



王国庆,王洪.下凹式绿地对降雨径流及其污染物削减作用[J].黑龙江农业科学,2019(8):101-106.

下凹式绿地对降雨径流及其污染物削减作用

王国庆^{1,2},王 洪^{1,2}

(1. 沈阳大学 环境学院,辽宁 沈阳 110044;2. 沈阳大学 区域污染环境生态修复教育部重点实验室,辽宁 沈阳 110044)

摘要:针对日益严重的城市内涝及降雨径流污染问题,搭建下凹式绿地装置,人工配水模拟地表降雨径流及污染物,通过改变基质种类和结构、不同植被考察下凹式绿地对降雨径流污染物去除效果及对降雨径流的削减效果。结果表明:无植被覆盖情况下,沸石、草炭土分层填装和混合填装处理装置中,4#沸石+土壤混合填装的装置对 COD、NH₃-N 和 TP 的去除效果最好,分别达到 55.61%,99.55%和 89.00%;2#沸石+土壤分层装置对径流削减能力最强;种植植被狗牙根和高羊茅后装置对污染物的去除率和径流削减能力明显提升,其中种植高羊茅的装置去除效果较优,对 COD、NH₃-N 和 TP 的去除率分别达到 66.78%,89.98%和 96.92%,径流削减率最高,达到了 46.00%。

关键词:下凹式绿地;污染物削减;径流削减;基质

水是人类赖以生存的重要资源,据国家统计局调查数据显示:目前我国的人口数量为 13 亿,人均占有的水资源量仅为加拿大的 3%,美国的 20%,居全球第 88 位,属于世界缺水国家的范畴(世界缺水国家共有 13 个)^[1]。随着城市化进程的加快,城市下垫面的条件不断发生变化,硬化化地表面积逐年增加,区域雨水截留、下渗、蒸发等水文要素及产流过程发生明显变化,以及过去

的城市管网设计易造成逢雨必涝,旱涝急转现象,难以应对大流量的雨洪^[2-4]。同时地面径流携带的氮、磷营养物质和重金属等会进入受纳水体引起水环境恶化^[5-6]。由此可见,雨水的资源化管理和利用对当今社会有着至关重要的意义,各种雨水管理理念和技术随之被提出,如美国的最佳管理措施和低影响开发技术,日本的水循环系统,澳大利亚的水敏感城市设计,英国的可持续城市排水系统等,根据各国经验及国情,我国提出海绵城市这一理念,随着海绵城市、低影响开发的大力提倡,下凹式绿地这一低影响开发工程措施被提出^[7-8]。

收稿日期:2019-03-18

基金项目:沈阳市科学计划项目(F16-157-9-00);国家水体污染控制与治理科技重大专项(2013ZX07202-007)。

第一作者简介:王国庆(1993-),男,在读硕士,从事污水生态处理与回用技术研究。E-mail:sishen542315902@163.com。

Application of Groundcover Plants in Tiande Lake Park of Taizhou City

LI Xia¹, CHEN Xia², LU Chao¹

(1. College of Landscape and Horticulture, Jiangsu Vocational College of Agriculture and Animal Husbandry Science and Technology, Taizhou 225300, China; 2. Nanjing Jinyong Landscape Construction Limited Company, Nanjing 211100, China)

Abstract: In order to further strengthen the greening construction of Taizhou City, this paper conducted on-site investigation on the species and application status of ground cover plants in Tiandehu Park, Taizhou, analyzed the application frequency of ground cover plants and the allocation mode with other garden elements, pointed out the advantages and disadvantages of ground cover plants in Tiandehu Park, and put forward appropriate improvement measures.

Keywords: ground cover plants; Tiande Lake Park; application

下凹式绿地由传统排水管网快排直排模式,转变为以渗为主,渗蓄排相结合的系统。大量研究表明^[9-11],绿地是一个很好的渗流系统,对降雨径流有很好的处理效果。良好渗透性的土壤和植被对初期雨水中的污染物有明显的净化效果,径流通过绿地系统下渗后水质得到改善,然后汇入地下水参与水循环,这样雨水下渗就减轻了城市排水管网的输水压力^[12]。在过去的城市绿地规划与建设过程中,景观效果和休闲价值是侧重点,但其在城市水分循环和城市面源污染控制中的重要作用也不可忽视。

因此,本文以解决城市发展与城市内涝、径流污染之间的矛盾为背景,考察了几种自制装置对污染物去除及降雨径流削减能力,以期为开展城市绿地削减雨水径流及其污染物的效应研究提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料

试验中采用的土壤基质取自沈阳大学树林中的空地,沸石、草炭土、狗牙根和高羊茅种子均从市场购买;蠕动泵型号为 Pre Fluid BT 100-YZ15,葡萄糖(C₆H₁₂O₆)、磷酸二氢钾(KH₂PO₄)、氯化铵(NH₄Cl)等均为天津市科密欧化学试剂有限公司生产的分析纯药品。

1.2 方法

1.2.1 试验装置设计 下凹式绿地模拟装置由两部分组成,其一为两个蠕动泵,主要作用为模拟直接降雨与地表径流;其二如图 1 所示,为高 500 mm,上直径 540 mm,下直径 420 mm 的聚丙烯塑料桶,中心放置一根高 450 mm,半径 15 mm PPL 管模拟雨水井,在距离塑料桶底部 250 mm 高度处横插入半径 15 mm PPL 管作溢流管,溢流管以下的雨水管管壁开孔,开孔率为 10%模拟雨水渗透。在距装置底部 20 mm 处的边缘开半径 10 mm 的圆孔,安装控制阀作出水口。装置底部铺设 30 mm 高卵石,盖上透水土工布,土工布上方铺设 400 mm 基质,由装置上方蠕动泵连接软管布水。

1.2.2 试验设计 填装 5 组不同基质组合的下凹式绿地裸地模拟装置,1#:土壤+土壤、2#:土

壤+沸石(分层 V:V=1:1)、3#:土壤+草炭土(分层 V:V=1:1)、4#:土壤+沸石(V:V=1:1混合)、5#:土壤+草炭土(V:V=1:1混合),15 mm·h⁻¹根据近年来降雨量统计,设定降雨强度 30,降雨时间 2 h,绿地服务面积 1:3,使用两个蠕动泵分别以 16 和 48 r·min⁻¹的速率将配置好的模拟雨水(25 L)打入装置中模拟降雨和降雨径流,模拟雨水为试验室人工配制,详见表 1。装置运行至溢流管溢水开始,从溢流管收集雨水,时间间隔为前 30 min 每 5 min 取一次样,30~60 min 每 10 min 取一次样,进水结束后打开出水口阀门将水排空,记录溢流管产流时间和溢流量,并检测水样中各污染物浓度。

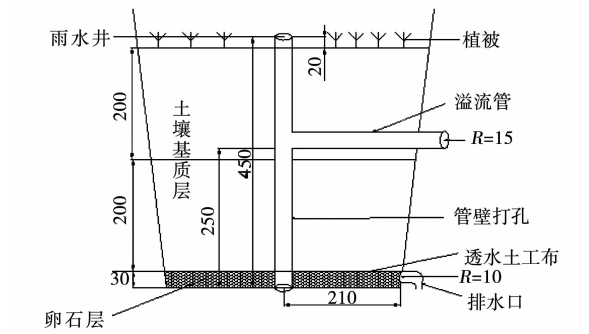


图 1 试验装置示意图
Fig. 1 Schematic diagram of experimental equipment

表 1 模拟雨水配制所需药品

Table 1 Drug for simulated rain			
指标 Index	COD	NH ₃ -N	TP
药品 Drug	葡萄糖	氯化铵	磷酸二氢钾
用量 Dosage/g	2.1480	0.2864	0.1098

根据测得试验数据筛选出综合效果最好的一组装置,重新填装基质,分别栽种狗牙根和高羊茅,与相同基质的裸地装置作为对照。按照上步试验方法进行试验,研究下凹式绿地对污染物去除率、径流削减率的影响。

1.2.3 数据分析 根据测定的试验数据利用 WPS 2019 计算各组装置的 COD、NH₃-N、TP 去除率,使用 Origin 9.0 绘制各污染物去除率变化曲线。

污染物去除率公式为:

$$\alpha(\%) = \frac{C_0 - C_1}{C_0} \times 100 \tag{1}$$

式中: Z 为某时段内下凹式绿地对污染物的去除效率; C_0 为径流中污染物的初始浓度, $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$; C_1 为收集的溢流中污染物的浓度, $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

2 结果与分析

2.1 不同基质的下凹式裸地装置对污染物的影响

2.1.1 COD 去除率 由图 2 可知,1#裸地装置对 COD 的去除率在 21.18%~63.56%,平均去除率为 45.55%,2#和 4#两组装置对 COD 平均去除率分别为 52.56%和 55.61%,且两者的去除率变化趋势在前 40 min 内都相对平稳,在 40 min 后 2#装置与 1#装置变化趋势大致相同,这是由于填充方式不同,导致基质下部的沸石达到饱和状态,基质上部的土壤暂时单独对 COD 进行去除。3#和 5#装置在起始阶段对 COD 的去除能力与 1#相似,去除率在 32.00%左右,15 min 后对 COD 的去除率开始大幅度的下滑,30 min 后去除率出现负值,这是由于草炭土这种基质本身含有一些有机物,有机质含量高使 COD 含量增加^[13-14],经由径流冲刷发生一系列反应致使 COD 浓度高于径流雨水的浓度。

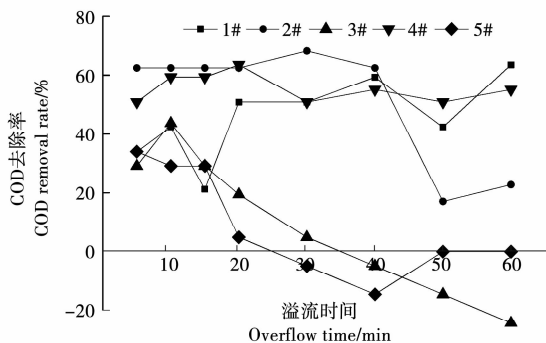


图 2 不同物料对 COD 去除率的影响

Fig. 2 Effects of the removal rate of COD in different matrices

2.1.2 $\text{NH}_3\text{-N}$ 去除率 由图 3 可知,1#装置对 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的去除率在 0~40 min 内保持较高且稳定的状态,去除效率最高达 82.84%,40 min 后出现下滑趋势;2#和 4#装置在 0~40 min 对 $\text{NH}_3\text{-N}$ 去除率保持一定上升趋势,40 min 后趋于稳定,期间去除率最高可达 99.55%。由于沸

石对 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的吸附主要是靠阳离子的交换,属于离子交换吸附,具有快速吸附、缓慢平衡的特点,初期沸石表面的吸附位为空,水中 NH_4^+ 会迅速占据沸石上的吸附位置,使沸石对 NH_4^+ 的吸附量呈现先下降后上升的趋势,随后当沸石吸附位被充满,并且 NH_4^+ 与沸石晶格上阳离子的交换也逐渐达平衡值,沸石对 NH_4^+ 的吸附量趋于平衡^[15-16]。2#和 4#相比前期去除率偏低,可能是经过水流冲刷上部的土壤进入沸石层使沸石层悬浮物增多阻碍沸石的离子交换。前期 3#相较于 1#对 $\text{NH}_3\text{-N}$ 去除率稍好且总体呈下滑趋势,分析是由于 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度较低,装置对其吸附效果不明显。前期 5#较 1#相比去除率稍低,可能由于混合填充打乱了原本土壤结构致使效果偏低。

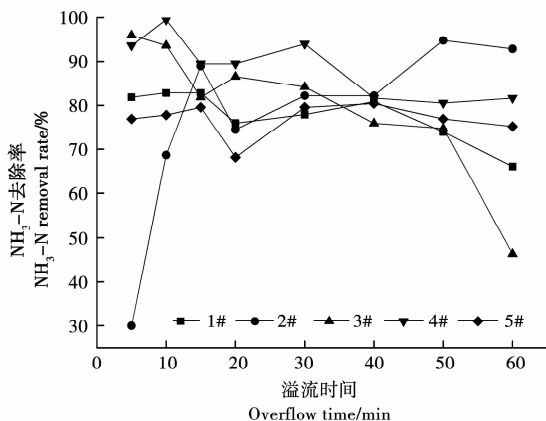


图 3 不同物料对 $\text{NH}_3\text{-N}$ 去除率的影响

Fig. 3 Effects of the removal rate of $\text{NH}_3\text{-N}$ in different matrices

2.1.3 TP 去除率 由图 4 可知,1#装置对 TP 的去除率相对稳定,平均去除率为 49.13%,随着时间的增加,去除效率有缓慢变低趋势,这是由于土壤对磷的去除主要是沉淀吸附作用,土壤胶体将水中的磷吸附后与阳离子结合生成不溶性的化合物沉积在土壤表面^[17],所以去除能力有限,其余 4 组装置对 TP 的去除能力有明显提高,且 4#装置去除率高达 89.00%。因为水中含有 $\text{NH}_3\text{-N}$,沸石对 $\text{NH}_3\text{-N}$ 有吸附效果,水中的 $\text{NH}_3\text{-N}$ 被沸石吸附后,沸石中的 Ca^{2+} 会被交换出来,磷酸盐会与 Ca^{2+} 形成沉淀^[18-19]。4#装置是两者同时起作用,而分层基质沸石层孔隙率大

于混合填装,吸附的磷可能被冲刷掉导致去除率偏低。草炭土中含有腐殖酸,由于腐殖酸对磷有吸附交换作用,但同时也会抑制土壤对磷的固定作用^[20],故而3#对磷的去除率高于5#。所以土壤+沸石和土壤+草炭土的装置对TP的去除率高于纯土壤的装置,在装置运行期间由于吸附饱和的原因导致去除率出现波动。

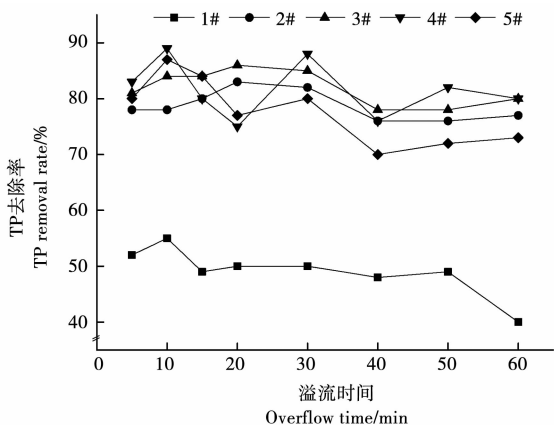


图4 不同物料对TP去除率的影响

Fig. 4 Effects of the removal rate of TP in different matrices

综上所述,下凹式绿地基质类型和基质填充结构对其削减污染物方面存在很大影响,同种基质不同的填装方式对污染物的去除也存在一定差异。

2.2 不同植被类型的下凹式绿地对污染物的影响

2.2.1 COD去除率 由图5可知,在种植植被后的模拟装置对COD的去除率较4#裸地装置有明显提高。4#种植高羊茅的装置对COD的平均去除率为62.16%,最高去除率为66.78%,种植狗牙根的装置4#(3)对COD的平均去除率为55.53%,最高去除率为60.13%,二者对COD的去除效果稳定且随时间的增加去除效率略有提升,可知植物对COD有明显去除效果,不同植物之间效果也有不同。

2.2.2 NH₃-N去除率 由图6可知,4#裸地装置对NH₃-N的去除有较好的效果,但随时间的增长,装置的吸附能力饱和,去除效果逐渐变差,去除率由最高的99.58%降至80.54%,平均去除率为88.74%,种植植物后去除能力有一定提升,且在30 min后4#裸果装置出现明显的下滑趋

势,而4#高半茅装置的去除效果依然保持上升趋势,且去除率高达89.98%优于4#狗牙根装置。

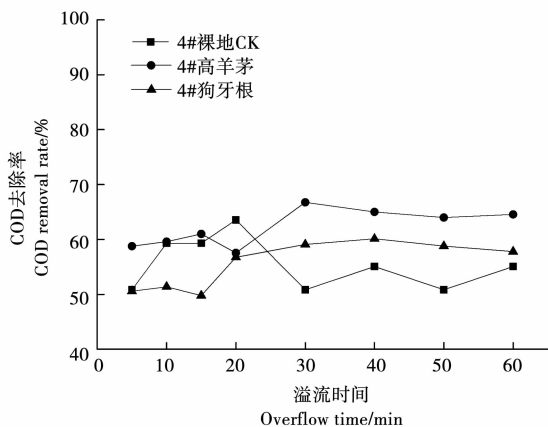


图5 不同植被类型对COD去除率的影响

Fig. 5 Effects of the removal rate of COD with different vegetation types

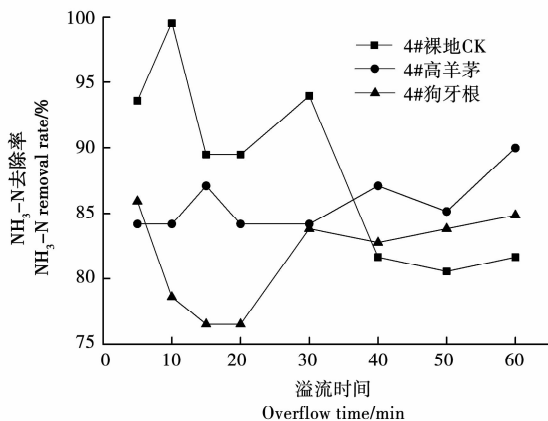


图6 不同植被类型对NH₃-N的去除率的影响

Fig. 6 Effects of the removal rate of NH₃-N with different vegetation types

2.2.3 TP去除率 由图7可知,土壤对TP的吸附效果能力有限,种植植物后,装置对TP的去除能力大幅度提升,4#高羊茅的去除率为96.92%,比4#裸地高20.92%,且4#狗牙根的去除率为94.96%,4#高羊茅和4#狗牙根去除率的大致趋势几近相同,表明不同植被的装置对TP去除能力相差不大,植物对TP的吸附能力也有一定限度,不同植物的吸附能力差距不明显。

综上所述,种植植被后的绿地系统对污染物的去除效率相比裸地有明显的提高,且高羊茅对污染物的去除能力高于狗牙根。由此可知,不同

的植被对下凹式绿地去除污染物的能力存在不同影响效果。

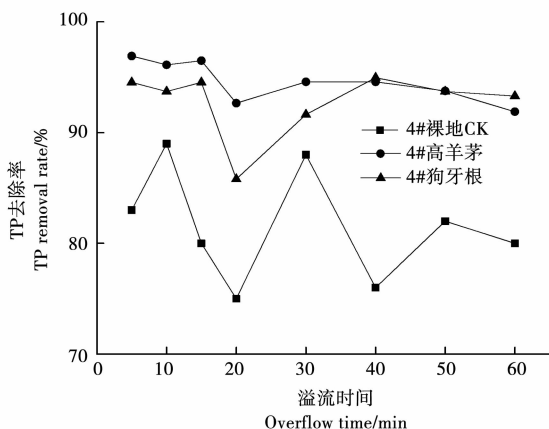


图7 不同植被类型对TP的去除率的影响

Fig. 7 Effects of the removal rate of TP with different vegetation types

2.3 不同基质的下凹式裸地装置对降雨径流的影响

由图8可知,在降雨条件相同的情况下,相比于纯土壤的裸地装置,改变基质后的4组裸地装置对降雨径流的削减能力有明显的提高,同时也推迟了产生溢流的时间。其中添加沸石的2#和4#两组裸地装置表现要好于其他3组装置,径流削减率分别为83.01%和80.00%,溢流产生时间也由110 min推迟到160和153 min,可以有效缓解洪峰频出的情况。

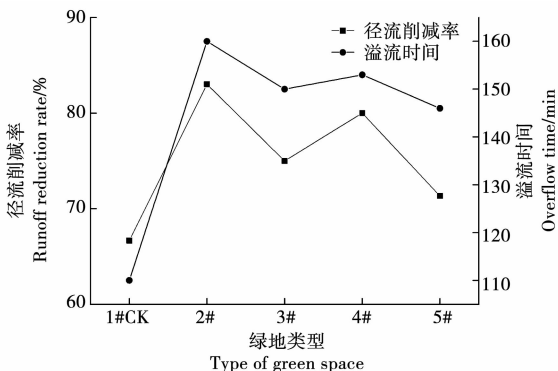


图8 不同物料对径流的削减率变化和产生溢流时间的影响

Fig. 8 Effects of the runoff reduction rate and overflow time of different matrices

2.4 不同植被的下凹式绿地对降雨径流的影响

综合装置对污染物的去除和径流量的削减,选取4#装置作进一步研究。由图9可知,相同基质的下凹式绿地装置在种植植被后对降雨径流

的削减率有不同程度的提高,削减率由高到低为4#高羊茅>4#狗牙根>4#裸地,最高达到46.96%,产生溢流的时间由晚到早为4#高羊茅>4#狗牙根>4#裸地,由此可见种植植被的类型影响着下凹式绿地对降雨径流的削减效率。

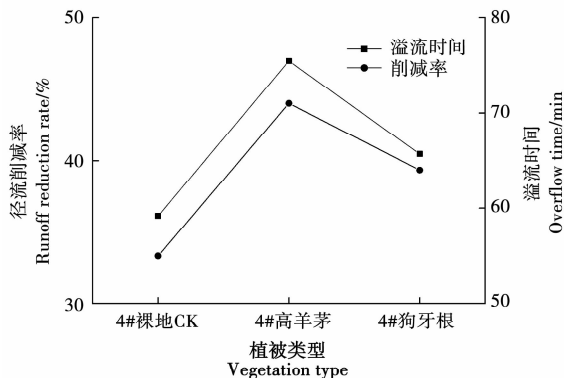


图9 不同植被类型对径流的削减率变化和产生溢流时间的影响

Fig. 9 Effects of the runoff reduction rate and overflow time with different vegetation types

3 结论与讨论

通过改变下凹式绿地土壤基质的结构、组成和种植植被可以有效提升对降雨径流污染物的去除率和对径流的削减率,Hunt等^[23]发现绿地系统能通过蒸腾蒸发作用和土壤渗透作用减少大量的径流体积,Donald等^[24]研究表明提高孔隙率可以提高雨水滞留能力,二者的研究结果与本研究结果一致。基质对径流污染物去除和径流阻控起着重要的作用。沸石、草炭土等人工基质可以通过吸附作用吸收污染物,与对照相比,可有效提高污染物的去除效果,土壤+沸石混合填装的装置对径流阻控率达到80.00%以上;种植植物可以进一步阻控污染物及降雨径流,其中种植高羊茅的装置的径流削减率最高,达到46.96%。模拟试验表明,下凹式绿地对城市降雨径流及污染物的去除有着重要作用,作为一种低影响开发技术措施,下凹式绿地在城市街道、小区等区域建设和改造更易实施,在海绵城市建设中必将发挥重要作用。

参考文献:

- [1] 易艳. 论生态文明视野下的水资源保护及利用[J]. 理论月刊, 2017(2): 76-81.
- [2] 刘文, 陈卫平, 彭驰. 城市雨洪管理低影响开发技术研究与利用进展[J]. 应用生态学报, 2015, 26(6): 1901-1912.

- [3] 张金龙,张志政. 下凹式绿地蓄渗能力及其影响因素分析[J]. 节水灌溉, 2012(1):44-47.
- [4] 张超,丁志斌. 基于暴雨洪水管理模型的下凹绿地和透水路面模拟研究[J]. 水资源与水工程学报, 2014, 25(5): 185-189.
- [5] 张晓菊,董文艺. 下凹式绿地径流污染控制与径流量消减影响因素分析[J]. 环境科学与技术, 2017, 40(2):113-117.
- [6] 王闪,张立秋. 下凹式绿地对模拟道路径流中磷削减效果研究[J]. 环境科学与技术, 2015, 38(9):119-122.
- [7] 仇保兴. 海绵城市(LID)的内涵、途径与展望[J]. 给水排水, 2015, 51(3):1-7.
- [8] 王红武,毛云峰,高原等. 低影响开发(LID)的工程措施及其效果[J]. 环境科学与技术, 2012, 35(10):99-103.
- [9] 张彪,谢高地,薛康等. 北京城市绿地调蓄雨水径流功能及其价值评估[J]. 生态学报, 2011, 31(13):3839-3845.
- [10] Zhang B, Xie G D, Zhang C Q, et al. The economic benefits of rainwater-runoff reduction by urban green spaces: A case study in Beijing, China[J]. Journal of Environmental Management, 2012, 100:65-71.
- [11] 程江,杨凯,黄民生,等. 下凹式绿地对城市降雨径流污染的削减效应[J]. 中国环境科学, 2009, 29(6):611-616.
- [12] Ahiablame LM, Engel BA, Chaubey I. Effectiveness of low impact development practices: Literature review and suggestions for future research[J]. Water, Air, and Soil Pollution, 2012, 223: 4253-4273.
- [13] 王忠强,刘婷婷,王升忠,等. 泥炭在环境修复中的应用研究概况和展望[J]. 科技通报, 2007(2):277-281.
- [14] 张思远,王飞. 改性泥炭与沸石用于污染水体的脱氮除磷试验研究[J]. 环境科学与管理, 2014, 39(11):105-108.
- [15] 安莹,王志伟,张一帆,等. 天然沸石吸附 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的影响因素[J]. 环境工程学报, 2013, 7(10):3927-3932.
- [16] Zhang M L, Zhang H Y, Xu D, et al. Removal of ammonium from aqueous solutions using zeolitesynthe-sized from fly ash by a fusion method[J]. Desalination, 2011, 271(1-3):111-121.
- [17] 王鹏飞. 城市面源污染岸堤漫流阻控技术研究[D]. 沈阳: 沈阳大学, 2014.
- [18] 李建霜. 沸石对生活污水 $\text{NH}_3\text{-N}$ 处理的研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2014.
- [19] 孙艳丽,林建伟,黄宏,等. 天然沸石同步去除水中 $\text{NH}_3\text{-N}$ 和磷酸盐[J]. 环境工程学报, 2012, 6(8):2470-2476.
- [20] 乔洁,任秀艳. 草炭对设施土壤有机碳、氮及土壤微生物生物量的影响[J]. 西南农业学报, 2012, 25(5):1777-1780.
- [21] 张成. 下凹式绿地对降雨径流及其污染物削减作用研究[D]. 苏州:苏州科技学院, 2015.
- [22] 游少鸿,佟小微,朱义年. 天然沸石对 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的吸附作用及其影响因素[J]. 水资源保护, 2010, 26(1):70-74.
- [23] Hunt W F, Jarrett A R, Smith J T. Optimizing bioretention design to improve denitrification in commercial site runoff[C]//American Society of Civil Engineers. World Water & Environmental Resources Congress, 2003: 1-10.
- [24] Donald D C, Laura H. An investigation of rain garden planting mixture performance and the implication for design[C]//Proceedings of the 2008 International Low Impact Development Conference: Low Impact Development for Urban Ecosystem and Habitat Protection. Washington: Seattle, 2008.

Reducing Effect of Rainfall Runoff and Pollutant for Concave Green Space

WANG Guo-qing^{1,2}, WANG Hong^{1,2}

(1. College of Environment, Shenyang University, Shenyang 110004, China; 2. Key Lab of Eco-restoration of Regional Contaminated Environment, MOE, Shenyang University, Shenyang 110044, China)

Abstract: In response to the growing problem of urban flooding and rainfall runoff pollution, construct a concave green space device, artificial water distribution was used to simulate surface rainfall runoff and pollutants. By changing the matrix type, structure and different vegetation to investigate the effect of the concave green space on the removal of rainfall runoff pollutants and the reduction of rainfall runoff. The results showed that soil mixed with the zeolite filling device without vegetation coverage had the best removal effect on COD, $\text{NH}_3\text{-N}$ and TP than soil mixed with peat filling device and soil with zeolite or peat layered filling device, the removal rate were 55.61%, 99.55% and 89.00%; The device with soil and zeolite stratification reflected the strongest ability in reducing runoff. The devices with planting Bermudagrass and Tall fescue has significantly improved on the removal rate of pollutants and the ability to reduce runoff, and the Tall fescue was better, of which the removal rates of COD, $\text{NH}_3\text{-N}$ and TP were 66.78%, 89.98% and 96.92%, and the runoff was reduced by 46.00%.

Keywords: concave green space; pollutant reduction; runoff reduction; matrix