

# 砾石人工湿地处理小区雨水径流的试验研究

高旺<sup>1</sup>, 康威<sup>1</sup>, 江强<sup>1</sup>, 姚欣翹<sup>2</sup>, 张昭雄<sup>2</sup>, 邵知宇<sup>1</sup>, 柴宏祥<sup>1</sup>

(1. 重庆大学 三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400045; 2. 深圳市越众<集团>股份有限公司, 广东 深圳 518040)

**摘要:** 利用天然地势坡度开发了一种用于处理绿色建筑小区雨水径流的砾石人工湿地系统,并在深圳市进行了中试研究。结果表明:当雨水径流的SS、TN、NH<sub>3</sub>-N、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N和TP浓度分别为26.38~432.33、1.23~5.33、0.54~1.36、0.28~3.52、0.06~0.46 mg/L时,砾石湿地系统对其净化效果较好,出水浓度分别为6.22~9.21、0.63~3.16、0.11~0.30、0.11~2.81、0.07~0.11 mg/L,各项指标都满足《城市污水再生利用 景观环境用水水质》(GB/T 18921—2002)的要求。当进水COD浓度为15.21~53.38 mg/L时,出水浓度为4.25~9.97 mg/L,满足《建筑与小区雨水利用工程技术规范》(GB 50400—2006)中观赏性水景用水水质的要求。但当雨水径流的COD和TP浓度较高,分别为112.50~187.35、0.93~1.57 mg/L时,系统出水浓度分别为60.53~75.95、0.61~0.95 mg/L,不能满足上述标准的要求,因此建议在砾石湿地系统前增加预处理设施,如植被浅沟缓冲带等。

**关键词:** 绿色建筑小区; 砾石人工湿地; 雨水径流

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** C **文章编号:** 1000-4602(2017)07-0153-04

## Treatment of Rainfall Runoff in Green Building Community by Gravel Constructed Wetland

GAO Wang<sup>1</sup>, KANG Wei<sup>1</sup>, JIANG Qiang<sup>1</sup>, YAO Xin-qiao<sup>2</sup>, ZHANG Zhao-xiong<sup>2</sup>, SHAO Zhi-yu<sup>1</sup>, CHAI Hong-xiang<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Three Gorges Reservoir Region's Eco-Environment <Ministry of Education>, Chongqing University, Chongqing 400045, China; 2. Shenzhen Yuezhong <Group> Co. Ltd., Shenzhen 518040, China)

**Abstract:** A gravel constructed wetland system was developed for the treatment of rainfall runoff in green building community with the natural slope gradient, and the pilot test was carried out in Shenzhen. Results showed that: when the influent SS, TN, NH<sub>3</sub>-N, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N and TP concentrations were 26.38~432.33 mg/L, 1.23~5.33 mg/L, 0.54~1.36 mg/L, 0.28~3.52 mg/L and 0.06~0.46 mg/L respectively, the system showed the better water quality purification effect as the effluent concentrations were 6.22~9.21 mg/L, 0.63~3.16 mg/L, 0.11~0.30 mg/L, 0.11~2.81 mg/L and 0.07~0.11 mg/L respectively, meeting the standard of *Reuse of Urban Recycling Water—Water Quality Standard for Scenic Environment Use* (GB/T 18921-2002). When the influent COD concentration was 15.21~

53.38 mg/L, the effluent concentration was 4.25 – 9.97 mg/L, meeting the standard of *Engineering Technical Code for Rain Utilization in Building and Sub-district* (GB 50400 – 2006). However, when the influent TP and COD were at higher concentrations of 112.50 – 187.35 mg/L and 0.93 – 1.57 mg/L, the effluent concentrations were 60.53 – 75.95 mg/L and 0.61 – 0.95 mg/L, which could not meet the water quality standard above. Therefore, it was advised that a pretreatment equipment was necessary to be added to the system such as the buffer zone of glassed swales.

**Key words:** green building community; gravel constructed wetland; rainfall runoff

随着城市化的发展,不透水面积增加,导致径流系数增大,径流量成倍增加,加重了排水管的负担,导致城市内涝现象频发。但同时城市也面临着水资源的短缺以及水生态系统的严重退化等问题。若能合理利用雨水回灌,既可涵养地下水源,防止地面沉降,还能防洪减灾,改善生态环境。低影响开发通过一系列多样化、小型化、本地化、经济合理的设施,再现场地开发前的洼地贮存、渗透、地下水补给、降雨径流的流量和容积控制等水文功能,减少开发后带来的降雨径流污染<sup>[1~3]</sup>。适于低影响开发的管理设施有:雨水花园、绿色屋顶、植被过滤或缓冲带、植被浅沟、渗透管渠、透水路面、蓄水池等<sup>[4,5]</sup>。人工湿地是一种常见的污水处理设施,主要利用物理、化学和生物的协同作用对污水进行处理。雨水虽然较污水清洁,但由于初期冲刷效应的存在,往往需要利用弃流装置处理初期雨水,存在能耗高、运行维护管理要求高等问题。针对上述问题,笔者开发了一种处理雨水径流的三级砾石人工湿地系统,通过改变湿地中雨水的处理路径,达到削减径流雨量、回补地下水、降低水体污染等目的。

## 1 砾石人工湿地系统的设计与原理

### 1.1 砾石人工湿地系统的设计

砾石人工湿地系统的构造如图1所示。

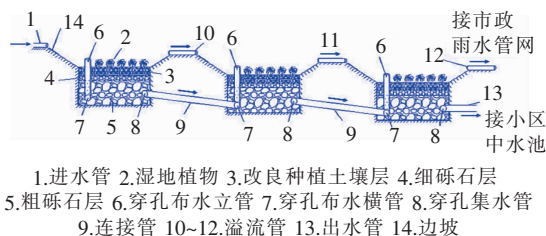


图1 砾石人工湿地系统示意

Fig.1 Schematic diagram of gravel constructed wetland

该系统沿斜坡面设有三级砾石湿地,每级砾石湿地从下至上依次为粗砾石层、细砾石层、改良种植土壤层和湿地植物。粗砾石层布置有穿孔集水管,

相邻两级洼地砾石的穿孔集水管由连接管连通,最后一级洼地砾石的穿孔集水管连通小区清水池。相邻两级洼地砾石湿地的边坡顶部装有溢流管,最后一级溢流管连接市政雨水管。每级洼地砾石湿地中还装有穿孔布水立管,穿孔布水立管的底部与穿孔布水横管连通。

### 1.2 砾石人工湿地系统的运行原理

不同下垫面产生的雨水径流通过进水管进入第一级洼地砾石湿地。当降雨强度较小时,雨水下渗速度大于洼地砾石湿地集水速度,洼地砾石湿地不溢流,雨水径流依次通过三级洼地砾石湿地的处理,即植物、填料层和微生物的共同作用,全部汇集至小区清水池回用,不会给市政雨水管网带来任何负荷。

当发生特大暴雨时,雨水下渗速度小于洼地砾石湿地集水速度,雨水径流漫过穿孔布水立管,一部分雨水直接进入穿孔布水立管,经穿孔布水横管布水后,直接经粗砾石层净化后进入下一级洼地砾石湿地;另一部分雨水依次经过改良种植土壤层、细砾石层、粗砾石层的处理,进入下一级洼地砾石湿地的粗砾石层继续进行净化,最后进入小区清水池;剩余雨水通过溢流管进入下一级洼地砾石湿地进行处理;最后一级洼地砾石湿地的溢流出水通过溢流管进入市政雨水管网。

## 2 中试研究

在深圳市育新学校修建了砾石人工湿地系统,用于收集处理屋面雨水径流。该砾石湿地系统面积为 14.5 m<sup>2</sup>,汇水面积为 145 m<sup>2</sup>,蓄水层为 100 mm,改良种植土壤层为 200 mm,细砾石层为 100 mm,粗砾石层为 600 mm,其中埋设直径为 100 mm 的穿孔集水管将渗透出水排入取样井。

2014 年下半年对该砾石湿地系统进行了连续监测,选取 5 场典型降雨事件,通过分析湿地系统的渗透出水水质,评估该系统对主要污染物的去除能力。系统各级渗透出水中的污染物 EMC 值如表 1

所示。

表 1 砾石人工湿地系统的运行效果

Tab. 1 Operation effect of gravel constructed wetland

$\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$

降雨时间	水样	TP	TN	氨氮	硝态氮	COD	SS
2014-08-19	进水	0.93	1.40	0.64	0.28	112.50	46.71
	一级渗透出水	0.77	0.62	0.40	0.07	71.07	11.21
	二级渗透出水	0.72	0.59	0.30	0.10	67.23	10.35
	三级渗透出水	0.61	0.63	0.30	0.11	60.53	9.21
2014-09-10	进水	0.36	5.33	1.36	3.52	53.38	43.52
	一级渗透出水	0.11	1.77	0.27	1.39	10.82	2.00
	二级渗透出水	0.06	2.90	0.13	2.38	11.23	3.00
	三级渗透出水	0.11	3.16	0.18	2.81	9.97	8.50
2014-09-15	进水	0.46	1.92	0.60	0.71	32.62	140.15
	一级渗透出水	0.13	1.21	0.13	0.61	15.13	13.00
	二级渗透出水	0.07	1.08	0.13	0.49	4.25	9.00
2014-11-08	进水	1.57	2.63	1.03	1.22	187.35	432.33
	一级渗透出水	1.21	1.86	0.56	1.13	89.53	15.37
	二级渗透出水	0.87	1.70	0.36	1.22	72.62	9.16
	三级渗透出水	0.95	1.52	0.21	1.19	75.95	6.22
2014-12-04	进水	0.06	1.23	0.54	0.35	15.21	26.38
	一级渗透出水	0.08	0.57	0.23	0.21	8.37	9.36
	二级渗透出水	0.11	0.63	0.19	0.25	5.41	9.67
	三级渗透出水	0.11	0.66	0.11	0.31	5.73	6.88

注: 由于9月15日降雨量较小,仅有一、二级渗透出水,未取得三级渗透出水的监测数据。

## 2.1 SS 的去除效果

针对不同强度下的 5 场天然降雨,在雨水径流 SS 浓度为 26.38 ~ 432.33  $\text{mg/L}$  的情况下,砾石湿地系统对 SS 的去除效果较好,出水 SS 浓度为 6.22 ~ 9.21  $\text{mg/L}$ ,去除率为 73.9% ~ 98.6%,出水 SS 指标可达到《城市污水再生利用 景观环境用水水质》(GB/T 18921—2002)中观赏性景观环境用水水质类的水质要求。砾石人工湿地对雨水径流中 SS 的去除率较高,不受雨前干燥期的长短以及干湿交替频率的影响;在降雨和干燥期间,出水 SS 浓度无明显差异。砾石人工湿地系统主要通过基质的物理过滤作用去除 SS。

## 2.2 COD 的去除效果

当进水 COD 浓度为 15.21 ~ 53.38  $\text{mg/L}$  时,砾石湿地系统出水 COD 为 4.25 ~ 9.97  $\text{mg/L}$ ,可以满足《建筑与小区雨水利用工程技术规范》(GB 50400—2006)中观赏性水景用水水质的要求。但当进水 COD 浓度为 112.50 和 187.35  $\text{mg/L}$  时,出水

COD 分别为 60.53 和 75.95  $\text{mg/L}$ ,无法满足 GB 50400—2006 的观赏性水景用水水质要求。分析认为,城市雨水径流以 COD 和 SS 污染为主,而且 COD 与 TSS 有较好的相关性<sup>[6,7]</sup>。通过对雨水径流的截污、沉淀和过滤,可有效控制污染物总量,进而达到去除 COD 的目的。COD 去除率也与前期干旱天数有关,例如在 2014 年 11 月 8 日降雨事件中,由于这场降雨前期干旱天数达到 51 d,虽然下垫面每天都有环卫工人打扫,但一些较难通过简单清扫去除的降尘物质积累在下垫面,导致径流雨水中 COD 的 EMC 值高达 187.35  $\text{mg/L}$ ,当进水污染物浓度过高时,会导致砾石湿地系统对其去除率不高。因此,在实际工程推广应用时可设置预处理设施,例如可将径流雨水通过一道植被浅沟缓冲带引入砾石湿地系统中,以减少进入其中的颗粒污染物,进而提高出水水质。

## 2.3 氮类污染物的去除效果

系统进水 TN 为 1.23 ~ 5.33  $\text{mg/L}$ ,出水 TN 为 0.63 ~ 3.16  $\text{mg/L}$ ,去除率为 40.7% ~ 55.0%;进水  $\text{NH}_3 - \text{N}$  为 0.54 ~ 1.36  $\text{mg/L}$ ,出水  $\text{NH}_3 - \text{N}$  为 0.11 ~ 0.30  $\text{mg/L}$ ,去除率在 53.1% ~ 86.8% 之间;进水  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  为 0.28 ~ 3.52  $\text{mg/L}$ ,出水浓度为 0.11 ~ 2.81  $\text{mg/L}$ ,去除率为 2.5% ~ 60.7%。系统出水 TN、 $\text{NH}_3 - \text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$  浓度均满足 GB/T 18921—2002 观赏性景观环境用水水质类的水质要求。系统对氨氮和总氮的去除率较高,对  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  的去除效果不稳定。分析认为:砾石湿地系统对氮类污染物的去除效果受降雨历时与雨前干燥期的长短、干湿交替频率的影响。溶解态氮的出水浓度经过干燥期后显著上升,受前期干旱时间的影响明显。因为较长的干旱时间(5 ~ 11 d)为设施氨化作用提供了充分的需氧环境,有机氮得以转化为氨氮,且干旱使得菌类细胞释放氨氮,在下一场降雨初期,累积的氨氮在需氧环境下经硝化作用转换为  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  排出<sup>[8]</sup>。由于微生物的硝化作用及填料的吸附作用,使得砾石湿地系统可以很好地滞留氨氮,所以对氨氮的去除率较好。

## 2.4 TP 的去除效果

当系统进水 TP 分别为 0.36、0.46  $\text{mg/L}$  时,出水浓度分别为 0.11 和 0.07  $\text{mg/L}$ ,去除率达到 69.4% 和 84.8%,出水水质满足 GB/T 18921—2002 观赏性景观环境用水的水质要求。当进水 TP 浓度



很低,为0.06 mg/L时,出水浓度较进水有所增加,为0.11 mg/L。系统对TP的去除效果波动性较大。分析认为:出现这种现象一方面是由于系统内种植土层和填料层中磷含量本底值较高,接近饱和,随时间延长慢慢开始向外释放磷<sup>[9,10]</sup>;另一方面可能由于水力停留时间过短,接触时间对磷去除效果的影响很大<sup>[11]</sup>。延长水力停留时间,可增加径流雨水与填料的接触时间以及聚磷菌和植物对磷的吸收时间,还能增加填料中铁、铝和钙等金属与径流中 $\text{PO}_4^{3-}$ 的反应时间,使系统更有效地除磷。此外,砾石湿地系统对磷的吸附能力随进水中磷负荷的增加而逐渐减弱,最终达到吸附饱和,当进水磷负荷很高时,易导致出流中磷的浓度较高。

### 3 结论

① 当雨水径流中的SS、COD、TN、 $\text{NH}_3-\text{N}$ 、硝态氮、TP浓度分别为26.38~432.33、15.21~53.38、1.23~5.33、0.54~1.36、0.28~3.52、0.06~0.46 mg/L时,砾石人工湿地系统对雨水径流的净化效果较好,出水浓度分别为6.22~9.21、4.25~9.97、0.63~3.16、0.11~0.30、0.11~2.81、0.07~0.11 mg/L,除COD外的其他指标都满足GB/T 18921—2002中观赏性景观环境用水水质类水质的要求,出水COD指标则满足GB 50400—2006中观赏性水景用水水质的要求。

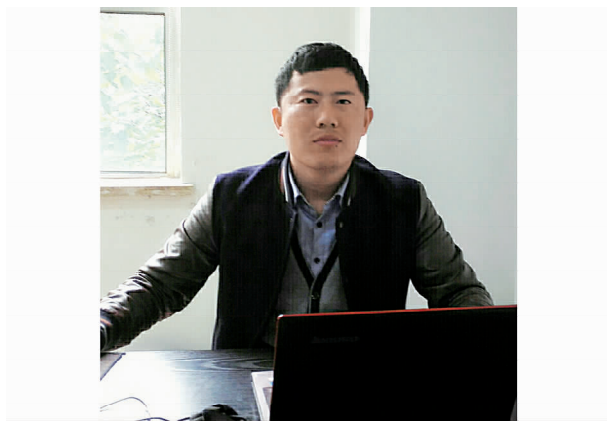
② 当雨水径流的COD、TP浓度较高,分别为112.50~187.3、0.93~1.57 mg/L时,砾石人工湿地系统的净化效果不佳,出水浓度分别为60.53~75.95、0.61~0.95 mg/L,不能满足上述标准的要求。

③ 为充分发挥砾石湿地系统对小区雨水径流的净化效果,确保系统出水水质达到景观环境用水水质要求,需保证系统的进水水质,因此建议:一是强化小区下垫面保洁工作;二是在该系统前增加预处理设施,如植被浅沟缓冲带等。

### 参考文献:

- [1] 王建龙,车伍,易红星. 基于低影响开发的城市雨洪控制与利用方法[J]. 中国给水排水,2009,25(14):6-9.
- [2] 车伍,吕放放,李俊奇,等. 发达国家典型雨洪管理体系及启示[J]. 中国给水排水,2009,25(20):12-17.

- [3] van Roon M. Water localisation and reclamation: Steps towards low impact urban design and development[J]. J Environ Manage, 2007, 83(4):437-447.
- [4] 王建龙,王明宇,车伍,等. 低影响开发雨水系统构建关键问题探讨[J]. 中国给水排水,2015,31(22):6-12.
- [5] 魏源源,王红武,胡龙,等. 典型低影响开发工程措施的应用效果研究[J]. 中国给水排水,2015,31(15):110-113.
- [6] 张亚东,车伍,刘燕,等. 北京城区道路雨水径流污染指标相关性分析[J]. 城市环境与城市生态,2003,16(6):182-184.
- [7] 车伍,李俊奇. 城市雨水利用技术与管理[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2006.
- [8] Scholz O, Gawne B, Ebner B, et al. The effects of drying and re-flooding on nutrient availability in ephemeral deflation basin lakes in western New South Wales, Australia[J]. River Res Appl, 2002, 18(2):185-196.
- [9] Lucas W C, Greenway M. Phosphorus retention by bioretention mesocosms using media formulated for phosphorus sorption: Response to accelerated loads[J]. J Irrig Drain Eng, 2011, 137(3):144-153.
- [10] 李海燕,罗艳红,马玲. 生物滞留设施对地表径流中磷去除效果的研究述评[J]. 中国水土保持,2014,(6):26-31.
- [11] 吴晓雨. 城市降雨径流收集及除磷净化研究[D]. 无锡:江南大学,2010.



作者简介:高旺(1989-),男,内蒙古巴彦淖尔人,硕士研究生,主要从事低影响开发雨水处理系统的研究。

E-mail: gwang0125@163.com

收稿日期:2016-09-05