

# 滨河城市广场表面流人工湿地的水质净化效能

李杨克<sup>1,2</sup>, 郑夕春<sup>3</sup>, 费一鸣<sup>3</sup>, 傅大放<sup>1,2</sup>

(1. 东南大学 土木工程学院, 江苏 南京 210096; 2. 东南大学-蒙纳士大学海绵城市联合研究中心, 江苏 南京 210096; 3. 昆山城市建设投资发展集团有限公司, 江苏 昆山 215300)

**摘要:** 对江苏省昆山市一处作为河流旁侧净化系统的滨河城市广场表面流人工湿地工程实例进行了18个月的连续监测,考察了三级串联式表面流人工湿地对微污染河水的长期净化效能,并探究了温度和降雨冲击负荷的影响。结果显示,当水力停留时间为15 h时,人工湿地对SS、NH<sub>3</sub>-N、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N、TN、TP和COD<sub>Mn</sub>的去除率分别为34.2%、38.4%、22.3%、29.1%、35.6%和31.5%;SS、NH<sub>3</sub>-N、TP主要在湿地前、中段被去除,NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N和TN主要在湿地中、后段被去除;各污染物去除率均与水温存在非常显著的正相关性( $p < 0.01$ );在降雨冲击负荷下,部分污染物进水浓度出现一定程度的升高,而出水浓度差异并不显著(除COD<sub>Mn</sub>),表面流人工湿地的水质净化能力较稳定。

**关键词:** 表面流人工湿地; 微污染河水; 水质净化; 城市广场

**中图分类号:** X703 **文献标识码:** C **文章编号:** 1000-4602(2017)05-0055-06

## Water Treatment Efficiency of a Surface Flow Constructed Wetland in a Riverside Urban Square

LI Yang-ke<sup>1,2</sup>, ZHENG Xi-chun<sup>3</sup>, FEI Yi-ming<sup>3</sup>, FU Da-fang<sup>1,2</sup>

(1. College of Civil Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China; 2. SEU-Monash Joint Research Center <Nanjing> on Sponge Cities, Nanjing 210096, China; 3. Kunshan City Construction Investment & Development Group Co. Ltd., Kunshan 215300, China)

**Abstract:** This study implemented a continuous monitoring of a constructed wetland adjacent to a slightly polluted river in Kunshan City, Jiangsu Province for 18 months, explored the long-term treatment efficiencies for a slightly polluted river using three constructed surface flow wetlands in series, and the effects of temperature and rainfall on pollutants removal. The results showed that removal efficiencies of SS, NH<sub>3</sub>-N, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N, TN, TP and COD<sub>Mn</sub> were 34.2%, 38.4%, 22.3%, 29.1%, 35.6% and 31.5%, respectively, when HRT was 15 h. SS, NH<sub>3</sub>-N, TP were generally removed in the first and the second wetlands, while NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N and TN were removed in the second and the third wetlands. Temperature significantly affected pollutants removal efficiencies ( $p < 0.01$ ). In wet weathers, some inflow pollutants increased to a certain degree, but no significant changes were identified in outflow (except for COD<sub>Mn</sub>), showing the good resilience of the surface flow constructed wetland to rainfall.

**Key words:** surface flow constructed wetland; slightly polluted river water; water treatment efficiency; urban square

近年来,太湖流域苏南地区河流水环境出现了不同程度的退化。根据2015年全国环境状况公报,太湖湖体的平均水质为Ⅳ类,环湖河流34个国控断面中,Ⅳ、Ⅴ、劣Ⅴ类占比分别达到了50%、2.9%、5.9%,流域水环境亟待改善。污染河水的整治措施,主要包括物理技术(如疏浚清淤<sup>[1]</sup>、机械除藻、水系沟通<sup>[2]</sup>)、化学技术、(微)生物技术(如改进型生物滤池<sup>[3]</sup>、微生物修复技术<sup>[4]</sup>)和生态技术(如构建河流旁侧湿地<sup>[5,6]</sup>、生态浮岛<sup>[7,8]</sup>),随着对生态环境的日益关注,生态修复技术越来越受到重视。

城市广场是城市公共空间的重要组成部分,对城市形象的传达、地方特色的体现、市民交流的促进有重要作用。随着对生态环境的日渐重视,滨河城市广场的规划设计亦更侧重其生态功能的实现,如通过多专业交叉综合设计,糅合人工湿地、氧化塘等绿色生态水质修复技术。在太湖流域苏南地区,水网密布,河浜交织,滨河城市广场数量众多,因此,可以对其加以充分利用,在规划设计中糅合旁侧湿地等河流生态修复技术,提高其生态环保价值,促进旁侧河流水环境的改善,实现城市广场的多功能化。国内的上海梦清园<sup>[9]</sup>和成都活水公园<sup>[10]</sup>、国外的Olentangy River Wetland Research Park<sup>[11]</sup>(河流旁侧湿地公园)即是此类设计的典范。

笔者以江苏省昆山市某滨河城市广场的河流旁侧人工湿地工程实例为研究对象,通过长达18个月的连续监测分析,考察了其对微污染河水的长期净化效能,并探究了温度和降雨冲击负荷的影响,以期后续类似的河流水环境生态修复工程实践提供技术参考。

## 1 试验部分

### 1.1 人工湿地概况

受试人工湿地位于昆山城西的文化艺术中心广场,该广场于2014年底建成并投入运营。广场旁侧河流是娄江支流,为娄江的一级支浜,全长约为1 km。受试人工湿地为三级串联式表面流人工湿地,进水为旁侧河流,出水回用于湿地下游的景观水池;湿地自北向南由调蓄池、湿地池1、湿地池2、湿地池3串联构成,池体间利用DN400球墨管连接,池壁为景观石笼。池体(除调蓄池外)总面积约为1 140 m<sup>2</sup>,平均水力停留时间(HRT)约为15 h。其中,湿地池1的表面积为500 m<sup>2</sup>,平均深度为0.3~0.9 m, HRT为7.4 h;湿地池2的表面积为370 m<sup>2</sup>,平均

深度为0.4~1.0 m, HRT为5.0 h;湿地池3的表面积为270 m<sup>2</sup>,平均深度为0.3~0.9 m, HRT为3.1 h。另外,调蓄池的表面积为74 m<sup>2</sup>,平均深度为1.8~1.9 m。

受试湿地水深沿流向平缓变化,垂直于流向则保持一致,以满足不同植物生长对水深的要求,保证湿地的景观生态效益。所种植物包括千屈菜、菖蒲、香蒲、黄菖蒲(黄花鸢尾)、茼菜、泽泻、大慈姑、梭鱼草、花叶水葱、再力花、睡莲、芦苇、穗花虎尾藻等,共计13种,均为景观效果好的本地植物;植物在湿地池体内呈块状分布。

人工湿地的处理流程如图1所示。旁侧河水由1<sup>#</sup>水泵泵至调蓄池并依次流入湿地池1~3,大部分出水经2<sup>#</sup>水泵转输至下游的景观水池,少量出水用于绿化浇灌,多余出水溢流回到河中。1<sup>#</sup>水泵不间断、连续运行,2<sup>#</sup>水泵只在日间(7:00—19:00)运行,二者的实际流量约为(28±1) m<sup>3</sup>/h。雨天时,两个水泵停止运行,部分广场路面径流经地面雨水管渠收集后汇入调蓄池,过量的暴雨径流则直接由市政管网排出。

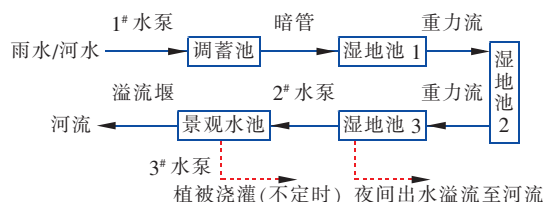


图1 人工湿地处理工艺流程

Fig.1 Flow chart of constructed wetlands

### 1.2 试验方法

2015年6月—2016年11月对湿地进出水共计采样19次,其中,降雨采样6次(2015年6月—9月);晴天采样13次(2015年10月—2016年11月),每月采样一次。湿地水质采样点共设4处,分别是调蓄池出水口0<sup>#</sup>、池1出水口1<sup>#</sup>、池2出水口2<sup>#</sup>、池3出水口3<sup>#</sup>。雨天时,根据雨势大小每隔5~30 min在调蓄池出水口取样200 mL,混合得到进水的事件平均浓度(EMCs),出水样在雨后约15 h(即1个停留时间)时取得。

检测的水质指标主要包括悬浮物、氨氮、硝态氮、总氮、总磷、COD<sub>Mn</sub>,检测方法均采用国家标准方法。

### 1.3 试验进水水质

晴天时,人工湿地进水为旁侧娄江支浜,水质相

对较好;雨天时,则主要是湿地附近的城市广场路面径流。该城市广场物业维保制度比较完善,卫生环境良好。湿地的进水  $SS$ 、 $NH_3 - N$ 、 $NO_3^- - N$ 、 $TN$ 、 $TP$ 、 $COD_{Mn}$  平均浓度分别为  $(35.16 \pm 14.04)$ 、 $(1.21 \pm 1.86)$ 、 $(1.1 \pm 0.31)$ 、 $(3.53 \pm 2.43)$ 、 $(0.28 \pm 0.23)$ 、 $(6.80 \pm 3.78)$   $mg/L$ 。

## 2 试验结果与分析

### 2.1 污染物的整体去除效果

#### 2.1.1 对污染物的去除率

根据试验期间的监测数据,人工湿地对悬浮物、氨氮、硝态氮、总氮、总磷和  $COD_{Mn}$  的平均去除率分别为  $(34.2 \pm 12.2)\%$ 、 $(38.4 \pm 10.8)\%$ 、 $(22.3 \pm 6.0)\%$ 、 $(29.1 \pm 6.5)\%$ 、 $(35.6 \pm 15.4)\%$ 、 $(31.5 \pm 11.0)\%$ ,去除负荷分别为  $(7.14 \pm 4.44)$ 、 $(0.29 \pm 0.46)$ 、 $(0.14 \pm 0.06)$ 、 $(0.65 \pm 0.58)$ 、 $(0.062 \pm 0.050)$ 、 $(1.38 \pm 1.02)$   $g/(m^2 \cdot d)$ ;与处理微污染河水的常规潜流湿地相比<sup>[12-16]</sup>,表面流湿地对污染物的去除率整体偏低。

表面流湿地对悬浮物、磷等污染物质的去除主要通过植物拦截、吸附沉淀等物理作用,由于进水为微污染河水,污染物浓度较低,且湿地停留时间过短(15 h),不溶性物质尚未来得及沉淀即被水流带出湿地;此外,过小的 HRT 也会降低污染物质与植物、微生物等的接触时间,导致后者的同化、降解反应无法充分进行,因此悬浮物、氨氮、有机质和磷的去除率偏低。

对于氮素,由于受试湿地中植物生长旺盛,大气复氧能力、植物泌氧能力均较强,三级人工湿地的平均溶解氧量在 2.5  $mg/L$  以上,为好氧环境,有利于硝化菌的繁殖代谢,不利于反硝化菌的生长,因此氨氮去除率较硝态氮和总氮去除率要高;此外,反硝化菌为异养菌,对水中碳氮比要求较高(一般  $BOD_5/TN$  值应大于 3~5),而受试湿地的进水有机质含量偏低,可生化性较差,这亦不利于硝态氮、总氮的去除。

#### 2.1.2 出水水质的达标性分析

参考地表水(Ⅲ类和Ⅴ类,GB 3838—2002)、景观环境用水(观赏性、水景类,GB/T 18921—2002)、城市黑臭水体(轻度黑臭,《城市黑臭水体整治工作指南》)的水质标准,对人工湿地的进、出水水质进行达标性分析,结果如下:

《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)规定

了氨氮、总氮、总磷和  $COD_{Mn}$  的限值,对于Ⅴ类水,分别是 2、2、0.4、15  $mg/L$ 。监测数据显示,湿地出水氨氮、总磷和  $COD_{Mn}$  的达标性较好,分别为 94.7%、84.2%、100%,但出水达标率的提高幅度较小,仅分别比进水提高了 5.9%、0、5.6%,这是因为进水已经基本达到Ⅴ类水标准,出水Ⅴ类水达标性的提升必然不明显。对于总氮,其出水达标性一般,仅为 57.9%,但比进水达标率提高了 120%,提升显著。综上可知,总氮是制约湿地出水达到地表Ⅴ类水标准的限制因子。

《地表水环境质量标准》中Ⅲ类水的氨氮、总氮、总磷和  $COD_{Mn}$  限值分别是 1、1、0.2、6  $mg/L$ 。湿地出水的氨氮、总磷和  $COD_{Mn}$  的达标性较好,分别为 89.5%、78.9%、84.2%,且较进水达标率分别提高了 30.8%、50.0%、23.1%,提升较为显著,湿地的净化作用较为明显。但出水总氮的达标性很差,仅为 5.3% (1/19),可知总氮是制约湿地出水达到地表Ⅲ类水标准的限制因子。

《城市污水再生利用 景观环境用水水质》(观赏性、水景类,GB/T 18921—2002)规定了悬浮物、氨氮、总氮、总磷的限值,分别为 10、5、15、0.5  $mg/L$ 。人工湿地进水的达标率分别为 0、94.7%、100%、84.2%,而出水的达标率则分别为 5.3%、94.7%、100%、94.7%,可知,出水水质达标的关键制约因子是悬浮物,其余指标的达标率均较高。一般认为,表面流湿地主要通过植物拦截、吸附和絮凝沉降去除悬浮物,因此较小的流速有利于增大  $SS$  与填料、植物的接触时间,提高其去除率。受试湿地的出水主要用于下游的景观水池补水,为了达到较好的景观效果,试验期间湿地采用了较大的进水流量(28  $m^3/h$ ),水力负荷高达 0.59  $m^3/(m^2 \cdot d)$ ,停留时间过小(15 h),严重限制了悬浮物的去除效能和达标率。而出水氨氮、总氮、总磷之所以能实现极高的达标率,推测主要与较高的标准限值和较低的进水浓度有关。

最新颁布的《城市黑臭水体整治工作指南》规定了溶解氧(0.2~2.0  $mg/L$ )、氨氮(8~15  $mg/L$ )等的“轻度黑臭”限值。由于指南规定的标准上限值较高,而湿地进水为微污染河水,污染物浓度较低,并不属于黑臭水体,因此出水氨氮 100% 达标。

#### 2.2 污染物的沿程去除效果

考虑到各级湿地面积不同,在湿地污染物去除



率沿程分析中计入表面积的权重,得到了湿地的污染物沿程去除负荷,如图 2 所示。

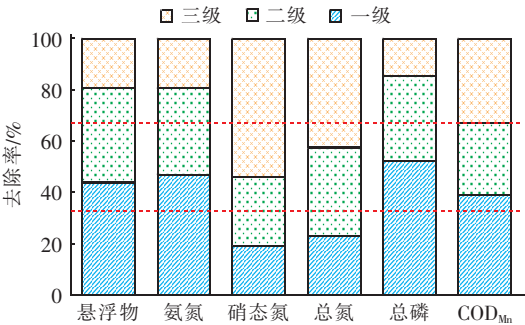


图 2 各级湿地的污染物去除负荷  
Fig. 2 Pollutants grading removal loadings of constructed wetlands

由图 2 可知,悬浮物、氨氮和总磷主要在湿地前、中段(第一、二级湿地)被去除,前两级湿地的贡献占比超过 80%;硝态氮、总氮则主要在湿地中、后段(第二、三级湿地)被去除,第一级湿地的贡献率不足 25%,远低于第二、三级湿地;对于有机质(COD<sub>Mn</sub>)的去除,三级湿地的贡献较为接近,各级去除率标准差低于 5%。

在表面流人工湿地中,悬浮物、磷质等不溶性污染物主要通过物理作用去除。河水进入人工湿地,经过基质层及密集的植物茎叶和根系,大量悬浮物、颗粒态磷等能够被拦截、过滤、吸附沉淀,因此在前两级人工湿地便可去除,这与熊家晴等人<sup>[17]</sup>的研究

结果相似。

对于氮类的去除,一般认为微生物作用的贡献较大,通过氨化、硝化和反硝化作用,有机氮依次被转化为氨氮、硝态氮和氮气,进而从湿地系统中去除。由于各级湿地的溶解氧含量差异(前两级均值高于 2.5 mg/L,第三级均值低于 1.6 mg/L),因此推测前、中段湿地更易发生好氧的氨化、硝化反应,后段更易发生厌氧的反硝化反应;加之湿地中有机质含量及其去除率均偏低,其在前、后段的分布差异较小,因此氨氮主要在前、中段被去除,硝态氮和总氮则主要在中、后段被去除。

2.3 温度对污染物去除率的影响

利用 SPSS 19.0 探究了各污染物指标与水温的 Pearson 相关性(见表 1)。结果显示,各污染物去除率均与水温存在非常显著的正相关性( $p < 0.01$ )。在气温较高季节(水温  $\geq 16\text{ }^{\circ}\text{C}$ ),对 SS、NH<sub>3</sub>-N、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N、TN、TP、COD<sub>Mn</sub>的去除率比气温较低季节(水温  $< 16\text{ }^{\circ}\text{C}$ )分别可提高 115%、89%、69%、61%、121%、135%。随着温度的上升,植物处于快速生长期或成熟期,新陈代谢剧烈,需要同化大量污染物质;同时,大多数土壤-根系微生物(如硝化菌、反硝化菌、聚磷菌等)对温度均非常敏感,温度的适宜上升会提高微生物的生长速率和底物降解速率,因此提高了温度较高季节下的污染物去除率,相关性极为显著。

表 1 污染物去除率与水温相关性分析

Tab. 1 Correlation analysis between pollutants removal efficiencies and water temperature

项 目		SS	NH <sub>3</sub> -N	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	TN	TP	COD <sub>Mn</sub>
去除率/ %	水温 $\geq 16\text{ }^{\circ}\text{C}$	41.2	45.1	25.6	33.1	43.0	38.5
	水温 $< 16\text{ }^{\circ}\text{C}$	19.2	23.9	15.1	20.5	19.5	16.4
Pearson 相关性		0.953 **	0.904 **	0.906 **	0.778 **	0.793 **	0.842 **

注: \*\*表示  $p < 0.01$  水平,下同。

2.4 降雨冲击负荷对污染物去除率的影响

2015 年 6 月—9 月对湿地在降雨冲击负荷下的去除效能进行了检测分析,共采样 6 次,并将其与 2016 年同期晴天下的水质净化效能进行比较分析。6 场降雨事件的降水量分别为 6.1(小雨)、11.7(中雨)、17.5(中雨)、30.2(大雨)、114.0(大暴雨)、234.3(特大暴雨) mm,覆盖了较宽的降雨等级;雨前晴天数为 0.4~7 d,与昆山当地的气象条件较为一致;包含了较长降雨历时的事件和短时强降雨事件(降雨历时 2~63 h),单峰型事件(如事件 1)和

双峰型事件(如事件 4、5),雨型选取具有一定的代表性。

① 进水浓度的差异

就进水浓度而言,由于降雨的冲刷作用,雨天的悬浮物、氨氮、硝态氮、总氮、总磷、COD<sub>Mn</sub>平均浓度较晴天时分别升高了 12.2%、23.9%、-16.3%、36.4%、22.0%、-21.5%;基于 S-N-K 方法的单因素方差分析(ANOVA)显示(见表 2),除 COD<sub>Mn</sub>外各污染物指标在晴/雨天的进水浓度均不存在显著性差异( $p > 0.05$ ),降雨事件下的进水仍属于微污

染河水。

表2 晴/雨天污染物去除效能单因素方差分析(S-N-K)

Tab.2 One-way analysis of variance for pollutants removal efficiencies between dry and wet weathers (S-N-K)

项 目	SS	NH <sub>3</sub> -N	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	TN	TP	COD <sub>Mn</sub>
进水浓度	0.678	0.090	0.333	0.309	0.365	0.007 **
出水浓度	0.831	0.095	0.325	0.318	0.557	0.003 **
去除率	0.610	0.646	0.596	0.685	0.233	0.639

## ② 去除率的差异

在降雨冲击下,雨天的悬浮物、氨氮、硝态氮、总氮、总磷、COD<sub>Mn</sub>去除率均值较晴天时分别降低了16.6%、11.7%、-0.7%、1.5%、15.9%、2.7%,晴/雨天下的污染物去除率变化较小;基于S-N-K方法的单因素方差分析(见表2)亦显示,除悬浮物( $p=0.049$ )外,其他污染物的去除率在晴/雨天下不存在显著性差异( $p>0.05$ ),表明处理微污染河水的人工湿地在降雨冲击负荷下具有较强的稳定性。

降雨初期,大量污染物会被裹挟、转移至湿地中,降低湿地水质;随着降雨的进行,又会对湿地水质产生一定的稀释作用。本案例中,部分路面径流经地面排水管渠收集后进入湿地,进水悬浮物、氨氮、总氮、总磷浓度出现了一定程度的上升,但其值仍然偏低,尚属于微污染河水范畴;而此时去除率变化较小,差异性亦不显著,表明表面流湿地在处理微污染河水时的稳定性较好。

## 3 结论

① 历时18个月的连续监测表明,表面流人工湿地对微污染河水具有稳定的净化能力,对悬浮物、氨氮、硝态氮、总氮、总磷、COD<sub>Mn</sub>的平均去除率分别为34.2%、38.4%、22.3%、29.1%、35.6%和31.5%。制约出水水质达到地表水V类、Ⅲ类以及景观环境用水标准的关键影响因子分别是总氮、总氮、悬浮物指标,出水不属于黑臭水体。在处理微污染河水时,表面流湿地可以较好地实现水质由(轻度)劣V类到V类的改善,并能在一定程度上实现水质由V类到Ⅲ类的提升。

② 沿程分析显示,悬浮物、氨氮和总磷主要在湿地前、中段去除,硝态氮、总氮主要在湿地中、后段去除,三级湿地对有机质(COD<sub>Mn</sub>)的去除率较为接近。

③ 各污染物去除率均与水温存在非常显著的正相关性( $p<0.01$ ),在气温较高季节(水温 $\geq 16$

℃),对SS、NH<sub>3</sub>-N、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N、TN、TP、COD<sub>Mn</sub>的平均去除率分别可达到41.2%、45.1%、25.6%、33.1%、43.0%、38.5%,水温对表面流湿地的水质净化效能影响较大。

④ 在降雨冲击负荷下,进水污染物浓度变化较小,仍属于微污染水体;污染物去除率略有下降,但差异并不显著(除悬浮物),表明表面流人工湿地在处理微污染河水时具有较好的稳定性。

## 参考文献:

- [1] 陈威,张雨晴. 某河道清淤与截污综合整治工程初步设计探讨[J]. 中国给水排水,2015,31(12):68-70.
- [2] 尹成国,陆伟. 合肥市环城水系沟通设计[J]. 江淮水利科技,2008,(4):11-12.
- [3] 朱擎,杨飞,芦婷,等. 微曝气生物滤池-固相碳源反硝化生物滤池强化脱氮处理新运粮河水的示范工程研究[J]. 生态环境学报,2015,24(7):1216-1221.
- [4] Sheng Y, Qu Y, Ding C, et al. A combined application of different engineering and biological techniques to remediate a heavily polluted river[J]. Ecol Eng, 2013, 57(8): 1-7.
- [5] Shi E, She Z, Xie T, et al. Nutrient removal from polluted river water by using vertical and horizontal subsurface flow constructed wetlands[J]. Adv Mater Res, 2011, 393/395:1304-1307.
- [6] Jia H, Sun Z, Li G. A four-stage constructed wetland system for treating polluted water from an urban river[J]. Ecol Eng, 2014, 71:48-55.
- [7] 胥丁文,陈玲娜,马前. 生态浮床技术的应用及研究新进展[J]. 中国给水排水,2010,26(14):11-15.
- [8] Zhao F, Xi S, Yang X, et al. Purifying eutrophic river waters with integrated floating island systems[J]. Ecol Eng, 2012, 40(3):53-60.
- [9] 陈漫漫,李小平,李丹. 梦清园人工湿地景观构建及运行效果研究[J]. 重庆环境科学,2008,1(2):10-13.
- [10] 阳小成. 成都活水公园人工湿地对锦江河水年度净化效果的研究[J]. 成都理工大学学报:自然科学版, 2008,35(5):591-596.
- [11] Mitsch W J. Wetland creation, restoration, and conservation: A wetland invitation at the Olentangy River Wetland Research Park[J]. Ecol Eng, 2005, 24(4):243-251.
- [12] 谢伟丹,谢飞,黄磊,等. 芦竹潜流人工湿地对微污染

- 河水的净化效果[J]. 中国给水排水, 2012, 28(21): 69-71.
- [13] Huang L, Gao X, Guo J, *et al.* Study on the purification efficiency of micro-polluted river treated by subsurface horizontal flow constructed wetlands[J]. *Procedia Environ Sci*, 2011, 10(1): 908-913.
- [14] Vymazal J. Removal of nutrients in various types of constructed wetlands[J]. *Sci Total Environ*, 2007, 380(1/3): 48-65.
- [15] 黄磊, 张绍博, 鲁言言, 等. 菖蒲和空心菜在处理微污染河水潜流人工湿地中的应用[J]. 环境工程学报, 2014, 8(5): 1845-1850.
- [16] 谢飞, 黄磊, 高旭, 等. 潜流人工湿地对微污染河水的净化效果[J]. 环境工程学报, 2013, 7(1): 65-71.
- [17] 熊家晴, 杨洋, 郑于聪, 等. 表面流人工湿地对高含量有机污染河水的去除效果研究[J]. 水处理技术, 2013, 39(7): 69-72.



作者简介: 李杨克(1990-), 男, 河北石家庄人, 硕士研究生, 主要从事城市雨洪管理及海绵城市建设研究。

E-mail: lykhelloworld@foxmail.com

收稿日期: 2016-12-15

(上接第54页)

- water quality parameters with mutagenicity of chlorinated drinking water samples[J]. *J Toxicol Environ Health*, 2009, 72(7): 461-467.
- [6] 韩梅, 高伟, 赵志伟, 等. 悬浮填料-沸石BAF处理低温高氨氮污染源水效能[J]. 中国给水排水, 2015, 31(1): 32-35.
- [7] Huang T L, Cao X, Zhang Q, *et al.* Catalytic oxidation of high-concentration ammonia in groundwater by a naturally formed co-oxide filter film[J]. *Desalination and Water Treatment*, 2014, 52(7/9): 1615-1623.
- [8] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法(第4版)[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [9] 汪洋. 接触氧化滤池处理含铁锰氨氮地下水的快速启动与处理效果[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2015.
- [10] 黄廷林, 郑娜, 曹昕. 滤料表面活性滤膜对水中锰的吸附特性与机理研究[J]. 水处理技术, 2013, 39(3): 39-43.
- [11] 王文斌, 黄廷林, 曹昕, 等. 活性滤料对水中氨氮的吸附特性研究[J]. 水处理技术, 2014, 40(11): 75-79.
- [12] 孙同喜, 郑萌璐, 蒋铁锋, 等. NaCl改性沸石对氨氮吸附性能的研究[J]. 环境污染与防治, 2010, 32(10):

46-50.

- [13] 岳舜琳. 给水中的氨氮问题[J]. 净水技术, 2001, 20(2): 12-15.
- [14] 张杰, 陈秀荣. 曝气生物滤池反冲洗的特性[J]. 环境科学, 2003, 24(5): 86-91.



作者简介: 张蓓蓓(1989-), 女, 河南郑州人, 硕士研究生, 主要研究方向为水质微污染控制与水资源保护。

E-mail: 1304332730@qq.com

收稿日期: 2016-10-15