

DOI: 10.11931/guihaia.gxzw201701008

引文格式: 陈福坤, 张丽微, 陈雷, 等. 柊叶和象草波式潜流人工湿地的对比研究 [J]. 广西植物, 2018, 38(6): 755-761
CHEN FK, ZHANG LW, CHEN L, et al. Comparative research on wavy subsurface flow constructed wetland with *Phrynium capitatum* and *Pennisetum purpureum* [J]. *Guihaia*, 2018, 38(6): 755-761

柊叶和象草波式潜流人工湿地的对比研究

陈福坤^{1,2*}, 张丽微¹, 陈雷¹, 邓利¹

(1. 广西生态工程职业技术学院, 广西柳州 545003; 2. 广西春晖环保工程有限责任公司, 广西柳州 545003)

摘要: 为探索柊叶和象草在人工湿地中的应用及其净化机理, 该研究以柊叶和象草为人工湿地植物分别构建了波式潜流人工湿地系统, 分析了柊叶和象草波式潜流人工湿地对生活污水中 COD_{cr} 、TN 和 TP 的净化效果, 观察了柊叶和象草两种植物在不同季节的生长状况。结果表明: 经过 15 个月的连续运行, 在表面水力负荷约 $0.3 \text{ m} \cdot \text{d}^{-1}$ 的条件下, 柊叶和象草波式潜流人工湿地平均去除率是 COD_{cr} 分别为 66.1% 和 70.1%, TN 分别为 60.4% 和 63.7%, TP 分别为 74.1% 和 75.1%。两种植物生长良好, 根系发达, 象草的地上生物量是柊叶的 2.1 倍, 地下生物量相当; 冬季象草生长缓慢, 柊叶部分叶片的四周干枯, 但二者都不会枯亡。这说明两个人工湿地对 COD_{cr} 、TN 和 TP 都具有较好的去除效果, 但无显著性差异, 柊叶和象草能明显提高潜流人工湿地的净化效果。

关键词: 柊叶, 象草, 波式潜流人工湿地, 湿地植物, 净化效果

中图分类号: X52 文献标识码: A 文章编号: 1000-3142(2018)06-0755-07

Comparative research on wavy subsurface flow constructed wetland with *Phrynium capitatum* and *Pennisetum purpureum*

CHEN Fukun^{1,2*}, ZHANG Liwei¹, CHEN Lei¹, Deng Li¹

(1. *Guangxi Eco-engineering Vocational and Technical College*, Liuzhou 545003, Guangxi, China; 2. *Guangxi Chunhui Environmental Engineering Co., Ltd*, Liuzhou 545003, Guangxi, China)

Abstract: By building wavy subsurface flow constructed wetland with *Phrynium capitatum* and *Pennisetum purpureum* as artificial wetland plant, we studied the growth characteristics of *Phrynium capitatum* and *Pennisetum purpureum*, the purification effects of COD_{cr} , total nitrogen (TN) and total phosphorus (TP) in domestic sewage by wavy subsurface flow constructed wetland. The results after fifteen months of continuous running showed that under a condition of hydraulic

收稿日期: 2017-10-12

基金项目: 柳州市科学研究与技术开发计划项目(2015J010501); 广西生态工程职业技术学院科学研究与技术开发项目(201103A) [Supported by Liuzhou Science Research and Technology Development Program (2015J010501); Science Research and Technology Development Program of Guangxi Eco-engineering Vocational and Technical College(201103A)]。

作者简介: 陈福坤(1981-), 男, 福建龙岩人, 硕士, 讲师, 工程师, 主要研究方向为污水生化处理和土地处理技术, (E-mail) 550717962@qq.com。

* 通信作者

surface loading for around $0.3 \text{ m} \cdot \text{d}^{-1}$, the average removal rate of them were 66.1% and 70.1% (COD_{cr}), 60.4% and 63.7% (TN), 74.1% and 75.1% (TP). Both plants grew well, the roots were well developed, the aboveground biomass of *P. purpureum* was 2.1 of *Phrynium capitatum*, and the underground biomass was quite the same. The growth of *P. purpureum* was slow in the winter, and the part of leaves were dry around with *Phrynium capitatum*, but they would not wither in winter. The results showed that they had a good purification effect on COD_{cr} , TN and TP without significant difference. *Phrynium capitatum* and *Pennisetum purpureum* can significantly improve the purification effect of subsurface flow constructed wetland.

Key words: *Phrynium capitatum*, *Pennisetum purpureum*, wavy subsurface flow constructed wetland, wetland plant, purification effect

自 20 世纪 70 年代以来,人工湿地的研究和应用得到了快速发展(陈长太等,2003)。由于具有投资及运行费用低、运行管理方便、处理效果好、景观生态相容性好、较好的生态环境效益等诸多优点(胡世琴,2017),所以已广泛应用于生活废水、工业污水、富营养化湖水、养猪废水等的处理中(高红杰等,2010)。

湿地植物的选择和净化机理是人工湿地研究的重点之一。人工湿地去除污染物的机理相当复杂,其中湿地植物起着非常重要的作用(袁东海等,2009);湿地植物不仅能吸收同化污水中的营养元素,富集重金属等其它有害物质(胡世琴,2017),而且发达的根系能为微生物提供巨大的物理表面,同时向根部和根际输氧,创造有利于污染物去除的好氧、缺氧和厌氧的根际微环境,提高根际微生物种群数量,有利于根际的氧化还原反应(梁雪等,2012);另外,植物发达的根系能增加填料的疏松度,提高湿地床的透水性(谢龙和汪德耀,2009)。因此,选择合适的人工湿地植物尤为重要。近年来诸多学者对美人蕉(*Canna indica*)(盛辛辛等,2013)、芦苇(*Phragmites australis*)(王萌等,2010)、风车草(*Cyperus alternifolius*)(靖元孝等,2002)、香根草(*Vetiveria zizanioides*)(杨林等,2011)和再力花(*Thalia doalбата*)(石雷和杨璇,2010)等水生植物人工湿地的净化效果、机理和影响因素开展了较多的研究,但有关柊叶和象草在人工湿地中的应用研究鲜见报道。本研究以柊叶(*Phrynium capitatum*)、象草(*Pennisetum purpureum*)为湿地植物构建波式潜流人工湿地系统,研究它们对生活污水中 COD_{cr} 、TN 和 TP 的去除效果,观察柊

叶和象草不同季节的生长情况,并探索了净化机理,为柊叶和象草在华南地区作为人工湿地植物提供参考和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 人工湿地的构建

1.1.1 波式潜流人工湿地的设计 在本学院排污口附近构建两个波式潜流人工湿地床(Wavy Subsurface Flow Constructed Wetland, 简称 W-SFCW),详见图 1。编为 1 号床和 2 号床,每个湿地床设布水区、湿地床层和集水区。每个湿地床长 3 m,宽 1 m,深 0.7 m,床底坡度 $i=0.01$,其中布水区 0.25 m,集水区 0.25 m。湿地床层的进水和出水处设 1 cm 厚的穿孔隔板,有利于均匀布水。湿地床层设 2 个导流板(与水平方向成 45 度角),导流板使污水呈波式流态,污水多次经过湿地内部具有不同处理特性的构造层,达到增强污水净化效果的目的(何成达等,2004)。床体填料为 50 cm 厚的建筑碎石层(直径 0.5~1.5 cm)和 10 cm 的土壤表层,总厚度为 60 cm。

1.1.2 湿地植物 柊叶是竹芋科,象草是禾本科、黍族多年生丛生大型草本植物,两种植物在亚洲南部分布极广,用途较多。柊叶的叶片较大,晾干可用于包裹物品,也可入药;象草是优良牧草,经济价值极高,应用前景也十分广阔(温晓娜等,2009)。

1 号床种植柊叶,柊叶采自学院标本园,从母株中挖取植株作为种苗,每苑 2 个地上茎,修剪为 25 cm 高,种植间隔为 30 cm × 30 cm。2 号床种植

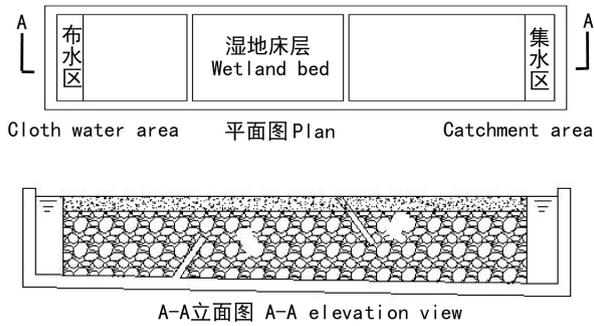


图 1 W-SFCW 示意图
Fig. 1 Diagram of W-SFCW

象草,象草采自学院附近农户种植地,采用扦插种植,选择生长在 100 d 以上的粗壮、无病虫害的茎秆作种茎,按 3 节切成一段,扦插间隔为 20 cm × 20 cm。栽植后每天进污水 1 h, 30 d 后开始连续进水,一方面有利于植物逐渐适应污水,另一方面培养填料表面的生物膜。

1.1.3 工艺流程 首先,污水经格栅进入集水池(长宽高为 1.2 m × 1.2 m × 1.0 m);然后,经提升泵进入好氧塘(长宽高为 2.0 m × 2.0 m × 1.8 m)进行预曝气;最后,通过 PVC 管流入 1 号床和 2 号床,W-SFCW 工艺流程见图 2。

1.2 人工湿地的运行

试验污水取自学院的生活污水,植物栽植后每天进污水 1 h,30 d 后开始连续进水,1 号和 2 号床以相同水力负荷运行(表面水力负荷约为 0.3 m · d⁻¹)。2014 年 3 月 2 日种植柞叶和象草,4 月 1 日开始连续进水,从 4 月 15 日至 2015 年 7 月约半个月监测一次数据,系统进水水质见表 1。

1.3 分析测试

1.3.1 水质分析方法 COD_{cr}采用 COD 测定仪消解—滴定法。TN 采用碱性过硫酸钾消解—紫外分光光度法。TP 采用钼酸铵分光光度法。

1.3.2 植物分析方法 株高:每个湿地床选择 5 个典型单株做好标记,每个月测量一次单株高度,取平均值作为湿地植物的平均株高。杆径:在收割时,对选择的 5 个典型单株测量杆径(离地 20 cm 测量),取平均值作为湿地植物的平均杆径。生物

表 1 W-SFCW 进水水质情况
Table 1 Influent quality of W-SFCW

水质参数 Water quality parameter	COD _{cr} (mg · L ⁻¹)	TN (mg · L ⁻¹)	TP (mg · L ⁻¹)	pH	DO
范围 Range	82~189	13~41	1.8~4.9	6.9~8.1	1.8~3.6
平均值 Average	131	30	3.3		

量;选择具有代表性样地 0.5 m²,挖取样地中的柞叶和象草,将地上部分和地下部分用自来水洗净分离,70 ℃烘干至恒重,称量,计算出每平方米的生物量。生长状况:观测柞叶和象草不同季节的生长情况,挖取典型柞叶和象草的根系,观测根系分布、组成和粗细。

2 结果与分析

2.1 柞叶、象草的生长状况

由于低温会影响大部分水生植物的生长,因此水生植物人工湿地冬季处理效果普遍较差(冯琳,2009)。近五年来,柳州城区 3—11 月间,平均气温为 15~29 ℃,12 月至次年 2 月平均气温为 10~13 ℃,极端低温为 0 ℃。本研究持续 15 个月,时间横跨一年四季,能更好的研究柞叶和象草在 W-SFCW 的生长状况。

柞叶和象草株高增长情况如图 3 所示,3—11 月柞叶和象草的月均生长高度分别为 14.6 cm 和 31.28 cm,象草株高生长速度极显著高于柞叶($P < 0.01$),而 12 月至次年 2 月两种植物株高增加都很小。进入冬季后,50%~60%柞叶叶片的四周出现干枯,但叶片中间呈绿色;象草叶片没有干枯,可常绿过冬,几乎所有的象草都开花结果;说明温度大于 10 ℃时,两种植物生长较快,冬季两种植物生长缓慢。经过 1 a 的生长,两种植物生物量增加放缓,因此于 2015 年 3 月对两种植物进行了收割,经测量柞叶和象草的杆径分别为 7.6 和 21.1 mm,象草的杆茎是柞叶的 2.8 倍;柞叶和象草的株高分别为 1.16 和 2.24 m,象草的株高是柞叶的 1.9 倍。

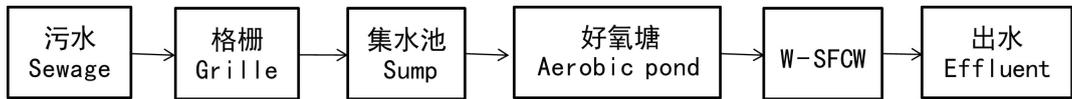


图2 W-SFCW 工艺流程

Fig. 2 Technological process of W-SFCW

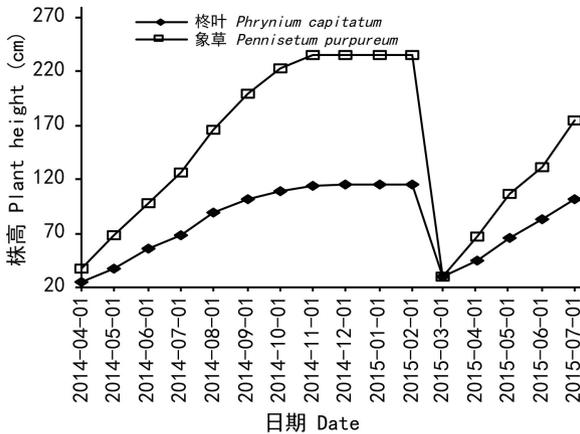


图3 柘叶和象草株高

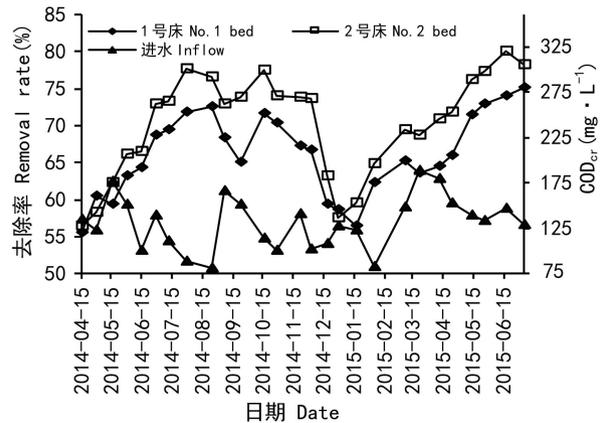
Fig. 3 Plant heights of *Phrynium capitatum* and *Pennisetum purpureum*

2015年7月,观察样地中挖出的所有柘叶和象草,发现柘叶根系主要分布在表层20 cm以上,根茎发达,须根短但多,须根上生长大量的短细根毛;而象草根系主要分布在表层30 cm以上,根茎发达,但较细,须根相对少一些,但须根和根毛都较细长。柘叶和象草的地上生物量(干质量)分别为1 320和2 719 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$,象草的地上生物量是柘叶的2.1倍,柘叶和象草的地下生物量(干质量)分别为872和901 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$ 。可见,象草的地上生物量显著大于柘叶,更有利于污染物的吸收去除。两种植物的地下生物量相当,但由于象草的根系较细长,可以判断象草比表面积较大,能为微生物生长提供更多的附着面积,更有利于微生物的生长。

2.2 COD_{cr} 的去 除

COD_{cr} 进水浓度和去除率如图4所示,1、2号床 COD_{cr} 平均出水分别为44.8 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和39.3 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$,平均去除率分别为66.1%和70.1%,其中

2号床去除率比1号床略高4.0%,2号床对 COD_{cr} 的净化效果略好。

图4 COD_{cr} 去除率和进水浓度Fig. 4 Removal rate and influent concentration of COD_{cr}

在7月以前,1、2号床 COD_{cr} 的去除率始终处于上升的过程,研究认为主要是基质和根区的降解性微生物处于增长期,还未形成稳定的微生物种群;其次,初期柘叶和象草的根茎生物量较小,还处于一个快速增长期,植物的作用逐渐增强。湿地系统稳定后,温度较高的7—11月,1、2号床平均去除率分别为69.5%和74.7%,2号床略高,研究认为主要是因为象草的地上生物量显著高于柘叶。温度较低的12月至次年2月,1、2号床平均去除率分别为60.7%和63.7%,相比7—11月分别下降8.8%和11.0%,研究认为主要是因为低温影响了微生物种群的活性;另外,柘叶受低温的影响,50%~60%叶片四周出现干枯,而象草开花结果,生长正常,但生长缓慢,使得系统对有机污染物的去除率明显下降。

1、2号床对有机污染物都有较好的去除效果,

在 W-SFCW 中, 有机物传质附着在基质表面、植物茎部和根区的生物膜上, 被微生物降解或植物吸收(冯琳, 2009)。分析认为: (1) 预曝气增加了湿地进水的溶解氧, 平均达到 $2.9 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 有利于有机物的氧化去除。(2) 两种植物的地下生物量相当, 茎和根的输氧和泌氧作用使得根区附近依次形成好氧区、缺氧区、厌氧区, 有利于有机物的去除(冯琳, 2009)。(3) W-SFCW 的波式流态基本使所有水流反复处于好氧-缺氧-厌氧状态, 类似于 A^2/O 工艺, 有利于有机物的去除(何成达等, 2004)。(4) 进水 COD_{cr} 负荷波动较大, 说明系统的抗冲击负荷能力较强。

2.3 TN 的去除

TN 进水浓度和去除率如图 5 所示, 1、2 号床 TN 平均出水分别为 11.7 和 $10.8 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 平均去除率分别为 60.4% 和 63.7% , 其中 2 号床去除率比 1 号床略高 3.3% , 2 号床对 TN 的净化效果略好。

在 7 月中旬以前, 1、2 号床 TN 的去除率始终处于上升的过程, 研究认为主要是基质和根区的硝化菌和反硝化菌处于增长期。3—7 月温度逐渐增加, 温度越高越有利于硝化和反硝化(靖元孝等, 2002)。另外, 两种植物的生物量处于快速增长期, 对 N 的吸收逐渐增多, 同时根区的输氧作用也逐渐增强, 有利于氮的硝化(刘春常等, 2005)。湿地系统较稳定后, 在温度较高的 7—11 月, 1、2 号床平均去除率分别为 64.8% 和 69.1% , 2 号床略高 4.3% , 研究认为主要是象草的生物量明显高于柞叶。2 号床中象草的根系分布较深, 根据植物泌氧作用, 2 号床的好氧区体积会略大一些, 更有利于氮的硝化。温度较低的 12 月至次年 2 月, 1、2 号床平均去除率分别为 49.0% 和 50.0% , 两者几乎无差异, 但相比 7—11 月分别下降了 15.8% 和 18.8% , 分析认为低温使柞叶和象草生长缓慢, 植物吸收作用减弱, 此时 N 的去除主要依靠硝化和反硝化, 而且低温环境下植物根系的泌氧作用很小(易乃康等, 2016), 使得植物向土壤输送的溶解氧极小, 湿地中的好氧区缩小, 不利于氮的硝化。此外, 低温严重影响了硝化菌和反硝化菌的活性(杨林等, 2011), 使得冬季人工湿地脱氮的效果显著下降。7—8 月进水 TN 浓度低于 $9 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 但

1、2 号床去除率均较其它月份高, 分析认为夏季高温是硝化和反硝化的最佳温度(张政等, 2006), 非常有利于 N 的去除。虽然进水 COD_{cr} 较低, 但 COD/TN 比值大于 5, 加上基质中原先截留的有机物能为反硝化提供充足的碳源(连小莹等, 2008); 另外, 夏季两种植物生长旺盛。

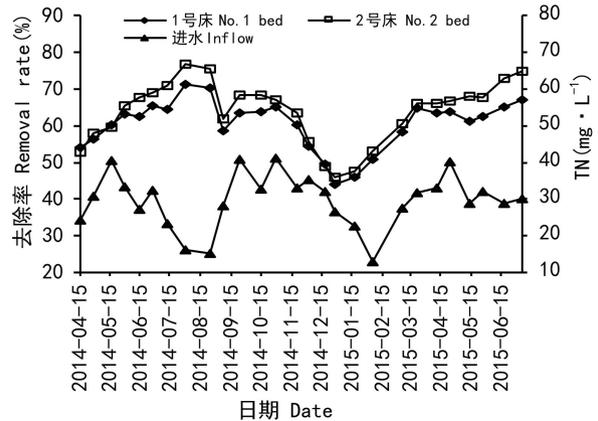


图 5 TN 去除率和进水浓度

Fig. 5 Removal rate and influent concentration of TN

1、2 号床对 TN 都有较好的去除效果, 人工湿地脱氮的机理主要包括微生物的硝化-反硝化脱氮、湿地植物的吸收、基质的截留吸附和氨的挥发(张政等, 2006)。Gottschal et al(2007)认为根据植物的种类和设计参数, 植物对 N 的吸收占湿地 TN 去除的 $3\% \sim 47\%$ 。从图 5 可以看出, 虽然柞叶和象草的生物量相差显著, 但是两个湿地脱氮的效果差异不明显, 说明硝化、反硝化作用才是脱氮的最主要途径。一般在潜流型人工湿地中, 植物根系基本分布在表层, 由于植物根系输氧泌氧和大气复氧的作用, 好氧区主要分布在植物根系的附近和人工湿地的浅层, 故厌氧、缺氧区体积大于好氧区体积, 使得硝化作用成为脱氮的限制因子(Antoniou et al, 1990); 而 W-SFCW 的波式流态使水流能把氧带到离表面更深的区域, 有效增加好氧区体积, 有利于氮的硝化, 同时波式流态使水流反复处于好氧-缺氧-厌氧状态, 污水中的氮反复进行硝化和反硝化(冯琳, 2009), 更有利于 TN 的去除。

2.4 TP 的去除

TP 进水浓度和去除率如图 6 所示, 1、2 号床

TP 平均出水分别为 $0.87 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $0.83 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 平均去除率分别为 74.1% 和 75.1%, 其中 2 号床去除率比 1 号床略高 1.0%, 差异很小。

研究表明, 1、2 号床对 TP 的去除率都稳定在 70% 以上, 未见较大的波动, 系统运行初期也未出现类似于 COD_{cr} 和 TN 去除率逐渐升高的过程。温度较高的 7—11 月, 1、2 号床平均去除率分别为 77.9% 和 79.3%; 温度较低的 12 月至次年 1 月, 1、2 号床平均去除率分别为 71.0% 和 72.1%。温度虽然影响了植物的生长和微生物的活性, 但对 TP 的去除影响并不显著。通过统计发现, 1、2 号床 2015 年 4—7 月 TP 平均去除率比 2014 年 4—7 月分别下降了 3.2% 和 1.7%。植物生物量增大和微生物种群稳定的情况下 TP 去除率反而下降, 说明湿地床经过一年的运行后, 基质中 Ca、Fe 等离子逐渐减少, 基质对磷的吸附沉淀作用逐渐减弱。以上说明柞叶和象草对 P 的吸收并不是该湿地除磷的主要途径。

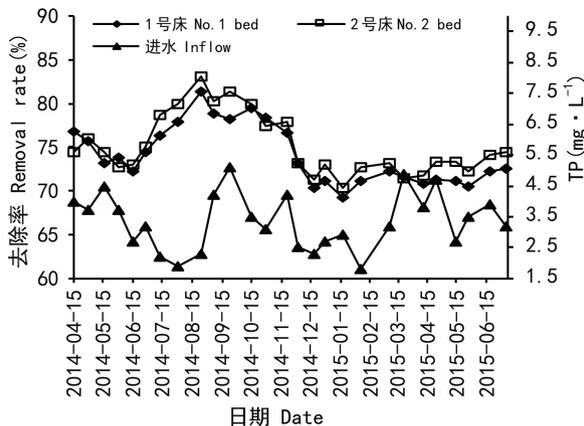


图 6 TP 去除率和进水浓度

Fig. 6 Removal rate and influent concentration of TP

人工湿地除磷的机理主要包括基质的吸附沉淀作用、植物的吸收作用和微生物的转化吸收作用(刘霄等, 2011)。从图 6 可以看出, 虽然柞叶和象草的生物量相差显著, 但两个湿地除磷的效果差异很小, 而且温度对除磷的影响也并不显著, 说明植物吸收和微生物吸磷的量比较有限, 基质的吸附沉淀作用才是除磷的主要途径。本研究的湿地填料(建筑碎石, 主要是石灰岩)含有大量 Ca、

Fe 等离子, 它们可与磷酸生成不溶物沉积下来, 说明以石灰岩为填料的 W-SFCW 可以达到较好的除磷效果。

3 结论

(1) 在相同试验条件下, 柞叶和象草波式潜流人工湿地平均去除率分别为 COD_{cr} , 66.1% 和 70.1%; TN, 60.4% 和 63.7%; TP, 74.1% 和 75.1%; 两者对以上污染物都具有较好的去除效果。

(2) 湿地床建成初期, 有机物和总氮的去除率会随着柞叶、象草生物量的增加而增加, 可见柞叶和象草能明显提高人工湿地系统的净化效果。

(3) 柞叶和象草都能很好的适应潜流人工湿地环境, 生长茂盛, 根系发达, 柞叶株高可达 1.3 m, 象草株高可达 2.5 m, 象草地上生物量显著大于柞叶; 在 $0 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上二者都可安全过冬, 但象草更耐寒; 在华南地区, 两种植物都可以作为人工湿地植物。

参考文献:

- ANTONIOU P, HAMILTON J, KOOPMAN B, et al, 1990. Effect of temperature and pH on the effective maximum specific growth rate of nitrifying bacteria [J]. *Water Res*, 24(1): 97-101.
- CHEN CT, WANG X, QI JY, 2003. Application and research development of constructed wetland technology in foreign countries [J]. *Chin Wastew*, 19(3): 105-106. [陈长太, 王雪, 祁继英, 2003. 国外人工湿地技术的应用及研究进展 [J]. *中国给水排水*, 19(3): 105-106.]
- FENG L, 2009. Progress of study on the degradation mechanism of organic pollutants in subsurface flow constructed wetland [J]. *Ecol Environ Sci*, 18(5): 2006-2010. [冯琳, 2009. 潜流人工湿地中有机污染物降解机理研究综述 [J]. *生态环境学报*, 18(5): 2006-2010.]
- GAO HJ, PENG JF, SONG YH, et al, 2010. Performance of circular flow constructed wetland (CFCW) stuffed with natural Ca-form zeolite saturated with ammonium for simulated swine wastewater treatment [J]. *Environ Prot Sci*, 36(6): 14-16. [高红杰, 彭剑峰, 宋永会, 等, 2010. 铵饱和和天然钙型沸石基质人工湿地对模拟养猪废水的处理效能 [J]. *环境保护科学*, 36(6): 14-16.]
- GOTTSCHALL N, BOUTIN C, CROLLA A, et al, 2007. The role of plants in the removal of nutrients at a constructed wet-

- land treating agricultural (dairy) wastewater, Ontario, Canada[J]. *Ecol Eng*, 29: 154-163.
- HE CD, TAN L, GE LY, et al, 2004. Application of wavy subsurface constructed wetland in treating domestic sewage [J]. *J Agro-Environ Sci*, 23(4): 766-769. [何成达, 谈玲, 葛丽英, 等, 2004. 波式潜流人工湿地处理生活污水的试验研究 [J]. *农业环境科学学报*, 23(4): 766-769.]
- HU SQ, 2017. Research on domestic sewage purification efficiencies of plants and N, P accumulation in biomass in constructed wetland [J]. *Res Soil Water Conserv*, 24(1): 200-206. [胡世琴, 2017. 人工湿地不同植被净化污水效果及其氮磷累积研究 [J]. *水土保持研究*, 24(1): 200-206.]
- JING YS, CHEN ZP, YANG DJ, 2002. Purifying efficiency of *Syperus alternifolius* domestic sewage and its application in constructed wetland [J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 8(6): 614-617. [靖元孝, 陈兆平, 杨丹菁, 2002. 风车草对生活污水的净化效果及其在人工湿地的应用 [J]. *应用与生物环境学报*, 8(6): 614-617.]
- LIAN XY, LI XN, XIE XF et al, 2008. Influence of C/N and nitrogen source type on denitrification effect in the subsurface flow constructed wetland [J]. *Electric Power Technol Environ Prot*, 24(2): 27-29. [连小莹, 李先宁, 谢祥峰, 等, 2008. C/N及氮源形式对潜流式人工湿地脱氮效果的影响 [J]. *电力环境保护*, 24(2): 27-29.]
- LIANG X, HE F, XU D, et al, 2012. Plant function and selection for constructed wetlands [J]. *J Hydroecol*, 33(1): 131-138. [梁雪, 贺锋, 徐栋, 等, 2013. 人工湿地植物的功能与选择 [J]. *水生态学报*, 33(1): 131-138.]
- LIU CC, XIA HP, JIAN SG, et al, 2005. A case study on domestic wastewater treatment in Shiyanhe constructed wetland in Shenzhen [J]. *Ecol Environ*, 14(4): 536-539. [刘春常, 夏汉平, 简曙光, 等, 2005. 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*, 14(4): 536-539.]
- LIU X, HUANG SL, TANG THZ, et al, 2011. Growth characteristic and nitrogen phosphorous accumulation ability of artificial wetland plants [J]. *J Water Resour Water Eng*, 22(5): 1-5. [刘霄, 黄岁樑, 唐婷芳子, 等, 2011. 人工湿地植物生长特性及其对氮磷富集能力研究 [J]. *水资源与水工程学报*, 22(5): 1-5.]
- SHENG XX, CAO JL, ZHAO FQ, et al, 2013. Purification effects of reeds, canna and coleus in constructed wetland on reclaimed water [J]. *J Hunan Agric Univ (Nat Sci Ed)*, 39(4): 423-428. [盛辛辛, 曹谨玲, 赵凤岐, 等, 2013. 芦苇和美人蕉及薄荷用作人工湿地植物对中水的净化效果 [J]. *湖南农业大学学报(自然科学版)*, 39(4): 423-428.]
- SHI L, YANG X, 2010. Phytomass and its impact on the pollutant removal ability of constructed wetland [J]. *Ecol Environ Sci*, 9(1): 28-33. [石雷, 杨璇, 2010. 人工湿地植物量及其对净化效果影响的研究 [J]. *生态环境学报*, 19(1): 28-33.]
- WANG M, WANG YB, CHEN ZH, 2010. Germplasm resource of *Phragmites adans* and its application in constructed wetlands [J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 16(4): 590-595. [王萌, 王玉彬, 陈章和, 2010. 芦苇的种质资源及在人工湿地中的应用 [J]. *应用与生物环境学报*, 16(4): 590-595.]
- WEN XN, JIAN YZ, XIE XM, 2009. The comprehensive exploitation and utilization of *Pennisetum purpureum* [J]. *Pratac Sci*, 26(9): 108-112. [温晓娜, 简有志, 解新明, 2009. 象草资源的综合开发利用 [J]. *草业科学*, 26(9): 108-112.]
- XIE L, WANG DG, 2009. Treatment of domestic sewage by subsurface-flow constructed wetland with *Arundo donax* var. *versicolor* [J]. *China Water Wastewater*, 25(5): 89-91. [谢龙, 汪德燿, 2009. 花叶芦竹潜流人工湿地处理生活污水的研究 [J]. *中国给水排水*, 25(5): 89-91.]
- YANG L, WU B, LAI FY, et al, 2011. Studies on seven typical emerging plants absorbing nitrogen and phosphorus in constructed wetlands [J]. *Acta Agric Univ Jiangxi*, 33(3): 616-621. [杨林, 伍斌, 赖发英, 等, 2011. 7种典型挺水植物净化生活污水中氮磷的研究 [J]. *江西农业大学学报*, 33(3): 616-621.]
- YI NK, PENG KM, LU LJ, et al, 2016. Research advances on the influence mechanism of wetland plants on microbial activity in nitrogen removal [J]. *Technol Water Treat*, 42(4): 12-16. [易乃康, 彭开铭, 陆丽君, 等, 2016. 人工湿地植物对脱氮微生物活性的影响机制研究进展 [J]. *水处理技术*, 42(4): 12-16.]
- YUAN DH, REN QJ, GAO SJ, et al, 2004. Purification efficiency of several wetland macrophytes on COD and nitrogen removal from domestic sewage [J]. *Chin J Appl Ecol*, 15(12): 2337-2341. [袁东海, 任全进, 高士祥, 等, 2004. 几种湿地植物净化生活污水 COD、总氮效果比较 [J]. *应用生态学报*, 15(12): 2337-2341.]
- ZHANG Z, FU RB, GU GW, et al, 2006. Analyse of nitrogen removal pathways and their effect factors in constructed wetland [J]. *Ecol Environ*, 15(6): 1385-1390. [张政, 付融冰, 顾国维, 等, 2006. 人工湿地脱氮途径及其影响因素分析 [J]. *生态环境*, 15(6): 1385-1390.]