

农田排灌水的稳定塘-植物床复合系统处理

卢少勇,张彭义,余刚,祝万鹏,向长生 (清华大学环境科学与工程系,北京 100084)

摘要:采用稳定塘-植物床系统处理农田排灌水,植物床栽植茭草和芦苇.监测结果表明,雨季、旱季平均流量分别为 417.1,206.8m³/d.无降雨期间渗漏、蒸发蒸腾损失的水量之和占进水的 42.1%~60.5%.系统雨季进水 COD、总氮(TN)、氨氮和总磷(TP)平均浓度分别为 97.9,8.09,3.38,0.69mg/L,旱季分别为 112,7.76,3.78,0.98mg/L.各项污染物平均去除率大于 57%.芦苇和茭草的生长速度在 5 月最大.因植物收割去除的 N 和 P 量分别占进水的 14.6%和 27.1%.从 2002 年 4 月~2003 年 7 月湿地截留 SS 量为 297.5m³.

关键词:稳定塘;植物床;农田排灌水;茭草;芦苇

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 1000-6923(2004)05-0605-05

Stabilization pond-plant bed composite system treatment of farmland irrigation and drainage water. LU Shao-yong, ZHANG Peng-yi, YU Gang, ZHU Wan-peng, XIANG Chang-sheng (Department of Environmental Science and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China). *China Environmental Science*, 2004,24(5): 605~609

Abstract: The stabilization pond-plant bed composite system was used for treatment of farmland irrigation and drainage water, in the plant bed, *Zizania caduciflora* and *Phragmites australis* were planted. The average flow rates in rainy and dry seasons were 417.1 and 206.8m³/d. The sum of the infiltration and the evapotranspiration loss in period without rain occupied 42.1%~60.5% of the influent water. The chemical oxygen demand (COD), total nitrogen (TN), ammonia nitrogen and total phosphorus (TP) average concentrations of the influent water in rainy and dry seasons were 97.9, 8.09, 3.38, 0.69mg/L and 112, 7.76, 3.78, 0.98mg/L, respectively. The average contaminant removal rate was more than 57%. The growth rates of *Zizania caduciflora* and *Phragmites australis* were greatest in May. The nitrogen and phosphorus amounts removed by plant harvesting occupied 14.6% and 27.1% of the influent water. The SS amount caught from April 2002 to July 2003 was 297.5m³.

Key words: stabilization pond ;plant bed ;farmland irrigation and drainage water ;*Zizania caduciflora*; *Phragmites australis*

近年来,因面源污染导致的总氮(TN)、总磷(TP)入湖量占滇池氮磷入湖总量的 50%以上,控制面源污染成为解决滇池富营养化的关键.对某示范区的调查表明,农田排灌区地表径流中的 TN 和 TP 入湖量分别占其面源总量的 39%和 38%^[1].有效控制农田排灌渠来水对防治滇池富营养化有重要意义.人工湿地处理污水工艺具有高效率、低投资、低运转费和低维持技术的优点,考虑到降雨径流来水中的悬浮物浓度较高,本研究采用稳定塘-人工湿地技术,处理排灌渠来水,削减来水中的 TN 和 TP.

棚覆盖率超过 85%,系统与滇池仅隔一条宽 2.5m 的排涝沟渠和一条宽 4m 的马路,见图 1.进水主要为农田排水和灌溉余水,含部分村镇生活污水及降雨径流,出水排入滇池.表 1 为系统的水力参数.在滇池高水位期间,系统出水排入排涝沟后经排涝泵站泵入滇池.在滇池低水位期间,系统出水直排滇池.大流量时缓冲区起到一定的水量缓冲作用,降低进入稳定塘的流速;格栅拦截大块漂浮物;稳定塘去除部分小颗粒悬浮物、COD、氮和磷,减轻植物床的负荷;稳定塘中部设导流墙,改善流态,进、出水端均设竹栅栏固定塘内浮水

1 材料与方法

1.1 实验系统

实验系统位于云南省昆明市新村,农田中大

收稿日期: 2004-02-24

基金项目: 国家科技部重大专项“滇池流域面源污染控制研究”(2000-03)资助

* 责任作者, 副教授, zpy@mail.tsinghua.edu.cn

植物.植物床东部芦苇和茭草各一半,西部为茭草,稳定塘内为水葫芦.研究区域每年5~9月底属雨季,其余为旱季.

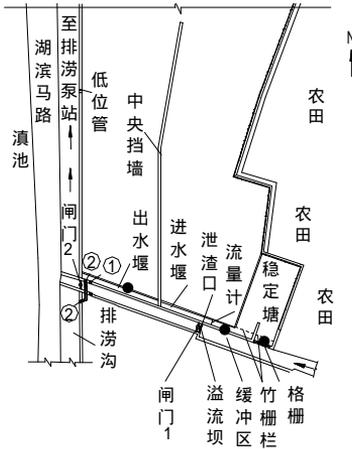


图1 平面示意

Fig.1 Schematic plan

滇池低水位时湿地出水管 滇池高水位时湿地出水管

表1 水力参数

Table 1 Hydraulic parameter

系统	面积 (m ²)	运行水深(m)		平均 HRT(d)	
		正常	最大	旱季	雨季
稳定塘	200	1.00	1.25	0.98	0.50
湿地	4200	0.16	0.42	3.05	2.01

1.2 水量平衡

湿地水量平衡计算方程^[2]为

湿地累积水量=进水量+降水量-土壤水分蒸腾蒸发损失水量(ET)-渗漏水量-出水量.

由流量计测定进水量,水表和溢流堰测定出水量,雨量计记录降水量.由无降雨阶段的湿地水位变化确定 ET 和渗漏水量.在 2002 年 12 月 11~15 日进行水量平衡试验,期间无降雨,无风,平均气温和水温为 10.4 和 12.5 ,茭草和芦苇平均高度为 2.76,2.93m.

1.3 水质测定

监测点为图 1 中实心圆点.水质分析每周 1~2 次,常规项目有 COD、氨氮、TN 和 TP,均采用标准方法^[3].现场测水深、水温、DO、pH、电

导率.植株全氮、全磷和全钾分别采用硫酸-混合加速剂-蒸馏法、钼锑抗比色法和火焰光度法^[4].

1.4 植物生长

主要测定植物的株高与营养物含量.

1.5 湿地淤泥沉积

Vymazal^[5]报道,湿地中悬浮物的积累对系统正常运行构成威胁.沉积物厚度的逐渐增加导致湿地有效面积的减少.故在运行中测定不同位置的淤泥厚度.

2 结果与讨论

2.1 水量平衡

湿地在 2002 年 4 月~2003 年 9 月期间,雨季和旱季平均流量为 417.1,206.8m³/d,月均进水量 105.8~780.1m³/d,月均停留时间 0.67~4.92d,月均水力负荷为 3.6~26.5cm/d.对比文献[6]推荐的表面流湿地的水力负荷 2~20cm/d,本湿地的水力负荷偏高.

水量平衡试验表明,总进水 595.2m³.总出水 285.7m³.以进水量为 100%计,(ET+渗漏)占 42.1%~60.5%,出水占 39.5%~57.9%.湿地的进、出水量的这种差异属于正常,文献[7]报道佛罗里达州某湿地 1990 年的出水约占进水的 29.5%.

2.2 水质

根据 1 年半中各阶段平均水量水质及相应的样本数加权平均得到年均水量水质(表 2).假设进水流量等于出水流量,计算得到污染负荷率(表 3).2002 年 12 月~2003 年 2 月湿地进出水的温度、DO、pH 和电导率见图 2 和表 4.图 2 为 2002 年 12 月 22 日稳定塘进出水和湿地进水堰后 5~45m 处的测定值.表 4 为 2002 年 12 月~2003 年 2 月的数据.

由表 2 可见,稳定塘在雨季时释放磷,可能因暴雨瞬时的大流量强烈扰动稳定塘淤积层,发生磷流失.稳定塘在雨季的去除率均低于旱季,主要因雨季的水力负荷和有机负荷明显高于旱季.实际上因渗漏和蒸发蒸腾导致水量损失,出水量远小于进水量,所以负荷削减率高于表 3 中的数值.

表 2 水质测定结果

Table 2 Results of water quality measurement

参数	季节	总进水	塘出水	总出水	塘去除率 (%)	总去除率 (%)
总氮 (mg/L)	旱季	7.76	5.62	3.30	27.6	57.5
	雨季	8.09	6.75	3.42	16.6	57.7
氨氮 (mg/L)	旱季	3.78	1.92	1.06	49.2	72.0
	雨季	3.38	2.73	1.23	19.2	63.6
总磷 (mg/L)	旱季	0.98	0.40	0.31	59.2	68.4
	雨季	0.69	0.71	0.28	-2.9	59.4
COD (mg/L)	旱季	112	53.6	41.3	52.2	63.2
	雨季	97.9	77.2	41.0	21.1	58.1

表 3 污染负荷计算结果

Table 3 Calculation Results of Pollution Load

季节	项目	总氮(kg)	氨氮(kg)	总磷(kg)	COD(kg)
旱季	总进水	229.5	111.9	29.0	3317.2
	塘出水	195.6	66.9	14.0	1866.2
	湿地出水	114.9	36.9	10.7	1437.6
	塘削减量	33.9	45.0	15.0	1451.0
	总削减量	114.6	75.1	18.2	1879.6
	塘削减率(%)	14.8	40.2	51.8	43.7
	总削减率(%)	49.9	67.1	62.9	56.7
雨季	总进水	1017.0	424.7	86.7	12292.0
	塘出水	888.6	359.1	93.3	10168.0
	湿地出水	450.7	161.9	37.3	5397.7
	塘削减量	128.0	65.6	-6.6	2124.4
	总削减量	565.9	262.8	49.4	6894.5
	塘削减率(%)	12.6	15.4	-7.6	17.3
	总削减率(%)	55.7	61.9	57.0	56.1

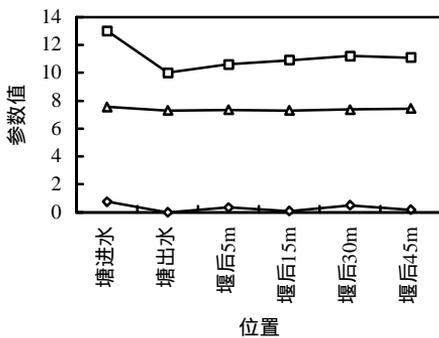


图 2 物化参数沿程变化曲线

Fig.2 Physical and chemical parameters variation of the system

表 4 物化参数测定结果

Table 4 Physical and chemical parameter measurement results

位置	项目	温度()	DO(mg/L)	pH 值	电导率(μS/cm)
总进	最大值	17.2	3.9	7.9	676
	最小值	10.0	0.2	6.5	648
	平均值	13.1	1.7	7.3	658
塘出	最大值	14.6	2.9	7.8	710
	最小值	10.0	0.0	7.3	641
	平均值	12.0	1.2	7.5	666
总出	最大值	14.9	10.6	8.7	696
	最小值	12.1	0.1	7.8	652
	平均值	13.2	2.9	8.0	668

由图 2 可见,废水经稳定塘后,水温降低 3 , pH 值降低 0.25.DO 降低 0.77mg/L,说明稳定塘中的有机物降解作用较明显,稳定塘对 COD 的降解率为 21.1%~52.2%.DO 先降后升再降,这是耗氧(有机物降解过程)和供氧(植物泌氧和大气复氧过程)综合作用的结果.

由表 4 可见,植物床出水温度比进水高 1.2 ,植物床出水电导率和 pH 值分别比进水高 2μS/cm 和 0.8.植物床出水的 DO 比进水高 1.2mg/L.温度变化说明湿地的保温效果较好,因为土壤表层的淤泥烂叶层发酵产热及旱季时流量较小而流速小.电导率和 pH 值的变化,是由于降雨量极小而日照强烈及植物的生理活动等导致系统的基质离子释放和酸碱条件的变化.DO 变化是由于污染物降解时耗氧导致 DO 降低,也因为植物根系供氧和大气复氧导致 DO 上升.

2.3 植物生长

茭草和芦苇株高和营养物含量见表 5~表 7.由表 5 可见,2002 年 5 月芦苇和茭草的平均株高增速高于文献[8]中的结论,这和本地适宜的气候有关,收割后的植物株高增速先大后小.同时期的芦苇平均株高比茭草大 8~30cm;但茭草的分蘖数大,因茭草的抗倒伏性较差,在 2003 年 6 月出现大面积茭草病虫害;故及时收割茭草.表 6 中的芦苇生物量高于文献[9]中的报道值,这与研究区适宜的气候有关.本湿地运行经验表明可在 6 月收割茭草,12 月收割芦苇和茭草,借助植物收割除

— — 温度() — — pH 值 — — 溶解氧(mg/L)

去氮磷,且6月收割能避免倒伏和虫灾,12月收割能避免植物在水中浸泡溶出污染物,还可采取芦苇和茭草混种的方式,既利用茭草吸收氮磷,又防止茭草倒伏。

表5 植物生长速率比较

Table 5 Comparison of plant growth rate

时间 (年-月)	芦苇 (cm/d)	茭草 (cm/d)	时间 (年-月)	芦苇 (cm/d)	茭草 (cm/d)
2002-4	1.89	1.88	2002-11	0.04	0.02
2002-5	3.55	3.07	2003-7	0.22	1.49
2002-6	0.95	1.09	2003-8	0.18	1.46
2002-7	0.38	0.71	2003-9	0.26	0.48
2002-8	0.53	0.68	2003-11	0.16	0.09
2002-9	0.13	0.24			

表6 植物株高、生物量和含水率

Table 6 Plant height, biomass and water content

植物	最大株高(m)	生物量湿重(kg/m ²)	含水率(%)
茭草	2.76	4.06	53.9
芦苇	2.93	2.50	64.5

表7 营养物测定与计算结果

Table 7 Results of nutrients measurement and calculation

项目	植物 品种	植株含量(g/kg)		湿地含量(g/m ²)		去除量 [t/(hm ² ·a)]
		5月*	12月*	12月*	6月#	
全氮	茭草	15.80	9.48	17.70	14.90	1.77
	芦苇	13.50	8.11	7.20	10.50	0.72
全磷	茭草	3.93	2.36	4.42	1.56	0.44
	芦苇	1.66	1.00	0.89	0.89	0.09
全钾	茭草	26.30	15.80	29.50	-	2.95
	芦苇	18.20	10.90	9.70	-	0.97

注: * 为2002年, # 为2003年, - 为未测定

根据芦苇等湿地植物冬季地上部分库存营养物约为夏季的60%^[10],计算得到2002年12月份的营养物浓度值。虽芦苇株高大于茭草,但茭草生物量大于芦苇,故单位面积上的氮含量茭草高于芦苇。收割植物2次,产量为茭草干重10.2t/a和芦苇干重0.6t/a,相应的营养物去除量见表7。

Vymazal等^[5]报道收割挺水植物能去除的磷、氮分别为30~150kgP/(hm²·a)和200~2500kgN/(hm²·a)。由表7可见,本研究中通过茭草的收割

可从湿地去除的磷量超出此范围,这归因于当地的适宜气候导致的高植物生物量。

湿地进水中氮的主要去向有微生物硝化反硝化,植物收割,氨氮挥发和出水排放。进水中磷的主要去向有介质的吸附、沉淀、络合,植物吸收和出水排放^[5,11-13],pH值小于8.0时氨挥发并不严重^[14],由表4可见,可忽略氨的挥发,表8为湿地氮磷去向分析,可见硝化反硝化是湿地氮的主要去除途径,与文献^[15,16]报道的一致。吸附沉淀络合是湿地磷的主要去除途径。

表8 TN和TP的主要去向

Table 8 Major outgoing of TN and TP

参数	植物茎叶 (收割去除)	出水 排放	硝化 反硝化	吸附沉淀 络合
TN(%)	14.6	42.4	43.0	
TP(%)	27.1	37.0		35.9

2.4 湿地淤泥层厚度的变化

2002年4月(湿地建成初期,淤泥沉积厚度计为0),于2003年7月测定稳定塘进水端、植物床进水堰后,植物床出水堰前的淤泥表面距离堰口顶部的距离,折算成淤泥层厚度,分别为43.5,22.8和4.7cm。同理得到稳定塘东侧,距离进水口0,6,10,14,18,20m处的淤泥沉积厚度分别为43.5,35.9,18.5,11.5,8.5,4.0cm。可见稳定塘和植物床的淤泥层厚度均沿程降低,而且植物床进水端的淤泥层厚度大于稳定塘出水端的淤泥层厚度,原因是大流量时对沉淀塘淤泥层的冲刷作用。

假设从进水到出水,淤泥层厚度均匀降低,和植物床面积相比,忽略进出水渠面积。考虑植物根茎占据30%^[17],14个月,系统截留SS的量为297.50m³。其中稳定塘沉积47.5m³。稳定塘和植物床的单位面积沉积量为0.24,0.06m³/m²。

3 结论

3.1 工程运行表明,以茭草和芦苇为主的稳定塘-植物床复合系统可成功地控制农业面源污染,系统抗冲击负荷能力强,在水力负荷高、进水量

波动大的情况下,能达设计目标。

3.2 2002 年 12 月无降雨期间湿地通过渗漏、蒸发蒸腾损失的水量之和占进水的 35.6%~54.7%,此部分水量在湿地水量平衡中不可忽略,影响营养物平衡的计算。

3.3 芦苇和茭草的生长速度在 5 月最大,分别为 3.55,3.07cm/d。单位面积上的生物量,茭草为芦苇的 1.62 倍。因植物收割去除的氮磷量分别占进水的 14.6%和 27.1%。硝化反硝化是湿地去氮的主要途径,吸附沉淀络合是湿地去磷的主要途径。

3.4 系统在运行 13 个月后茭草遭受病虫害,茭草的抗倒伏性差。建议每年 6 月和 12 月各收割 1 次,改善景观和水质,避免倒伏。

参考文献:

- [1] 桂 萌.滇池流域农田大棚区面源污染控制研究 [D]. 北京:清华大学环境科学与工程系,2002.24.
- [2] Hughe C., Hydrology of a disturbed estuarine wetland, Hunter River, Australia: field investigation, process modelling and management implications [D]. University of Newcastle, Australia, 1998.4-1-4-35.
- [3] 国家环境保护总局.《水和废水监测分析方法》编委会.水和废水监测分析方法 [M]. 北京:中国环境科学出版社, 2002.
- [4] 鲁如坤.土壤农业化学分析方法 [M]. 北京:中国农业科技出版社, 2000.
- [5] Vymazal J, Brix H, Cooper P F, *et al.* Removal mechanisms and types of constructed wetlands [A]. Vymazal J, Brix H, Cooper P F, *et al* (Eds). Constructed wetlands for wastewater treatment in Europe(C). Leiden: Backhuys Publishers, 1998.17-66.
- [6] 高拯民,李宪法,王绍堂,等.城市污水土地处理利用设计手册 [M]. 北京:中国标准出版社, 1990.
- [7] Martin R J, Keller H C, Clarke A R, *et al.* Long-term performance summary for the boot wetland treatment system [J]. Water Science and Technology, 2001,44(11-12):413-420.
- [8] 赵家荣.芦苇和荻的栽培与利用 [M]. 北京:金盾出版社,2002. 25-28.
- [9] 籍国东,孙铁珩,常士俊,等.辽河油田超稠油废水潜流湿地处理系统研究 [J]. 北京:中国环境科学,2001,21(1):85-88.
- [10] Vymazal J. Nitrogen removal in constructed wetlands with horizontal subsurface flow-Can we determine the key process [A]. Vymazal J(Ed). Nutrient cycling and retention in natural and constructed wetlands [C]. Backhuys Publishers, Leiden, 1999.1-17.
- [11] 刘超翔.提高人工湿地处理生活污水效能的研究 [D]. 北京:清华大学环境科学与工程系,2003.77-80.
- [12] 李旭东.农田降雨径流氮磷污染控制沸石湿地研究 [D]. 北京:中国地质大学,2003.60-72.
- [13] 张荣社.人工湿地去除农业区暴雨径流中氮磷的研究[D]. 上海:同济大学,2003.53-69.
- [14] 吴晓磊.污染物在人工湿地中的流向 [J]. 中国给水排水, 1994,10(1):40-43.
- [15] 梁 威,周巧红,成水平,等.构建湿地基质微生物与净化效果及相关分析 [J]. 中国环境科学,2002,22(3):283-285.
- [16] 李科得,胡正嘉.芦苇床系统净化污水的机理 [J]. 中国环境科学,1995,15(2):140-144.
- [17] 卢少勇,张彭义,余 刚,等.农田排灌水人工湿地处理工程的设计 [J]. 中国给水排水,2003,19(11):75-77.

作者简介:卢少勇(1976-),男,湖南郴州人,清华大学环境工程与科学系在读博士生,研究方向为水污染治理.发表论文 3 篇。

《中国环境科学》加入台湾华艺 CEPS 中文电子期刊服务声明

《中国环境科学》自 2004 年 8 月起,加入台湾中文电子期刊服务—思博网(CEPS)。凡向本刊投稿者,均视为其文稿刊登后可供思博网(CEPS)收录、转载并上网发行,其作者文章著作权使用费与稿酬本刊一次付清,不再另付其他报酬。凡不同意入编光盘的稿件,请作者在投稿时声明。

中文期刊服务—思博网(CEPS)是目前台湾地区最大的期刊全文数据库,收录台湾地区 300 余种核心期刊的全文,其访问网址为:www.ceps.com.tw。读者可以通过这一网址检索《中国环境科学》于 2001 年起各期的全文。

《中国环境科学》编辑部