

垂直流美人蕉模拟人工湿地对化粪池出水的净化效果

朱夕珍, 崔理华, 刘 雯, 刘 怡

(华南农业大学环境科学与工程系, 广东 广州 510642)

摘 要: 通过在 3 种不同基质上种植美人蕉, 研究了垂直流美人蕉模拟人工湿地系统对化粪池出水的净化效果以及不同水力负荷对污水净化效果的影响。结果表明, 不同填料、不同水力负荷对污水中 TP、COD、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 BOD_5 的净化效果不同。由于美人蕉根系和微生物的吸收与分解作用以及基质的吸附作用, 种植美人蕉的人工湿地出水水质要比对照好。

关键词: 人工湿地; 垂直流; 美人蕉; 水力负荷; 净化效果

中图分类号: X703 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672 – 2043(2004)04 – 0761 – 05

Removal Efficiencies of Septic Tank Effluent by Simulating Vertical – Flow Constructed *Canna indica* Linn Wetlands.

ZHU Xi-zhen, CUI Li-hua, LIU Wen, LIU Yi

(Department of Environmental Science & Engineering, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

Abstract: *Canna indica* Linn was planted in three mixture substrates. The effects of simulating constructed wetland and hydraulic load on the purifying efficiency for septic tank effluent treatment were studied in this paper. The results showed that the wastewater purifying efficiency for COD, BOD_5 , ammonium and total phosphorus were significant different with substrates and hydraulic loading rate. Under the combination function of the absorbability and decomposition of *Canna indica* Linn roots and microbiology and the absorption of substrate, the effluent quality of vertical – flow constructed wetlands planted with *Canna indica* Linn were better than those constructed wetlands without *Canna indica* Linn.

Keywords: constructed wetlands; vertical – flow; *Canna*; Hydraulic loading rate; purifying efficienc

人工湿地作为一种低投资、低能耗、低处理成本和具有氮磷去除功能的废水生态处理技术已逐渐被世界各国所接受。在欧洲和北美, 数以千计的天然湿地和人工湿地被广泛应用于处理多种废水, 其中包括城市污水、工业废水、农业径流、城市暴雨、填埋场沥滤液、造纸废水和矿山酸性排水^[1~3]等。垂直下行流芦苇床被认为是废水硝化的可靠天然处理系统, 因为它具有优良的氧转移特性^[4], 可用于氨氮含量较高的

污水^[5,6]以及城市污水^[7,8]等方面的处理, 但采用垂直流人工湿地系统处理化粪池出水的研究和实例尚不多见, 特别是浅型垂直流人工湿地处理化粪池出水则未见有报道^[9]。人工湿地的深度一般是按水生植物根系自然扩展的深度来设计的, 多数为 0.6 ~ 0.7 m^[10,11], 但有些湿地植物根系不能达到基质的底部, 主要集中在上面 25 cm 的基质区域^[12]。因此, 本研究的垂直流人工湿地深度采用 25 cm, 并以美人蕉作为湿地植物, 研究浅型垂直流美人蕉模拟人工湿地系统对化粪池出水的处理效果。

1 材料与方法

1.1 人工湿地结构

1.1.1 人工湿地的构造

垂直流人工湿地为浅白色圆柱状瓷盆, 高 30 cm,

收稿日期: 2003 – 12 – 27

基金项目: 广东省自然科学基金项目(990721); 广东省重点科技计划项目(2KM06503S、2003C32912)和广州市环保局项目(2000 – 008)

作者简介: 朱夕珍(1968—), 女, 实验室主任、实验师, 主要从事环境监测与土壤化学分析以及污水生态处理系统等方面的教学和科研工作。

联 系 人: 崔理华, 教授, E – mail: lihcui@scau.edu.cn

内径 24.5 cm,瓷盆侧底部开有一小圆孔,用穿有玻璃管的橡皮塞塞住,然后在玻璃管上接上橡皮软管,用止水夹夹住,旋转止水夹旋扭可调节出水速度。

1.1.2 基质

先在 18 个瓷盆底部垫上一层 5 cm 厚的砾石,再分别在砾石上填充 20 cm 厚的人工混合基质,其中 1~6 号填充中性人工土,7~12 号填充偏酸性人工土,13~18 号填充偏碱性人工土。每个瓷盆顶部空余 5 cm 用于蓄水和种植植物。

1.1.3 植物

湿地植物选取耐湿的陆生花卉—美人蕉(Canna indica Linn)。其中,单号瓷盆种植美人蕉,双号瓷盆设为对照。

2.1.4 水力负荷

每种填料分高、中、低 3 种水力负荷。例如在中性基质的 6 个处理中,1~2 号高负荷,3~4 号中负荷,5~6 号低负荷。其水力负荷定额分别为 21、14、7 cm·d⁻¹。如下的偏酸性基质(7~12 号)和偏碱性基质(13~18)依次类推。

1.2 人工湿地的运行

人工湿地 2000 年 10 月 18 日开始运行,每种填料每日分别按高、中、低 3 种负荷浇灌污水,运行至 2001 年 2 月 14 日在每个单号瓷盆上种植了 3 株美人蕉,至 2002 年 7 月底共运行了 22 个月。运行期间,每日计量各处理实际的灌溉污水量,每隔一个星期取样分析一次进水和出水水质,具体的分析化验指标有

COD、BOD₅、NH₄-N、NO₃-N、TN 和 TP 等。

1.3 供试污水特性

供试城市污水取自华南农业大学五号楼公厕三级化粪池出水,其水质状况的监测结果如表 1 所示。

表 1 供试污水水质状况(mg·L⁻¹)

Table 1 The characteristic of sewage for the experiment

水质指标	COD	BOD ₅	NH ₄ -N	TP
春季	152-325	74-105	71-129	5.1-17.6
夏季	77-169	35-98	43-73	6.2-7.4
秋季	141-209	58-84	106-150	6.1-14.2
冬季	194-349	73-133	150-220	9.0-17.9

1.4 分析方法

COD 采用催化消解密封-滴定法;BOD₅ 采用标准稀释法;氨氮、硝氮采用蒸馏酸滴定法;总磷采用过硫酸钾氧化-钼蓝比色法。

2 结果与分析

2.1 垂直流人工湿地的水力负荷

近 2 年连续运行试验各处理的水力负荷率如表 2 所示。有些研究表明进水流量不同、水位高低不同,对床体内的硝化速度、溶解氧量的影响很小或没有影响(Rosgers, 1997)。如果进水负荷太小,则不能充分发挥湿地系统对污水的净化潜力,但是进水负荷增大会引起停留时间、出水速率和出水量的下降,对污水的净化处理造成不利影响。有结果证明水力负荷增加会使去除率下降^[8]。

表 2 垂直流人工湿地的水力负荷率(cm·d⁻¹)

Table 2 The hydraulic loading rate of vertical-flow constructed wetland (cm·d⁻¹)

项目	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
水力负荷	17.2	18.5	12.0	12.1	6.86	6.93	18.0	19.5	12.6	13.1	6.93	6.93	18.3	18.1	12.7	12.5	7.29	7.00
标准差	2.39	2.49	1.74	2.08	0.40	0.29	3.13	2.03	1.57	1.61	0.29	0.29	2.32	2.09	1.29	1.64	0.80	0.00

注:样本数为 16

2.2 对 COD 的去除效果

COD 是水体耗氧有机污染物的综合指标,常用来指示水体中有机物的含量。表 3 反映了种植美人蕉前后对 COD 的处理效果。试验结果表明,在 3 种基质的人工土中,以偏酸性基质对 COD 的去除效果最好,其次为中性基质,最差的是偏碱性基质。种植美人蕉后,出水中 COD 值与不种美人蕉的对照相比有很明显的下降,偏酸性基质的去除率增幅不明显,而偏碱性与中性基质的去除率却显著升高。另外,水力负荷的大小对 3 种基质的 COD 去除率都有一定的影响,其中采用中低进水负荷时,其去污效果较好,这可能

是因为水力负荷增大引起停留时间缩短和处理速率以及处理出水水量增加而不利于污水的净化。

2.3 对 BOD₅ 的去除效果

不同填料对去除效果的影响:无论是偏碱性还是偏酸性或中性基质对 BOD₅ 的去除效果都很显著,种美人蕉的处理和没种美人蕉的对照对 BOD₅ 的去除效果都比较好,两者之间差异不显著,其去除率基本上都在 75.3% 以上,见表 4。并且种植美人蕉之前以偏酸性基质的去除效果最好,而种植美人蕉之后以偏碱性基质的去除效果最好,偏酸性基质次之,中性基质最差。这可能是因为偏碱性基质孔隙度大,其根系

表 3 种植美人蕉与否对 COD 的去除效果

Table 3 The removal efficiency (%) of COD before and after being planted *Canna indica* Linn (%)

盆号	样本数	平均值 ± 标准差 /mg · L ⁻¹	去除率 /%
1	8	59.79 ± 40.46	63.9
2	8	63.81 ± 43.85	61.5
3	8	39.86 ± 28.34	76.0
4	8	46.89 ± 35.84	71.7
5	8	47.38 ± 44.38	71.4
6	8	51.94 ± 22.38	68.7
7	8	43.74 ± 36.26	73.6
8	8	48.35 ± 36.26	70.8
9	8	19.59 ± 21.02	88.2
10	8	31.76 ± 23.73	80.7
11	8	22.01 ± 18.66	86.7
12	8	23.33 ± 14.93	85.9
13	8	59.88 ± 47.08	64.5
14	8	58.24 ± 46.10	64.3
15	8	42.16 ± 30.78	74.6
16	8	51.82 ± 38.32	68.7
17	8	46.23 ± 47.72	72.1
18	8	49.84 ± 47.24	69.9
污水	8	165.77 ± 83.72	—

供氧能力优于孔隙度较小的另外两种基质,因而其耗氧分解能力较强,所以对 BOD₅ 的去除能力大大提高了。

不同水力负荷对去除效果的影响:不同的水力负荷对 BOD₅ 的净化效果也不同,由表 4 可以看出随着

表 4 种植美人蕉与否对 BOD₅ 的去除效果

Table 4 The removal efficiency (%) of BOD₅ before and after being planted *Canna indica* Linn

盆号	样本数	平均值 ± 标准差 /mg · L ⁻¹	去除率 /%
1	6	9.04 ± 7.85	83.9
2	6	11.32 ± 8.91	79.9
3	6	9.58 ± 6.31	83.0
4	6	15.97 ± 16.54	81.6
5	6	10.07 ± 9.23	82.1
6	6	4.31 ± 4.14	78.4
7	6	3.49 ± 2.93	88.1
8	6	13.72 ± 14.79	75.6
9	6	9.50 ± 6.28	83.1
10	6	6.68 ± 5.18	81.8
11	6	11.76 ± 13.52	80.8
12	6	7.88 ± 7.46	79.3
13	6	10.25 ± 10.36	93.8
14	6	8.28 ± 8.10	75.3
15	6	5.76 ± 3.75	89.8
16	6	11.45 ± 13.00	79.7
17	6	6.81 ± 9.50	87.9
18	6	7.73 ± 8.15	86.3
污水	6	56.30 ± 30.95	—

水力负荷的增加,3 种填料对 BOD₅ 的去除率都有不同程度的降低,但这种影响并不是很明显。试验结果表明,种植美人蕉的湿地系统对 BOD₅ 有较高的去除率,而未种美人蕉的湿地系统其去除效果比种植系统要差些,这可能是由于种植美人蕉后湿地系统具有较好的氧传输能力。因此,污水中所含的有机物在美人蕉湿地中通过好氧代谢得到降解,从而降低了处理出水中 BOD₅ 和 COD 的含量。

2.4 对氨氮的去除效果

不同填料对去除效果的影响:由表 5 可以看出,采用偏碱性基质的系统对 NH₄⁺ - N 的去除效果最好,其次为偏酸性煤渣,最差的是中性基质,这可能是由于偏酸性基质颗粒较细,其孔隙率较低而引起自然通气供氧能力较差以及 NH₄⁺ - N 硝化能力不强之所致;而偏碱性基质的基质孔隙度在 3 种填料中最大,这既有利于自然通风供氧,又有利于有机物的好氧分解和氨氮的硝化。因此,偏碱性基质对 NH₄⁺ - N 最差。这可能是因为偏碱性基质孔隙度大,其的去除效果最好。

不同水力负荷对去除效果的影响:由表 5 对比可知,3 种填料在低水力负荷下出水效果比高负荷和中负荷有明显的改善。种美人蕉之前以中水力负荷(14 cm · d⁻¹)出水最差,而在种美人蕉后,在高水力负荷(21 cm · d⁻¹)下的出水水质变差,而且很不稳定,出水 NH₄⁺ - N 去除率变化幅度大, NH₄⁺ - N 最高为

表 5 种植美人蕉与否对氨氮的处理效果

Table 5 The removal efficiency of ammonia before and after being planted *Canna indica* Linn

盆号	样本数	平均值 ± 标准差 /mg · L ⁻¹	去除率 /%
1	16	38.96 ± 7.18	58
2	16	50.77 ± 9.07	45.3
3	16	36.78 ± 7.5	60.4
4	16	47.31 ± 10.47	49.1
5	16	32.88 ± 6.82	64.6
6	16	49.45 ± 11.0	46.8
7	16	34.7 ± 7.93	62.6
8	16	41.47 ± 10.41	55.3
9	16	31.37 ± 5.3	66.2
10	16	37.76 ± 7.75	59.3
11	16	26.28 ± 7.66	71.7
12	16	27.4 ± 6.62	70.5
13	16	15.4 ± 4.54	83.4
14	16	39.52 ± 6.94	57.4
15	16	15.54 ± 5.06	83.3
16	16	17.95 ± 7.87	80.7
17	16	11.76 ± 5.16	87.3
18	16	18.07 ± 5.63	75.8
污水	16	92.86 ± 9.32	—

83.4%,最低仅有 45.3%。而其中又以偏碱性基质的去除效果为最好。3 种基质在种植美人蕉后对 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的去除率都有很显著的提高。这是因为美人蕉根系的输氧作用使根系周围形成一个好氧区域,同时由于好氧生物膜对氧的利用而使离根系较远的区域呈缺氧状态,而在更远的区域则呈厌氧状态。这些溶解氧含量不同的区域分别有利于废水中不同污染物的降解、转化及去除。因此,种美人蕉的湿地形成了一个具有很强净化功的体系,氧的供给对此过程起了重要作用。

2.5 对总磷的去除效果

试验过程中,在单数号的瓷盆里种植了美人蕉,双数号不种作为对照,使每种填料、每种水力负荷都有一盆是种了植物,一盆是不种植物。所测得总磷的平均去除率如表 6。从表 6 可以看出,种植美人蕉的系统总磷去除率均比没种植物的高,增加幅度为 20% ~ 60% 不等;其中偏碱性基质提高幅度最高,平均为 41.5%;中性基质次之,平均为 37.6%;偏酸性基质最低,提高幅度平均只有 29%。由此可知,种植了美人蕉对总磷的去除是有一定效果的,但对于偏酸性基质来说作用不是很大。低水力负荷最高,有充分的接触时间,其作用期较长,去除的效果也比较好。

这主要是由于磷是植物细胞生长所需的营养物质,在土壤溶液中磷主要以可溶性磷存在,植物根系

可从中吸收磷酸盐作为新陈代谢的能源物质。同时,根系具有输氧功能,在根周围的土壤溶液中溶解氧浓度较高,适宜于好氧微生物的活动,通过它们的分解作用起到去除磷的目的。另外,植物的生长状况可影响到去除效果的好坏。在冬季,植物生长减慢,对磷的吸收放慢,使出水磷的含量增加,去除率也相应的降低。偏碱性基质的去除效果最显著($P < 0.05$)达到了 90% 以上,而在中性和偏酸性基质系统中,未种美人蕉者其出水中 TP 浓度有些还要低于种植美人蕉的系统。这表明系统中有有机磷、不可溶性磷酸盐的分解释放了正磷酸盐,可能与基质及美人蕉根系的释放作用有关。因植物吸收磷有限,因此需要定期收割美人蕉以防止磷的再释放。

3 结论

(1)美人蕉根系是除基质外影响污水净化的主要因素,它增加了人工土表层的水流通道,并沟通基质上下层,使污水流动迅速,出水畅快。另外,美人蕉根系具有吸收、转化污染物质的显著功能。它的根系周围的富氧环境对好氧微生物活动具有促进作用,这种生物效应,使其净化效果也得到了很大的提高。

(2)种植美人蕉的系统对污水有较好的净化效果。而没有种植美人蕉的系统在相同的水力负荷,相同的基质条件下,比种植美人蕉的污水净化效果差。

(3)2 种基质试验结果表明,利用偏碱性基质的系统除在 COD 去除率上略低于偏酸性基质外,其他如对 BOD_5 、TP、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的去除效果均要比其他基质好。特别是种植美人蕉后,对 TP 的去除率达到 90% 以上,这说明偏碱性基质是一种良好的高磷吸附人工湿地基质。

参考文献:

[1] Amelia Kivaisi. The potential for constructed wetlands for wastewater treatment and reuse in developing countries: a review[J]. *Ecol Eng*, 2000, 1 6: 545 – 560.

[2] 籍国东,孙铁珩,李 顺. 人工湿地及其在工业废水处理中的应用[J]. *应用生态学报*,2002,13(2):224 – 228.

[3] 楼莉萍,胡顺良,王光火. 人工湿地处理系统技术的研究现状与进展[J]. *环境科学进展*,1999,7(7): 33 – 38.

[4] Cooper P F and Green M B. Reed bed treatment systems for sewage treatment in the United Kingdom[J]. *Wat Sci Technol*, 1995, 32(3): 317 – 327.

[5] Sakadevan K, Bavor HJ. Phosphate adsorption characteristics of soils, slag and zeolite to be used as substrates in constructed wetland systems [J]. *Water Reasearch*, 1998, 32(2): 393 – 399.

表 6 种植美人蕉与否对磷的处理效果
Table 6 The removal efficiency of total phosphorus before and after being planted *Canna indica* Linn

盆号	样本数	平均值 ± 标准差 / $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	去除率 / %
1	15	3.30 ± 0.55	56.7
2	15	6.33 ± 0.53	16.9
3	15	3.17 ± 0.66	58.4
4	15	6.40 ± 0.48	16.0
5	15	1.84 ± 0.55	75.9
6	15	4.88 ± 0.47	36.0
7	15	1.87 ± 0.57	75.5
8	15	4.64 ± 0.64	39.1
9	15	1.45 ± 0.30	81.0
10	15	4.17 ± 0.50	45.3
11	15	0.90 ± 0.28	88.2
12	15	3.38 ± 0.44	55.6
13	15	0.54 ± 0.19	93.0
14	15	0.69 ± 0.14	91.0
15	15	0.56 ± 0.26	92.7
16	15	0.72 ± 0.35	90.5
17	15	0.29 ± 3.67E – 02	96.2
18	15	0.39 ± 8.02E – 02	94.9
污水	15	7.62 ± 0.60	—

- [6] Verhoeven J T A, Meuleman A F M. Wetlands for waste water treatment: opportunities and limitations[J]. *Ecological Engineering*, 1999, 12, 12: 5 – 12.
- [7] 崔理华, 朱夕珍, 汤连茂, 等. 城市污水人工快滤床与水植物复合处理系统[J]. 中国环境科学, 2000, 20(5): 432 – 435.
- [8] 王宜明. 人工湿地净化机理和影响因素探讨[J]. 昆明冶金高等专科学校学报, 2000, 16(2): 1 – 6.
- [9] 崔理华, 朱夕珍, 李国学, 等. 北京西郊城市污水人工快滤处理与利用系统研究[J]. 中国环境科学, 2000, 20(1): 45 – 48.
- [10] Gersberg R M, Elkins B V, Lyon S R, et al. Role of aquatic plants in wastewater treatment by artificial wetlands[J]. *Wat Res*, 1986, 20(3): 364 – 368.
- [11] 胡康萍. 人工湿地设计的水力学问题研究[J]. 1991, 4(5): 8 – 12.
- [12] Rosgers K H, Breen P F, Chick A J. Nitrogen removal in experimental wetland treatment systems: evidence for the role of aquatic plants[J]. *JWPCF*, 1991, 63: 934 – 941.
- [13] 唐述虞, 宋正达, 史建文, 等. 金属酸性废水的湿地生态工程处理研究[J]. 中国环境科学, 1993, 13(5): 356 – 360.
- [14] 吴振斌, 任明迅, 付贵萍, 等. 垂直流人工湿地水力学特点对污水净化效果的影响[J]. 环境科学, 2001, 22(5): 45 – 49.

欢迎订阅 2005 年《中国沼气》

《中国沼气》由农业部主管, 中国沼气学会和农业部沼气科学研究所主办。主要报道我国沼气、环保及生态科研新技术、新成果, 推广沼气、环保、生态建设实用新技术, 介绍沼气、沼液、沼渣利用的新方法, 探讨沼气、环保及生态建设中的新问题。辟有实验与研究、沼气工程、生活污水净化池、户用沼气池、综合利用、管理经验、问题探讨、其他可再生能源等 10 多个栏目。读者主要为从事厌氧技术研究、沼气建设、环保工程、农村能源、卫生土肥等领域的科研、教学人员、管理干部和技术人员等。本刊还承办广告业务, 为客户提供商品信息。

本刊为国际大 16 开, 季刊, 国内外公开发行。订户可到当地邮局办理订阅手续, 邮发代号: 62 – 164, 每期 5.00 元, 全年订价 20 元; 也可以直接向编辑部邮购。

编辑部地址: 四川省成都市人民南路四段 13 号(邮编: 610041)

电话(传真): (028) 85230681

E – mail: cbso@ mail. sc. cninfo. net