

多层次多物种配置人工湿地处理生活污水研究

刘春常¹, 夏汉平¹, 简曙光, 任海^{1*}, 张倩媚¹, 张太平², 陆少鸣²

1. 中国科学院华南植物园, 广东 广州 510650; 2. 华南理工大学, 广东 广州 510640

摘要: 将多层次、多物种配置的植物床的生活污水处理效果与传统植物配置方式的污水处理效果进行了比较, 研究了多层次、多植物种配置在人工湿地系统中污水处理的有效性和可行性。研究中, 对 COD_{Cr}、BOD₅、TP、TN 和 NH₃-N 的去除率, 传统植物配置的植物床分别达到了 69.0%、71.6%、78.5%、33.6% 和 36.7%, 多层次配置的植物床分别达到了 65.7%、64.6%、84.5%、20.2% 和 18.3%。结果表明, 多层次、多植物配置的植物床能有效去除污水中的污染物。另外, 在人工湿地中进行多层次、多物种配置时, 有必要结合植物筛选工作, 以确保配置更有效。

关键词: 人工湿地; 污水处理; 植物配置

中图分类号: X703

文献标识码: A

文章编号: 1672-2175 (2006) 02-0229-05

人工湿地是通过模拟自然湿地的结构和功能, 选择一定的地理位置与地形, 根据人们的需要人为设计与建造的湿地^[1]。植物是人工湿地的重要组成部分, 在系统中起关键作用, 主要表现在植物根系向基质中释放氧气, 植物根系固定植物床, 改变水力传导能力, 创造生物共生条件, 根系分泌物杀灭病原菌以及植物的景观美学作用等方面^[2]。随着人工湿地的进一步推广应用, 在保证污水处理高效的前提下, 景观效果和近自然的多植物多层次植物配置越来越得到重视。本研究将多层次、多植物的配置方式与传统的植物配置方式进行了比较实验, 试图验证多层次、多植物配置方式在人工湿地处理生活污水中的有效性, 为该技术在我国的推广应用提供理论依据和实践参考。

1 材料及方法

1.1 人工湿地中试系统构建

人工湿地植物床位于中国科学院华南植物园内, 紧挨流经广州市芭蕾舞剧团和广州艺术学校进入华南植物园的市政排污渠, 污水成分以生活污水为主。该人工湿地植物床系统由抽滤池、沉淀池、配水池、植物床和出水池 5 部分组成, 是串并联复合垂直流人工湿地 (图 1)。其中, 植物床由 4 块组成 (图 1 中 5—8 表示), 每块面积为 5 m×5 m, 植物床 5、6 与分别 7、8 串联, 5、7 分别与 6、8 并联平行。植物床 5、6 为下行流植物床, 植物床 7、8 为上行流植物床, 下行床比上行床高出 30 cm。床内基质填料均为底部 20 cm 厚的碎石和上部 100 cm 厚的石英沙。植物床 5、7 之间与植物床 6、8 之间由底部管道相连通, 并联植物床相互之间不连

通。污水在整个人工湿地的流动路径是由图 2 (下页) 所示。

植物床 5、7 中的植物采自华南植物园及其周边湿地, 属水生或湿生植物, 大多尚未广泛应用于人工湿地系统, 共 44 种 (下页表 1), 主要用来进行植物筛选和配置研究。植物床 6、8 中的植物来自深圳石岩河人工湿地, 共 6 种, 分别是香根草 *Vetiveria zizanioides*、风车草、纸莎草 *Cyperus pa-*

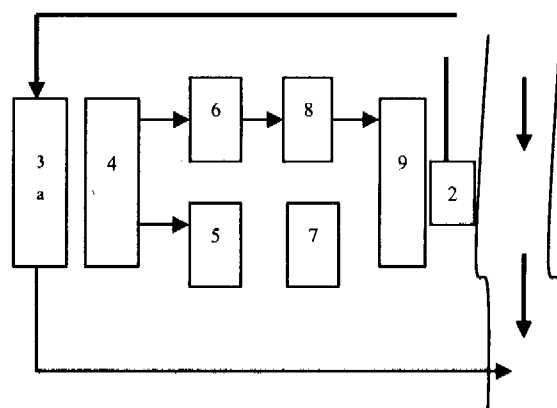


图 1 复合垂直流人工湿地简图

1.排污渠; 2.抽滤池; 3.沉淀池; 4.配水池; 5—6.垂直下行流植物床(上级); 7—8.垂直上行流植物床(下级); 9.出水槽 (箭头为水流方向; 线条粗细为水流量的相对大小; a—e 表示的是水样采集点)

Fig. 1 The flowing routine of the combined vertical constructed wetland

1.Sewage; 2.Pumping pond; 3.Precipitation pond; 4.Water distributing pond; 5—6.Vertical down-flow plant bed; 7—8.Vertical up-flow plant bed; 9.Output tank (The arrows refer to the direction of the flux, and the thickness of the lines indicates the size of the flux; and a—e refers to the water sampling sites)

基金项目: 广东省科技攻关项目 (2003C32201); 广州市政项目 (2003J1-C0341)

作者简介: 刘春常 (1980—), 男, 硕士研究生, 研究方向为生态工程。E-mail: liucc3505@scbg.ac.cn

*通讯联系人

收稿日期: 2005-12-17

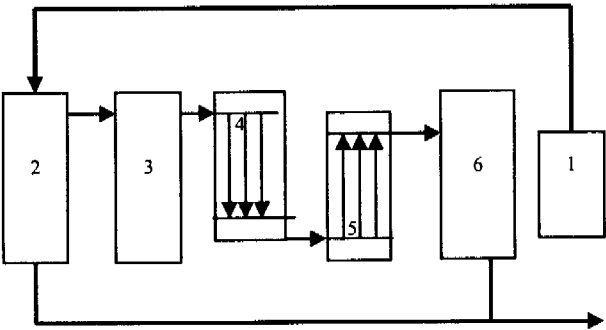


图2 复合垂直流人工湿地污水流程剖面图

1.抽滤池; 2.沉淀池; 3.配水池; 4.垂直下行流植物床; 5. 垂直上行流植物床; 6. 出水槽(箭头为水流方向)

Fig.2 The cutaway view of the combined vertical constructed wetland

1. Pumping pond; 2. Precipitation pond; 3. Water distributing pond; 4. Vertical down-flow plant bed (VDFB); 5. Vertical up-flow plant bed (VUFB); 6. Output tank (The arrows refer to the direction of the flux)

pyrus、水竹芋 *Thafia dealbata*、美人蕉 *Canna sp.* 和芦苇 *Phragmites australis*, 它们都是目前国内、外常用的人工湿地植物, 实验中作为植物床 5、7 中的对照组。所有植物于 2004 年 2—3 月间相继种下, 移植时, 串联的下行和上行植物床的植物种类相同, 同一种植物植株高度、种植密度和个体数尽量保持一致。并联的两套植物床形成了两种植物配置人工湿地模式, 其中植物床 6、8 作为植物床 5、7 的对照。

植物种植完后, 即对植物进行养护并进行系统试运行, 1 个月后, 植物全部成活并保持良好生长状态。4 月中旬, 系统开始连续运行, 每天污水处理量为 40 m³, 即平行的两套系统每天各处理 20 m³, 孔隙度为 40%, 水力停留时间为 24 h。

1.2 植物调查和水质采样方法

在 4—6 月份每月对植物的存活情况、高度、分蘖数及植物覆盖度等调查 1 次。按照工程设计的特点和本研究的需要, 共确定 5 个水样采集点, 分别是进水口 a、下行植物床出水口 b 和 c、上行植物床出水口 d 和 e (图 1)。4—8 月间, 每月选择 1 d 进行, 分别在 8:00、14:00、20:00 和次日凌晨 2:00 在每一采样点采样, 研究期间总共采样 16 次。

1.3 水质测定指标和方法

温度 (T) 和溶解氧 (DO) 由溶氧仪 (型号: TOA DO-11P) 测得; pH 由 pH 计测定; 化学需氧量 (铬) (COD_{Cr}): 快速密闭催化消解法; 五日生化需氧量 (BOD₅): 稀释接种法; 总氮 (TN): 过硫酸钾氧化—紫外分光光度法; 总磷 (TP): 钼锑抗分光光度法; 氨态氮 (NH₃-N): 纳氏试剂光度法^[3]。

1.4 统计分析方法

统计软件采用 Excel 和 SPSS, 对水质测定结果和植物调查结果进行平均值及标准差计算、相关性分析和配对样 T 检验等。

表1 植物床 5、7 中植物存活情况¹⁾

Table 1 List of the investigation of the survival of the plants in plant beds 5 and 7

中文名	拉丁名	存活	中文名	拉丁名	存活
黄花石蒜	<i>Lycoris aurea</i>	0/0*	大叶冷水花	<i>Pilea martinii</i>	3/3
崖角藤	<i>Rhaphidophora hongkongensis</i>	0/0	漏兜树	<i>Pandanus tectorius</i>	3/3
野牡丹	<i>Melastoma candidum</i>	0/0	落羽杉	<i>Taxodium distichum</i>	3/3
蒲桃	<i>Syzygium jambos</i>	1/0	三白草	<i>Saururus chinensis</i>	3/3
羊蹄甲	<i>Bauhinia adscendens</i>	1/0	石芒草	<i>Arundinella nepalensis</i>	4/0
龟背竹	<i>Monstera deliciosa Liehn</i>	1/1	艾蒿	<i>Artemisa argyi</i>	4/0
麒麟尾	<i>Rhaphidophora pinnata</i>	1/1	血苋	<i>Iresine herbstii</i>	4/0
五色梅	<i>Lantana camara</i>	1/1	水芋	<i>Calla palustris</i>	4/4
蜘蛛抱蛋	<i>Aspidistra elatior</i>	2/1	海芋	<i>Alocasi amarorrhiza</i>	4/4
鸢尾	<i>Iris tectorum</i>	2/2	野芋	<i>Colocasia antiquorum</i>	4/4
紫鸭跖草	<i>Tradescantia reflexa</i>	2/	薏苡	<i>Coix lacryma</i>	4/4
绿萝	<i>Scindapsus aureus</i>	3/0	象草	<i>Pennisetum purpureum</i>	4/4
美丽胡枝子	<i>Lespedeza formosa</i>	3/0	白姜花	<i>Hedychium coronarium</i>	4/4
火炭母	<i>Polggonum chlnense</i>	3/1	宽叶香蒲	<i>Typha latifolia</i>	4/4
白蝴蝶	<i>Syngonium podophyllum</i>	3/3	黄苞蝎尾蕉	<i>Heliconia latistaha</i>	4/4
紫背竹芋	<i>Stromanthe sanguinea</i>	3/3	水鬼蕉	<i>Hymenocallis speciosa</i>	4/4
粤万年青	<i>Aglaoanema moolestum</i>	3/3	芒草	<i>Miscanthus floridulus</i>	4/3
花叶沿阶草	<i>Ophiopogon japonicus</i>	3/3	叠穗莎草	<i>Phaius flavus</i>	4/4
沿阶草	<i>Ophiopogon japonicus</i>	3/3	黄花蔺	<i>Limnocharis flava</i>	4/4
花叶香蒲	<i>Typha latifolia Var variegatus</i>	3/3	轮叶狐尾藻	<i>Myriophyllu aquaticum</i>	4/4
虎尾兰	<i>Sansevieria trifasciata</i>	3/3	水芹	<i>Oenanthe javanica</i>	4/4
花叶冷水花	<i>Pilea cadierei</i>	3/3	水蓼	<i>Polygonum hydropiper</i>	4/4

1) 0、1、2 分别表示植物在 4、5、6 月份调查中已死亡, 3 表示植物能在植物床中生长, 但生长状态不好, 4 表示植物能在植物床中生长, 而且保持较好生长状态。斜线左边的数字为植物床 5 中的植物生长状态, 右边的为植物床 7 中的植物生长状态

2 结果与分析

2.1 植物存活及生长状况

植物床 5、7 中植物的存活状况（表 1）表明，至实验结束，植物床 5 中有 31 种植物存活下来，

植物床 7 中有 22 种植物存活，植物床 5 和 7 的植物覆盖度分别达到了 85%和 75%。植物床 6、8 中 6 种植物均生长良好，表 2 是植物床 6、8 所有植物种和植物床 5、7 中部分植物种的高度分蘖数调查

表 2 部分植物调查列表
Table 2 List of the investigation of a part of plants in the plant beds

植物床	中文名	拉丁名	高度/cm 及分蘖数 ¹⁾	
			下行床	上行床
6 和 8	香根草	<i>V. zizanioides</i>	20(4.0)/164.0(10.3)*	20(4.0)/208.3(12.0)
	芦苇	<i>P. australis</i>	26.0(9.5)/133.0(38.0)	25.3(10.0)/110.5(31.0)
	风车草	<i>C. alternifolius</i>	15.0(7.0)/98.3(52.5)	15.0(7.0)/94.7(50.7)
	纸莎草	<i>C. papyrus</i>	65.5(8.0)/150.0(13.0)	65.8(8.3)/156.7(44.7)
	水竹芋	<i>T. dealbata</i>	94.4(7.3)/180.0(31.0)	96.5(6.7)/185.0(35.0)
	美人蕉	<i>C. sp.</i>	35.0(6.3)/170.7(13.0)	31.2(7.0)/175.0(14.0)
5 和 7	苎蕨	<i>C. lacryma</i>	36.0(3.0)/124.7(8.7)	42.0(3.0)/157.3(14.0)
	白姜花	<i>H. coronarium</i>	20.0(3.0)/96.3(12.0)	20.0(3.0)/127.0(7.3)
	象草	<i>P. purpureum</i>	68.3 (7.5)/345.5(30.0)	57.4(7.0)/218.5(10.0)
	黄苞蝎尾蕉	<i>H. latistaha</i>	20(3.0)/84.0(15.0)	20(3.0)/82.0(5.0)
	叠穗莎草	<i>P. flavus</i>	15(4.0)/119.3(11.0)	15(4.0)/109.3(15.0)
	水芋	<i>C. palustris</i>	41.3/203.3**	44.0/168.8
	野芋	<i>C. antiquorum</i>	70.0/114.3	78.5/134.5
	海芋	<i>A. amarorrhiza</i>	33.7/97.3	27.6/58.0
	水鬼蕉	<i>H. speciosa</i>	51.3/118.0	46.3/112.3

1) 斜线左边的数字为种植时的观测值，右边的为种植 3 个月后的观测值，括号外的数值为高度，括号内的数值为分蘖数。**部分植物研究期间尚未长出新分蘖，表中未作相关记录

结果，结果表明植物床 6、8 和植物床 5、7 均能保持较好的生长状况。

2.2 温度、溶解氧和 pH 变化

如图 3 所示，污水处理前后温度变化较小，且植物床 5、7 与的植物床 6、8 之间也没明显差别。

相关分析表明，在污水的整个流程中，其水温均与大气温度呈高度相关 ($r^2=0.987$, $P<0.05$) (数据未列出)。DO 的变化呈“V”字型，上行植物床明显大于下行植物床，植物床 6、8 和植物床 5、7 之间差异不大。污水经植物床处理后，pH 均有所下降，

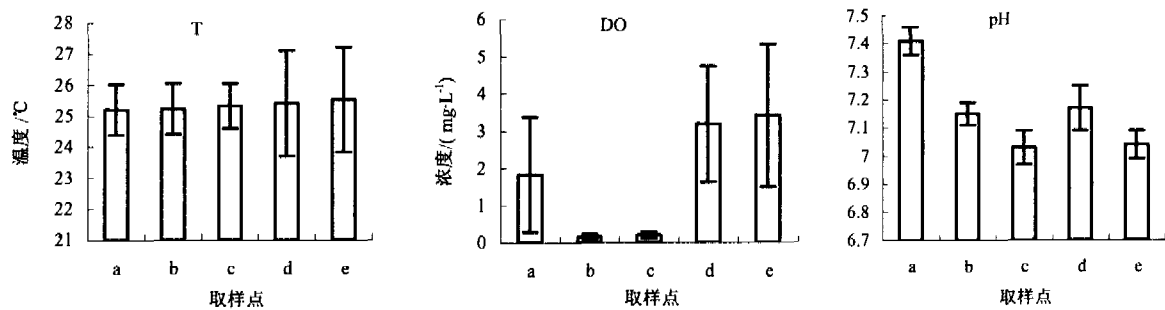


图 3 各取样点 T、DO 和 pH 浓度变化
Fig. 3 The change of T, DO and pH in the five sampling sites

其中植物床 5、7 下降的幅度要明显小于植物床 6、8，下行流和上行流植物床之间 pH 变化不大。

2.3 主要污染物的去除效果

表 3 和图 4 结果表明，对 COD_{Cr}、BOD₅、TP、TN 和 NH₃-N 的去除率，污水通过植物床 6、8 分别达到了 69.0%、71.6%、78.5%、33.6%和 36.7%，新植物配置的植物床分别达到了 65.7%、64.6%、84.5%、20.2%和 18.3%。植物床 6、8 和植物床 5、

7 均能有效去除污染物。但对于而对于 TN 和 NH₃-N，植物床 6、8 要显著好于植物床 5、7，而对于 TP，其去除量主要集中在上行植物床。

3 讨论

3.1 多层次、多植物种配置方式的可行性

植物床 5、7 由多种植物组成，至实结束，已形成了不同层次草本植物的配置格局，且保持了较高的物种多样性。植物床 6、8 由传统植物组成，

表3 几种主要污染物指标在污水处理过程中的质量浓度的变化
Table 3 The results of several major pollutants tested (Mean±SD, n=16)

测试指标	取样点 a	取样点 b	取样点 c	取样点 d	取样点 e
COD _{Cr}	59.80 ± 15.28	21.24 ± 5.12	20.52 ± 8.38	20.51 ± 7.89	18.57 ± 3.89
BOD ₅	39.72 ± 13.59	17.64 ± 6.02	14.96 ± 4.77	14.07 ± 6.71	11.27 ± 6.14
NH ₃ -N	12.41 ± 3.5	10.12 ± 1.57	8.30 ± 1.63	10.14 ± 2.19	7.85 ± 1.91
TN	14.13 ± 3.09	12.1 ± 1.30	10.64 ± 1.46	11.27 ± 2.15	9.39 ± 1.83
TP	1.36 ± 0.48	1.23 ± 0.25	0.94 ± 0.21	0.21 ± 0.03	0.29 ± 0.22

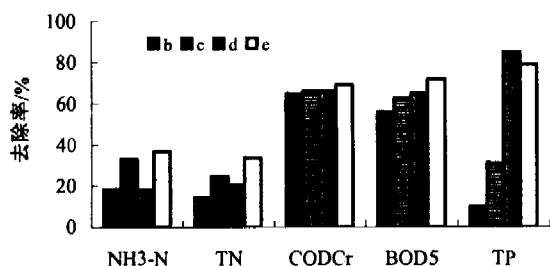


图4 污染物的去除率
Fig. 4 The removal rates of the pollutants

这些植物具有较好的污染物去除能力和较高的生物量,但物种多样性较低,景观效果较为单一^[4,5],离人工湿地公园的目标尚有一定距离。本研究中新植物配置方式与传统植物配置方式的比较表明多层次、多物种的新植物配置方式能有效去除污染物。但是,在实际操作中,有必要将人工湿地植物筛选工作与植物配置工作结合起来,防止选用部分植物因不适宜人工湿地生长环境而被淘汰,从而影响系统的处理能力。

3.2 人工湿地生活污水处理规律

植物吸收不是人工湿地除氮的主要途径^[6],但由于植物床5、7部分植物的死亡及覆盖度相对植物床5、7较小使得其氮的去除能力明显小于植物床6、8,这说明植物通过其它途径影响污染物的去除。氨氮是生活污水氮的主要成分,氨氮的浓度决定生活污水处理过程中pH的变化^[7],从而使植物床pH因不同植物配置而有较大差异,而上行下行流植物床间差异不明显。人工湿地污水处理过程中O₂的主要来源则包括污水中的DO、自由水面DO和植物根系分泌的O₂3部分^[8]。由于DO由多种因素决定,因此,两种植物配置之间并未表现出较大的浓度差异。P的去除途径有物理作用、化学吸附、生物同化等,其中以化学吸附为主^[9],因此它的去除率通常较高。研究表明,根系及其他生物释放磷酸酶等物质抑制磷酸盐与其他离子络合^[10,11]。因此,结合本实验人工湿地的工艺,在上述两方面因素作用下,TP较多地在上行植物床中去除。

表4 b、c、d、e各水质测试指标的配对样T检验结果 (n=16)
Table 4 The results of paired-sample T test of the items of water quality of sampling sites b, c, d and e

取样点	COD _{Cr}	BOD ₅	TP	TN	NH ₄ -N
b-c	0.410	1.054	2.379*	2.420*	2.917*
d-e	1.278	1.172	-3.004**	3.413*	3.463*
b-d	0.114	0.754	7.282**	0.811	0.189
c-e	0.552	1.905	14.483**	2.070	1.237

*P < 0.05, **P < 0.01

4 结论

通过对多层次、多物种配置的植物床与传统物种配置的植物床污水处理效果进行的比较研究,其结果表明,多层次、多植物种配置在人工湿地系统是有效和可行的。但是,在进行多层次、多物种配置时,必须结合植物筛选工作,以确保配置更有效。生活污水主要以N、P污染,其中氮以氨态氮为主,其去除量与植物生长情况相关,而P的去除则多集中在上行植物床。

参考文献:

- [1] 夏汉平. 人工湿地处理污水的机理与效率[J]. 生态学杂志, 2002, 24(4): 51-59.
XIA Hanping. Mechanisms and efficiencies on wastewater treatment with constructed wetlands: a review[J]. Chinese Journal of Ecology, 2002, 21(4): 51-59.
- [2] BRIX H. Do macrophytes play a role in constructed treatment wetlands?[J]. Water Science and Technology, 1997, 35(5): 11-17.
- [3] 王心芳. 水和废水监测分析方法[M]. 北京: 中国环境出版社, 2002: 216-219.
WANG Xinfang. Methods of the water and wastewater inspection and analysis[M]. Beijing: China Environmental Press, 2002: 216-219.
- [4] 王圣瑞, 年跃刚, 侯文华, 等. 人工湿地植物的选择[J]. 湖泊科学, 2004, 16(1): 91-96.
WANG Shengrui, NIAN Yuegang, HOU Wenhua, et al. Microphyte selection in artificial wetlands[J]. Journal of Lake Sciences, 2004, 16(1): 91-96.
- [5] BRIX H. Treatment of wastewater in the rhizosphere of wetland plants -the root-zone method[J]. Water Science and Technology, 1987, 19(1): 107-118.
- [6] 刘春常, 夏汉平, 简曙光, 等. 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, 2005, 14(4): 536-539.

- LIU Chunchang, XIA Hanping, JIAN Shuguang, et al. A case study on domestic wastewater treatment in Shiyianhe constructed wetland in Shenzhen[J]. Ecology and Environment, 2005, 14(4): 536-539.
- [7] 徐乐中. pH 值碱度对脱氮除磷效果的影响及其控制方法[J]. 给水排水, 1996, 22(1): 10-14.
- XU Lezhong. Effect on N and P removals and control of pH and alkalinity[J]. Water & Wastewater Engineering, 1996, 22(1): 10-14.
- [8] 吴晓磊. 人工湿地废水处理机理[J]. 中国环境科学, 1995, 16(3): 83-86.
- WU Xiaolei. Mechanism of wastewater treatment in constructed wetlands[J]. Chinese J Environmental Science, 1995, 16(3): 83-86.
- [9] 张建, 魏杰. 氮磷在废水表面滤过系统中的去除机制[J]. 中国环境科学, 2002, 22(5): 438-441.
- ZHANG Jian, WEI Jie. Nitrogen and phosphorus removal mechanism in subsurface wastewater infiltration system[J]. Chinese J Environmental Science, 2002, 22 (5): 438-441.
- [10] 周易勇, 付永清. 水体磷酸酶: 来源、特征及其生态学意义[J]. 湖泊科学, 1999, 11(3): 274-282.
- ZHOU Yiyong, FU Yongqing. Phosphatases in natural water: origin, characteristics and ecological significance[J]. J Lake Science, 1999, 11 (3): 274-282.
- [11] 廖新伟, 骆世明. 人工湿地对猪场废水有机物处理效果的研究[J]. 应用生态学报, 2002, 13(1): 113-117.
- LIAO Xindi, LUO Siming. Shiming treatment effect of constructed wetlands on organic matter in wastewater from pig farm[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2002, 13(1): 113-117.

Sewage treatment in constructed wetland of multiplayer plants configuration

LIU Chunchang¹, XIA Hanping¹, JIAN Shuguang¹, REN Hai¹,
ZHANG Qianmei¹, ZHANG Taiping², LU Shaoming²

1. South China Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510650, China;

2. South China University of Technology, Guangzhou 510640, China

Abstract: Comparing the plantbeds with multiplayer plants configuration with those with traditional plant configuration, the research was focused on the domestic wastewater treatment in constructed wetland. As to COD_{Cr}, BOD₅, TP, TN and NH₃-N, the removal rates in the traditional plants configuration got to 69.0%, 71.6%, 78.5%, 33.6% and 36.7% , irrespectively, and 65.7%, 64.6%, 84.5%, 20.2% and 18.3% in multiplayer plants configuration plantbeds. It indicated that the plantbed with multiplayer plants configuration could decrease the pollutants effectively. However, it is noteworthy that plants selection is necessary when different plants are collocated together.

Key words: constructed wetland; wastewater treatment; plant configuration