

美人蕉+梭鱼草人工湿地植物组合处理高浓度畜禽废水的净化效应和生理响应研究

陈金发

(西昌学院 工程技术学院,西昌 四川 615013)

摘要:以自然湿地中采集的梭鱼草和美人蕉为试材,在室外模拟条件下研究了这2种湿地植物组合在高浓度畜禽废水条件下的净化作用及植物生理变化。并探讨了该湿地植物组合对废水的净化作用与生物学效应之间的关系。结果表明:该种植物组合对高浓度畜禽废水有较好的净化处理效果;COD、TP、NH₃-N分别从1 615~2 364、33~71、115~224 mg/L下降到136~280、17~76、0.5~9.0 mg/L,均能达标排放。周期结束植物各项生理指标正常,生长状况良好,选用的梭鱼草和美人蕉组合搭配建造人工湿地不仅有良好的景观效果,而且对畜禽废水有较好的净化作用。

关键词:人工湿地;畜禽废水;抗氧化酶系统;胁迫

中图分类号:S 555+.9 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-0009(2015)06-0067-05

近年随着禽养殖业的快速发展,畜禽养殖业的自身发展与环境保护的矛盾日益突出。未经处理的畜禽废水含有大量的污染物,污染负荷很高。畜禽污水排入江

河湖泊中,造成水体N、P量升高,导致水体严重富营养化。我国畜禽养殖业废弃物的配套处理设施少,处理水平低下。近年来,人工湿地具有净化污染物效果好、运行费用低、易维护等特点作为污水处理技术已被广泛应用^[1]。国内外在人工湿地技术、湖滨带生态修复、生态景观设计等方面进行了大量的研究。人工湿地作为一种具有污水处理和水环境生态改善双重功能的工程技

作者简介:陈金发(1976-),男,福建莆田人,硕士,副教授,研究方向为污染控制与循环经济。E-mail:84536683@qq.com.

基金项目:四川省科技厅应用基础研究资助项目(2013JY0131)。

收稿日期:2014-11-10

Effect of Exogenous Ca²⁺ on Stomatal Morphology of *Nitraria tangutorum* Under Salt Stress

XUAN Ya-nan, LIU Wei, GAO Yan-bo, DU Yu-ling, YAN Yong-qing
(College of Horticulture, Northeast Agricultural University, Harbin, Heilongjiang 150030)

Abstract: With *Nitraria tangutorum* as experimental material, effect of the different concentrations (0, 5, 10, 15, 20 mmol/L) of exogenous Ca²⁺ on stomatal morphology characteristics of *Nitraria tangutorum* under different concentrations (100, 200, 300, 400 mmol/L) of salt stress were researched. The results showed that the *Nitraria tangutorum* stomatal length and width were both lower with the increase of NaCl concentration, there was a maximum of stomatal length and width under NaCl concentration for 200 mmol/L and Ca²⁺ concentration of 10 mmol/L, when Ca²⁺ concentration was 15 mmol/L and salt stress (NaCl ≥ 300 mmol/L), there was a maximum of stomatal length and width. Along with the increase of NaCl concentration, stomatal density of *Nitraria tangutorum* epidermis decreased gradually, as the exogenous Ca²⁺ concentration increasing, stomatal density of *Nitraria tangutorum* hypodermis under different salt processing showed decreasing after increasing first, each treatment reached maximum with the Ca²⁺ concentration (5 mmol/L) and NaCl concentration (≤ 300 mmol/L); stomatal density of *Nitraria tangutorum* increased under NaCl concentration (400 mmol/L), but part of porosity development was not mature, some deformation was serious, unable to exercise its function, it indicated that *Nitraria tangutorum* suffered the maximum concentration (NaCl 300 mmol/L) to salt stress.

Keywords: salt stress; Ca²⁺; *Nitraria tangutorum*; stomatal

术,人工湿地在生活污水、养殖废水、农田和暴雨径流等污染控制和水质环境改善方面发挥了重要作用^[2-3]。在人工湿地净化污水过程中,植物作用表现为直接吸收利用污水中可利用态的营养物质、吸附和富集重金属和一些有毒有害物质;为根区好氧微生物输送氧气;增强和维持介质的水力传输;促进微生物的生长繁殖等^[4-5]。湿地植物选择以易栽培根系生物量较大多年生水生或湿生植物为主,并兼顾景观功能。湿地植物中美人蕉也有较强的产氧、输氧能力^[6],有研究表明多种植物系统与多种填料系统在有机物与营养元素去除方面均比单一植物单一填料系统有优势^[7]。

通过模拟人工湿地,设计梭鱼草和美人蕉搭配,采用细沙和土壤的基质研究人工湿地对水质中各类主要污染物的去除作用,并且研究在高浓度畜禽废水胁迫下植株的生理特性变化与生态景观效果。通过研究,探索出既对高浓度畜禽废水水质具有很好净化作用,又能达到很好的生态景观效果的最佳湿地植物搭配方案,以期为湖泊湿地生态工程建设、水质处理等提供可行性强的研究基础和科学的数据支撑。

1 材料与方法

1.1 试验材料

该试验选用梭鱼草和美人蕉长势良好的成熟植株作为供试材料,株数数量分别为10株和8株,植株覆盖面积60%。试验前用离子水将植物冲洗干净,备用。

1.2 试验方法

1.2.1 试验装置和水质设定 试验潜流人工湿地均采用水平流态,床体均匀布水,水体水平流过湿地床,试验人工湿地装置为规格1.3 m×1.0 m×0.8 m的方形水塘。装置基质为2 cm的细沙,上覆栽种物的土壤18 cm,表层土壤起到补充湿地微生物和保温的作用。向装置中加入畜禽废水150 L,试验水深为20 cm。其畜禽废水水质指标COD、TP、NH₃-N范围分别为1 615~2 364 mg/L、33~71 mg/L、115~224 mg/L。

1.2.2 试验设计 设4个周期,均加入150 L畜禽废水。进废水当天开始测定水质指标化学需氧量(COD)、总磷(TP)和氨氮(NH₃-N),植物叶片指标过氧化氢酶(CAT)、过氧化物酶(POD)和超氧化物歧化酶(SOD)。每个周期水力停留时间在15 d以内,每3 d测定1次指标,3个水质指标中某个指标达到畜禽废水国家排放标准,则在该周期之后的试验期间不测定达标指标,当3个水质指标都达到排放标准时,即结束该周期试验,并用自来水进水3 d,使植物的相应的酶活性回复正常值左右,进入下1个周期试验。4个周期试验结束后,将地面上植物全部收割,作为氮肥和磷肥的原料(表1)。

表1 模拟人工湿地初始水质情况

Table 1	Initial water quality in simulated wetland			
	第1周期 1st cycle	第2周期 2nd cycle	第3周期 3rd cycle	第4周期 4th cycle
化学需氧量 COD/(mg·L ⁻¹)	2 364.3410	1 938.9057	1 615.3838	2 121.2000
氨氮 NH ₃ -N/(mg·L ⁻¹)	141.4285	224.2857	224.2857	115.7140
点磷 TP/(mg·L ⁻¹)	71.0270	33.5668	46.3380	35.6500

2 结果与分析

2.1 模拟人工湿地对高浓度畜禽废水的净化处理效果

在湿地系统中,有机物主要通过物理过程和生物过程去除。物理过程主要体现在人工湿地对悬浮固体的过滤和沉淀作用,同时去除了吸附在固体颗粒表面的有机物质。其生物降解过程,主要由附着在根部的好氧微生物完成^[8]。模拟湿地对高浓度的畜禽废水中的COD的去除效果见图1。经7~10 d的净化处理,4个处理组中,水体COD含量从1 615~2 364 mg/L降至136~327 mg/L,梭鱼草和美人蕉的搭配组合对高浓度畜禽废水的COD去除率为86.17%~92.98%。4个周期从趋势线看,COD都呈现出前期去除率高后期趋于平稳的趋势;其中第1周期效果最好去除速度达到291 mg·L⁻¹·d⁻¹,7 d即能达标排放;4次周期试验模拟人工湿地对有机物的去除速度均在180 mg·L⁻¹·d⁻¹以上,去除率在10 d内均能达到86%以上,有机物去除效果稳定良好。

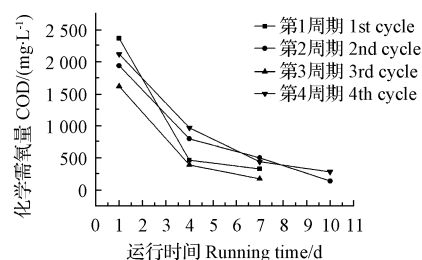


图1 模拟湿地系统对高浓度畜禽废水COD的去除效果

Fig.1 Removal effect of simulated wetland system for COD in high concentration of livestock wastewater

由图2可知,模拟湿地对高浓度的畜禽废水中的NH₃-N均有较好的去除效果,最终去除率除第4周期降低到34.72%,其余均在70%以上。其中第1周期10 d内去除率达到88.21%,第3周期的去除速度最好,达41.61 mg·L⁻¹·d⁻¹。污水中的有机氮和无机氮分别通过微生物的硝化、反硝化作用去除,植物吸收合成自身物质通过收割后将其从废水中去除^[9]。因此,在模拟人工湿地系统中,氨氮主要通过硝化系统去除^[10]。由于硝化过程由好氧细菌消耗水体中溶解氧完成。人工湿地系统中水生植物的存在为好氧微生物的生长繁殖提供了场所,从而促进了系统的硝化过程,提高氨氮的去

除效率^[11]。周期内趋势线平稳,7 d 中模拟湿地对氨氮的吸收呈稳定的去除速度。4 个周期中,由于高浓度畜禽废水对植株的过营养胁迫作用,氨氮的去除效果受到试验植株的生理变化和生长状况影响大,4 个周期去除结果不一致。

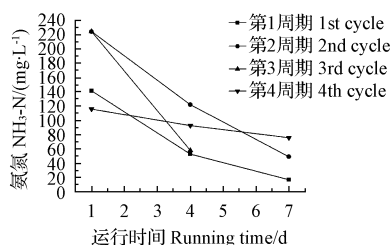


图2 模拟湿地系统对高浓度畜禽废水 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的去除效果

Fig. 2 Removal effect of simulated wetland system for $\text{NH}_3\text{-N}$ in high concentration of livestock wastewater

人工湿地对磷的去除主要通过填料的吸附和沉淀作用微生物的聚集作用、湿地中植物和藻类的吸收等途径共同作用而完成的^[12]。从图3可以看出,模拟湿地对于磷有很好的净化处理效果且较稳定,4 个周期的最终去除率分别为 85.97%、98.38%、92.14%、84.42%,去除速度分别为 4.75、2.06、4.27、1.88 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ 。这是由于模拟人工湿地基质对磷的去除作用更大,在处理畜禽废水的湿地系统中,基质对磷的吸附、沉淀作用比植物对磷的吸收转移作用要有效得多。可能在各周期前期模拟湿地中的植株与基质共同发挥作用,促使 TP 急速降低,中后期开始植物对 TP 的吸收已达饱和,TP 的去除主要依靠基质的吸附和沉淀作用,因此趋势线后期趋于平稳。

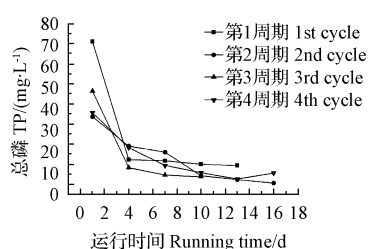


图3 模拟湿地系统对高浓度畜禽废水 TP 的去除效果

Fig. 3 Removal effect of simulated wetland system for TP in high concentration of livestock wastewater

2.2 高浓度畜禽废水对植物的生理特性变化影响

植物体内一系列的抗氧化酶,如超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化氢酶(CAT)、过氧化物酶(POD)等,能够保护植物在逆境胁迫过程中维持体内的活性氧代谢平衡并保护膜结构,以抵御不良环境的胁迫^[13-15]。

SOD 是清除氧自由基的重要抗氧化酶,其作用是清除超氧自由基 $\text{O}_2^{\cdot-}$,产生 H_2O_2 。由图4、5可知,高浓度

畜禽废水胁迫下,梭鱼草和美人蕉叶片中的 SOD 活性大致呈先升高再降低的趋势,第1周期,梭鱼草和美人蕉试验植株呈现出先升后降或升高的趋势,符合植物受胁迫后发挥其抗性调动抗氧化酶系统等保护机制,当胁迫达到植物的抗耐性极限时,会导致抗氧化酶活性降低,这可能就是导致第2周期2种植物的 SOD 活性不稳定波动变化的原因。而到胁迫第3周期、第4周期二者呈现较高相似性。在第3周期4 d 后 SOD 活性增至最大分别为 11.08、18.53 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$;在第4周期,4 d 后达到一个峰值分别为 5.88、9.28 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ 。

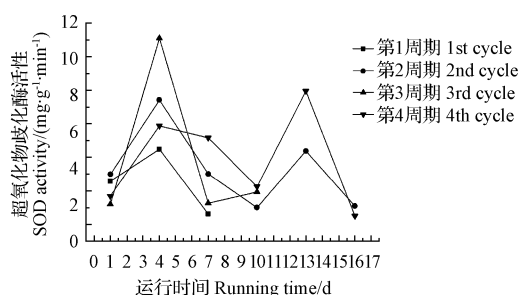


图4 在高浓度畜禽废水胁迫下,梭鱼草叶片中 SOD 活性变化

Fig. 4 Change of SOD activity in *Pontederia cordata* leaves under high concentrations of livestock waste water stress

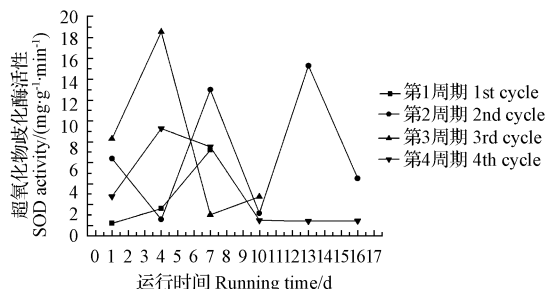


图5 在高浓度畜禽废水胁迫下,美人蕉叶片中 SOD 活性变化

Fig. 5 Change of SOD activity in *Canna generalis* leaves under high concentrations of livestock waste water stress

POD、CAT 同是植物体内清除 H_2O_2 等活性氧的重要酶,植物体内低浓度的 H_2O_2 主要靠 POD 在氧化相应基质时被消化,高浓度的 H_2O_2 主要靠 CAT 清除,从而使 H_2O_2 控制在较低水平,并与 SOD 等酶协同作用维持体内活性氧代谢平衡。4 个周期中,梭鱼草、美人蕉叶片中的 POD 和 CAT 分别呈现出相反的变化趋势,变幅差异较大(图6、7)。梭鱼草4个周期中,植株叶片中的 POD 活性变化大致呈现先降后升而 CAT 为先升后降,表明在高浓度畜禽废水胁迫下梭鱼草叶片中的 POD、CAT 活性酶呈互补反应,主要以 CAT 的保护机制为主,酶应激反映剧烈,抗氧化系统平衡失调,高浓度 H_2O_2 得到抑制,植物生理特性稳定,植物生长正常,仅部分萎焉。美人蕉叶片中 POD、CAT 酶活性最终均呈现下降

的趋势,周期内变化较平稳,有部分上升后下降的趋势,且2种活性酶大致互补反应。可以看出美人蕉叶片中的酶活性相对稳定。这可能也与应试植物自身生理特性状况有关,可以看出美人蕉生理特性更为稳定,受逆境胁迫的影响更小(图8、9)。

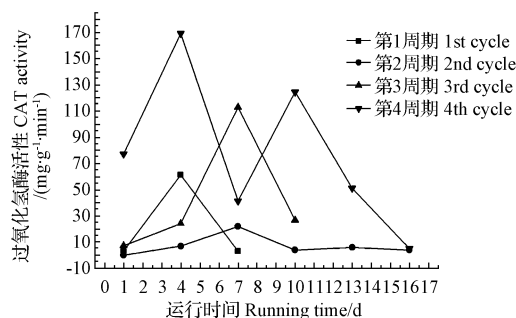


图6 在高浓度畜禽废水胁迫下,梭鱼草叶片中CAT活性变化
Fig. 6 Change of CAT activity in *Pontederia cordata* leaves under high concentrations of livestock waste water stress

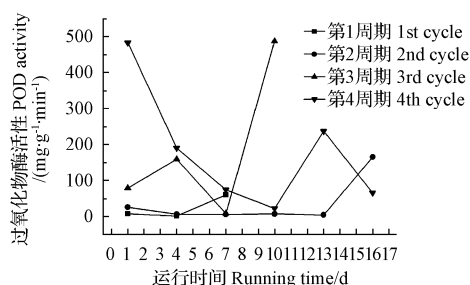


图7 在高浓度畜禽废水胁迫下,梭鱼草叶片中POD活性变化
Fig. 7 Change of POD activity in *Pontederia cordata* leaves under high concentrations of livestock waste water stress

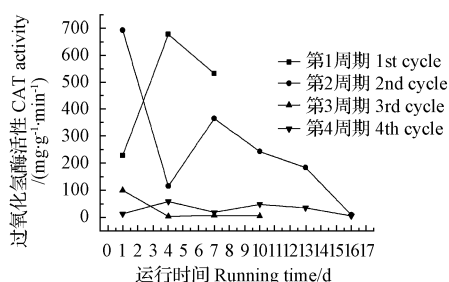


图8 在高浓度畜禽废水胁迫下,美人蕉叶片中CAT活性变化
Fig. 8 Change of CAT activity in *Canna generalis* leaves under high concentrations of livestock waste water stress

3 结论

试验过程中观察植株生长情况,第3周期结束时有一部分梭鱼草出现枯萎现象。在高浓度畜禽废水的逆境胁迫下,美人蕉较梭鱼草具有更强的抗性和耐性。模拟人工湿地中,植物根系在净化污水方面起了重要作用,提供放氧表面,扩大系统中气体的空间,增加根系附近溶解氧的浓度;不仅增加了微生物生长繁殖的场所,而

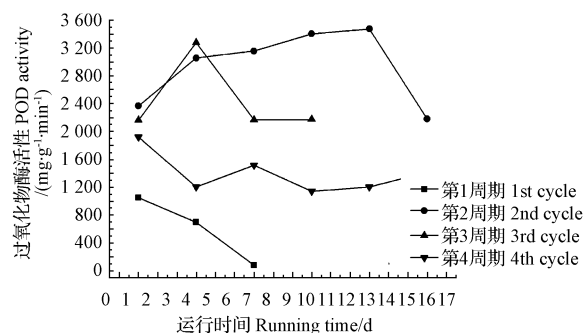


图9 在高浓度畜禽废水胁迫下,美人蕉叶片中POD活性变化
Fig. 9 Change of POD activity in *Canna generalis* leaves under high concentrations of livestock waste water stress

且根系的分泌物(碳水化合物、氨基酸)提供了微生物生长的营养物质^[16-19]。人工湿地处理污水时有机物的降解和转化主要是由植物根区微生物活动来完成的,微生物的多寡程度和活性直接影响水处理的效率^[20-21]。因此对湿地植物的光合作用、逆境生理等生理生态特性有待进一步研究,开展湿地植物生理生态特性研究和污染适应性进化研究,筛选出不仅能有效净化环境且能够耐受恶劣逆境胁迫的湿地植物种类与植物种类组合。试验结束后植株数分别为18、10株,植株数量的增加即生物量的增加,说明这2种植物搭配不仅能取得良好的污水处理效果,也能促进湿地植物的生长同时起到美化景观的作用。

在此人工湿地系统处理下,高浓度畜禽废水均能在10 d内达标排放,有机物去除速率达到 $180.28 \sim 291.00 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$,氨氮去除速率达 $5.74 \sim 41.61 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$,总磷去除速率达 $1.88 \sim 4.75 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ 。4次试验周期数据表明,梭鱼草和美人蕉搭配组合模拟湿地能起到良好的水质处理效果,且植株能正常成长并进行循环处理运用。

对氮磷的去除是人工湿地研究的一个重点研究方向。该试验结果在该湿地系统中,高浓度畜禽废水的氮磷均有明显下降能够达标排放,其中机制有待进一步研究。目前许多学者致力于提高湿地硝化作用促进氨氮去除的研究^[22-24]。然而,硝化作用不足已成为制约人工湿地脱氮的关键因素。

参考文献

- [1] Huang J, Reneau J R B J, Hagedorn C. Nitrogen removal in constructed wetlands employed to treat domestic wastewater [J]. Water Research, 2000, 34(9): 2582-2588.
- [2] White J S, Bayley S E, Curtis P J. Sediment storage of phosphorus in a northern prairie wetland receiving municipal and agro-industrial wastewater [J]. Ecological Engineering, 1999, 14 (1/2): 127-138.
- [3] Seo D C, Cho J S, Lee H J, et al. Phosphorus retention capacity of filter media for estimating the longevity of constructed wetland [J]. Water Research, 2005, 39(11): 2445-2457.

- [4] 成水平,吴振斌,况琪军. 人工湿地植物研究[J]. 湖泊科学,2002,14(2):179-184.
- [5] 吴建强,阮晓红,王雪. 人工湿地中水生植物的作用和选择[J]. 水资源保护,2005,21(1):1-6.
- [6] 黄娟,王世和,雒维国,等. 植物光合特性及其对湿地 DO 分布、净化效果的影响[J]. 环境科学学报,2006,26(11):1828-1832.
- [7] 蒋玲燕,殷峻,闻岳,等. 修复受污染水体的潜流人工湿地微生物多样性研究[J]. 环境污染与防治,2006,28(10):734-737.
- [8] Ansola G, Fernández C, Luis de E. Removal of organic matter and nutrients from urban wastewater by using an experimental emergent aquatic macrophyte system[J]. Ecological Engineering,1995,5(1):13-19.
- [9] 张志勇,王建国,杨林章,等. 植物吸收对模拟污水净化系统去除氮、磷贡献的研究[J]. 土壤,2008,40(3):412-419.
- [10] Manios T, Stentiford E I, Millner P. The removal of $\text{NH}_3\text{-N}$ from primary treated wastewater in surface reed beds using different substrates [J]. Journal of Environmental Sciences Health A,2002,37(3):297-308.
- [11] Li Y, Zhang S S, Jiang W S, et al. Cadmium accumulation, activities of antioxidant enzymes and malondialdehyde(MDA) content in *Pistia stratiotes* L. [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2013, 20(2): 1117-1123.
- [12] Vymazal J. Removal of phosphorus in constructed wetlands with horizontal sub-surface flow in the Czech Republic [J]. Water, Air and Soil Pollution, 2004,4(2/3):657-670.
- [13] Sinha S, Basant A, Malik A, et al. Multivariate modeling of chromium-induced oxidative stress and biochemical changes in plants of *Pistia stratiotes* L. [J]. Ecotoxicology,2009,8:555-566.
- [14] Hasan S A, Fariduddin Q, Ali B, et al. Cadmium: toxicity and tolerance in plants[J]. Environmental Biology,2009,30:165-174.
- [15] Dazy M, Masfaraud J F, Férard J F. Induction of oxidative stress biomarkers associated with heavy metal stress in *Fontinalis antipyretica* Hedw [J]. Chemosphere,2009,75:297-302.
- [16] Tanner C C, Sukias J P. Accumulation of organic solids in gravelbed constructed wetlands [J]. Water Science Technology,1995,32:229-239.
- [17] Allen W C H. Temperature and wetland plant species effects on wastewater treatment and root zone oxidation [J]. Environmental Quality, 2002,31:1010-1016.
- [18] Coleman J, Hench K. Treatment of domestic wastewater by three plant species in constructed wetlands [J]. Water Air Soil Pollution,2001,128:283-295.
- [19] Wetzel R G. Land-water interfaces: metabolic and limnological regulators (Edgardo Baldi Memorial Lecture) [J]. Ver Int Ver Limnol,1990(24):6-24.
- [20] Stottmeister U, Wiener A, Kusch P, et al. Effects of plants and microorganisms in constructed wetlands for wastewater treatment [J]. Biotechnology Advances,2003,22(1-2):93-117.
- [21] 吴振斌,周巧红,贺锋,等. 构建湿地中试系统基质剖面微生物活性的研究 [J]. 中国环境科学,2003,23(4):422-426.
- [22] Kozub D D, Liehr S K. Assessing denitrification rate limiting factors in a constructed wetland receiving landfill leachate [J]. Water Science and Technology,1999,40(3):75-82.
- [23] Comin F A. Nitrogen removal and cycling in restored wetlands used as filters of nutrients for agricultural runoff [J]. Water Science and Technology, 1997,35(5):255-261.
- [24] 王晟,徐祖信,李怀正. 潜流湿地处理不同浓度有机污水的差异分析 [J]. 环境科学,2006,27(11):2194-2200.

Purification and Biological Effect of *Pontederia cordata* and *Canna generalis* Wetland Plants Under High Concentrations of Livestock Wastewater

CHEN Jin-fa

(Department of Engineering Technology, Xichang College, Xichang, Sichuan 615013)

Abstract: Taking *Pontederia cordata* and *Canna generalis* which grow in natural wetland as materials, the purify and biological effect of two kinds of plants under high concentration of livestock wastewater was studied in outdoor simulated conditions. The correlation between clean and biological effect was also studied. The results showed that two species had good purify treatment effect for livestock wastewater: COD, TP, $\text{NH}_3\text{-N}$ were decreased from 1 615—2 364 mg/L, 33—71 mg/L, 115—224 mg/L to 136—280 mg/L, 17—76 mg/L, 0.5—9.0 mg/L, which could reach the standard of discharge. The physiological indexes of plants was in normal range and the plants grew well. The combination wetland plants of *Pontederia cordata* and *Canna generalis* in constructed wetland not only had good landscape effect, but also had high purify effect for livestock wastewater.

Keywords: artificial wetland; livestock wastewater; antioxidant enzyme system; stress