. CB 和 MB 处理狼尾草地上生物量分别为 $(1.19 \pm 0.21) \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 和 $(1.58 \pm 0.57) \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$. 饱和带设置 (MB) 有利于狼尾草生长, 可提高狼尾草地上生物量. CB 和 MB 处理狼尾草地下生物量分别为 $(0.21 \pm 0.04) \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 和 $(0.25 \pm 0.12) \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$. 2 种处理地下生物量没有明显差异. 另外 CB 和 MB 狼尾草地上生物量约为地

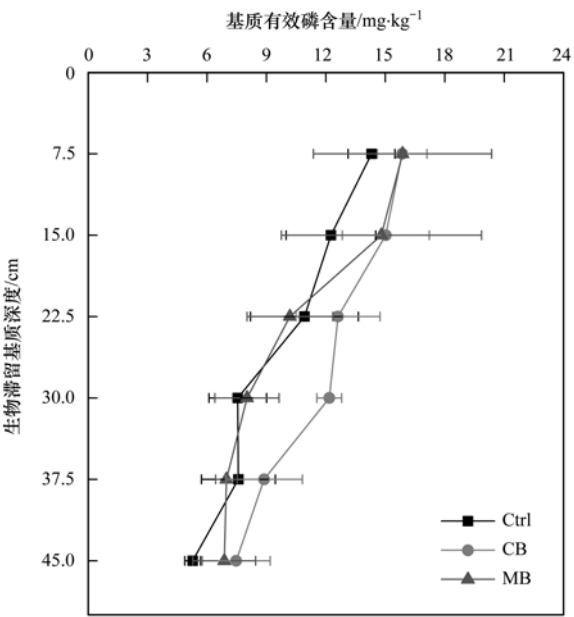


图 4 Ctrl、CB 和 MB 过滤基质中有效磷垂直分布
Fig. 4 Vertical distribution of extractable phosphorus in the filter media for Ctrl, CB, and MB

表 5 2 种生物滞留种植狼尾草一个生长季生物量与对磷的吸收固定量¹⁾ (均值 $\pm$ 标准差, $n=3$)

Table 5 Above- and below-ground biomass and the phosphorus accumulated in biomass from the two bioretention treatments (mean $\pm$ SD, $n=3$)

处理	进水磷负荷 / $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$	地上生物量 (AG) / $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$	P_{AG} / $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$	地下生物量 (BG) / $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$	P_{BG} / $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$	总生物量 / $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$	P_t / $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$	P_t 占进水磷负荷 /%
CB	4.23 ± 0.01	1.19 ± 0.21	2.42 ± 0.43	0.21 ± 0.04	0.33 ± 0.05	1.41 ± 0.22	2.75 ± 0.45	65.0 ± 10.6
MB	4.23 ± 0.01	1.58 ± 0.57	3.22 ± 1.16	0.25 ± 0.12	0.39 ± 0.19	1.84 ± 0.68	3.61 ± 1.33	85.3 ± 31.5

1) P_{AG} : 地上生物量吸收固定磷; P_{BG} : 地下生物量吸收固定磷; P_t : 总生物量固定磷

下生物量的 6 倍,狼尾草地上生物量是总生物量的主要组成. 狼尾草地上、地下部分磷含量测定结果分别为 $(2.03 \pm 0.37) \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $(1.55 \pm 0.22) \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$. 根据对狼尾草地上、地下生物量以及磷含量测定结果,分别计算了 2 种生物滞留处理一个生长季狼尾草地上、地下部分对磷的吸收固定量 (表 5). 一个生长季 CB、MB 狼尾草生长吸收的磷分别为 $(2.75 \pm 0.45) \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ 和 $(3.61 \pm 1.33) \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$, 可分别占进水磷负荷 $(65.0 \pm 10.6)\%$ 和 $(85.3 \pm 31.5)\%$.

3 讨论

根据武汉城市地表径流磷浓度以及磷负荷,选择当地土壤与河砂混合作为生物滞留基质,种植城市绿地景观植物狼尾草,通过 1a 运行监测,研究了生物滞留种植植物 (狼尾草) 与设置饱和带对城市地表径流溶解性磷 ($\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$) 去除的影响及去除途径. 2 种生物滞留与对照的过滤基质都采用的是

75% 河砂与 25% 当地土壤混合而成,对地表径流 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的平均去除率都在 90% 以上,且不受进水文、水质变化的影响,达到了有效稳定去除 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的目的. 因此采用河砂与黄棕壤混合可作为生物滞留有效除磷的过滤基质. 另外与对照 Ctrl 不种植植物相比,种植狼尾草可显著降低出水 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 浓度,表明种植植物通过植物吸收与根际微生物同化可进一步去除地表径流中的 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ [22]. 因此植物种植与选择对去除地表径流中的磷也是重要的.

生物滞留设置饱和带 MB 与不设饱和带 CB 相比,可进一步有效降低出水 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 浓度,饱和带中的生物同化可能是进一步降低出水 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 浓度的主要原因 [23]. 饱和带并添加碳源木块增加了颗粒态磷 (PP) 的输出, CB 出水颗粒态磷 ($\text{PP} = \text{TP} - \text{DP}$) 平均浓度为 $0.030 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, MB 出水颗粒态磷平均浓度为 $0.042 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. MB 颗粒态磷的增加与饱和带碳源 (木块) 分解输出有关. 综合而看,生物滞留设置饱和带不影响出水 TP 浓度. 本研究饱和

带设置不同于传统饱和带设置,传统饱和带只是把过滤基质底部一定深度设置为饱和带,还原条件下 Fe^{3+} 转化为 Fe^{2+} ,吸附去除的 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 会重新释放^[12].而本研究是在过滤基质底部独立设置45 cm饱和带,因此 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的去除主要发生在上部45 cm过滤基质,底部45 cm饱和带形成的厌氧与缺氧环境不会影响吸附去除磷的重新释放,且会进一步增加 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的去除作用,与饱和带微生物对 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的利用有关^[24].

生物滞留通过基质吸附去除地表径流中的磷,表现为基质剖面中有效磷的增加,表层0~22.5 cm基质是吸附去除磷的主要作用区.生物滞留基质剖面增加的这部分磷,可以被植物吸收利用.由于没有直接测定生物滞留过滤基质中全磷含量的变化,仅以基质剖面有效磷变化和植物吸收固定磷不能完全说明生物滞留对地表径流磷去除作用. CB 和 MB 处理基质剖面有效磷增加量与种植狼尾草吸收固定量之和超过了进水磷负荷,分别是进水磷负荷的 $(109.0 \pm 19.8)\%$ 和 $(144.0 \pm 14.5)\%$.首先从 Ctrl 处理来看,未种植狼尾草,基质剖面有效磷的增加量仅占进水磷负荷的 $(46.0 \pm 10.7)\%$,说明基质吸附去除的磷不全表现为有效磷的增加.另外种植狼尾草处理(CB 和 MB),尽管植物吸收固定磷,但是基质剖面有效磷增加大于 Ctrl 处理有效磷的增加.另外种植狼尾草 CB 出水 pH 明显低于未种植植物 Ctrl(图3),由此可说明,生物滞留基质剖面有效磷是动态变化的,而且种植植物会影响有效磷的含量,可能与植物根际低 pH 有关.生物滞留种植狼尾草生长吸收的磷一部分直接来源于过滤基质从地表径流吸附去除的有效磷,另外一部分可能源于过滤基质固有的磷^[22].

从生物滞留系统磷输入(进水)与输出(出水与植物地上部分)角度分析, CB、MB 狼尾草地上部分吸收的磷分别为 $(2.42 \pm 0.43) \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ 和 $(3.22 \pm 1.16) \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$,分别占进水磷负荷的 $(57.1 \pm 10.3)\%$ 和 $(76.1 \pm 27.4)\%$.过滤基质通过吸附去除地表径流中的磷,可被植物吸收利用,生物滞留通过种植植物吸收基质中吸附去除的磷^[9],可延长达到生物滞留基质磷吸附饱和的时间.根系发达、地上部分生长快的植物能够从土壤或种植基质中高效吸收利用磷^[25],推荐应用于生物滞留.本研究中种植的狼尾草须根发达、生长快,且在园林绿化中作为观赏草,可选择作为生物滞留种植植物.由于植物地上部分可通过收割移除,通过每年定期收割植物地上部分,

可作为生物滞留去除地表径流磷的主要途径.

4 结论

(1)75%河砂与25%黄棕壤作为生物滞留过滤种植基质,对地表径流 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的平均去除率可达到90%以上,且不受进水水文、水质变化的影响.

(2)生物滞留种植狼尾草可显著降低出水 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 浓度.生物滞留设置饱和带可进一步提高对 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的去除,不影响出水 TP 浓度.

(3)生物滞留通过基质吸附去除地表径流中的磷,表现为0~22.5 cm 基质剖面中有效磷的增加,约占试验期间进水磷负荷的50%.生物滞留种植狼尾草地上部分吸收的磷可占进水磷负荷的57.1%~76.1%,定期收割植物地上部分可作为去除地表径流磷的主要途径.

参考文献:

- [1] 车伍,张伟.海绵城市建设若干问题的理性思考[J].给水排水,2016,42(11):1-5.
- [2] Davis A P, Hunt W F, Traver R G, *et al.* Bioretention technology: overview of current practice and future needs[J]. Journal of Environmental Engineering, 2009, 135(3): 109-117.
- [3] LeFevre G H, Paus K H, Natarajan P, *et al.* Review of dissolved pollutants in urban storm water and their removal and fate in bioretention cells[J]. Journal of Environmental Engineering, 2015, 141(1): 1-23.
- [4] Liu J Y, Davis A P. Phosphorus speciation and treatment using enhanced phosphorus removal bioretention[J]. Environmental Science & Technology, 2014, 48(1): 607-614.
- [5] Li J K, Davis A P. A unified look at phosphorus treatment using bioretention[J]. Water Research, 2015, 90: 141-155.
- [6] 王建军,李田,张颖.给水厂污泥改良生物滞留填料除磷效果的研究[J].环境科学,2014,35(12):4642-4647.
Wang J J, Li T, Zhang Y. Water treatment residual as a bioretention media amendment for phosphorus removal[J]. Environmental Science, 2014, 35(12): 4642-4647.
- [7] 李立青,龚燕芳,颜子钦,等.生物滞留设施对城市地表径流低浓度磷吸附基质研究[J].环境科学,2015,36(7):2511-2517.
Li L Q, Gong Y F, Yan Z Q, *et al.* Bioretention media screening for the removal of phosphorus in urban stormwater[J]. Environmental Science, 2015, 36(7): 2511-2517.
- [8] Read J, Fletcher T D, Wevill T, *et al.* Plant traits that enhance pollutant removal from stormwater in biofiltration systems[J]. International Journal of Phytoremediation, 2010, 12(1): 34-53.
- [9] Zhang Z H, Rengel Z, Liaghati T, *et al.* Influence of plant species and submerged zone with carbon addition on nutrient removal in stormwater biofilter[J]. Ecological Engineering, 2011, 37(11): 1833-1841.
- [10] Payne E G, Pham T, Cook P L, *et al.* Biofilter design for effective nitrogen removal from stormwater-influence of plant species, inflow hydrology and use of a saturated zone[J]. Water

- Science & Technology, 2014, **69**(6): 1312-1319.
- [11] Fowdar H S, Hatt B E, Cresswell T, *et al.* Phosphorus fate and dynamics in greywater biofiltration systems [J]. Environmental Science & Technology, 2017, **51**(4): 2280-2287.
- [12] Zinger Y, Blecken G T, Fletcher T D, *et al.* Optimising nitrogen removal in existing stormwater biofilters: benefits and tradeoffs of a retrofitted saturated zone [J]. Ecological Engineering, 2013, **51**: 75-82.
- [13] Roy E D. Phosphorus recovery and recycling with ecological engineering: a review [J]. Ecological Engineering, 2017, **98**: 213-227.
- [14] Chowdhury R B, Moore G A, Weatherley A J, *et al.* Key sustainability challenges for the global phosphorus resource, their implications for global food security, and options for mitigation [J]. Journal of Cleaner Production, 2017, **140**: 945-963.
- [15] 李立青, 胡楠, 刘雨情, 等. 3 种生物滞留设计对城市地表径流溶解性氮的去除作用 [J]. 环境科学, 2017, **38**(5): 1881-1888.
- Li L Q, Hu N, Liu Y Q, *et al.* Effects of three bioretention configurations on dissolved nitrogen removal from urban stormwater [J]. Environmental Science, 2017, **38**(5): 1881-1888.
- [16] 代会平, 向佐湘, 郭君, 等. 紫穗狼尾草和狗牙根茎叶水文生态效应比较 [J]. 草业科学, 2009, **26**(2): 107-113.
- Dai H P, Xiang Z X, Guo J, *et al.* Comparative study on hydrological and ecological effects of stems and leave of wild *Pennisetum alopecuroides* and *Cynodon dactylon* [J]. Pratacultural Science, 2009, **26**(2): 107-113.
- [17] 林莉峰, 李田, 李贺. 上海市城区非渗透性地面径流的污染特性研究 [J]. 环境科学, 2007, **28**(7): 1430-1434.
- Lin L F, Li T, Li H. Characteristics of surface runoff pollution of Shanghai urban area [J]. Environmental Science, 2007, **28**(7): 1430-1434.
- [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] 李立青, 单保庆, 赵建伟, 等. 山地城市地表径流源区水质特征监测研究 [J]. 环境科学, 2012, **33**(10): 3397-3403.
- Li L Q, Shan B Q, Zhao J W, *et al.* Research on stormwater runoff quality of mountain city by source area monitoring [J]. Environmental Science, 2012, **33**(10): 3397-3403.
- [20] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法 [M]. (第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [21] Hsieh C H, Davis A P, Needelman B A. Bioretention column studies of phosphorus removal from urban stormwater runoff [J]. Water Environment Research, 2007, **79**(2): 177-184.
- [22] Ryciewicz-Borecki M, McLean J E, Dupont R R. Nitrogen and phosphorus mass balance, retention and uptake in six plant species grown in stormwater bioretention microcosms [J]. Ecological Engineering, 2017, **99**: 409-416.
- [23] Glaister B J, Fletcher T D, Cook P L, *et al.* Co-optimisation of phosphorus and nitrogen removal in stormwater biofilters: the role of filter media, vegetation and saturated zone [J]. Water Science & Technology, 2014, **69**(9): 1961-1969.
- [24] Forbes M G, Dickson K L, Saleh F, *et al.* Recovery and fractionation of phosphorus retained by lightweight expanded shale and masonry sand used as media in subsurface flow treatment wetlands [J]. Environmental Science & Technology, 2005, **39**(12): 4621-4627.
- [25] Richardson A E, Lynch J P, Ryan P R, *et al.* Plant and microbial strategies to improve the phosphorus efficiency of agriculture [J]. Plant and Soil, 2011, **349**(1-2): 121-156.

CONTENTS

Spatial-Temporal Change Evolution of PM _{2.5} in Typical Regions of China in Recent 20 Years	LUO Yi, DENG Qiong-fei, YANG Kun, <i>et al.</i>	(3003)
Evaluation the Extent of Health Damage Caused by PM _{2.5} Particulate in Xi'an City	WEI Guo-ru, SHI Xing-min	(3014)
Analysis of Chemical Composition, Source and Evolution of Submicron Particles in Xianghe, Hebei Province	JIANG Qi, WANG Fei, SUN Ye-le	(3022)
Characteristics and Source Analysis of Carbonaceous Components of PM _{2.5} During Autumn in the Northern Suburb of Nanjing	XU Zu-fei, CAO Fang, GAO Song, <i>et al.</i>	(3033)
Comparison of Chemical Components Characteristics of PM _{2.5} Between Haze and Clean Periods During Summertime in Lin'an	LIANG Lin-lin, SUN Jun-ying, ZHANG Yang-mei, <i>et al.</i>	(3042)
Characteristics and Sources of Carbon Components in PM _{2.5} During Autumn and Winter in Panjin City	ZHANG Lei, JI Ya-qin, ZHANG Jun, <i>et al.</i>	(3051)
Aerosol Optical Properties and Light Absorption Enhancement of EC During Wintertime in Nanjing	HUANG Cong-cong, MA Yan, ZHENG Jun	(3057)
Concentration, Solubility, and Dry Deposition Flux of Trace Elements in Fine and Coarse Particles in Qingdao During Summer	LI Peng-zhi, LI Qian, SHI Jin-hui, <i>et al.</i>	(3067)
Characteristics and Sources of Dissolved Heavy Metals in Summer Precipitation of Taiyuan City, China	YE Ai-ling, CHENG Ming-chao, ZHANG Lu, <i>et al.</i>	(3075)
Characteristics of and Factors Affecting Atmospheric CO ₂ Concentration in Hangzhou	PU Jing-jiao, XU Hong-hui, JIANG Yu-jun, <i>et al.</i>	(3082)
Treatment Status and Emission Characteristics of Volatile Organic Compounds from Typical Industrial Sources	JING Sheng-ao, WANG Hong-li, ZHU Hai-lin, <i>et al.</i>	(3090)
Characteristics of Industrial VOCs Emission Sources and Control Technology Application in a Prefecture-level City Region-Based on Qinhuangdao City	HU Xu-rui, HU Xiao-yu, WANG Can	(3096)
Pollution Condition and Health Risk Assessment of VOCs in Fermentation Exhaust from Penicillin Production	GUO Bin, YAO Rui-jing, ZHANG Shuo, <i>et al.</i>	(3102)
Measurements of OC and EC Emission Factors for Light-duty Gasoline Vehicles	HUANG Cheng, HU Qing-yao, LU Jun	(3110)
Pollution Levels and Risk Assessment of Heavy Metals from Atmospheric Deposition in Nanjing	TIAN Chun-hui, YANG Ruo-zhu, Gulizhaer Yilihamu, <i>et al.</i>	(3118)
Contamination Levels and Source Analysis of Heavy Metals in the Finer Particles of Urban Road Dust from Xi'an, China	SHI Dong-qi, LU Xin-wei	(3126)
pCO ₂ in the Main Rivers of the Three Gorges Reservoir and Its Influencing Factors	LUO Jia-chen, MAO Rong, LI Si-yue	(3134)
Major Ionic Features and Their Possible Controls in the Surface Water and Groundwater of the Jinghe River	KOU Yong-chao, KUA Kun, LI Zhou, <i>et al.</i>	(3142)
Urban Runoff Phosphorus Removal Pathways in Bioretention Systems	LI Li-qing, LIU Yu-qing, YANG Jia-min, <i>et al.</i>	(3150)
Succession Characteristics of Phytoplankton Functional Groups and Their Relationships with Environmental Factors in Dianshan Lake, Shanghai	YANG Li, ZHANG Wei, SHANG Guang-xia, <i>et al.</i>	(3158)
Spatio-temporal Variations of Diatom Community and Their Relationship with Water Environment in Fuxian Lake	LI Rui, CHEN Guang-jie, KANG Wen-gang, <i>et al.</i>	(3168)
Effects of Algal Blooms and Their Degradation on the Sediment-water Micro-interface	WANG Yong-ping, XIE Rui, CHAO Jian-ying, <i>et al.</i>	(3179)
Effect of Biochar on Root Morphological Characteristics of Wetland Plants and Purification Capacity of Constructed Wetland	XU De-fu, PAN Qian-cheng, LI Ying-xue, <i>et al.</i>	(3187)
Preparation of Mn-Co/Ceramic Honeycomb Catalyst and Its Performance on Catalytic Ozonation of Hydroquinone	ZHANG Lan-he, GAO Wei-wei, CHEN Zi-cheng, <i>et al.</i>	(3194)
Degradation Mechanism of Tetracycline Using Fe/Cu Oxides as Heterogeneous Activators of Peroxymonosulfate	LI Jing, BAO Jian-guo, DU Jiang-kun, <i>et al.</i>	(3203)
Behavior and Mechanisms of Cd(II) Adsorption from Water by Niobate-Modified Titanate Nanosheets	KANG Li, LIU Wen, LIU Xiao-na, <i>et al.</i>	(3212)
Trace Amounts of Phosphorus Removal Based on the in-suit Oxidation Products of Iron or Manganese in a Biofilter	CAI Yan-an, BI Xue-jun, ZHANG Jia-ning, <i>et al.</i>	(3222)
Effect of Preparation Methods on Phosphate Adsorption by Iron-Titanium Binary Oxide: Coprecipitation and Physical Mixing	ZHONG Yan, WANG Jiang-yan, CHEN Jing, <i>et al.</i>	(3230)
Effects of Conductivity on Performance of a Combined System of Anaerobic Acidification, Forward Osmosis, and a Microbial Fuel Cell	LU Yu-qin, LIU Jin-meng, WANG Xin-hua, <i>et al.</i>	(3240)
COD Requirement for Biological Phosphorus Removal Granule System Under Different Phosphorus Concentrations	LI Dong, CAO Mei-zhong, GUO Yue-zhou, <i>et al.</i>	(3247)
Effect of Substrate Concentration on SAD Collaborative Nitrogen and Carbon Removal Efficiency in an ABR Reactor	ZHANG Min, JIANG Ying, WANG Yao-qi, <i>et al.</i>	(3254)
Evaluation of Advanced Nitrogen Removal from Coking Wastewater Using Sulfide Iron-containing Sludge as a Denitrification Electron Donor	FU Bing-bing, PAN Jian-xin, MA Jing-de, <i>et al.</i>	(3262)
Stability of Nitrification Combined with Limited Filamentous Bulking Under Intermittent Aeration	GAO Chun-di, SUN Da-yang, AN Ran, <i>et al.</i>	(3271)
Filamentous Sludge Microbial Community of a SBR Reactor Based on High-throughput Sequencing	HONG Ying, YAO Jun-qin, MA Bin, <i>et al.</i>	(3279)
Impact of Nano Zero-Valent Iron (NZVI) on Methanogenic Activity, Physiological Traits, and Microbial Community Structure in Anaerobic Digestion	SU Run-hua, DING Li-li, REN Hong-qiang	(3286)
Effects of Gas/Water Ratio on the Characteristics of Nitrogen Removal and the Microbial Community in Post Solid-Phase Denitrification Biofilter Process	ZHANG Qian, JI Fang-ying, FU Xu-fang, <i>et al.</i>	(3297)
Comparison of Extraction Methods of Extracellular Polymeric Substances from Activated Sludge	SUN Xiu-yue, TANG Zhu, YANG Xin-ping	(3306)
Identification and Characterization of a Hypothermic Alkaliphilic Aerobic Denitrifying Bacterium <i>Pseudomonas monteilii</i> Strain H97	CAI Xi, HE Teng-xia, YE Qing, <i>et al.</i>	(3314)
Isolation, Identification, and Biodegradation Behaviors of a Perfluorooctane Sulfonic Acid Precursor (PreFOSs) Degrading Bacterium from Contaminated Soil	ZHAO Shu-yan, ZHOU Tao, WANG Bo-hui, <i>et al.</i>	(3321)
Microbial Community Distributions in Soils of an Oil Exploitation Site	CAI Ping-ping, NING Zhuo, HE Ze, <i>et al.</i>	(3329)
Characteristics of Soil Physicochemical Properties and Enzyme Activities over Different Reclaimed Years in a Copper Tailings Dam	WANG Rui-hong, JIA Tong, CAO Miao-wen, <i>et al.</i>	(3339)
Risk Analysis of Heavy Metal Contamination in Farmland Soil Around a Bauxite Residue Disposal Area in Guangxi	GUO Ying, LI Yu-bing, XUE Sheng-guo, <i>et al.</i>	(3349)
Occurrence and Distribution of Phthalate Esters in Urban Soils of Chongqing City	YANG Zhi-hao, HE Ming-jing, YANG Ting, <i>et al.</i>	(3358)
Profile Distribution of Paddy Soil Organic Carbon and Its Influencing Factors in Chengdu Plain	LI Shan, LI Qi-quan, WANG Chang-quan, <i>et al.</i>	(3365)
Correlation Between Soil Organic and Inorganic Carbon and Environmental Factors in Cotton Fields in Different Continuous Cropping Years in the Oasis of the Northern Tarim Basin	ZHAO Jing-jing, GONG Lu, AN Shen-qun, <i>et al.</i>	(3373)
Soil Organic Carbon Components and Their Correlation with Soil Physicochemical Factors in Four Different Land Use Types of the Northern Tarim Basin	AN Shen-qun, GONG Lu, LI Yang-mei, <i>et al.</i>	(3382)
Short-term Mechanism of Warming-induced Stability for Organic Carbon in the Karst Plateau Soil	TANG Guo-yong, ZHANG Chun-hua, LIU Fang-yan, <i>et al.</i>	(3391)
Effects of Boron Treatment on Arsenic Uptake and Efflux in Rice Seedlings	ZHU Yi, SUN Guo-xin, CHEN Zheng, <i>et al.</i>	(3400)
Comparative Analysis of Different Soil Amendment Treatments on Rice Heavy Metal Accumulation and Yield Effect in Pb and Cd Contaminated Farmland	HU Xue-fang, TIAN Zhi-qing, LIANG liang, <i>et al.</i>	(3409)
Seasonal Variation in Surface Ozone and Its Effect on the Winter Wheat and Rice in Nanjing, China	ZHAO Hui, ZHENG You-fei, WEI Li, <i>et al.</i>	(3418)
Hair Mercury Concentrations in Residents of Fuling and Zhongxian in the Three Gorges Reservoir Region and Their Influence Factors	CHENG Nan, XIE Qing, FAN Yu-fei, <i>et al.</i>	(3426)
Removal of Typical Antibiotics During Aerobic Composting of Human Feces	SHI Hong-lei, WANG Xiao-chang, LI Qian	(3434)
Effect of COD/SO ₄ ²⁻ Ratio on Anaerobic Digestion of Penicillin Bacterial Residues	QIANG Hong, LI Yu-you, PEI Meng-fu	(3443)
Characteristics of Odor Emissions from Fresh Compost During Storage and Application	HE Pin-jing, JIANG Ning-ling, XU Xian, <i>et al.</i>	(3452)
Effects of the Veterinary Antibiotic Sulfamethazine on Ammonia Volatilization from a Paddy Field Treated with Conventional Synthetic Fertilizer and Manure	PANG Bing-kun, ZHANG Jing-sha, WU Jie, <i>et al.</i>	(3460)