

## 不同季节人工湿地处理污水效果

华昇<sup>1</sup>, 陈浩<sup>1</sup>, 刘云国<sup>2\*</sup>, 田思溶<sup>2</sup>, 华权<sup>2</sup>

(1. 湖南省水利水电勘测设计研究总院, 湖南长沙 410000; 2. 湖南大学环境科学与工程学院, 湖南长沙 410012)

**摘要** 人工湿地是目前最自然、生态的处理废水技术。利用人工湿地植物、基质和微生物构成的生态系统, 处理废水中 COD、总氮、总磷和氨氮, 实现水质净化。通过连续一年野外试验发现, 不同时期对废水中污染物的去除效果有较大差别, 春夏季对污染物的去除效果好于秋冬季, 对不同污染物去除率也存在差异, 人工湿地的平均去除率呈现出总磷>总氮>氨氮>COD。此外, 美人蕉、菖蒲、铜钱草的耐淹性强, 长达 35 d, 在半淹状态下 90 d, 植物形态上与未淹时无明显的差别, 生长良好。该人工湿地造价和运行成本低, 单位水量投资成本约为 0.20 元/(t·d), 此人工湿地基本达到了净化水质、节约能源的目的。

**关键词** 人工湿地; 废水处理; 季节; 淹没

**中图分类号** X 703 **文献标识码** A

**文章编号** 0517-6611(2019)19-0068-05

**doi**: 10.3969/j.issn.0517-6611.2019.19.021



开放科学(资源服务)标识码(OSID):

### Effects of Constructed Wetland on the Wastewater Treatment in Different Seasons

HUA Sheng<sup>1</sup>, CHEN Hao<sup>1</sup>, LIU Yun-guo<sup>2</sup> et al (1. Hunan Hydro & Power Design Institute, Changsha, Hunan 410000; 2. College of Environmental Science and Engineering, Hunan University, Changsha, Hunan 410012)

**Abstract** Constructed wetland is the most natural and ecological wastewater treatment technology at present. In this paper, the ecosystem consisting of plants, substrates and microorganisms in constructed wetland system was used to remove COD, total nitrogen, total phosphorus and ammonia nitrogen in wastewater to achieve water purification. The field experiment for one year showed that the removal efficiency of pollutants in wastewater were varied greatly in different periods. The removal efficiency of pollutants in spring and summer was higher than that in autumn and winter. The removal efficiency of different pollutants was also varied. The average removal rate of constructed wetlands showed total phosphorus > total nitrogen > ammonia nitrogen > COD. In addition, *Canna indica*, *Acorus calamus* and *Strychnos nudicaulis* had strong waterlogging resistance for up to 35 days, in the semi-flooded state for 90 days, there was no significant difference in plant morphology from that in the non-submerged state, and the plant grew well. The construction and operation cost of the constructed wetland was low, and the investment cost per unit water was about 0.20 yuan/(t·d). This constructed wetland basically achieved the purpose of purifying water quality and saving energy.

**Key words** Constructed wetland; Wastewater treatment; Season; Flood

随着工农业发展迅速, 废水排放量骤增。目前处理废水主要靠污水处理厂, 其运行成本高, 管理运营复杂, 二级污水处理厂的基建投资费用为 1 500~2 000 元/t, 运行费用为 0.7~1.2 元/t<sup>[1]</sup>。在较为偏远的城镇区域, 产生的废水需要集中收集处理, 通过较高费用的管网收集系统, 转移至污水处理厂, 因此在远离市中心管网系统不完善的区域, 应采用便捷、经济、美化的方法处理废水。近年来, 人工湿地在我国逐渐被重视, 它具有基建投资费用低、运营低成本、管理维护方便、污染物去除效率高等特点, 如若选取合适的植物, 能达到净化水质与绿化观赏相融合的效果。

基质是人工湿地中重要组成部分, 对废水的净化有决定性的作用<sup>[2]</sup>。人工湿地中的基质去除水体中的污染物主要是通过吸收、吸附、过滤、络合、离子交换等作用实现<sup>[3-4]</sup>。基质能为微生物提供生存环境, 还能为植物生长提供载体, 植物根系能通过基质的空隙进行呼吸作用<sup>[5]</sup>。植物的生长状况、净化性能以及植物之间的协同作用对废水的净化和污染物的去除有重要作用, 植物根区为微生物生长和分解营养物质提供了场所和好氧环境。笔者选取了常见的效果较佳基质沸石、粉煤灰、石灰石及植物美人蕉、菖蒲、铜钱草为研究

对象, 研究人工湿地的净化能力。

### 1 材料与方法

**1.1 试验地概况** 选取桃子湖和靳江河 2 处进行试验。桃子湖位于长沙市天马山景区, 岳麓山脚下, 主要容纳周边居民生活用水, 作为景观娱乐用水, 执行水质Ⅳ类标准; 靳江河为湘江支流, 选取靳江河一部分作为研究对象, 作为生活饮用水源, 执行水质Ⅲ类标准。

**1.2 材料** 试验所用植物美人蕉 (*Canna indica*)、菖蒲 (*Acorus calamus*)、铜钱草 (*Strychnos nudicaulis*) 购自长沙市红星桃花村花卉市场。试验所用基质沸石 (zeolite)、石灰石 (limestone) 和活性炭 (activated carbon) 购自河南博旭环保公司, 粉煤灰 (flyash) 另购自电厂。采用具有透水不透泥的生态袋无纺布对基质和河体进行隔离<sup>[6]</sup>, 在水体充分流经基质的前提下保证基质组合的稳定性。

**1.3 试验装置** 试验区分为进水区、反应区和出水区, 试验装置如图 1 所示。进水区取 2.0 m×0.6 m×0.5 m 的矩形水道, 污水由进水区进入装置内, 进水区内部放置粉煤灰; 反应区挖取 5.0 m×1.0 m×0.5 m 的矩形水道, 并添加少量活性炭等具有强吸附力的物质, 在填料层上部预埋上一层填土, 将准备好的美人蕉、铜钱草和菖蒲种植在填土上层; 出水区用于承接由反应区渗出的水, 用以种植水草、水绵等植物, 并测试装置的 COD、总氮、总磷和氨氮浓度, 与此同时观察装置内植物的生长变化。

**基金项目** 国家自然科学基金面上项目 (41271332); 国家自然科学基金委创新群体项目 (51521006)。

**作者简介** 华昇 (1984—), 女, 湖南常德人, 工程师, 硕士, 从事水污染治理研究。\* 通信作者, 教授, 博士, 从事生态修复研究。

**收稿日期** 2019-05-13

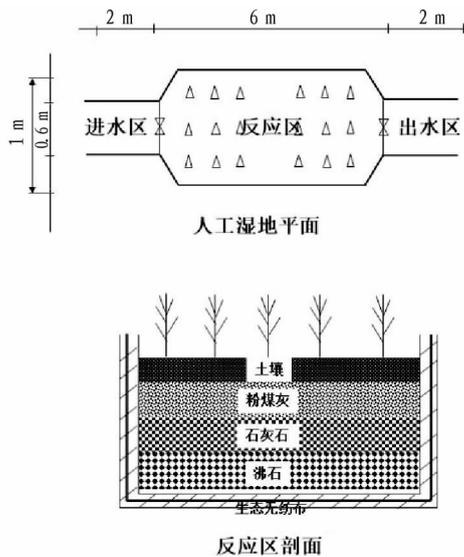


图1 试验装置  
Fig.1 Test device

**1.4 样品采集及测试** 试验周期为2018年3月—2019年2月,2018年3月为试运行期。试验期间定期测定水样中的COD、氨氮、总磷和总氮的浓度,同时,观察记录不同植物在不同季节的生存情况、耐淹程度等。

水样中的COD采用重铬酸钾法测定;氨氮采用纳氏试剂分光光度法测定;总磷采用钼酸铵分光光度法测定;总氮采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法测定。

## 2 结果与分析

### 2.1 人工湿地去除效果

**2.1.1 人工湿地对总氮的去除率。**由图2可知,人工湿地在连续1年中的不同时期对废水中总氮的去除效果有较大差别,废水经人工湿地处理后总氮含量有所下降。2个湿地系统总氮去除率随不同月份的变化趋势基本保持一致。桃子湖人工湿地的总氮去除效率略高于靳江河。夏季5—8月总氮去除率较高,桃子湖和靳江河人工湿地最高去除率分别达88.3%和77.9%,此阶段是微生物繁殖期,植物生长较快;秋冬季10月—次年2月总氮去除率效果较低,桃子湖和靳江河人工湿地最低去除率分别为2.8%和5.7%。

湿地系统中去除总氮的机理有挥发、硝化和反硝化、氨化、植物摄取和基质吸收等,硝化和反硝化是人工湿地系统除氮最常见途径。湿地系统也可通过多种机理联合作用达到高效去除总氮的效果。图2表明,4—8月春末和盛夏环境条件(气候、湿度等)适合湿地植物和微生物的生长繁殖及新陈代谢,保证人工湿地系统对废水中氮的去除;在10月—次年2月的秋末和冬季,气温低,美人蕉等湿地植物进入萎蔫、凋零状态,微生物也处在冬眠期,造成湿地系统去除废水中总氮能力下降。

**2.1.2 人工湿地对总磷的去除率。**从图3可以看出,桃子湖人工湿地在春冬季总磷去除率高于靳江河人工湿地,而在夏秋季出现相反的现象。从试验开始运行至9月,2处人工湿地去除总磷的效率处于较高水平,桃子湖和靳江河人工湿

地最高去除率分别达80.9%和72.7%;从10月开始,去除率明显下降,冬季的总磷去除率都处在较低水平,桃子湖和靳江河人工湿地最低去除率分别为25.0%和12.5%。2处人工湿地系统,春夏季总磷去除率优于秋冬季。

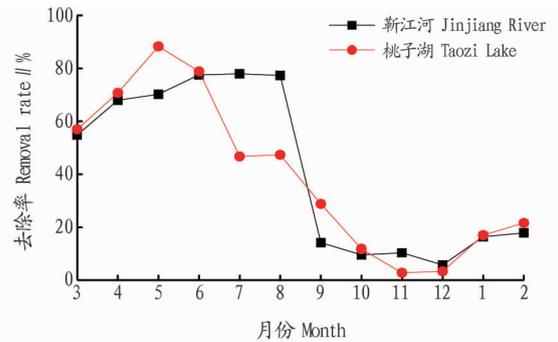


图2 靳江河和桃子湖人工湿地对废水中总氮去除效果  
Fig.2 Removal efficiency of total nitrogen from wastewater by constructed wetlands in Jinjiang River and Taozi Lake

人工湿地对废水中总磷的去除主要是通过基质的吸附作用和系统的过滤作用实现。从图3可以看出,人工湿地全年总磷去除率都处在较高水平,该试验采用粉煤灰作为基质上层的填料,可以达到较好的除磷效果。一年中,植物的生长情况对废水中磷的去除有较大影响,春夏季植物生长旺盛,对磷的吸收增加,可有效去除水中的无机磷酸盐,进入秋冬季,植物萎蔫,对废水中磷的吸附下降,植物体内磷元素被微生物分解、释放,使得总磷去除率降低<sup>[7]</sup>。

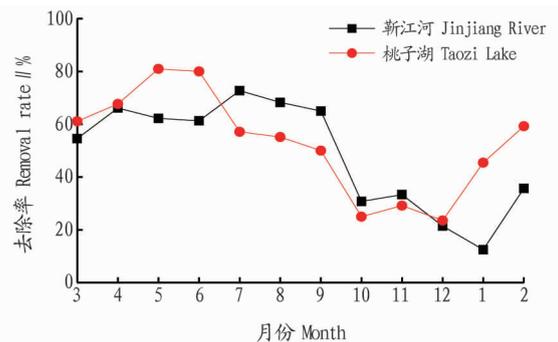


图3 靳江河和桃子湖人工湿地对废水中总磷去除效果  
Fig.3 Removal efficiency of total phosphorus from wastewater by constructed wetlands in Jinjiang River and Taozi Lake

**2.1.3 人工湿地对氨氮的去除率。**由图4可知,试验一整年过程中,桃子湖人工湿地氨氮去除率总体高于靳江河人工湿地。试验开始运行至8月,2处人工湿地氨氮的去除率呈上升趋势,氨氮去除率处在较高水平,桃子湖和靳江河人工湿地最高去除率分别达93.9%和83.0%;9月,氨氮去除率急速下降,一直到12月,氨氮去除率都处在较低水平,桃子湖和靳江河人工湿地最低去除率分别为10.6%和14.0%。2处人工湿地系统夏季氨氮去除效率最佳,优于春秋冬季。

人工湿地对氨氮的去除与去除总氮的机制类似,一部分是通过植物和基质的吸附和过滤作用,另一部分是微生物硝化和反硝化作用。氮元素作为植物的必需元素,吸收后,能促进植物生长。同时,氨氮也能通过微生物的分解作用达到

高效去除,氨氮经过硝化菌的硝化作用后生成 $\text{NO}_2^-$ 和 $\text{NO}_3^-$ ,硝酸盐再经过反硝化细菌的反硝化作用后形成 $\text{N}_2$ 或 $\text{N}_2\text{O}$ 从水中释放。秋冬季低温,硝化菌和反硝化菌活性降低,其作用随之减弱,造成湿地去除率降低。

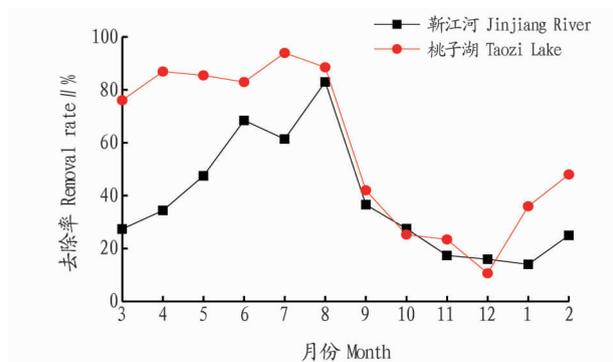


图4 新江河和桃子湖人工湿地对废水中氨氮去除效果

Fig. 4 Removal efficiency of ammonia nitrogen from wastewater by constructed wetlands in Jinjiang River and Taozi Lake

**2.1.4 人工湿地对COD的去除率。**从图5可以看出,试验一整年过程中,桃子湖人工湿地COD去除率总体高于新江河人工湿地。春夏季去除率高于秋冬季,秋季的去除率逐渐下降,而冬季逐渐上升。一整年COD的平均去除率在50%以下,桃子湖和新江河人工湿地最高去除率分别为63.3%和42.9%,在11月去除率达到最低值,最低去除率分别为7.1%和13.0%。

人工湿地系统对废水中COD的去除机制主要包括吸附、吸收和生物降解。菖蒲具有发达的根系,能高效地对不溶性有机物进行截留。废水经过人工湿地时,基质和植物会对废水中的不溶性有机物进行阻挡和截留,随着植物生长和微生物的繁殖,基质表面形成一层生物膜,不溶性有机物逐渐被湿地系统降解;可溶性有机物是通过植物根系吸附、基质吸收和微生物新陈代谢作用被去除<sup>[8-9]</sup>。春夏季是植物生长最为旺盛的季节,植物根系发达,生长较快,在此时期湿地植物根系的输氧作用也最强,能促进地下部分好氧微生物对有机物的降解。秋冬季温度较低,美人蕉凋零,植物根系的输氧作用降低,微生物活性降低,从而对水体中有机物的去除作用下降。

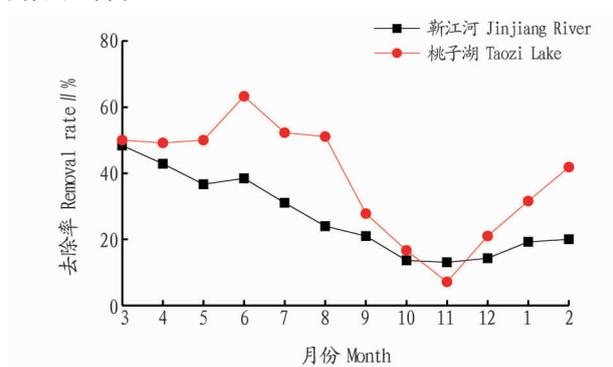


图5 新江河和桃子湖人工湿地对废水中COD去除效果

Fig. 5 Removal efficiency of COD from wastewater by constructed wetlands in Jinjiang River and Taozi Lake

## 2.2 人工湿地植物生长情况

**2.2.1 人工湿地植物不同时期生长情况。**图6是不同时期新江河人工湿地植物的生长状态。从图中可以看出,春季湿地系统运行初期,新江河湿地植物长期处于被淹没状态,美人蕉和菖蒲顶部呈绿色,露在水面上,美人蕉和铜钱草正常存活,表明试验植物的栽培存活率较高,能在河岸漫滩上正常生长。

夏季退水之后,所有湿地植物露出水面,美人蕉、菖蒲和铜钱草恢复生长,并生长迅速,生长量骤增,部分美人蕉在此时期开花。夏季降水较多,植物根茎部长期被水淹没,但植物仍正常生长,出水水质较好,表明所选植物长期处在被淹状态仍能维持正常生长,还能对水体中污染物进行去除。

秋初,新江河湿地植物仍然处在被淹没状态,秋末植物茎部才完全露出水面。退水之后,植物生长量下降,美人蕉、菖蒲逐渐萎蔫,铜钱草朝四周蔓延,生长较为旺盛。总体而言,秋季植物的吸收作用愈来愈低,吸收速度减慢,水体中各项污染物去除指标下降。

冬初,美人蕉基本枯萎,菖蒲仍有少数未枯萎,铜钱草仍正常生长,冬末,美人蕉、菖蒲、铜钱草基本都已萎蔫。植物死亡后,植株会释放氮、磷及有机物到人工湿地水体中,使得人工湿地出水中污染物质含量上升,人工湿地污染物去除率下降<sup>[10]</sup>。

图7是不同时期桃子湖人工湿地植物的生长状态。从图中可以看出,春季湿地植物逐渐生长,美人蕉正常生长,试验反应区内植物复苏,生长逐渐茂盛。春季是桃子湖污染最为严重的时期,从图中可以明显看到试验区域内水体呈浑浊状态,污染越严重,湿地植物生长越旺盛,说明湿地植物能对废水中氮、磷、有机物进行有效的吸收,促进植物体自身的生长。

夏初,湖区中心湿地植物生长速度快,生长较为旺盛,应对中心区域湿地植物进行打捞收割。夏季桃子湖进水水质比春季好,湿地植物正常生长,多数美人蕉在该季节开花。夏季降水较多,外部湖区水位上涨,人工湿地出水水质佳,污染物去除率较高,但由于外部湖区荷叶茂盛,水流流动性不强,造成外部湖区水质较试验区水质差。

秋季,湿地植物开始从四周往中心凋零、萎蔫,在秋季植物的吸收作用愈来愈低,吸收速度减慢,各类污染物去除率下降明显。进入冬季,湿地植物基本上都凋谢。植物死亡后,植株会释放氮、磷及有机物到人工湿地水体中,使得人工湿地出水中污染物质含量上升,人工湿地污染物去除率下降。进入秋冬季后,植物根部对基质中吸附截留的污染物同化吸收能力减弱,去除主要靠湿地基质的吸附、过滤和截留等物理作用,植物根系对微生物生存环境的改善作用和对湿地污染物的拦截能力减弱。

**2.2.2 人工湿地植物耐淹性。**不同淹水条件下,各种湿地植物的表现特征见表1。5月,水位一直处在全年较高水位,试验区内植物长期处于全淹状态,在此状态维持35d,湿地植物从正常生长,叶片逐渐开始萎蔫,至大部分叶片泛黄。

而当6月退水后,湿地植物又能继续恢复正常生长状态,叶、茎、根呈鲜绿色。7、8、9月降水多,河流水量较大,水位上升,

再次将湿地植物根茎部覆盖,维持半淹状态长达90 d,但美人蕉、菖蒲和铜钱草形态上与未淹时无明显差别。

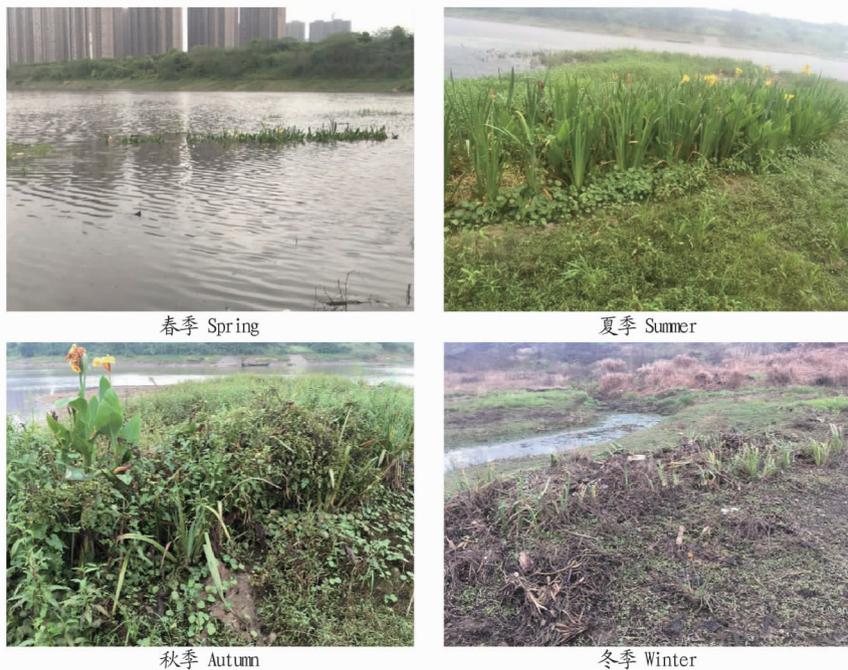


图6 不同时期靳江河人工湿地植物生长状态

Fig. 6 Plant growth status of Jinjiang River constructed wetland in different periods



图7 不同时期桃子湖人工湿地植物生长状态

Fig. 7 Plant growth status of Taotzi Lake constructed wetland in different periods

在淹水胁迫下,美人蕉、菖蒲和铜钱草有着较强的生理应激能力,完全能够适应在不同时期水位变化条件下的生长。菖蒲的根系较为发达,能够起到固土护坡的作用。同时,铜钱草绿叶周期长,美人蕉花期长,能够在很大程度上提升湿地的景观效应<sup>[11]</sup>。

主要贡献是削减水体中污染物含量,改善水质。该人工湿地单位水量投资成本为0.20元/(t·d),单位水量运行成本0.04元/(t·d)。人工湿地每年处理有机物的经济效益较高,1元能处理43.25g的有机物;其次是处理总氮和氨氮的经济效益,1元能处理9.70g的总氮,1元能处理4.70g的氨氮;处理总磷的经济效益较差,1元能处理0.66g的总磷。

2.3 主要经济指标 从经济角度分析,人工湿地对环境的

表1 淹水胁迫下湿地植物表现特征

Table 1 Apparent characteristics of wetland plants under flooding stress

湿地植物 Wetland plant	淹水状态 Flooding state	表现特征 Apparent characteristics
美人蕉 <i>Canna indica</i>	半淹	形态上与未淹时无明显的差别,生长良好
	全淹	全淹 15 d 时,植物能正常生长,且开出黄花;全淹 25 d,根底部的叶片开始出现萎蔫、凋零;全淹 35 d,叶片出现不同程度的萎蔫,叶片皱干,普遍泛黄
菖蒲 <i>Acorus calamus</i>	半淹	形态上与未淹时无明显的差别,生长良好
	全淹	全淹 15 d 时,植物能正常生长;全淹 25 d,叶片顶部开始出现萎蔫;全淹 35 d,叶片出现不同程度的萎蔫,整个植株叶片皱干,普遍泛黄
铜钱草 <i>Hydrocotyle chinensis</i>	半淹	形态上与未淹时无明显的差别,生长良好
	全淹	全淹 15 d 时,叶片表层附着一层薄薄的黏膜,很滑腻;全淹 25 d,少数叶片出现枯黄;全淹 35 d 叶片及茎部开始出现枯黄

### 3 结论

一年中,人工湿地的平均去除率呈现出总磷>总氮>氨氮>COD,春夏季去除 4 项指标的效率高于秋冬季。夏季湿地植物生长旺盛,微生物活性强;秋冬季植物逐渐枯萎、凋零,温度降低,微生物代谢减弱。

选取的 3 种湿地植物的耐淹性都较强,被水完全淹没 35 d 后,植物仍能正常生长,铜钱草生长繁殖速度最快。在半淹状态下 90 d,植物形态上与未淹时无明显的差别,生长良好。

该人工湿地造价和运行成本低,单位水量投资成本约为

0.20 元/(t·d),人工湿地每年处理有机物的经济效益较高,1 元能处理 43.25 g 的有机物。

试验采用人工湿地处理废水成本低,管理运行简单方便。在桃子湖和靳江河的应用结果显示,人工湿地处理后靳江河出水水质达水质Ⅲ类标准,桃子湖达水质Ⅳ类标准。人工湿地的应用已经达到了净化水质、节约能源的目的,实现了污染物低排放。

### 参考文献

- [1] 曹优明. 菖蒲人工湿地对城市生活污水的净化研究[J]. 环境污染与防治, 2010, 32(12): 54-58.
- [2] 黄勇, 董运常, 罗伟聪, 等. 人工湿地基质类型及其去污能力的影响因素[J]. 贵州农业科学, 2018, 46(1): 137-142.
- [3] YANG Y, WANG Z M, LIU C, et al. Enhanced P, N and C removal from domestic wastewater using constructed wetland employing construction solid waste (CSW) as main substrate[J]. Water science & technology, 2012, 66(5): 1022-1028.
- [4] SAEED T, AFRIN R, AL-MUYEED A, et al. Treatment of tannery wastewater in a pilot-scale hybrid constructed wetland system in Bangladesh[J]. Chemosphere, 2012, 88(9): 1065-1073.
- [5] 华昇, 陈浩, 刘志文, 等. 人工湿地处理废水机理浅析[J]. 湖南水利水电, 2018(6): 53-55.
- [6] 吴昌永. A<sup>2</sup>/O 工艺脱氮除磷及其优化控制的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.
- [7] 刘文杰, 许兴原, 何欢, 等. 4 种湿地植物对人工湿地净化生活污水的影响比较[J]. 环境工程学报, 2016, 10(11): 6317-6319.
- [8] 陈金发. 美人蕉和菖蒲人工湿地植物组合对高浓度畜禽废水的处理效果研究[J]. 家畜生态学报, 2015, 36(4): 40-43.
- [9] 薛彦茵. 复合垂直流-水平流人工湿地深度处理农村生活污水的实验研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2018.
- [10] 和丽萍, 陈静, 杨逢乐, 等. 季节变化及植物生长对人工湿地处理效率的影响[J]. 环境工程, 2014(S1): 221-224.
- [11] 张小璇, 谢三桃. 大水位变化条件下护坡植物耐淹性研究[J]. 现代农业科技, 2009(17): 260-262, 265.
- [12] 李春光. 基于 GIS 的武汉典型城乡交错带土壤养分空间变异研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2009.
- [13] 邵宁平, 刘小鹏, 渠晓毅. 银川湖泊湿地生态系统服务价值评估[J]. 生态学杂志, 2008, 27(9): 1625-1630.
- [14] 刘玉龙, 马俊杰, 金学林, 等. 生态系统服务功能价值评估方法综述[J]. 中国人口·资源与环境, 2005, 15(1): 91-95.
- [15] 杨维鸽. 基于 CA-Markov 模型和多层次模型的土地利用变化模拟和影响因素研究: 以陕西省米脂县高西沟村为例[D]. 西安: 西北大学, 2010.
- [16] 周锐, 苏海龙, 王新军, 等. 基于 CLUE-S 模型和 Markov 模型的城镇土地利用变化模拟预测: 以江苏省常熟市辛庄镇为例[J]. 资源科学, 2011, 33(12): 2262-2270.
- [17] 谢高地, 甄霖, 鲁春霞, 等. 一个基于专家知识的生态系统服务价值化方法[J]. 自然资源学报, 2008, 23(5): 911-919.
- [18] 谢高地, 张彩霞, 张雷明, 等. 基于单位面积价值当量因子的生态系统服务价值化方法改进[J]. 自然资源学报, 2015, 30(8): 1243-1254.
- [19] 谢高地, 肖玉, 甄霖, 等. 我国粮食生产的生态服务价值研究[J]. 中国生态农业学报, 2005, 13(3): 10-13.
- [20] 李胜利. 基于灰色系统理论的湖南省粮食产量预测研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2012.
- [21] 彭文甫, 周介铭, 杨存建, 等. 基于土地利用变化的四川省生态系统服务价值研究[J]. 长江流域资源与环境, 2014, 23(7): 1011-1020.
- [22] 董家华, 舒廷飞, 谢慧, 等. 城市建设用地生态服务功能价值计算与应用[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2007, 35(5): 636-640.

(上接第 47 页)

23.65 亿元, 林地和水体为贡献率最高的地类。到 2030 年, 衡阳市中心城区的耕地、林地、草地和未利用地面积呈下降趋势, 而建设用地和水体面积呈上升趋势。2030 年衡阳市中心城区的预测的生态系统服务价值总量为 21.94 亿元, 相比 2010 年下降了 1.71 亿元, 在未来新型的城镇化过程中, 衡阳市中心城区需要慎重权衡城市发展与生态保护的关系。

### 参考文献

- [1] 吴健生, 毛家颖, 林倩, 等. 基于生境质量的城市增长边界研究: 以长三角地区为例[J]. 地理科学, 2017, 37(1): 28-36.
- [2] 郑江坤, 余新晓, 贾国栋, 等. 密云水库集水区基于 LUCC 的生态服务价值动态演变[J]. 农业工程学报, 2010, 26(9): 315-320.
- [3] 刘彦随, 陈百明. 中国可持续发展问题与土地利用/覆被变化研究[J]. 地理研究, 2002, 21(3): 324-330.
- [4] 张凯, 冉圣宏, 田玉军, 等. 干旱区绿洲城市扩张对水资源的影响: 以石河子市为例[J]. 资源科学, 2011, 33(9): 1720-1726.
- [5] 吴绍华, 周生路, 潘贤章, 等. 城市扩张过程对土壤重金属积累影响的定量分离[J]. 土壤学报, 2011, 48(3): 496-505.
- [6] 王卿, 阮俊杰, 沙晨燕, 等. 人类活动对上海市生物多样性空间格局的影响[J]. 生态环境学报, 2012, 21(2): 279-285.