

doi:10.3969/j.issn.1674-8530.17.0123



## 表面流人工湿地处理污染河水的净化效果

张智超<sup>1,2</sup>, 王树谦<sup>1,2\*</sup>

(1. 河北工程大学水利水电学院, 河北 邯郸 056002; 2. 河北省水资源高效利用工程技术研究中心, 河北 邯郸 056038)



张智超

**摘要:** 为了给永年洼高效净污人工湿地系统示范性工程提供技术支撑, 试验研究了表面流人工湿地对受污染的滏阳河水主要污染物总氮(TN)和氨氮( $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ )的净化效果. 试验在邯郸永年降雨径流试验场开展, 表面流人工湿地中试试验在水力负荷为430 mm/d、水力停留时间为0.5 d的条件下运行. 结果表明, 系统对TN和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的平均去除率分别为51.89%和47.00%, 对污染河水有良好的去除效果. 在试验期间的进水水质下, 发现此设置条件下的表面流人工湿地系统对TN和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的最大处理负荷分别为8.95和2.16 mg/L, 最大去除率分别为60.00%和56.48%. 对TN和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 质量浓度沿程变化规律发现: 溶解氧(DO)是影响湿地系统对TN和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 去除的关键因子; 进一步分析得出 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的去除更易受DO的影响.  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 质量浓度沿程变化趋势为在系统前段短暂小幅度升高, 中前段大幅度下降, 尾端趋于平稳; TN质量浓度全程均呈平稳下降趋势.

**关键词:** 表面流人工湿地; 总氮; 氨氮; 平均去除率; 浓度沿程变化

**中图分类号:** S276.1; X522 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-8530(2018)03-0209-06

张智超, 王树谦. 表面流人工湿地处理污染河水的净化效果[J]. 排灌机械工程学报, 2018, 36(3): 209-214.

ZHANG Zhichao, WANG Shuqian. Purification effects of surface flow constructed wetland in treating polluted river water[J]. Journal of drainage and irrigation machinery engineering (JDIME), 2018, 36(3): 209-214. (in Chinese)

## Purification effects of surface flow constructed wetland in treating polluted river water

ZHANG Zhichao<sup>1,2</sup>, WANG Shuqian<sup>1,2\*</sup>

(1. School of Water Conservancy and Hydroelectric Power, Hebei University of Engineering, Handan, Hebei 056002, China; 2. Hebei Province Effective Utilization of Water Resource Engineer Research Center, Hebei University of Engineering, Handan, Hebei 056038, China)

**Abstract:** To provide technical support for a demonstration project-efficient pollutant removal surface flow constructed wetland system, purification effects of the system on main pollutants such as nitrogen (TN) and ammonia nitrogen ( $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ ) in Fuyang River were studied. A pilot experiment was carried out in Yongnian rainfall runoff test field of Handan at 430 mm/d hydraulic load with 0.5 d hydraulic retention time. The results show that the is system subject to 51.89% and 47.00% average removal rates for TN and  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ , respectively, exhibiting a good purification effect on polluted river water body. Based on the inflow water body quality during the trial, it turns out that the maximum

收稿日期: 2017-05-31; 修回日期: 2017-09-04; 网络出版时间: 2018-03-02

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1814.TH.20180302.1016.064.html>

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2014ZX07203-008)

第一作者简介: 张智超(1992—), 男, 黑龙江哈尔滨人, 硕士研究生(870789166@qq.com), 主要从事水污染治理研究.

通信作者简介: 王树谦(1954—), 男, 河北邯郸人, 教授, 博士生导师(wsq9681@sina.com), 主要从事节水灌溉理论与技术及水资源管理研究.

working loads of the system are 8.95 mg/L and 2.16 mg/L for TN and  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ , and the corresponding maximum removal rates are 60.00% and 56.48%, respectively. The TN and  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  concentrations along the course are examined. It is identified that dissolved oxygen (DO) is one of the key factors influencing TN and  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  removal, especially for  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  removal. The trend of  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  concentration slightly increases in the upper course, significantly decreases in the middle and gets stable in the tail end. The TN concentration shows a steadily decreasing trend along the course.

**Key words:** free surface wetland; TN;  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ ; average removal rate; concentration along the flow

水是生命之源.但是,随着中国人口数量增长、现代工业废水排放、城市垃圾增多、农村农药喷洒普及等,造成河流污染,河水无法直接使用.因此,对污染河水的治理尤为重要.其中人工湿地处理系统由于具有去除污染物效果好、出水水质稳定、投资少、能耗低和管理方便等优点,目前在污染河水治理中应用非常广泛<sup>[1]</sup>.人工湿地是由人工建造和控制运行的、与沼泽地类似的地面,将污水、污泥有控制地投配到经人工建造的湿地上,在其沿一定方向流动的过程中,主要利用土壤、人工介质、植物和微生物的物理、化学、生物3重协同作用,对其进行处理的一种技术<sup>[2-3]</sup>.

人工湿地按污水在系统中的流动通常可分为表面流人工湿地(surface flow wetland)、潜流人工湿地(subsurface flow wetland)、垂直流人工湿地(vertical flow constructed wetland)和复合流式潜流人工湿地(composite streaming undercurrents artificial wetland)<sup>[4-5]</sup>.其中表面流人工湿地因与大气具有广阔的接触面积,使得系统氧气供应充足,对悬浮物、有机物的去除效果较好,但对氮、磷的去除率相对较低<sup>[6]</sup>.此外,表面流人工湿地还具有美学价值,可为水生、野生动植物提供良好的栖息场所.综合而言,表面流人工湿地具有建设成本低、运行维护方便和水力条件好的特点,而被广泛用于处理受污染的河流水和湖泊水等<sup>[7-8]</sup>.

滏阳河位于河北省,流经邯郸、邢台、衡水,干流全长402 km,是一条防洪、灌溉、排涝、航运等综合利用的骨干河道.滏阳河地处邯郸-衡水腹心地带,西部为太行山余脉丘陵区,西高东低,东部为冲积平原.

永年洼湿地是河北省第3大洼淀,也是河北省南部唯一的内陆淡水型湿地,在涵养水源、调节气候、维护生物多样性方面发挥着巨大作用<sup>[9]</sup>.永年洼湿地的主要水源为滏阳河水,雨水积存次之,但由于滏阳河上游属于人工控制河道,导致了湿地进水量严重不足;同时,滏阳河入境水质较差,其中莲

花口监测断面常年为劣V类水,导致了湿地污染严重,生态系统严重退化.

鉴于此,文中通过构建中试表面流人工湿地系统,对利用表面流人工湿地处理污染滏阳河河水的可行性进行论证,分析系统对污染河水的去除效果和系统脱氮机理,从而为永年洼滞洪区高效净污人工湿地系统示范性工程的设计和建设,提供理论依据和技术支撑.

## 1 材料与方法

### 1.1 表面流人工湿地构建

表面流人工湿地中试装置如图1所示.人工湿地中试系统构建于邯郸永年降雨径流重点实验场,该实验场属暖温带大陆性季风气候,多年平均降水量为527.8 mm,年平均气温为14℃.



图1 表面流人工湿地中试系统实景图

Fig. 1 Realistic scene of surface flow constructed wetland system in pilot study scale

构建人工湿地的植物均取自滏阳河两岸河滩地的芦苇、荷花、荇菜、水芹和香蒲;基质取自滏阳河沿岸的河沙,基质深度约为1 m,分为2层:底层约为0.2 m深的黏土、上层约为0.8 m深的壤土.在系统前端设置配水池用以调蓄进水流量,以保证进入系统的流量稳定.

沿程设置7个试验小区,每个试验小区长度为10.0 m,宽4.0 m.人工湿地系统垂向剖面示意图如图2所示,图中配水池长4.0 m、深1.5 m,排水池长8.0 m、深1.5 m.

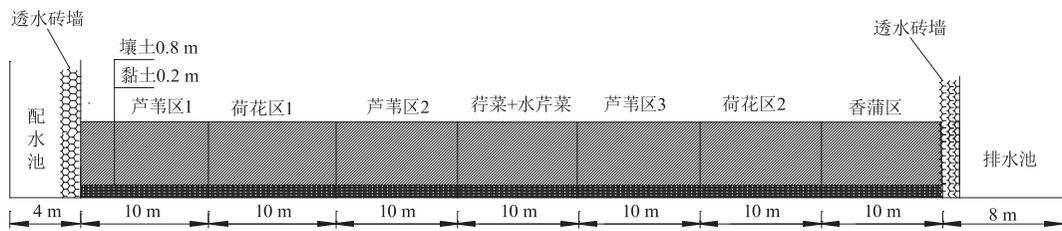


图2 人工湿地系统示意图

Fig. 2 Sketch of constructed wetland

## 1.2 湿地运行方式

由于表面流人工湿地中试系统距离濠阳河河道较远,不能从濠阳河莲花口断面直接提水.为了保证湿地系统用水与河道水质保持一致,用水车提取莲花口断面河水送至试验场蓄水池,再用带滤网的水泵把河水从蓄水池抽至配水池.表面流人工湿地系统经过3个月的试运行后达到稳定,试验期间湿地系统水力负荷为430 mm/d,水力停留时间为0.5 d,平均水位维持在基质表面以上0.3 m.自2016年7月初至10月末,对湿地系统进行了4个月的污水净化效果跟踪监测并对监测的数据进行分析.

## 1.3 水样采集与水质分析

自2016年7月初至10月末,每隔1星期采集1次水样.将配水池作为沿程第1个取样点,其检测结果作为进水水质指标;沿程每个小区的出水处依次

作为沿程取样点,沿程取样点监测结果用以分析污水流经每个小区之后的净化效果,其中最后一个小区出水处的监测结果作为湿地系统最终的净化结果.因此,沿程共设置8个取样点,每个取样点在与进水平行的方向取2个水样(每个取样点污染物监测浓度为2个水样的算术平均值,2组均值采用T检验分析其差异性).水样采集后,于2 h内分析;水样较多时,于4℃低温保存,并于24 h内分析、处理完毕<sup>[10]</sup>.

水质监测方法参照《水和废水监测分析方法》<sup>[11]</sup>.同时,由于pH、溶解氧DO是非常重要的环境因子,它们不仅影响植物、微生物的生长,还影响不同营养元素在水中的存在形态及转化过程<sup>[12]</sup>,因此,在试验期间用手持式pH/DO检测仪,对系统中沿程pH值、DO浓度进行监测.试验期间进水水质指标、pH和DO监测结果见表1,表中 $\rho$ 为质量浓度.

表1 试验进水水质、pH和DO监测结果  
Tab.1 Monitored polluted river water body quality, pH and DO

项目	$\rho / (\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$							pH
	COD <sub>Mn</sub>	TP	TN	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	NO <sub>3</sub> -N	NO <sub>2</sub> -N	DO	
变化范围	4.590~6.960	0.042~0.130	2.480~11.020	0.430~3.430	1.610~9.440	0.220~0.790	7.080~9.800	8.030~8.790
平均值	5.780	0.086	6.750	1.930	5.525	0.525	8.440	8.410

根据表1数据,对比地表水环境质量标准(GB 3838—2002),可知濠阳河污染河水的主要超标因子为总氮TN和氨氮NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N.因此,只针对湿地系统中TN和NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N的去除效果和沿程规律进行分析.

湿地系统污染物去除率计算式为

$$R = \frac{C_0 - C_1}{C_0} \times 100\%, \quad (1)$$

式中: $R$ 为去除率,%; $C_0, C_1$ 分别为污染物进水、出水的质量浓度,mg/L.

## 2 结果与分析

### 2.1 表面流人工湿地对污染河水的处理效果

2016年7月17日—10月23日,对人工湿地系

统进行了连续观测,系统运行良好.结果表明在4个月的时间里,人工湿地系统对污染河水有稳定的去除效果,对TN和NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N的平均去除率分别达到50.89%和48.95%左右.由表1试验进水水质监测结果可知,濠阳河水主要污染是氮污染且总氮严重超标,水质属于劣V类,但经过人工湿地系统净化之后的出水水质一般可以达到IV类水甚至III类水水质,这说明表面流人工湿地系统对污染濠阳河水具有良好的净化效果.图3为4个月试验期间的人工湿地净化效果,图中 $R_{\text{TN}}, R_{\text{NH}}$ 分别为TN, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N的去除率; $\rho_{\text{TN}}, \rho_{\text{NH}}$ 分别为TN, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N的质量浓度.

由图3可知,整个系统在4个月试验期间内对TN和NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N的净化效果始终处于较高水平,但

呈现中前期去除率较高,后期净化效果下降的趋势.究其原因是因为7月初至9月末,系统运行已进入稳定阶段,基质表面的生物膜已经形成,与此同时温度等环境条件适宜系统内香蒲、荷花、芦苇等水生植物生长,氨化细菌、硝化细菌数量增加,生物活性增强,使得去除效果明显提升.进入10月份后,一是由于气温降低,植物的生长趋于停滞并逐渐枯萎脱落,散落到系统内的枯枝落叶腐败、植物体内部分氮素释放,间接导致了系统TN和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 负荷增加;二是因为植物新陈代谢下降,导致了植物对人工湿地系统的供氧降低.两者的综合作用降低了系统对氮的净化效果.

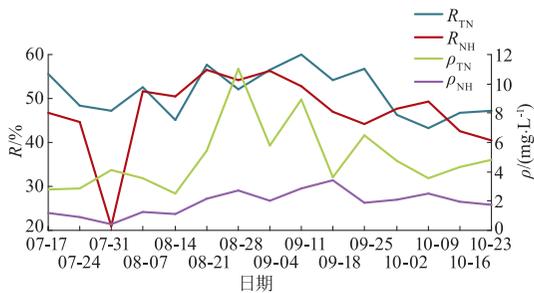


图3 人工湿地净化效果

Fig. 3 Purification effects constructed wetland

由图3还可知,TN和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的进水质量浓度与去除率之间有着较好的一致性,即进水质量浓度高,去除率也较高.但其中有一些数据异常:①虽然8月28日TN的进水质量浓度最高,达到11.02 mg/L,但去除率只有52.09%;而9月11日TN的进水质量浓度为8.95 mg/L,去除率却达到最高为60.00%,这是因为8月28日的进水质量浓度超过系统的最大处理负荷,系统不再具有相应的处理能力而导致处理效率下降.②7月31日系统对 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的去除率突然下降,由图可见是因为当天 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的进、出水质量浓度均较低,已很难提高去效率导致的.

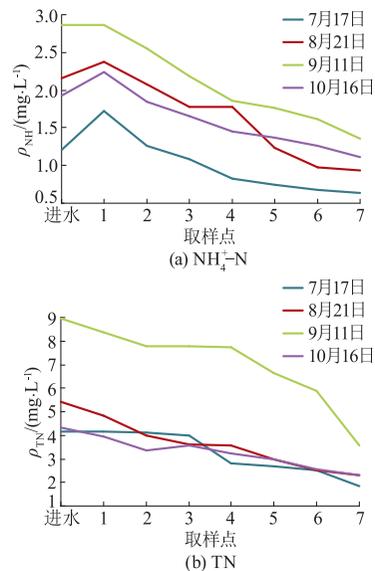
由图3又可知,在4个月的试验期间,系统对TN的去除效率最高时的进水质量浓度为8.95 mg/L,去除率为60.00%;系统对 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的去除效率最高时的进水质量浓度为2.16 mg/L,去除率为56.48%.通过SPSS软件,对湿地系统中同时存在的TN和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的质量浓度进行相关性分析,结果表明两者在 $P < 0.01$ 水平上呈显著正相关,具有统计学意义,相关系数 $R$ 为0.803,这表明整个试验期间TN质量浓度的变化过程与 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的较为一致,这与万玉文等<sup>[13]</sup>、VAN de MOORTELE等<sup>[14]</sup>的研

究污染河水中TN的去除主要受 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 去除水平制约的结论相符.

## 2.2 表面流人工湿地脱氮效果及机理

人工湿地中,氮的主要去除途径为挥发、基质吸附和离子交换、植物吸收、硝化与反硝化等.有研究表明挥发、基质吸附和离子交换对氮的去除效果并不明显,而植物吸收约占总质量的10%<sup>[15-16]</sup>.

这说明系统内部微生物的硝化与反硝化作用才是去除氮的主要途径.硝化过程中, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 首先在亚硝化杆菌的作用下转化为 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ ,进而在硝化杆菌的作用下转化为 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ ;反硝化过程中, $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 被转化为氮气,释放到大气中<sup>[17]</sup>.通过对7—10月的沿程试验表明污染物的沿程去除规律具有相似性,以7月17日、8月21日、9月11日和10月16日这4组数据为例进行分析,如图4所示.

图4  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和TN的沿程变化规律Fig. 4 Variations of  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  and TN along the course

从图4a中可以分析 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的沿程去除规律,可以看出,从进水到第1个取样点之间, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的质量浓度有所上升,取样点1—4的去除效果显著,取样点4—7的去除效果相对平稳.这表明从进水处到第1个取样点之间有机物分解消耗了大量DO,导致此区间DO质量浓度大幅度降低,这与我们实测的沿程DO质量浓度值变化规律相符合,如图5所示.由于DO质量浓度值下降,不利于 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 进行硝化作用,同时有机氮经氨化作用转化为 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ ,两者同时作用导致此区间 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的质量浓度短暂升高,这与卢少勇等<sup>[18]</sup>、郑仁宏等<sup>[19]</sup>的研究结果相符.

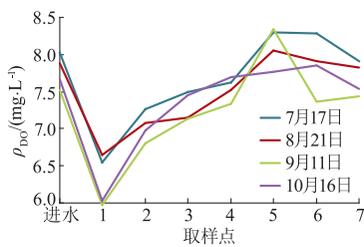


图5 试验沿程 DO 监测结果

Fig. 5 Monitored DO along the course

随着水头往前推进,大气复氧作用和有机物降解速率变慢,使水中 DO 质量浓度有所回升,在取样点 1—4 之间主要进行的硝化作用导致了  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  的质量浓度大幅度下降,这说明了 2 点:①  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  的去除主要受到系统中的硝化菌和 DO 的限制,通过对系统中同时存在的 DO 和  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  的质量浓度进行相关性分析,结果表明两者在  $P < 0.01$  水平上呈显著负相关,具有统计学意义,相关系数  $R$  为  $-0.672$ ;对系统中同时存在的 DO 和 TN 的质量浓度进行相关性分析,结果表明两者在  $P < 0.05$  水平上呈显著负相关,具有统计学意义,相关系数  $R$  为  $-0.399$ . 水体中 DO 的质量浓度与  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  和 TN 的质量浓度均呈负相关关系,且由分析结果进一步表明系统中  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  的去除更易受 DO 质量浓度的影响.② 表面流人工湿地的硝化作用主要在系统的前中段进行.

水流继续向前推进, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  的质量浓度沿程下降趋势趋于平稳,这是由于此时的  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  质量浓度已经被大幅度削减的原因.由图 4b 可见 TN 全程呈较均匀下降趋势,这表明系统沿程均有良好的反硝化作用,有利于系统中 TN 去除.

### 3 结 论

对于主要污染因子为 TN 和  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  的滏阳河污染河水,人工湿地发挥了较为稳定的去除效果,在水力负荷为  $430 \text{ mm/d}$ 、水力停留时间为  $0.5 \text{ d}$  的设计工况下,人工湿地系统对 TN 和  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  的平均去除率为  $50.89\%$  和  $48.95\%$ ,能够将劣 V 类水处理为 IV 类水甚至 III 类水,因此利用表面流人工湿地系统处理污染河水有技术上的可行性.

针对试验期间由于进水质量浓度过高而超出系统的处理负荷而导致的净化效果下降,以及进水质量浓度过低而导致的处理效率大幅度下降的现象,说明适当高的进水浓度(始终维持在系统最大

处理负荷左右)能够促进湿地系统净化功能达到最大限度地发挥.

研究表明湿地系统中的 DO 质量浓度与 TN 和  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  的质量浓度呈显著负相关,具有统计学意义;且进一步对数据进行分析表明水体中  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  去除更易受 DO 的影响.表面流人工湿地中, TN 和  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  沿程变化规律表明, TN 沿程均有较好的去除效果,全程均呈平稳下降趋势; $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  沿程呈现出在系统前段短暂小幅度升高,中前段大幅度下降,尾端趋于平稳的趋势.

### 参考文献 (References)

- [1] 吴晓磊. 人工湿地废水处理机理[J]. 环境科学, 1995, 16(3): 83-86.  
WU Xiaolei. Mechanism of wastewater treatment in constructed wetlands[J]. Chinese journal of environmental science, 1995, 16(3): 83-86. (in Chinese)
- [2] 李杰, 钟成华, 邓春光. 人工湿地研究进展[J]. 安徽农业科学, 2007, 35(6): 1778-1780.  
LI Jie, ZHONG Chenghua, DENG Chunguang. Research advance in the construction of artificial wetland [J]. Journal of Anhui agricultural sciences, 2007, 35(6): 1778-1780. (in Chinese)
- [3] HAMMER D A. Constructed wetlands for wastewater treatment: municipal, industrial and agricultural [M]. [S. l.]: Lewis Publishers Inc, 1989: 5-20.
- [4] DIERBERG F E, DEBUSK T A, JACKSON S D, et al. Submerged aquatic vegetation-based treatment wetlands for removing phosphorus from agricultural runoff: response to hydraulic and nutrient loading[J]. Water research, 2002, 36(6): 1409-1422.
- [5] 白晓慧, 王宝贞, 余敏, 等. 人工湿地污水处理技术及其发展应用[J]. 哈尔滨建筑大学学报, 1999, 32(6): 88-92.  
BAI Xiaohui, WANG Baozhen, YU Min, et al. Development of constructed wetland wastewater treatment technology and its application in China[J]. Journal of Harbin University of Civil Engineering and Architecture, 1999, 32(6): 88-92. (in Chinese)
- [6] WOOD A. Constructed wetlands in water pollution control: fundamentals to their understanding [J]. Water science and technology, 1995, 32(3): 21-29.
- [7] 刘春常, 夏汉平, 简曙光, 等. 人工湿地处理生活污水研究——以深圳石岩河人工湿地为例[J]. 生态环境, 2005, 14(4): 536-539.  
LIU Chunchang, XIA Hanping, JIAN Shuguang, et al. A case study on domestic wastewater treatment in Shi-

- yanhe constructed wetland in Shenzhen[J]. Ecology and environment, 2005, 14(4):536-539. (in Chinese)
- [8] DUNNE E J, CULLETON N, O'DONOVAN G, et al. An integrated constructed wetland to treat contaminants and nutrients from dairy farmyard dirty water[J]. Ecological engineering, 2005, 24(3):221-234.
- [9] 王丽枝,高文杰,邢晨宇,等. 基于生态敏感性分析的湿地保护与开发——以邯郸市永年洼湿地为例[J]. 湖北农业科学, 2013, 52(12):2484-2487, 2791.  
WANG Lizhi, GAO Wenjie, XING Chenyu, et al. Conservation and development of wetland based on ecological sensitivity analysis: a case study of Yongnianwa wetland of Handan city[J]. Hubei agricultural sciences, 2013, 52(12):2484-2487, 2791. (in Chinese)
- [10] 吴军,崔远来,赵树君,等. 塘堰湿地对农田排水氮磷净化效果试验研究[J]. 排灌机械工程学报, 2014, 32(2):167-172.  
WU Jun, CUI Yuanlai, ZHAO Shujun, et al. Research on removal effects of pond wetland system on nitrogen and phosphorus in paddy field drainage[J]. Journal of drainage and irrigation machinery engineering, 2014, 32(2):167-172. (in Chinese)
- [11] 国家环保局《水和废水监测分析方法》编委会. 水和废水监测分析方法[M]. 3版. 北京:中国环境科学出版社, 1989:230-438.
- [12] 熊家晴,刘华印,刘永军,等. 复合人工湿地处理受污染河水中试研究[J]. 水处理技术, 2012, 38(12):82-84, 89.  
XIONG Jiaqing, LIU Huayin, LIU Yongjun, et al. Pilot-scale research on treatment of polluted river water by hybrid constructed wetland[J]. Technology of water treatment, 2012, 38(12):82-84, 89. (in Chinese)
- [13] 万玉文,郭长强,茆智,等. 多级串联表面流人工湿地净化生活污水效果[J]. 农业工程学报, 2016, 32(3):220-227.  
WAN Yuwen, GUO Changqiang, MAO Zhi, et al. Sewage purification effect of multi-series surface flow constructed wetland[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(3):220-227. (in Chinese)
- [14] VAN de MOORTELE A M K, ROUSSEAU D P L, TACK F M G, et al. A comparative study of surface and sub-surface flow constructed wetlands for treatment of combined sewer overflows: a greenhouse experiment[J]. Ecological engineering, 2009, 35(2):175-183.
- [15] US ENVIRONMENT PROTECTION AGENCY. Wastewater stabilization ponds: Nitrogen removal[R]. Washington, USA: Office of Water, 1983.
- [16] 袁东海,高士祥,任全进,等. 几种挺水植物净化生活污水总氮和总磷效果的研究[J]. 水土保持学报, 2004, 18(4):77-80, 92.  
YUAN Donghai, GAO Shixiang, REN Quanjing, et al. Study on purified efficiency of phosphorus and nitrogen from domestic sewage by several macrophytes in vertical flow constructed wetlands[J]. Journal of soil and water conservation, 2004, 18(4):77-80, 92. (in Chinese)
- [17] 俞盈,付广义,陈繁忠,等. 水体中三氮转化规律及影响因素研究[J]. 地球化学, 2008, 37(6):565-571.  
YU Ying, FU Guangyi, CHEN Fanzhong, et al. Nitrogen translation of pollution water and its influential factor[J]. Geochimica, 2008, 37(6):565-571. (in Chinese)
- [18] 卢少勇,金相灿,余刚. 人工湿地的氮去除机理[J]. 生态学报, 2006, 26(8):2670-2677.  
LU Shaoyong, JIN Xiangcan, YU Gang. Nitrogen removal mechanism of constructed wetland[J]. Acta ecologica sinica, 2006, 26(8):2670-2677. (in Chinese)
- [19] 郑仁宏,邓仕槐,李远伟,等. 表面流人工湿地硝化和反硝化强度研究[J]. 环境污染与防治, 2007, 29(1):37-39, 43.  
ZHENG Renhong, DENG Shihuai, LI Yuanwei, et al. Nitrification and denitrification in surface flow wetland[J]. Environmental pollution & control, 2007, 29(1):37-39, 43. (in Chinese)

(责任编辑 张文涛)