

红壤区填料沙土配比对生物滞留池 环境水文效应的影响

李英^{1,2}, 涂安国^{1,2}, 张华明^{1,2}, 胡欣^{1,2}, 袁瑾雯^{1,2}, 咎玉亭^{1,2}

(1. 江西省土壤侵蚀与防治重点实验室, 江西 南昌 330029; 2. 江西省水土保持科学研究院, 江西 南昌 330029)

摘要: 提高填料透水性能以平衡其水文调节和污染物去除性能是红壤区生物滞留池构建的关键。研究设计红壤填料中掺入不同比例的河沙以改变其透水性, 比较分析其在不同的重现期降雨强度下对生物滞留池的水文调节和污染物去除效果。结果表明: 同一降雨强度重现期下, 地表径流处理率随着掺沙比例的增加而增加, 峰值削减率随沙土配合比的增加变化不明显, 峰值延迟时间随掺沙比例增加而减少; 硝氮的去除率随着掺沙比例的增加而增加, 但对 COD 的去除率则随着掺沙量的增加而下降, 对氨氮和总磷的去除率影响不大; 综合考虑生物滞留池的水文调节和污染物去除效果, 20% 红壤土与 80% 河沙混合是红壤区生物滞留池填料较为科学的沙土配比。

关键词: 生物滞留池; 沙土配合比; 水文调节; 污染物去除; 红壤区填料

中图分类号: TU992; X52

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2019)06-0068-05

Effect of the sand/soil ratio in filling on the environmental hydrological effect of bioretention pool in red soil region

LI Ying^{1,2}, TU Anguo^{1,2}, ZHANG Huaming^{1,2}, HU Xin^{1,2}, YUAN Jinwen^{1,2}, ZAN Yuting^{1,2}

(1. Jiangxi Provincial Key Laboratory of Soil Erosion and Prevention, Nanchang 330029, China;

2. Jiangxi Institute of Soil and Water Conservation, Nanchang 330029, China)

Abstract: Improving the permeability of fillers to balance their hydrological regulation and pollution removal performance is the key for the bioretention pond in red soil region. In order to change the permeability of red soil, different proportions of river sand were mixed into red soil, and their effects on hydrological regulation and pollution removal of bioretention pond system under different rainfall intensity at different recurrence periods were compared and analyzed. The results show that the surface runoff treatment rate increases with the increase of sediment mixing ratio, the peak reduction rate does not change significantly with the increase of sand mixing ratio, and the peak delay time decreases with the increase of sediment mixing ratio. The removal rate of nitrate increases with the increase of sediment content, but the removal rate of COD decreases with the increase of sediment content, and little effect on the removal rate of ammonia nitrogen and total phosphorus. Considering the effects of hydrological regulation and pollution removal, 20% red loam and 80% river sand are the scientific proportion of fillers for bioretention facilities in red soil area.

Key words: bioretention pond; sand/soil ratio; hydrological regulation; pollution removal; filling of red soil region

1 研究背景

随着城市化进程的快速推进,不透水下垫面比

例不断增加,由此造成了城市洪涝灾害频发和水体污染^[1-3]。生物滞留系统作为海绵城市建设的主要措施之一,是一种以渗滤为基础的城市雨洪管理措

收稿日期:2019-05-10; 修回日期:2019-07-03

基金项目:江西省重点研发计划项目(20161BBG70087、20161BBG70086、20171BBG70076);江西省水利科技计划项目(KT201722、201820YBKT18、201821ZDKT16)

作者简介:李英(1982-),女,安徽安庆人,硕士,高级工程师,主要从事水土保持设计研究。

通讯作者:涂安国(1983-),男,江西余干人,硕士,高级工程师,主要从事流域水土保持研究。

施,具有较强的径流调节及污染物净化能力^[4-6]。填料组成和配比设计是保证生物滞留系统水文调节和污染去除性能发挥的关键因素^[7-9]。目前,国内外学者针对如何提高生物滞留设施的污染物去除效果和调节性能,在填料的选择及配比优化方面做了大量的研究^[10-11],但对于如何综合提高生物滞留设施的环境水文性能研究相对较少。选择黏粒含量高、富含铁、铝的材料作为生物滞留设施的填料组成,可提高其对地表径流氮、磷的去除能力^[12]。已有试验结果表明,较低的渗透率有利于提高生物滞留池的脱氮效果^[13]。但是当填料黏粒含量高时,水分的渗透能力会衰减,生物滞留设施的水力负荷将降低,不能满足对地表径流的调节和净化要求。当基础土壤的渗透系数达不到生物滞留设施要求的3.6 cm/h时,则需在土壤中添加其他材料以提高渗透性^[14]。因此,填料中不同成分配合比的确定则需要综合考虑其水文调节和污染物去除性能。

每个地区土壤类型不同,所选的填料组成及配比也有差异。红壤黏粒含量高,对氮磷等污染物具有很好的吸附作用^[15-16],但其0~100 cm深度的土壤渗透系数大多在 $1 \times 10^{-6} \sim 1 \times 10^{-5}$ cm/s,远达不到生物滞留系统所需渗透系数。同时,南方红壤地区年降雨量丰沛且集中,次降雨量可高达200 mm以上,当地面不透水时,暴雨极容易造成超大地表径流,这更需要添加外来物质改善其透水性,提高对地表径流调节能力。本研究拟设计不同比例的河沙掺入红壤填料以改变其透水性,比较分析其对生物滞留池系统的水文调节和污染物去除效果,以期确定合理的河沙掺入比例,为红壤区生物滞留设施填料组成配置提供科学依据。

2 材料与方法

2.1 试验装置

试验由配水水箱、蠕动泵、配水管线、生物滞留池和径流收集桶组成。生物滞留池采用5个内径为300 mm的有机玻璃管制成(见图1)。生物滞留池自上而下分别为15 cm蓄水层、25 cm种植层、50 cm过滤层和30 cm反滤层。反滤层由上面填细沙10 cm、下面填入砾石20 cm组成。实验所装填的红壤土(0~30 cm土壤)和河沙均取自江西省德安县。为保证土壤初始含水率和密度均匀,土样需经自然风干和过筛(孔径2 mm)。红壤土土样有机质含量为0.37%,黏粒(<0.002 mm)含量为24.65%,粉粒(0.002~0.05 mm)含量为51.82%。采用蠕动泵

供水,上方进水,底部出水。

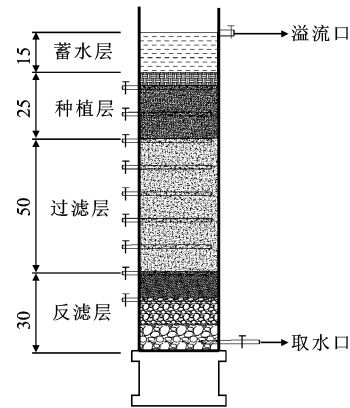


图1 生物滞留池试验装置示意图(单位:cm)

2.2 试验设计

过滤层分别按100%河沙(A)、20%红壤土与80%河沙(B)、50%红壤土与50%河沙(C)、80%红壤土与20%河沙(D)、100%红壤土(E)等沙土比设置5组处理。在准备好土样后,先测定土的初始含水率(若实验要求按一定的含水率装土,则须先对土样进行制备)。然后按照一定的容重和初始含水率分层填装土样(要求按照合理的含水率和容重计算每层所要填装的土量)。开始装土时首先要称取该层所要填土的重量,每层装入土后都要先整平,然后用击实器击实,使得装入的土与该层事先标定好的线相平齐,然后用适当的工具抛毛(以保证土体密度的均一性),然后进行下一层土的填装,装土时须保证层与层之间的良好接触,不能出现明显的分层现象。掺沙后生物滞留池填料层的饱和导水率随掺沙率的变化见图2。

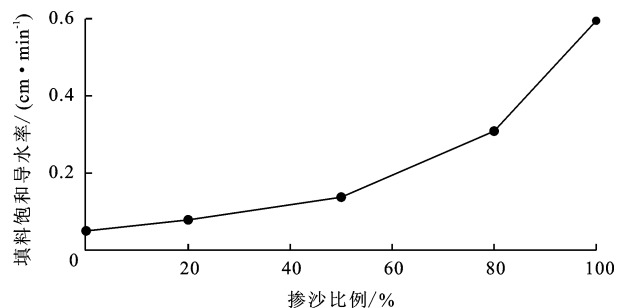


图2 填料层饱和导水率随掺沙率的变化

2.3 试验方法

试验进水强度根据江西省建筑设计院制定的南昌市暴雨公式计算得出:

$$q = \frac{8.316(1 + 0.69 \log p)}{(t + 1.4)^{0.64}} \quad (1)$$

式中: q 为暴雨强度, mm/min; p 为设计重现期, a; t

为降雨历时, min。

根据暴雨强度、滤柱汇水面积和径流系数(取0.9)计算得到重现期为1年、5年一遇120 min供水流量分别为163、197、217、242 mL/min。根据蠕动泵流量精度, 试验进水强度分别取170、200、220、250 ml/min。采用蠕动泵控制恒定流量持续进水120 min。

生物滞留设施对径流水质控制效果的试验用水根据南昌市多年平均降雨初期道路径流水质各项污染物指标的平均浓度人工配制而成, 原水为自来水。采用硝酸钾、氯化铵、磷酸二氢钾和葡萄糖配置成进水硝氮浓度6.8 mg/L、氨氮浓度2.5 mg/L、总磷1.5 mg/L、COD浓度为200 mg/L。

在进行试验之前, 在配置好浓度的供水容器中再取样一次, 最终确定进水水体中各指标的浓度。试验过程中, 在滤柱底部用径流桶收集底部出流量, 并每隔10~20 min用取样瓶采集水样分析出水中各污染物浓度。

3 结果与分析

3.1 沙土比对生物滞留池的水文过程影响

红壤填料掺沙后, 土壤的入渗性能得到明显改善。由不同掺沙比例下生物滞留池底部出流过程曲线(图3)可知, 当红壤填料中掺入20%、50%、80%、100%河沙时, 1年一遇降雨可使生物滞留池

底部最大入渗流量提高1.44、2.38、4.99和5.33倍。5年一遇降雨可使生物滞留池底部最大入渗流量提高1.61、2.56、4.41和4.64倍。由此可知, 当填料组成为80%和100%河沙时, 其底部出流过程相差不大。掺沙后, 5年一遇降雨较1年一遇降雨的出流峰值和底部出流延迟时间均要大。这是由于随着降雨强度的增加, 设施表面积水深度升高的速度随之加快。而根据达西定律, 水力坡度与水流的下渗速率呈正比关系, 这必将造成湿润锋下移的速度加快, 穿过底部的时间变短, 底部出流开始时间也越早, 底部出流量也越大。

由不同掺沙比例下生物滞留池水文参数特征(表1)可知, 不对红壤填料进行处理时, 生物滞留池可处理1年一遇84.48%的地表径流, 5年一遇58.79%的地表径流。当掺入20%的河沙时, 可处理100%的1年一遇地表径流和86.47%的5年一遇地表径流。当河沙掺入达50%时, 无论时1年一遇还是5年一遇暴雨下, 地表径流处理率均达100%。同时, 掺沙后将显著减少积水深度和积水时间, 当河沙掺入达80%时, 1年一遇和5年一遇暴雨下的积水时间均为0。而积水时间减少可有效减少设施的表面积^[17]。结合不同掺沙比例下生物滞留池底部出流过程(图3)可知, 随着掺沙比例的增加, 生物滞留池的出流延迟时间减小, 而洪峰削减率呈下降趋势, 但差异不明显。径流处理率则呈现变大的趋势。

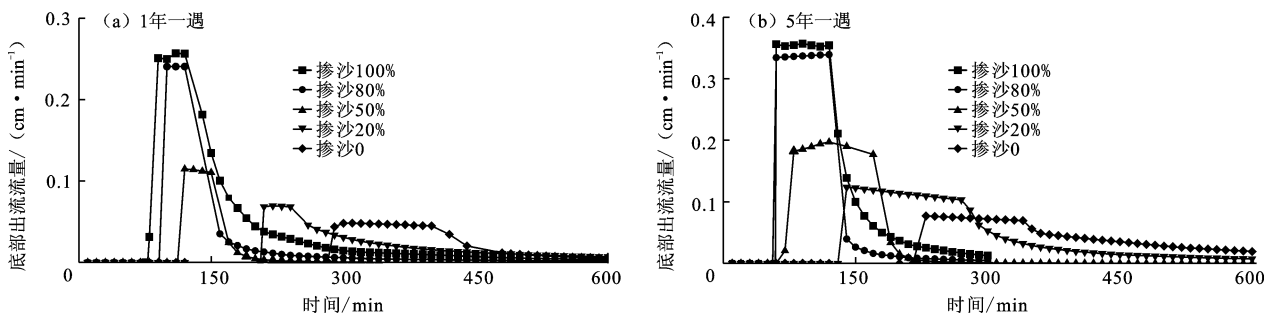


图3 不同掺沙比例下生物滞留池底部出流过程

表1 不同掺沙比例下生物滞留池水文参数特征

掺沙比例/ %	地表溢流量/mL		径流处理率/%		洪峰削减率/%		积水时间/min	
	1年一遇	5年一遇	1年一遇	5年一遇	1年一遇	5年一遇	1年一遇	5年一遇
100	0.00	0	100.00	100.00	0	0	0	0
80	0.00	0	100.00	100.00	0	4.12	0	0
50	0.00	0	100.00	100.00	52.27	44.29	56	85
20	0.00	4060.19	100.00	86.47	71.04	65.06	197	259
0	3165.52	12362.25	84.48	58.79	79.95	78.24	369	358

3.2 沙土比对生物滞留池的去污效果影响

由上述分析可知,不同掺沙比例的生物滞留设施的底部出流滞后时间不一样,为比较不同处理间径流污染物去除效果,研究以底部出流时刻为起点,分析底部出流的污染物浓度变化过程。由不同出流污染物浓度变化过程曲线(图4)可知,随着生物滞留池填料中掺沙比例的增加,底部出流中的硝态氮浓度逐渐降低,但掺沙比例大于80%时差异不明显。初始底部出水硝态氮浓度高于进水浓度,但后期随时间增加其浓度逐渐下降,且在填料掺沙80%以上时

可低于进水浓度。对比进水浓度,生物滞留池可有效降低底部出流中的氨氮和总磷浓度,但掺沙比例对其浓度变化的影响无明显规律。在同一时刻,随着填料掺沙比例的增加,生物滞留池底部出流COD浓度逐渐增加。初始时生物滞留池对COD具有较好的去除率,且去除率随着掺沙比例的增加而增加。但随着时间的增加,各掺沙比例底部出水污染物浓度均呈先增加后趋于稳定的趋势。尤其是在高水力负荷和高掺沙比例时,后期出水污染物浓度反而高于进水浓度。

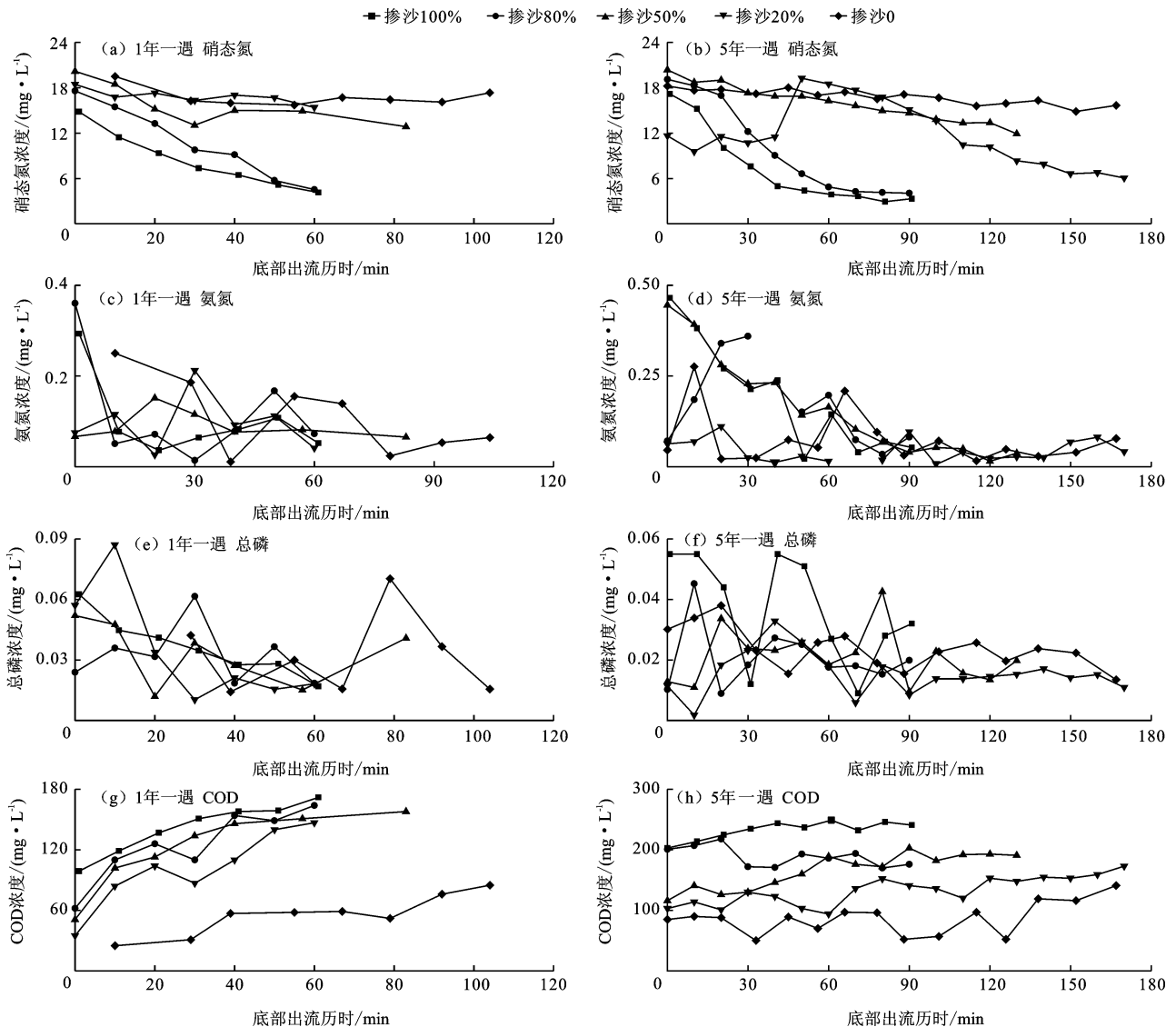


图4 不同掺沙比例下底部出流各污染物浓度变化过程

4 讨论

短期条件下,进水中污染物的去除主要是靠填料的物理过滤和吸附作用。生物滞留池对氨氮和总磷均具有很好的去除效果,去除率均在80%以上,

与已有研究基本相同^[18]。填料本身带有负电荷,对带有正电荷的氨氮具有很好的吸附效果。红壤中水合铁、铝氧化物比表面积大,对磷酸根具有很高的亲和力,且常以胶膜形式包被于其他矿物表面,对磷酸盐具有很强的吸附作用^[19]。初期硝氮不但没有得

以去除,反而出现了出水浓度高于进水的现象。氮素析出现象,尤其是硝态氮的析出已被大量实验室研究和工程性研究所证实^[20-21]。这可能是由于填料中硝氮含量较高且不易被多孔介质吸附,在径流的淋溶作用下极易排出。但随着运行时间的延长,生物滞留池对硝氮的去除率逐渐增大,最终高掺沙比例下硝氮去除率可达40%以上。试验过程中,初始时生物滞留池对COD具有很好的去除效果,在低水力负荷和低掺沙量下去除率可达80%。但在随后的进水过程中出现COD严重淋出现象。因此,应用河沙于实际生物滞留措施时,应当将河沙彻底清洗干净,防止河沙本身带有的氮和有机物进入滞留设施跟随雨水流出,造成出水氮和COD浓度升高。

填料种类和级配是影响生物滞留池脱氮除磷效果的关键因素。由于红壤黏粒含量高,其土壤饱和导水率很低,无法满足生物滞留池填料渗透性要求。填料掺沙后,其土壤导水率呈幂函数关系增长,导水性得到极大改善。当填料中掺入80%以上的河沙时,生物滞留池可全部处理试验区5年一遇暴雨强度的地表径流。渗透性提高的同时,硝氮的去除率也得到显著的提高。该比例下径流中硝氮的稳定去除率可达40%左右,与掺沙100%处理相差不大。但对于COD的去除率却随着掺沙量的增加而下降。掺沙量对氨氮和总磷的去除率影响不大。因此,对于以去除污染物为目的的生物滞留池填料是否掺沙以及掺沙量的多少需要根据污染物去除目标而定。

需要特别指出的是,本次试验时间很短,不具备反硝化反应发生的条件,污染物去除主要是通过填料的物理过滤和吸附作用,生物作用以及污染物之间的转化可忽略。但长持续时间条件下有机氮会向硝氮发生转化^[22]。因此,试验得出的结果对于长期运行的生物滞留池是否确切仍需要再深入的观测和分析。对于南方红壤区雨季降雨频繁且量大、生物滞留系统径流水力停留时间较短的条件下,本研究的结果仍具有参考价值。

5 结 论

(1) 填料导水性随着掺沙比例的增加呈幂函数增加,从而使得洪峰调节能力下降,而地表径流处理率可得到极大的提高。

(2) 生物滞留池对硝氮的去除率随着掺沙比例的增加而增加,但对COD的去除率则随着掺沙量的增加而下降,对氨氮和总磷的去除率影响不大。

(3) 综合考虑生物滞留池的水文调节和污染去

除效果,20%红壤土与80%河沙混合是填料较为科学的沙土配比。

参考文献:

- [1] 徐宗学. 北京市城市化对暴雨洪水过程的影响及其数值模拟[J]. 中国防汛抗旱, 2018, 28(2): 4.
- [2] 付国楷, 陈水平, 陆 颂, 等. 滇池流域某分流制小区雨水径流水质及初期冲刷规律研究[J]. 环境工程学报, 2015, 9(12): 5703-5708.
- [3] 廖义善, 卓慕宁, 李定强, 等. 珠江三角洲城市非点源COD影响因素分析及其负荷估算[J]. 环境科学, 2013, 34(8): 3019-3024.
- [4] VIRAHSAWAMY H K, STEWARDSON M J, GEOFF V, et al. Factors that affect the hydraulic performance of raingardens; implications for design and maintenance[J]. Water Science & Technology A Journal of the International Association on Water Pollution Research, 2014, 69(5): 982-988.
- [5] 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): 310-321.
- [6] 李立青, 刘雨情, 杨佳敏, 等. 生物滞留对城市地表径流磷的去除途径[J]. 环境科学, 2018, 39(7): 3150-3157.
- [7] 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.
- [8] 朋四海, 李 田, 黄俊杰. 合肥地区生物滞留设施的合理构型和设计参数[J]. 中国给水排水, 2014, 30(17): 145-149.
- [9] O NEILL S W, DAVIS A P. Water treatment residual as a bioretention amendment for phosphorus. I: Evaluation studies[J]. Journal of Environmental Engineering, 2012, 138(3): 318-327.
- [10] DEBUSK K M, WYNN T M. Storm-water bioretention for runoff quality and quantity mitigation[J]. Journal of Environmental Engineering, 2011, 137(9): 800-808.
- [11] OLSZEWSKI J M, DAVIS A P. Comparing the hydrologic performance of a bioretention cell with predevelopment values[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2012, 139(2): 124-130.
- [12] HUNT W F, DAVIS A P, TRAVER R G. Meeting hydrologic and water quality goals through targeted bioretention design[J]. Journal of Environmental Engineering, 2011, 138(6): 698-707.
- [13] 朋四海, 黄俊杰, 李 田. 过滤型生物滞留池径流污染控制效果研究[J]. 给水排水, 2014, 40(6): 38-42.

(下转第80页)

- tion by - products in filter backwash water; implications to water quality in recycle designs [J]. *Water Research*, 2010, 44(15): 4581 - 4589.
- [13] LIU Z, XU Y, YANG X, et al. Does the recycling of waste streams from drinking water treatment plants worsen the quality of finished water? A case assessment in China [J]. *Water Science and Technology: Water Supply*, 2017, 17(2): 597 - 605.
- [14] EBRAHIMI A, AMIN M M, POURZAMANI H, et al. Hybrid coagulation - UF processes for spent filter backwash water treatment; a comparison studies for PAFCl and FeCl₃ as a pre-treatment [J]. *Environ Monit Assess*, 2017, 189: 387.
- [15] CHEN Ting, XU Yongpeng, LIU Zguquan, et al. Evaluation of drinking water treatment combined filter backwash water recycling technology based on comet and micronucleus assay [J]. *Journal of Environmental Sciences (China)*, 2015, 42: 61 - 70.
- [16] ZHOU Zhiwei, YANG Yanling, LI Xing, et al. An insight into dissolved organic matter removal characteristics of recycling filter backwash water: A comparative study [J]. *Separation Science and Technology*, 2014, 49(18): 2981 - 2989.
- [17] KOOLJ D V D, HIJNEN W A M. Substrate utilization by an oxalate - consuming spirillum species in relation to its growth in ozonated water [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 1984, 47(3): 551 - 559.
- [18] 华伟, 张雪, 张骏鹏, 等. 净水厂常规与深度处理工艺对饮用水生物稳定性控制研究 [J]. *给水排水*, 2016, 52(1): 7 - 12.
- [19] LOU Jiechung, LIN Chungyi, HAN Jiayun, et al. Comparing removal of trace organic compounds and assimilable organic carbon (AOC) at advanced and traditional water treatment plants [J]. *Environ Monit Assess*, 2012, 184(6): 3491 - 3501.
- [20] SHARP E L, PARSONS S A, JEFFERSON B. Seasonal variations in natural organic matter and its impact on coagulation in water treatment [J]. *Sci Total Environ*, 2006, 363(1-3): 183 - 194.
- [21] HUANG C, LIN J L, LEE W S, et al. Effect of coagulation mechanism on membrane permeability in coagulation - assisted microfiltration for spent filter backwash water recycling [J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2011, 378(1-3): 72 - 78.
- [22] 苏振铎, 徐志嫻, 许光远, 等. 基于藻类连续生长的生物慢滤池深度净化污水的研究 [J]. *水资源与水工程学报*, 2015, 26(3): 96 - 99.
- [23] 陈翔宇, 姚娟娟, 王庆涛, 等. 基于 CFD 技术的臭氧给水处理工艺研究进展 [J]. *水资源与水工程学报*, 2018, 29(2): 110 - 115.
- [24] GREENSTEIN K E, LEW J, DICKENSON E, et al. Investigation of biotransformation, sorption, and desorption of multiple chemical contaminants in pilot - scale drinking water biofilters [J]. *Chemosphere*, 2018, 200: 248 - 256.
- [25] TERRY L G, SUMMERS R S. Biodegradable organic matter and rapid-rate biofilter performance: A review [J]. *Water Research*, 2011, 45: 234 - 245.

(上接第 72 页)

- [14] 高晓丽, 张书函, 肖娟, 等. 雨水生物滞留设施中填料的研究进展 [J]. *中国给水排水*, 2015, 31(20): 17 - 21.
- [15] 曹英兰, 刘延锋, 徐颖. 红壤对三氮吸附 - 解吸性能实验研究 [J]. *集美大学学报(自然科学版)*, 2009, 14(3): 245 - 250.
- [16] 贺娜, 蓝增全, 吴永红, 等. 滇池北岸城郊红壤对磷的吸附特征 [J]. *西南林学院学报*, 2009, 29(3): 15 - 18.
- [17] 梁小光, 魏忠庆, 上官海东, 等. 海绵城市建设中生物滞留设施排空时间研究 [J]. *给水排水*, 2018, 44(11): 26 - 30.
- [18] HUNT W F, SMITH J T, JADLOCKI S J, et al. Pollutant removal and peak flow mitigation by a bioretention cell in urban Charlotte, NC [J]. *Journal of Environmental Engineering*, 2008, 134(5): 403 - 408.
- [19] 宋春丽, 樊剑波, 何园球, 等. 不同母质发育的红壤性水稻土磷素吸附特性及其影响因素的研究 [J]. *土壤学报*, 2012, 49(3): 607 - 611.
- [20] BROWN R A, HUNT W F. Improving bioretention/biofiltration performance with restorative maintenance [J]. *Water Science & Technology A Journal of the International Association on Water Pollution Research*, 2012, 65(2): 361.
- [21] 王书敏, 何强, 徐强, 等. 生物滞留系统去除地表径流中的氮素研究评述 [J]. *水科学进展*, 2015, 26(1): 140 - 150.
- [22] BROWN R A, BIRGAND F, HUNT W F. Analysis of consecutive events for nutrient and sediment treatment in field - monitored bioretention cells [J]. *Water Air & Soil Pollution*, 2013, 224(6): 1 - 14.