

# 污染物浓度和水力负荷双重作用下 人工湿地的净化效果

戈浩宇<sup>1,2</sup>, 华祖林<sup>1,2</sup>, 沈 健<sup>3</sup>, 聂永平<sup>3</sup>, 倪效欣<sup>3</sup>, 白 雪<sup>1,2</sup>

(1. 河海大学浅水湖泊综合治理与资源开发教育部重点实验室, 江苏 南京 210098;

2. 河海大学环境学院, 江苏 南京 210098; 3. 江苏省南水北调工程建设领导小组办公室, 江苏 南京 210029)

**摘要:**研究从徐州地区大沙河西人工湿地基地中筛选 6 种挺水植物系统和 2 种沉水植物作为室内实验的供试植物, 从丰县康达污水处理厂出水取样作为实验用水, 研究人工湿地的水生植物对不同污染程度水体和水力负荷条件下的净化能力。研究可为人工湿地的实际运行和处理效果提供理论依据。

**关键词:**人工湿地; 污染负荷; 水力负荷; 正交试验

中图分类号: X52

文献标识码: B

文章编号: 1007-7839(2021)06-0041-06

## Purification effect of constructed wetland under dual action of pollutant concentration and hydraulic load

GE Haoyu<sup>1,2</sup>, HUA Zulin<sup>1,2</sup>, SHEN Jian<sup>3</sup>, NIE Yongping<sup>3</sup>,  
NI Xiaoxin<sup>3</sup>, BAI Xue<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Integrated Regulation and Resource Department on Shallow Lakes,  
Ministry of Education, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. College of Environment, Hohai University, Nanjing 210098, China;

3. Jiangsu South-to-North Water Diversion Project Construction Leading Group Office, Nanjing 210029, China)

**Abstract:** Six emergent plants and two submerged plants were selected for laboratory experiments from West Dasha River Constructed Wetland Base in Xuzhou. The effluent of Kangda Sewage Treatment Plant in Fengxian County was sampled as experimental water to study the purification ability of aquatic plants in constructed wetland under different levels of pollution and hydraulic load conditions, which could provide a theoretical basis for practical operation and treatment effect of constructed wetland.

**Key words:** constructed wetland; pollution load; hydraulic load; orthogonal test

由于人工湿地管理简单、建造成本低等特点, 人工湿地已经成为尾水深度处理的主要工艺之一。湿地植物的选择应注重其生态适应能力和生态恢复功能, 因此需要结合当地气候、植物类型及其对氮磷等污染物的去除能力等因素来进行选择。目前, 学者们已经对湿地植物的去污效果进行了大量

研究, Chuluun B 等<sup>[1]</sup>研究了黄菖蒲等 21 种湿地植物对氮磷的去除, 发现黄菖蒲对氮磷的去除有显著效果; Goulet R 等<sup>[2]</sup>以香蒲为对象, 同样研究了其对氮磷的吸收能力, 发现香蒲能够显著降低氮磷浓度; Ezzahri J 等<sup>[3]</sup>研究了芦苇等 9 种湿地植物对氮磷的去除, 结果表明植物对氮元素有较高的吸收能

收稿日期: 2020-11-24

作者简介: 戈浩宇(1996—), 硕士研究生, 研究方向为土壤及地下水修复。E-mail: ghy19960@163.com

力,其主要依靠的是植物的吸收作用和微生物的硝化及反硝化作用;陈永华等<sup>[8]</sup>以生活污水为处理对象,对 17 种湿地植物的净化潜力进行了评价,并筛选出了粉美人蕉、再力花、千屈菜、梭鱼草等优势去污物种。另一方面,由于尾水的污染程度和水力负荷条件不同,导致湿地对污染物的净化能力有差异。王文东等<sup>[9]</sup>研究不同水力停留时间下,人工湿地对污染物的去除效果。发现随着水力停留时间的增大,人工湿地的净化效果越好。刘臻等<sup>[10]</sup>研究了不同的进水方式与污染物去除之间的关系,发现水力负荷也是影响人工湿地净化的重要影响因素。Chung 等<sup>[11]</sup>的研究表明,水力负荷对人工湿地的处理效果有着显著影响。本文结合大量文献报道和徐州当地气候条件及湿地植物资源,依据植物对氮磷的去除结果,选取了 6 种挺水植物系统和 2 种沉水植物作为供试植物,研究不同污染负荷对人工湿地污染物净化的影响,以期为选择人工湿地实际运行和处理效果提供理论依据和实践基础。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验装置和植物的选择

#### 1.1.1 试验装置

将 6 种挺水植物系统和 2 种沉水植物系统之间用蠕动泵连接起来,实现湿地运行时的微水动力条件。

#### 1.1.2 植物的选择

本研究选取的香蒲、再力花、芦苇、花叶芦竹、黄菖蒲、矮蒲苇 6 种挺水植物和苦草、伊乐藻 2 种沉水植物,其植物特征见表 1。

### 1.2 试验工况设计

#### 1.2.1 进水浓度条件

本文中的试验污水采自徐州丰县康达污水处理厂。具体污水浓度如表 2 所示。

#### 1.2.2 水力负荷设定

根据大沙河西湿地实际进水情况,选取 3 组最常见的流量作为湿地代表流量,计算各自的水力负荷。将湿地实际的水力负荷作为实验水力负荷,乘以桶的表面积,得单个桶在 3 种水力负荷下的流量,计算结果见表 3。其中,蠕动泵每天每运行 6 h 休息 2 h,即蠕动泵每天运行 18 h。

### 1.3 分析方法

为了筛选大沙河西人工湿地基地中对污染物去除效果较好的水生植物,对试验中各植物所处水体进行水样监测。具体监测指标、分析方法和仪器见表 4。

### 1.4 正交试验

正交试验是指安排多因素试验、寻求最优水平组合的一种高效率试验设计方法。其原理是利用正交表来安排和分析多因素试验的一种方法。即,在全部的水平组合中,挑选部分有代表性的水平进行试验的方法。通过对这部分试验结果的分析,了解全面试验的情况,找出最优的水平组合。为重点考察人工湿地结构因素的影响,选取污染物浓度和水力负荷作为正交设计因素,安排正交试验,见表 5。

## 2 结果与分析

### 2.1 对 COD 去除的影响

图 1 为各因素水平下 COD 的去除率。由图 1 可

表 1 供试植物性状特征

学名	科属	形态	生态习性类别
香蒲 <i>Typha orientalis</i>	香蒲科	根状茎乳白色,叶片条形,全株可达 1.3 ~ 2 m	挺水植物
再力花 <i>Thalia dealbata</i> Fraser	竹芋科	叶卵状披针形,复总状花序,全株可达 2 m	挺水植物
芦苇 <i>Phragmites communis</i>	禾本科	叶片披针状线形,全株可达 1 ~ 3 m	湿生/挺水植物
花叶芦竹 <i>Arundo donax</i> 'Versicolor'	禾本科	全株可达 1.5 ~ 2 m	挺水植物
黄菖蒲 <i>Iris pseudacorus</i> L.	天南星科菖蒲属	叶片剑状线性,具毛发状须根,全株可达 1 m	湿生/挺水植物
矮蒲苇 <i>Cortaderia selloana</i> 'Pumila'	禾本科	叶聚生于基部,圆锥花序大,全株可达 1.2 m	挺水植物
苦草 <i>Vallisneria spiralis</i> (Lour.) Hara	水鳖科苦草属	叶基生,线形或带形	沉水植物
伊乐藻 <i>Elodea nuttallii</i>	水鳖科水蕴藻属	叶片 3 枚轮生	沉水植物

表 2 试验污水各指标浓度

	$\rho(\text{COD})/$ ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	$\rho(\text{TP})/$ ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	$\rho(\text{TN})/$ ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	$\rho(\text{NH}_4^+-\text{N})/$ ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	$\rho(\text{NO}_3^--\text{N})/$ ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	$\rho(\text{NO}_2-\text{N})/$ ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )
低浓度	17	0.19	3.7	2	1.5	0.028
中浓度	35	0.35	8	3.5	3	0.5
高浓度	60	1	20	8	8	0.8

表 3 试验水力负荷及试验所需总水量

	大沙河西湿地实际流量 (最常见)/ ( $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ )	湿地实际水力负荷/ ( $\text{m}^3 \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ )	单桶流量	总体积/L
最小流量 Q1	400	0.09	8mL/min	42
中流量 Q2	750	0.17	15mL/min	79
最大流量 Q3	1300	0.29	25mL/min	136

表 4 监测指标、分析方法及所用仪器

序号	监测项目	分析方法	所用仪器
1	水温	现场快速测定	哈希溶氧仪 HQ3d
2	DO	现场快速测定	哈希溶氧仪 HQ3d
3	pH	现场快速测定	MIK-PH160 检测仪
4	COD	重铬酸盐法	标准 COD 消解器
5	TN	碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法	LDZX-50KBS 立式压力蒸汽灭菌器; 哈希 DR5000 分光光度计
6	$\text{NH}_4^+-\text{N}$	哈希纳氏试剂法	哈希 DR2800 分光光度计
7	$\text{NO}_3^--\text{N}$	HJ/T 346-2007 紫外分光光度法	哈希 DR5000 分光光度计
8	TP	GB11893-89 钼酸铵分光光度法	LDZX-50KBS 立式压力蒸汽灭菌器; 哈希 DR5000 分光光度计

表 5 正交试验因素水平

水平	因素	
	污染物质量浓度 $A/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	水力负荷 $B/(\text{m}^3 \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1})$
1	各指标对应的低浓度	0.09
2	各指标对应的中浓度	0.17
3	各指标对应的高浓度	0.29

知,随着水力负荷的增大,人工湿地系统对 COD 的去除率呈稳定趋势,而随着污染物浓度的增加,去除率逐渐稳定。其中,低浓度情况下,低、中、高水力负荷相对应的 COD 去除率分别为 33%、30%、

37%;中浓度情况下,低、中、高水力负荷相对应的 COD 去除率分别为 34%、37%、36%;高浓度情况下,低、中、高水力负荷相对应的 COD 去除率分别为 44%、40%、41%。可以看出,人工湿地对 COD 的去

除率总体较低,这是因为流进湿地的为经污水处理厂处理过的尾水,有机污染物组成情况复杂,难以处理且去除效果不稳定,但总的来说湿地植物的吸收、吸附作用、微生物的分解作用和基质的吸附作用,使湿地中 COD 的浓度逐渐降低。但是植物去除 COD 的能力有限,以至于改变水力负荷或污染物浓度都无法有效地增加 COD 的去除率。

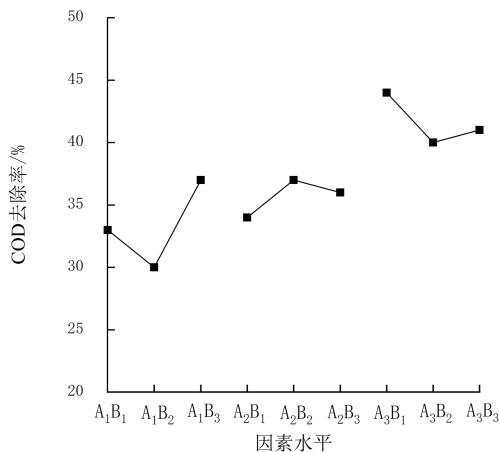


图1 各因素水平下 COD 的去除率

## 2.2 对 TP 去除的影响

图2为各因素水平下 TP 的去除率,由图可知,随着水力负荷的增大,人工湿地系统对 TP 的去除率呈递减趋势,而随着污染物浓度的增加,去除率逐渐增加,水力负荷是影响 TP 去除效果的主要因素。与张国珍等<sup>[12]</sup>研究不同的是,其中,低浓度情况下,低、中、高水力负荷相对应的 TP 去除率分别为 52%、48%、43%;中浓度情况下,低、中、高水力负荷相对应的 TP 去除率分别为 63%、58%、52%;高浓度情况下,低、中、高水力负荷相对应的 TP 去除率分别为 90%、80%、72%。低水力负荷条件下,TP 的去除率优于梁康等<sup>[13]</sup>研究,这是由于水力负荷较低时,来水在湿地中停留时间较长,能够与基质、植物充分接触,从而达到较好的除磷效果;中水力负荷条件下,水体的流速有所增加,对基质和植物根茎的冲击增大,使得基质和植物对 TP 的吸附量有所减少,但流速的加快有助于提高水体 DO 含量,使聚磷菌等氧化细菌在好氧条件下过量吸附一部分磷,故而中水力负荷与低水力负荷条件下,TP 的去除率相差不是很大;而高水力负荷条件下,污水的流速更大,冲击基质释放出的磷远多于微生物的过量吸收,导致 TP 去除率下降较明显。

## 2.3 对 TN 去除的影响

图3为不同水力负荷对人工湿地 TN 去除效果

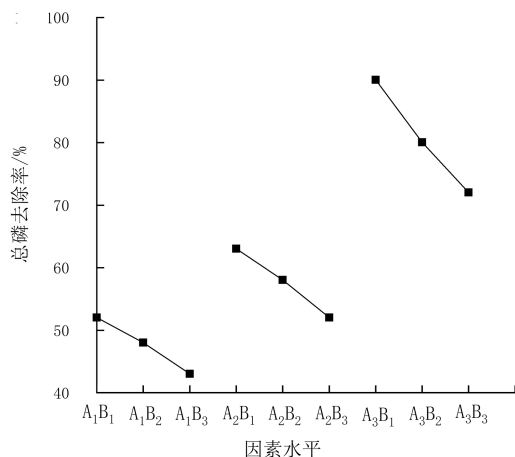


图2 各因素水平下 TP 的去除率

的影响图,由图可知,随着水力负荷的增大,人工湿地系统对 TN 的去除率呈递减趋势,而随着污染物浓度的增加,去除率逐渐增加,水力负荷是影响 TN 去除效果的主要因素。其中,低浓度情况下,低、中、高水力负荷相对应的 TN 去除率分别为 87%、85%、81%;中浓度情况下,低、中、高水力负荷相对应的 TN 去除率分别为 91%、88%、84%;高浓度情况下,低、中、高水力负荷相对应的 TN 去除率分别为 97%、96%、92%。TN 的去除率比闫晖敏等<sup>[14]</sup>研究的去除率要高,这是由于试验期为春夏季,正处于植物生长阶段,所需氮量较大,且此阶段温度适宜,微生物反应较强,再加上基质对 TN 的吸收,人工湿地系统对 TN 呈现出了很好的去除效果。在水力负荷较低时,来水在湿地中停留时间较长,能与基质、植物充分接触,使其吸附沉降效果增大,同时也能微生物提供充分反应的时间,因而除氮效果最好<sup>[15]</sup>;当水力负荷为中水力负荷时,水体的流速有所增加,对基质、植物根茎的冲击增大,使得基质、植物对 TN 的吸附量有所减少,但流速的加快有利于提高水体 DO 含量,使得硝化细菌的硝化作用得以较好的发生,故而中水力负荷与低水力负荷对去除率的影响不是很大;而高水力负荷条件下,其污水的流速更大,停留时间大幅缩短,使得硝化细菌和反硝化细菌不能有效地转化氮,导致 TN 去除率下降。

## 2.4 对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除的影响

图4为不同水力负荷对人工湿地  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  去除效果的影响图,由图可知,随着水力负荷的增大,人工湿地系统对  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  的去除率呈先上升后减小的趋势,而随着污染物浓度的增加,去除率逐渐增加,水力负荷是影响  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  去除效果的主要因素。其中,

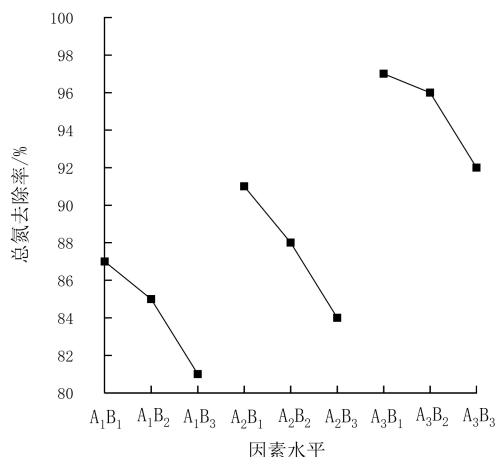
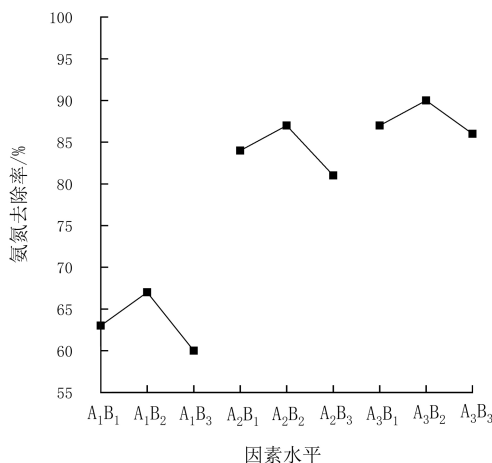


图3 各因素水平下TN的去除率

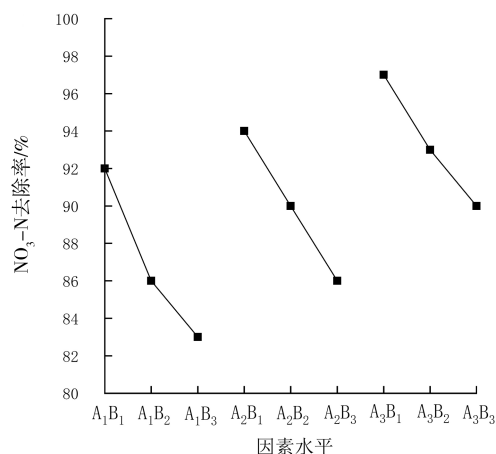
低浓度情况下,低、中、高水力负荷相对应的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除率分别为63%、67%、60%;中浓度情况下,低、中、高水力负荷相对应的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除率分别为84%、87%、81%;高浓度情况下,低、中、高水力负荷相对应的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除率分别为87%、90%、86%。对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除也优于闫晖敏等<sup>[14]</sup>研究,这是由于试验在桶内进行,与空气直接接触的水面面积有限,而空气富氧又是水体溶解氧富集的主要途径,故本试验中溶解氧含量较低,从而使得硝化细菌的硝化反应减弱,对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除效果一般。当水力负荷为中水力负荷时,水体流速比低水力负荷大,水中溶解氧含量有所增加<sup>[13,15]</sup>,硝化细菌的硝化作用有所增强,对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除效果比低水力负荷好;而高水力负荷情况下,水体流速进一步增加,虽然提高了水中溶氧含量,但较快的流速导致水体在湿地系统中的停留时间减少,污染物不能与微生物充分接触,使得去除率有所下降。

图4 各因素水平下 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除率

## 2.5 对 $\text{NO}_3\text{-N}$ 去除的影响

图5为不同水力负荷对人工湿地 $\text{NO}_3\text{-N}$ 去除效

果的影响图,由图可知,随着水力负荷的增加,人工湿地系统对 $\text{NO}_3\text{-N}$ 的去除率呈逐渐减小的趋势,而随着污染物浓度的增加,去除率逐渐增加,水力负荷是影响 $\text{NO}_3\text{-N}$ 去除效果的主要因素。其中,低浓度情况下,低、中、高水力负荷相对应的硝态氮去除率分别为92%、86%、83%;中浓度情况下,低、中、高水力负荷相对应的 $\text{NO}_3\text{-N}$ 去除率分别为94%、90%、86%;高浓度情况下,低、中、高水力负荷相对应的 $\text{NO}_3\text{-N}$ 去除率分别为97%、93%、90%。这同样是由于DO含量较低,而此时起作用的细菌主要是反硝化细菌,反硝化作用较强,因此对 $\text{NO}_3\text{-N}$ 有较好的去除效果<sup>[16-17]</sup>。当水力负荷为低水力负荷时,水体流速较小,停留时间较长,污染物与微生物接触时间充分,湿地系统对 $\text{NO}_3\text{-N}$ 的去除效果最好;而中、高水力负荷时,水体流速有所增加,水中溶氧含量提高,且水体在湿地中的停留时间较短,因此随着水力负荷的增加, $\text{NO}_3\text{-N}$ 的去除率呈下降趋势。

图5 各因素水平下 $\text{NO}_3\text{-N}$ 的去除率

## 2.6 对BOD去除的影响

图6为不同水力负荷对人工湿地BOD去除效果的影响图,由图可知,随着水力负荷的增加,人工湿地系统对BOD的去除率呈逐渐稳定的趋势,而随着污染物浓度的增加,去除率逐渐稳定。其中,低浓度情况下,低、中、高水力负荷相对应的BOD去除率分别为32%、36%、33%;中浓度情况下,低、中、高水力负荷相对应的BOD去除率分别为30%、39%、37%;高浓度情况下,低、中、高水力负荷相对应的BOD去除率分别为36%、41%、39%。这是因为流进湿地的为经污水处理厂处理过的尾水,有机污染物组成情况复杂,但总体来说在湿地植物的吸收、吸附作用、微生物的分解作用及基质的吸附作用下,湿地中BOD的浓度会下降<sup>[17]</sup>。

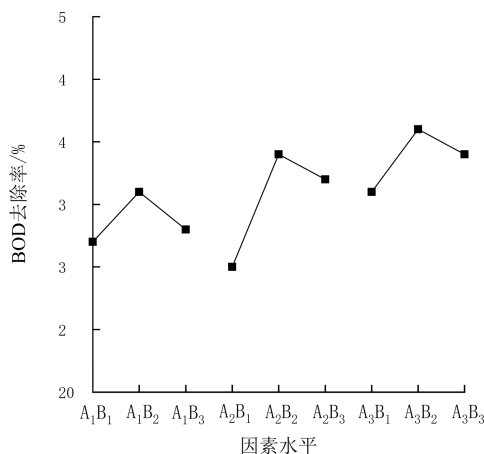


图 6 各因素水平下 BOD 的去除率

### 3 结 论

本研究通过室内动水试验和正交试验得出:随着水力负荷的增加,湿地污染物的去除基本呈递减趋势;水力负荷的大小是影响湿地去除污染物效果的主要因素;将水力负荷设置在  $0.09 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ ,人工湿地对污染物的净化效果最好。而污染物浓度越大,人工湿地对污染物的净化效果越好。这些可作为初步人工湿地的工艺参数,但还需要进行长期的观测、研究,优化结构参数和运行参数。尾水经湿地处理后,氮磷的浓度基本能达到地表Ⅲ类水要求,但湿地对 COD 和 BOD 的净化效果较差,但有一定的去除效果,其浓度总体上呈下降趋势。由此可以考虑在湿地系统前期人为投加相应的微生物,加强湿地对 COD 和 BOD 的去除效果。

#### 参考文献:

- [1] CHULUUN B, IAMCHATURAPAT R J, RHEE J S. Phytoremediation of organophosphorus and organochlorine pesticides by acorus gramineus[J]. Environmental Engineering Research, 2009, 14(4):144-151.
- [2] GOULET R R, PICK F R. The effects of cattails (Typha latifolia L.) on concentrations and partitioning of metals in surficial sediments of surface-flow constructed wetlands[J]. Water, Air, & Soil Pollution, 2001, 132(3):275-291.
- [3] EZZAHRI J, ENNABILI A, RADOUX M. Artificial eco-systems for wastewaters treatment under Mediterranean conditions (Morocco)[J]. Biological Diversity & Conservation, 2010, 3(2):145-150.
- [8] 陈永华, 吴晓芙, 蒋丽鹃, 等. 处理生活污水湿地植物的筛选与净化潜力评价[J]. 环境科学学报, 2008, 28(8):1549-1554.
- [9] WENDONG WANG, XIA WANG, JIE ZHENG, et al. Evaluation of the pollutant removal performance of the wetland built up in a modular-ized manner based on the hydraulic optimization[J]. Journal of Safety and Environment, 2018, 18(4):1473-1477.
- [10] ZHEN LIU, TAO LIU, JIAN ZHOU, et al. Influence of water feeding pattern on the nitrification efficiency of the deep sequencing constructed wetlands [J]. Journal of Safety and Environment, 2017, 17(4):1432-1436.
- [11] CHUNG A K, WU Y, TAM N F, et al. Nitrogen and phosphate mass balance in a sub-surface flow constructed wetland for treating municipal wastewater[J]. Ecological Engineering, 2008, 32(1):81-89.
- [12] 张国珍, 马凯, 薛彦茵, 等. 不同水力负荷下复合垂直-水平流人工湿地的污染处理效果分析[J]. 安全与环境学报, 2019, 19(6):2166-2175.
- [13] KANG LIANG, JUNJUN CHANG, FEIHUA WANG, et al. Purification effect and optimal hydraulic load of tail-water in vertical flow constructed wetland[J]. Lake Science, 2016, 28(1):114-123.
- [14] HUIMIN YAN, ZHIFEI QI, HUA CHENG, et al. Purification effect of combined verticalflow-horizontal flow combined artificial wetland on sewage[J]. Industrial Water and Wastewater, 2016, 47(6):39-43.
- [15] LIPING HE, YIWEN FAN, JING CHEN, et al. Analysis on removal effect of nitrogen-containing substances in constructed wetland[J]. Environmental Science and Technology, 2014, 37(增刊1):158-162.
- [16] 谭迪, 雷鸣, 龙九妹, 等. 运用无动力人工湿地分散式处理农村生活污水的研究[J]. 环境污染与防治, 2018, 40(4):455-459.
- [17] 吴建强. 潜流垂直流人工湿地污染物净化效果及耐污染负荷冲击能力研究[J]. 环境污染与防治, 2010, 32(7):39-43.