

人工湿地两种挺水植被净化生活污水效果研究

韩丛丛¹, 杨阳¹, 刘秉儒¹, 谢应忠^{1,2}, 卜晓燕^{2,3}

(1. 宁夏大学 西北退化生态系统恢复与重建教育部重点实验室, 宁夏 银川 750021; 2. 宁夏大学 农学院, 宁夏 银川 750021; 3. 宁夏职业技术学院, 宁夏 银川 750021)

摘要:人工湿地中挺水植被对生活污水的净化效果尚未完全揭示,以黄花鸢尾(*Iris pseudacorus*)和美人蕉(*Canna indica*)2种常见的挺水植被组建的潜流式人工湿地为研究对象,以无植被的人工湿地为对照,比较研究了人工湿地的植被对生活污水中总氮(TN)、总磷(TP)、氨氮(NH₄-N)、化学耗氧量(COD)的去除效果。结果表明:有植被的人工湿地和无植被的人工湿地对生活污水 TN、TP、NH₄-N、COD 均有明显的去除效果,并且以 COD 的去除效果最好, NH₄-N、TN、TP 的去除效果次之;有植被的人工湿地对 TN、TP、NH₄-N、COD 的去除作用明显高于无植被的人工湿地,二者的去除率随人工湿地时期变化其总趋势保持一致,均在人工湿地的稳定期最高,稳定期以后逐渐下降并趋于平稳,对 TN、NH₄-N、COD 的去除率随人工湿地时期的变化呈单峰曲线,而对 TP 的去除率随时期的变化呈先平稳后下降趋势;综合比较,人工湿地的挺水植被能有效促进湿地对污染物的去除效果,但是不同植物之间去除效果存在一定的差异,美人蕉的去除效果明显高于黄花鸢尾,二者对 TN、TP、NH₄-N、COD 去除贡献率分别为 40.37%、39.08%、42.75%、41.93%和 26.06%、30.56%、30.38%、31.86%。

关键词:人工湿地;挺水植被;净化;生活污水;去除效果

中图分类号:S 682.32 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-0009(2014)08-0057-05

人工湿地是一种自适应系统,一般被称为构建湿地、芦苇床系统等^[1],其包括四大基本要素,即水体、基质、水生植被和微生物。人工湿地是将土壤、河砂、炉渣和粉煤灰等按一定比例构成的基质,被选择性地植入植被的污水处理生态系统^[2-3],从而形成的基质、水生植被和微生物通过一系列物理、化学、生物途径,能够对污染物高效去除,具有低投资、低运行费用、低耗能和美观等特点^[3-4],已被广泛运用于污水处理和水环境富营养化的防治中^[2,5-7]。挺水植被是人工湿地植被系统的主要植被类型^[3,8],在净化水质等方面起着重要作用,目前关于人工湿地挺水植被净化水质的研究主要集中在芦苇(*Phragmites australis*)、香蒲(*Typha latifolia*)、凤眼莲(*Eichhornia crassipes*)、千屈菜(*Spiked loosestrife*)等生物量较大的水生植被方面^[9-11],蒋跃平等^[10]、Brij^[12]研究

认为,选择优势挺水植被、发挥生物多样性是提高人工湿地净化能力的关键。近年来潜流式人工湿地因其面积较小、净化水质能力强、操作和运行方便等优点应用较为广泛,因此选择合适的挺水植被是构建人工湿地和恢复重建自然湿地的重点研究内容^[5,10]。现以黄花鸢尾(*Iris pseudacorus*)和美人蕉(*Canna indica*)2种常见的挺水植被组建的潜流式人工湿地为研究对象,以无植被的人工湿地为对照,比较研究了人工湿地的植被对生活污水中总氮(TN)、总磷(TP)、氨氮(NH₄-N)、化学耗氧量(COD)的去除效果,以期合理选取人工湿地挺水植被,为恢复自然湿地和水生植被、净化生活污水、控制水体污染和富营养化等提供理论依据和实践措施。

1 材料与方法

1.1 研究地概况

人工湿地位于江夏区安山街胜利村枫林敖生态文明村,生活污水来自附近居民生活用水,该区降水丰沛,年均降雨量为 1 269 mm,多集中在 6~8 月,年均气温 15.8~17.5℃,无霜期 211~276 d,年日照总时数 1 810~2 100 h。

1.2 试验方法

人工湿地结构:试验共设 3 个平行人工湿地处理单元,每个单元长 10 m、宽 1.5 m、深 0.65 m(依据所选植被的根系衡量),每个处理单元间用 1 m 宽的土埂隔开,

第一作者简介:韩丛丛(1991-),女,硕士研究生,研究方向为植物和恢复生态学。E-mail:ml8795214667@163.com

责任作者:谢应忠(1961-),男,教授,博士生导师,现主要从事退化生态系统恢复等研究工作。E-mail:xieyzh@nxu.edu.cn

基金项目:国家自然科学基金资助项目(41061003);宁夏自然科学基金资助项目(NZ12217);宁夏高校科学研究基金重点资助项目(NGY2012123)。

收稿日期:2013-12-23

底部为集水区,其上铺放尼龙网,防止填料下漏。

人工湿地填料:该人工湿地基质铺设相同,底层均选用砾石,直径为1~5 cm,厚度为20 cm,中层选用当地较好的炉渣,直径为0.5~1.0 cm,厚度为20 cm,上层选用当地的泥沙,直径为0.1~0.5 cm,厚度为25 cm;用炉渣和泥沙基质可以避免土壤系统表面的断流现象,同时多孔大大增加了表面积,更有利于微生物进行代谢活动。

人工湿地植被:选取武汉当地常见的美人蕉和黄花鸢尾作为人工湿地植被,2012年3月均匀植入2个单元的人工湿地中进行培植,以无植被人工湿地为对照,密度为8~10株/m²,湿地床中沿对角线埋入直径为15 mm的PVC管,使湿地池中的循环水能够流入其中,方便样品的采集。

根据人工湿地的运行情况,再结合植被的生长状况,将该人工湿地分为4个时期:启动期、稳定期、反弹期和恢复期,分别在这4个不同时期取进水口与出水口水样在实验室进行化验分析,生活污水各指标的去除率=(进水口值-出水口值)/出水口值×100%。

1.3 项目测定

采用重铬酸钾氧化法测定化学耗氧量(COD);碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法测定总氮(TN)含量;纳

氏试剂比色法测定氨氮(NH₄-N)含量;过硫酸钾消解钼锑抗比色法测定总磷(TP)含量^[13]。

2 结果与分析

2.1 2种植被类型人工湿地不同时期 TN、TP、NH₄-N、COD 去除率比较

由图1可知,2种植被类型人工湿地对TN、NH₄-N、COD的去除率随人工湿地时期的变化呈单峰曲线,而对TP的去除率随时期的变化呈先平稳后下降趋势,人工湿地对TN、NH₄-N、COD的去除率在启动期较小,由启动期到稳定期去除率增幅较大,稳定期以后去除率逐渐减小,且减小的幅度较为平缓,恢复期的去除率基本与启动期保持一致,人工湿地在各时期对TN、NH₄-N、COD的去除率依次表现为稳定期>反弹期>恢复期>启动期;而对TP的去除率由启动期到稳定期变化较为缓慢,稳定期以后去除率减小,且减小的幅度较大,对TP各时期的去除率表现为稳定期>启动期>反弹期>恢复期。2种植被类型的人工湿地在各个时期对TN、TP、NH₄-N、COD的去除率表现为一致趋势,各时期去除率的大小表现为美人蕉>黄花鸢尾,在稳定期二者的差异达到最大,在恢复期二者的去除率基本一致。

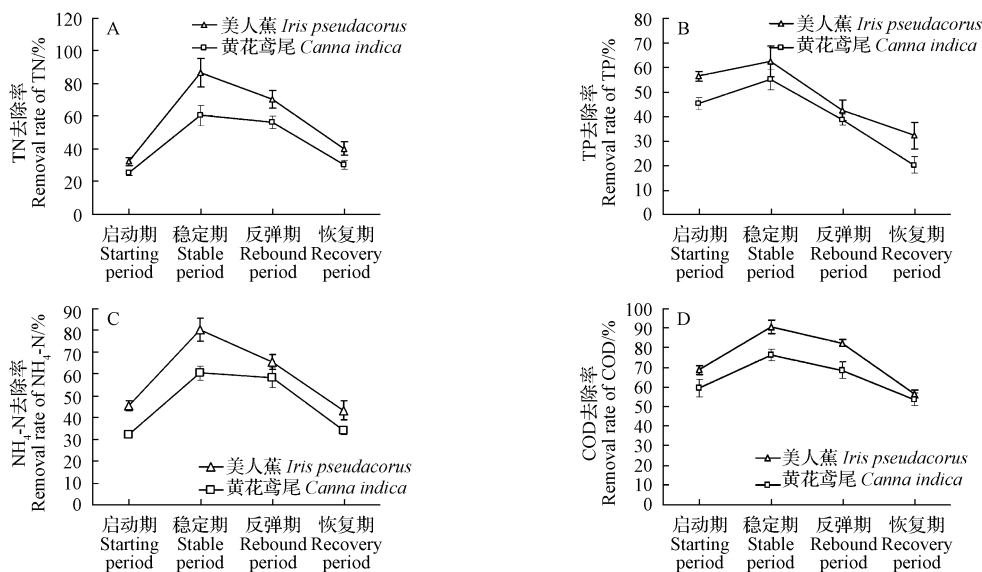


图1 2种植被类型人工湿地不同时期 TN、TP、NH₄-N、COD 去除率比较

Fig.1 Comparison of removal rate of two macrophytes of constructed wetland of TN,TP,NH₄-N and COD in different period

2.2 无植被类型人工湿地对不同时期 TN、TP、NH₄-N、COD 去除率比较

由图2可知,无植被的人工湿地各时期对各指标的去除率表现为 COD>TN>NH₄-N>TP,对TN、TP、NH₄-N、COD去除率在稳定期达到最高,分别为20.64%、12.45%、21.37%、40.32%,稳定期以后逐渐下降并趋于平稳,恢复期最低;人工湿地在各时期对TN、

NH₄-N、COD去除率表现为稳定期>反弹期>启动期>恢复期,稳定期达到最大以后,去除率缓慢减小,而对COD的去除率减小的幅度较大,可达21.73%;无植被的人工湿地各时期对TN和NH₄-N去除率基本一致,而对TP的去除率变化较为平缓,从稳定期到恢复期去除率减小的幅度仅为5.91%,在各时期表现为稳定期>启动期>反弹期>恢复期,与2种植被类型人工湿地各时期对TN、

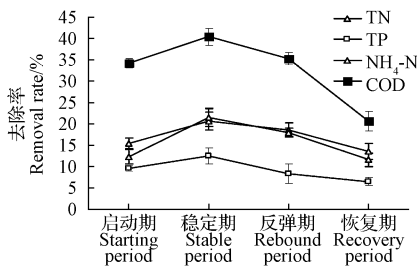


图2 无植被类型人工湿地不同时期 TN、TP、NH₄-N、COD 去除率比较

Fig. 2 Comparison of removal rate of without macrophytes of constructed wetland of TN, TP, NH₄-N and COD in different period

TP、NH₄-N、COD 去除率趋势总保持一致。

2.3 有植被的人工湿地和无植被的人工湿地不同时期去除率比较

由图3可知,在各时期有植被的人工湿地对 TN、TP、NH₄-N、COD 去除率均明显高于无植被的人工湿地,并达到显著差异水平;启动期有植被的人工湿地对 TN、TP、NH₄-N、COD 去除率比无植被的人工湿地分别高出 13.43%、41.22%、26.31%、29.80%;稳定期分别高出 52.86%、46.32%、48.97%、42.89%;反弹期分别高出 44.72%、36.11%、26.31%、39.23%;恢复期分别高出 21.91%、19.63%、27.04%、34.44%;综合来看,相对于无植被的人工湿地,有植被的人工湿地在稳定期的去除效果较好,且二者对 COD 的去除效果较好。

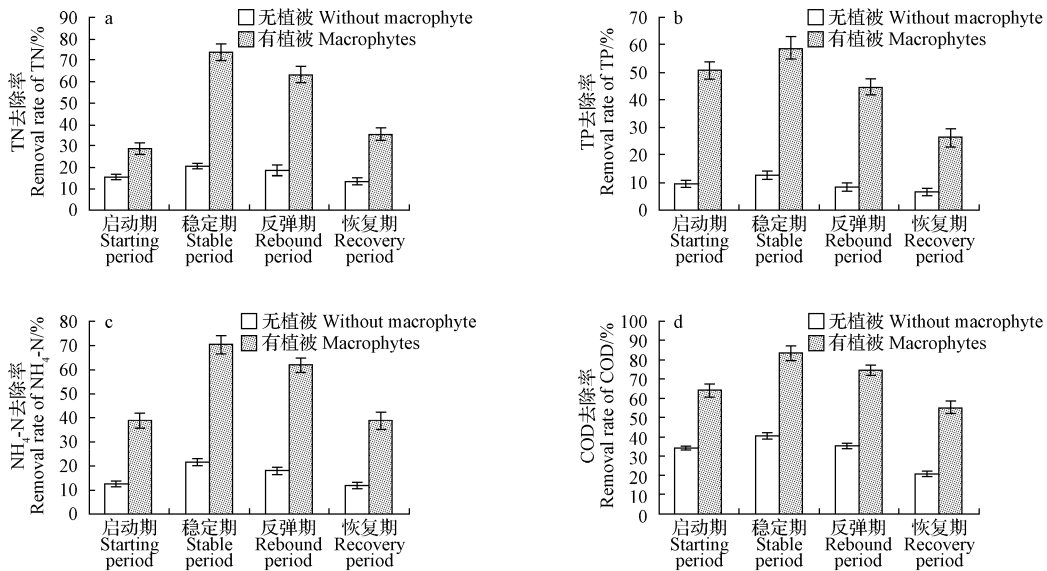


图3 有植被的人工湿地和无植被的人工湿地不同时期去除率比较

Fig. 3 Comparison of removal rate of constructed wetlands of macrophytes and without macrophytes in different period

2.4 有植被的人工湿地和无植被的人工湿地去除率比较

由图4(A)可知,有植被的人工湿地对 TN、TP、NH₄-N、COD 去除率均高于无植被的人工湿地,二者对 COD 的去除效果较好, TN、NH₄-N、TP 次之;与无植被

的人工湿地相比,有植被的人工湿地对 TN、TP、NH₄-N、COD 去除率分别高出 33.23%、35.82%、36.56%、36.59%,综合比较可知人工湿地引入植被以后对 COD 和 NH₄-N 去除效果较好, TN 和 TP 次之。

由图4(B)综合分析可知,美人蕉人工湿地对 TN、

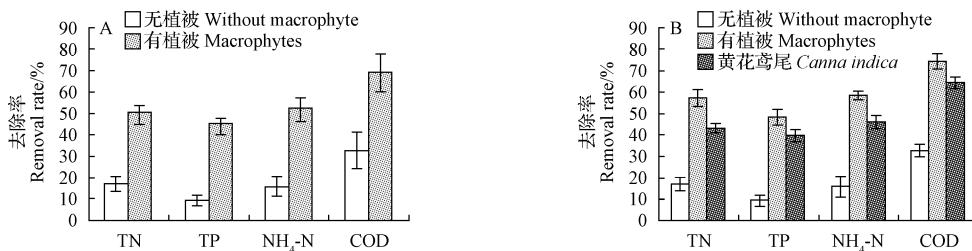


图4 有植被的人工湿地和无植被的人工湿地去除率比较

Fig. 4 Comparison of removal rate of constructed wetlands of macrophytes and without macrophytes

TP、NH₄-N、COD 去除效果明显高于黄花鸢尾人工湿地,而 2 种植被类型人工湿地的去除效果均明显高于无植被的人工湿地。美人蕉人工湿地对 TN、TP、NH₄-N、COD 去除率分别高出无植被的人工湿地 40.37%、39.08%、42.75%、41.93%,黄花鸢尾人工湿地对 TN、TP、NH₄-N、COD 去除率分别高出 26.06%、30.56%、30.38%、31.86%。

3 结论与讨论

该试验结果表明,人工湿地对 TN、NH₄-N、COD 的去除率随各时期的变化呈单峰曲线,而对 TP 的去除率随时期的变化呈先平稳后下降趋势,说明人工湿地植被对不同污染物的去除效果和机理不同,其中 2 种植被均表现为对 COD 的去除能力较强,对 TN 和 NH₄-N 的去除效果无明显差异,对 TP 的去除效果最差,说明 2 种植被对生活污水中 COD 的吸收效果较好。研究表明 COD 主要是通过人工湿地植被的截流、过滤以及微生物的新陈代谢过程得以去除^[14-15],这与项学敏等^[16]的研究结果一致,而 TN 和 NH₄-N 去除机理基本一致,植被对 TP 的吸收可能与根际微环境以及植被与微生物的耦合作用有密切关联^[2,17]; 2 种植被人工湿地对 TN、TP、NH₄-N、COD 的去除率在启动期较小,由启动期到稳定期去除率增幅较大,稳定期以后去除率逐渐减小,且减小的幅度较为平缓,恢复期的去除率基本与启动期保持一致,这是由于 2 种植被在稳定期各项生长指标均达到最大,有助于其根区微生物的繁殖,因而这个时期对 TN、TP、NH₄-N、COD 的去除效果最为明显,根据资源比例假说和密度制约,稳定期以后植被缺乏有限的空间和资源,地面部分开始枯黄、根系也逐渐溃烂,净化水质效果缓慢下降等,导致恢复期以后其去除效果呈现下降趋势最后基于平稳状态。

植被在人工湿地中发挥着重要作用,其不仅可以直接摄取和利用污水中的营养物质,还能提高人工湿地的渗透系数,增强根际微生物活性输送氧气到根区、增加根际的溶解性氧含量、提供根区微生物生长、繁殖和降解对氧的需求等^[1,3,18],该试验中 2 种不同植被类型的人工湿地净化污水效果在各时期均不同,综合来看,美人蕉净化污水中各项指标明显高于黄花鸢尾,这与人工湿地中特定植被生长状况和根系发达程度密切相关,导致不同植被构成的人工湿地净化污水效果存在着一定差异^[19],因此,对于人工湿地应该选用净化污水能力较强的植被,一方面可以提高人工湿地对污染物的去除效率;另一方面可以减少引用外来植被的投资成本,还可以避免引用外来植被造成的生物入侵危险^[19]。

Grosse^[20]报道了栽种有芋(*Colocasia esculenta*)、一种美人蕉属(*Canna glauca*)等植被的人工湿地对水

体中污染物具有很好的去除效果,Armstrong^[21]测试了小型湿地根区的氧浓度、pH 值及氧化能力,发现三者有植被系统中皆高于无植被系统,另外 Rosgers 等^[22]研究结果也显示了人工湿地植被的吸收和吸附作用,有植被的人工湿地对污水中的污染物去除能力高于无植被的人工湿地系统。该研究表明,有植被的人工湿地在各个时期对污水中 TN、TP、NH₄-N、COD 去除率明显高于无植被的人工湿地,与前人的研究结果一致^[20-22],说明了植被在人工湿地净化水质中的重要作用,该研究中的美人蕉和黄花鸢尾的输氧作用形成了氧化态的根区^[3,6-7],根区有氧和缺氧区域为根区的好氧、兼性和厌氧微生物提供了各自适宜的小生境,有利于微生物在人工湿地纵深的扩展,从而促进了深层基质中微生物的生长和繁殖^[3,6-7,23]。因此,有植被的人工湿地净化污水效果明显高于无植被的人工湿地,而无植被的人工湿地对污水仍然具有一定的净化能力,与有植被的人工湿地对 TN、TP、NH₄-N、COD 的去除率变化总保持一致,表明引入植被以后其净化污水能力在此基础上得以增加,其中净化能力是在同等基础上呈比例增加,以美人蕉增加其净化污水能力较好,充分体现在对 COD 的去除率。

该研究表明人工湿地引入植被后能有效促进湿地对污染物的去除效果,美人蕉和黄花鸢尾的去除效果均高于无植被的人工湿地,二者对 TN、TP、NH₄-N、COD 去除贡献率分别为 40.37%、39.08%、42.75%、41.93% 和 26.06%、30.56%、30.38%、31.86%,与吴振斌等^[24]的研究结果一致。吴振斌等^[24]报道了芦苇-水葱(*Schoenoplectus lacustris*)、茭白(*Zizania latifolia*)-菖蒲(*Acorus calamus*)、蘆草(*Scirpus* sp.)-苔草(*Carex* sp.)等植被组合的人工湿地系统净化效果及稳定性均高于无植被对照。美人蕉是人工湿地的常见挺水植被,该试验也证实了美人蕉对 TN、TP、NH₄-N、COD 的去除效果明显高于黄花鸢尾。建议在选择人工湿地挺水植被时更多地使用美人蕉,在参考前人研究成果的基础上,结合人工湿地各时期对 TN、TP、NH₄-N、COD 的去除效果,构建以美人蕉-黄花鸢尾组合的人工湿地以提高净化污水能力,同时也应认识到在选择和利用二者间接的生态效应和利用种间差异是构建此人工湿地的难点。

参考文献

- [1] 熊飞,李文朝,潘继征,等. 人工湿地脱氮除磷的效果与机理研究进展[J]. 湿地科学,2005(3):228-234.
- [2] 李晓东,孙铁珩,李海波,等. 人工湿地除磷研究进展[J]. 生态学报,2007,27(3):1226-1232.
- [3] 成水平,吴振斌,况琪军. 人工湿地植被研究[J]. 湖泊科学,2002,14(2):179-184.
- [4] 何明雄,胡启春,罗安靖,等. 人工湿地植被生物质资源能源化利用潜力评估[J]. 应用与环境生物学报,2011,17(4):527-531.

- [5] 张洪刚,洪剑明. 人工湿地中植被的作用[J]. 湿地科学,2006,4(2):146-154.
- [6] 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.
- [7] 李林锋,年跃刚,蒋高明. 人工湿地植被对观赏水中氮磷去除的贡献[J]. 环境科学学报,2009,22(3):337-342.
- [8] 靖元孝,李晓菊,杨丹菁. 红树植被人工湿地对生活污水的净化效果[J]. 生态学报,2007,27(6):2365-2374.
- [9] 李林锋,年跃刚,蒋高明. 植被吸收在人工湿地脱氮除磷中的贡献[J]. 湿地科学,2009,22(3):337-342.
- [10] 蒋跃平,葛滢,岳春雷,等. 人工湿地植被对观赏水中氮磷去除的贡献[J]. 生态学报,2004,24(8):1720-1725.
- [11] 袁东海,高士祥,任全进,等. 几种挺水植被净化生活污水 TN 和 TP 效果的研究[J]. 水土保持学报,2004,18(4):77-92.
- [12] Brij G. Natural and constructed wetlands for wastewater treatment: Potential and problems[J]. Water Science and Technology, 1999, 40(3):27-35.
- [13] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京:中国农业出版社,1999.
- [14] 司马卫平,何强,夏安林,等. 人工湿地处理城市污水效能的影响因素分析[J]. 环境工程学报,2008,2(3):319-323.
- [15] 王全金,陈栋. 芦苇人工湿地处理技术研究进展[J]. 华东交通大学学报,2004,21(4):1-5.
- [16] 项学敏,杨洪涛,周集体,等. 人工湿地对城市生活污水的深度净化效果研究:冬季和夏季对比[J]. 环境科学,2009,30(3):713-719.
- [17] 贺锋,吴振斌,陶菁,等. 复合垂直流人工湿地污水处理系统硝化与反硝化作用[J]. 环境科学,2005,26(1):47-50.
- [18] 叶建锋. 垂直潜流人工湿地中污染物去除机理研究[D]. 上海:同济大学,2007.
- [19] 徐德福,李映雪. 用于污水处理的人工湿地的基质、植被及其配置[J]. 湿地科学,2007,5(1):32-38.
- [20] Grosse W. Consolidated Report-Project N°ERBIC18CT960059 in INCO-DC-Biotechnology-of the 4th Framework Programme of European Commission[M]. Brussels,1999.
- [21] Armstrong W. Root aeration in wetland condition. In: Hook D D, Crawford R M, eds. Plant life in anaerobic environments[M]. Ann Arbor: Ann Arbor Science,MI,1978;269-297.
- [22] Rosgers K H, Breen P F, Chick A J. Nitrogen removal in experimental wetland treatment systems: evidence for the role of aquatic plants[J]. Research Journal of the Water Pollution,1991,63:934-941.
- [23] Fennessy M S, Cronk J K, Mitsch W J. Macrophyte productivity and community development in created freshwater wetlands under experimental hydrological conditions[J]. Ecological Engineer,1994,3(4):469-484.
- [24] 吴振斌,陈辉蓉,成水平,等. 人工湿地磷的去除研究[J]. 水生生物学报,2001,25(1):28-35.

Removal Effect of Two Macrophytes of Constructed Wetland to Domestic Sewage

HAN Cong-cong¹, YANG Yang¹, LIU Bing-ru¹, XIE Ying-zhong^{1,2}, BU Xiao-yan^{2,3}

(1. Key Lab of Restoration and Reconstruction of Degraded Ecosystem in Northwest China of Ministry of Education, Ningxia University, Yinchuan, Ningxia 750021; 2. College of Agriculture, Ningxia University, Yinchuan, Ningxia 750021; 3. Ningxia Polytechnic, Yinchuan, Ningxia 750021)

Abstract: Removal effect of macrophytes of constructed wetland to domestic sewage remain poorly understood, taking *Iris pseudacorus* and *Canna indica* as materials, using constructed wetland without macrophyte as CK, comprehensive analysis was present based on constructed wetlands with two macrophytes and without macrophyte, and removal effect of total nitrogen (TN), total phosphorus (TP), ammonia nitrogen (NH₄-N) and chemical oxygen consumption (COD) in domestic sewage were compared. The results showed that constructed wetlands had obvious removal effect which was significantly higher on COD. Removal effect of constructed wetland with macrophytes was higher than constructed wetland without macrophytes on TN, TP, NH₄-N and COD, and the removal rates were consistent with constructed wetland period which was highest in stable period, and then the removal rate gradually decline and leveled off after stable period. The removal rate of TN, NH₄-N and COD was unimodal curve along constructed wetland period, and the removal rate of TP was leveled off and then decline along with constructed wetland period. The finding suggests that macrophytes of constructed wetland could effectively promote pollutants, and there were some differences in different periods of constructed wetland between macrophytes removal effect, but there was a different between macrophytes, and the removal efficiency of *Canna indica* was obviously higher than that of *Iris pseudacorus*, and the contribution on TN, NH₄-N and COD removal rates were 40.37%, 39.08%, 42.75%, 41.93% and 26.06%, 30.56%, 30.38%, 31.86%, respectively.

Key words: constructed wetland; macrophytes; purification; domestic sewage; removal effect