

# 表面流人工湿地在滇池湖滨区面源污染控制中的应用研究

李跃勋<sup>1</sup>, 徐晓梅<sup>1</sup>, 洪昌海<sup>1</sup>, 何佳<sup>1</sup>, 李宗逊<sup>1</sup>, 陈云波<sup>1</sup>, 李中杰<sup>1,2</sup>

(1. 昆明市环境科学研究院, 云南 昆明 650032; 2. 昆明天图环境咨询有限公司, 云南 昆明 650032)

**摘要:** 在滇池湖滨带核心区退塘还湖措施的基础上, 通过对福保村湖滨废弃鱼塘改造, 建立了表面流人工湿地系统, 对该区域内面源污水处理进行了研究。研究表明, 系统年削减入湖污染物 COD、TN、TP 负荷分别达 7 840、650 和 20 kg, 单位面积削减量分别为 4 704、390 和 12 kg·hm<sup>-2</sup>, 削减率分别为 28.02%、35.93% 和 4.86%; 系统对污水中 COD、NH<sub>3</sub>-N、TN、TP 的去除率分别为 15.57%、56.76%、40.37% 和 35.64%, 且除 COD 外, 旱季污染物去除率高于雨季。推流曝气可提高系统对污染物的去除效果, 使 NH<sub>3</sub>-N、TN、TP 的去除率分别提高约 39%、23% 和 21%, 而 COD 去除率变化不明显。该系统为滇池湖滨区退塘还湖和湖滨生态系统重建提供了重要的技术示范, 对滇池富营养化防治工作的开展具有重要意义。

**关键词:** 滇池 表面流人工湿地 湖滨区 面源污染

中图分类号: X703.1 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2009)10-2155-06

## The Application Study on Surface Constructed Wetlands for Non-Point Source Pollution Control at the Dianchi Lakeshore Region

LI Yue-xun<sup>1</sup>, XU Xiao-mei<sup>1</sup>, HONG Chang-hai<sup>1</sup>, HE Jia<sup>1</sup>, LI Zong-xun<sup>1</sup>, CHEN Yun-bo<sup>1</sup>, LI Zhong-jie<sup>1,2</sup>

(1. Kunming Research Academy of Environment Sciences, Kunming 650032, China; 2. Kunming Tiantu Corporation of Environment Consulting, Kunming 650032, China)

**Abstract:** In this study, we examined the effect of constructed wetlands in former fish ponds along the Lake Dianchi shoreline as an environmental protection measure. Abandoned fish-ponds in Fubao Village were used for constructing a surface flow wetland system to treat agricultural non-point source runoff in the area. The results indicated that, the total reduction (and reduction per hectare) and reduction rate of COD, TN, TP discharged into the lake were 7 840 kg (4 704 kg·hm<sup>-2</sup>), 650 kg (390 kg·hm<sup>-2</sup>), 20 kg (12 kg·hm<sup>-2</sup>) and 28.02%, 35.93%, 4.86% respectively. The COD, NH<sub>3</sub>-N, TN and TP removal rates in the system were 15.57%, 56.76%, 40.37% and 35.64%, which were higher in the dry season than in the rainy season except for COD. Plug-flow aeration improved the removal performance of the system, with removal rates of NH<sub>3</sub>-N, TN, TP enhanced by 39%, 23%, 21% respectively; however, COD removal rate was not enhanced. In short, this study provides an important technical example on implementing the measure of returning ponds to the lake and rebuilding the lakeshore bio-system, both of which are significant to protecting Lake Dianchi.

**Keywords:** Dianchi; surface constructed wetlands; lakeshore region; non-point source pollution

人工湿地由于其投资省、运行维护方便、处理效果好, 在国内外许多地区已经广泛应用<sup>[1-2]</sup>。

表面流人工湿地是应用最早的一种人工湿地, 相

对于潜流、垂流湿地, 表面流湿地处理效率较低、占地面积大, 但却因其运行成本低和人工投入少等特点, 在农村污水治理方面具有明显优势<sup>[3-6]</sup>。

滇池是我国著名的高原淡水湖泊, 是昆明城市饮用水源地之一, 具有工农业用水、调蓄、防洪、旅游、航运、水产养殖、调节气候等多种功能。由于位于昆明城市下方, 是城市污水唯一接纳水体, 大量点、面源污水的排入致使滇池水体富营养化严重, 基本丧失饮用水

收稿日期: 2009-02-18

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863)项目(2005AA60101005)

作者简介: 李跃勋(1965—), 男, 云南大理人, 高级工程师, 主要从事环境科学研究。E-mail: lyxun@sina.com

通讯作者: 徐晓梅 E-mail: xiaomei1965@gmail.com

水源地功能。“九五”以来,滇池被列为“三河三湖”治理重点之一,《国家中长期科学和技术发展规划纲要》(2006—2020年)将滇池治理列为16个国家科技重大专项中的湖泊治理难点项目。

由于大量人为破坏如围湖造田、环湖防浪堤建设、湖周土地过度开发等,湖泊生态系统遭到毁灭性打击,滇池的湖滨自然生态带基本消失,丧失了保护湖泊的生态功能。为遏制滇池湖滨带生态功能继续退化,“十五”期间编制的《滇池流域湖滨带保护与建设规划》中明确规定滇池水体水位1887.4 m外延100 m的湖滨带核心区全部退塘(耕)还湖,建设湖滨天然湿地。本研究的根本目的在于配合滇池退塘还湖措施,探索一套集农村面源污染治理和生态系统重建为一体的湖滨带功能恢复与强化技术方案。

本文选取滇池东北岸福保村废弃鱼塘,通过对废弃鱼塘采取基底修复、人工配水和均匀布水、水生植物选培、水位控制等措施,建立湖滨带表面流湿地系统,在恢复湖滨生态系统的同时,处理周边农田径流和村落生活污水,消减直接进入湖湾的污染负荷。研究成果不仅对今后滇池和其他湖泊湖滨退塘还湖政策的实施提供了技术支持,而且为退塘还湖后的生态系统重建和利用提供了示范。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区域概况

福保村位于滇池外海北岸湖滨区,属低纬度亚热带高原季风气候,气候温和,四季不分明。区域内生活污水以及经初步处理后的企业废水主要用于农灌,经小清河形成循环,最终由海河口泵站和湾区最南部好望角附近泵站抽排至滇池,滇池为其污染负荷的最终接纳水体。根据本研究的设计思想,利用原有湖湾南部泵站将其排污区域内污水由灌溉沟渠提升至湿地系统进行处理后排入滇池。福保村及湿地系统位置如图1所示,其中白线所框区域即为集水区。

### 1.2 湿地构建

因滇池水位与地势较低,处理污水原经排涝站提升后排入滇池。现对原有泵房进行改造,增设一台水泵及部分管道、电控,将污水改为提升至湿地系统内进行处理后自流排入滇池。

对原有鱼塘进行改造。在鱼塘进水处增设格栅两道及进水计量堰,边埂用粘土分层夯实,加宽至2 m,标高1888.5 m(与现有防浪堤齐平),采用土工膜围隔折流式布水。植物选培以本地物种为主,根据系统



图1 研究区域和表面流湿地示范工程区位图

Figure 1 Location of the study area and constructed surface flow wetland system

东高西低的地势走向,模拟湖滨带生态环境,对挺水、浮叶、沉水植物进行合理搭配,在保证污染物去除率的前提下,考虑景观效果和生物多样性。浅水处种植挺水植物,包括窄叶香蒲、茭草、芦苇、旱伞竹、美人蕉等,塘中以种植沉水植物为主,主要包括金鱼藻、马来眼子菜、苦草、伊尔藻和菹草;水面景观植物包括睡莲等,在堤岸配以耐水乔木,如柳树等。

通过引水、布水、水生植物种植、堤埂改造等主要工程措施,建成包括沉淀塘、一级表面流、二级表面流和稳定塘的湿地系统,总占地面积16668 m<sup>2</sup>(包括12000 m<sup>2</sup>的水面面积和4668 m<sup>2</sup>的绿化面积)。总体工艺流程图见图2,主要工艺参数如表1。

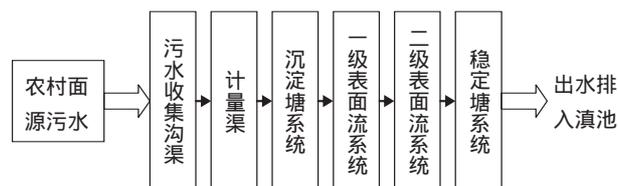


图2 表面流湿地系统工艺流程图

Figure 2 Process flow diagram of the constructed surface flow wetland system

表 1 表面流人工湿地系统主要设计参数  
Table 1 Main designed parameters of constructed surface flow wetland

设计参数	沉淀塘	一级表面流湿地	二级表面流湿地	稳定塘
面积/m <sup>2</sup>	1 400	3 800	4 900	1 900
水力负荷/m <sup>3</sup> ·m <sup>-2</sup> ·d <sup>-1</sup>	0.21	0.08	0.06	0.16

## 2 试验结果分析

### 2.1 湿地对污染物的削减情况

表 2 反映了福保村污染物的产生、削减和入湖情况。其中, 污染物产生量为 2007 年统计监测数据, 湿地于 2007 年 6 月建成, 故泵站口污染物排放量和湿地对污染物的削减量均由湿地建成以来监测数据统计得出, 污染物最终入湖总量为以上数据综合分析结果。经实测与分析, 福保村 2007 年企业、农业、农村生活污染物 COD、TN、TP 产生总量分别约为 50 780、3 190 和 910 kg。区域内产生的污染物经农田灌溉消减, 实际通过泵站排放(污染物通过湖湾南部泵站抽排至湿地, 再通过海河口泵站抽排至滇池)的污染物 COD、TN、TP 总量分别为 28 000、1 800 和 500 kg, 其中雨季分别为 17 290、1 250 和 340 kg, 旱季分别为 10 710、550 和 160 kg。

湿地对湖湾南部泵站排水进行处理, 雨季和旱季处理水量分别约为 2 000 和 300 m<sup>3</sup>·d<sup>-1</sup>, 对 COD、TN、TP 负荷的年削减量分别为 7 840、650 和 20 kg, 单位面积

表 2 研究区域污染负荷产生及削减情况

Table 2 The yield and reduction of pollution load in the research area

污染物负荷		COD		TN		TP	
		负荷/ kg·a <sup>-1</sup>	比例/ %	负荷/ kg·a <sup>-1</sup>	比例/ %	负荷/ kg·a <sup>-1</sup>	比例/ %
产生	企业	12 310	24.24	710	22.26	70	25.56
	村镇生活源	25 130	49.49	1 210	37.93	500	36.14
	农田径流	13 340	26.27	1 270	39.81	340	38.30
	合计	50 780	100.00	3 190	100.00	910	100.00
排放	雨季	17 290	61.75	1 250	69.67	340	67.24
	旱季	10 710	38.25	550	30.33	160	32.76
	合计	28 000	100.00	1 800	100.00	500	100.00
湿地削减	雨季	7 170	41.48	500	39.93	20	5.85
	旱季	670	6.27	150	26.76	5	2.82
	合计	7 840	28.02	650	35.93	20	4.86
入湖	雨季	10 120	58.52	750	60.07	320	94.15
	旱季	10 040	93.73	400	73.24	160	97.18
	合计	20 160	71.98	1 150	64.07	480	95.14

削减量为 4 704、390 和 12 kg·hm<sup>-2</sup>, 削减率分别为 28.02%、35.93% 和 4.86%; 其中, 由于雨季排水量较大, 系统对污染物的削减率较大, 旱季排水量较小, 削减率仅为雨季的 1/3 左右。通过以上数据综合分析得出, 研究区域产生污水经农田灌溉回用和湿地处理, 污染物 COD、TN、TP 年入湖量分别为 20 160、1 150 和 480 kg。

### 2.2 污染物浓度变化

通过对湿地系统连续 12 个月的监测结果统计分析可知, 如图 3 所示, 湿地进水浓度变化较大, 出水浓度变化幅度较小。其中, NH<sub>3</sub>-N 和 TN 的进水浓度变化幅度大于 COD 和 TP, 且旱季浓度高于雨季。这是因为虽然雨季初期地表径流浓度较大, 但由于未在初期降雨时取样, 而中后期随着大量雨水的稀释作用, 导致雨季污染物监测浓度相对较低。

如表 3 所示, 除 TP 外, 各污染物进水浓度均高于同期相邻滇池外海浓度, 经湿地系统处理后, 各污染物浓度均下降到低于外海浓度, 除 COD 外, 其他污染物均小于地表水 V 类水标准。

### 2.3 污染物去除率

本系统年平均和雨季、旱季污染物去除率统计结果如表 4 所示。污染物去除率变化幅度较大, 且旱季变化幅度大于雨季, 这可能与湿地旱季进水污染物浓度变化幅度较大有关。另一方面, 除 COD 外, NH<sub>3</sub>-N、TN、TP 的旱季去除效果优于雨季, 这主要是因为旱季的进水流量小于雨季, 水力停留时间较长, 故处理效果相对较好。

具体来说, COD 的处理效果较差, 年均去除率仅为 16%, 与卢少勇等<sup>[7]</sup>的研究结论相类似。一方面, 这可能是由于湿地进水由企业排水、农村生活污水和农田径流污水组成, 其中农田径流污水水量大, 且 COD 浓度低, 仅为 20~50 mg·L<sup>-1</sup>, 致使湿地进水经稀释后 COD 浓度偏低, 故而影响其去除率; 另一方面, 湿地中植物的腐败也会导致系统本身 COD 负荷的增加, 影响出水水质。

微生物的硝化-反硝化作用是湿地系统中氮的主要去除机制<sup>[8]</sup>。总体来说, 人工湿地对氮的去除效果差异性较大, 研究表明, 人工湿地对氮的去除率范围在 30%~98%<sup>[9]</sup>, 本系统 TN 去除率约为 40%, 去除率略低。NH<sub>3</sub>-N 主要通过好氧条件下微生物将其转化成硝态氮而去除<sup>[10]</sup>。国内外大量实验数据表明, 人工湿地氨氮的去除率为 13%~94%<sup>[11]</sup>, 本研究中可达 57%, 去除效果相对较好。

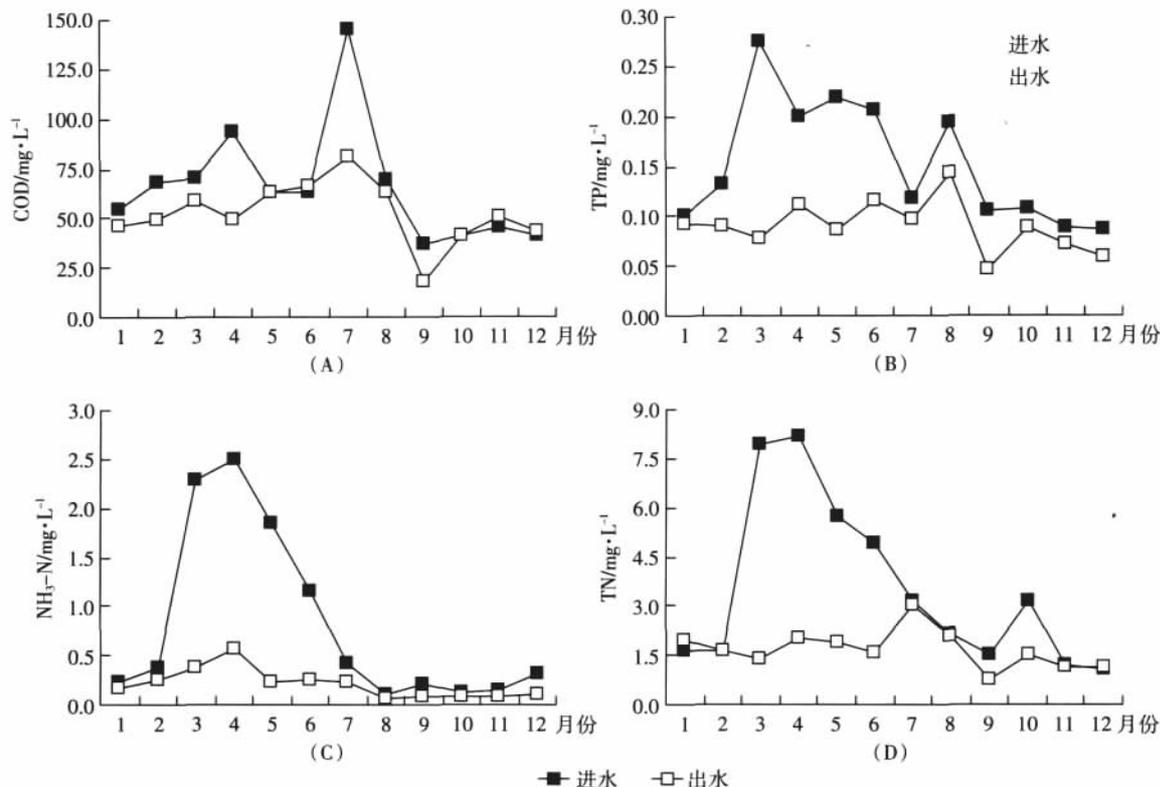


图3 各月份表面流人工湿地进水和出水污染物浓度变化情况

Figure 3 Inlet and outlet pollutants concentration change with month in the constructed surface flow wetland

表3 表面流人工湿地进水和出水污染物平均浓度( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )Table 3 Average concentration of pollutants in the inlet and outlet of the constructed surface flow wetland( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )

污染物浓度	系统进水		系统出水		滇池水体		V类标准	
	平均值	标准差	平均值	标准差	平均值	标准差		
COD	旱季	62.31	16.42	51.65	6.40	67.72	8.00	40
	雨季	71.02	38.82	53.94	21.95	56.08	6.00	
	年平均	65.94	28.35	52.60	15.03	63.36	7.00	
$\text{NH}_3\text{-N}$	旱季	1.10	0.98	0.25	0.16	0.47	0.08	2.0
	雨季	0.40	0.39	0.14	0.08	0.17	0.04	
	年平均	0.81	0.86	0.21	0.14	0.36	0.06	
TN	旱季	3.92	3.00	1.60	0.35	2.80	0.42	2.0
	雨季	2.97	1.14	1.78	0.75	2.34	0.47	
	年平均	3.53	2.45	1.68	0.56	2.63	0.53	
TP	旱季	0.16	0.07	0.08	0.02	0.26	0.04	0.2
	雨季	0.15	0.04	0.10	0.03	0.15	0.04	
	年平均	0.15	0.06	0.09	0.03	0.22	0.04	

湿地对污水中磷的去除主要通过湿地土壤的过滤、吸附、离子交换、植物吸收和微生物分解等途径来实现<sup>[12-13]</sup>。研究表明,人工湿地对磷的去除率范围在20%~90%<sup>[9]</sup>,本系统TP去除率约为36%,去除率适中。

表4 表面流人工湿地污染物去除率(%)

Table 4 Pollutants reduction rate in the constructed surface flow wetland(%)

污染物去除率	COD		$\text{NH}_3\text{-N}$		TN		TP	
	平均值	标准差	平均值	标准差	平均值	标准差	平均值	标准差
旱季	12.56	12.90	59.99	23.81	44.80	26.31	38.56	20.40
雨季	19.79	9.27	52.23	15.63	35.93	26.98	31.56	15.51
年平均	15.57	13.62	56.76	21.15	40.37	28.14	35.64	18.84

污染物在沉淀塘、一级表面流系统、二级表面流系统、稳定塘中的沿程去除量和去除率如图4所示。

COD在湿地前端系统中的去除率较高,后段部分去除效果较差,这可能是由于污水中的不溶性COD在湿地前端系统中通过基质过滤截留作用而被迅速去除。

由于二级表面流系统水深相对较深,形成一个良好的兼氧环境,有利于反硝化反应的发生,故TN在此阶段去除率较高。氨氮的去除率依赖于水中溶解氧的浓度,一级表面流系统水深较浅,好氧条件相对较好,故氨氮去除率最高。

TP在一级表面流系统中的去除率较大,表明TP在系统前段通过吸附和沉淀被大量去除,同时,系统

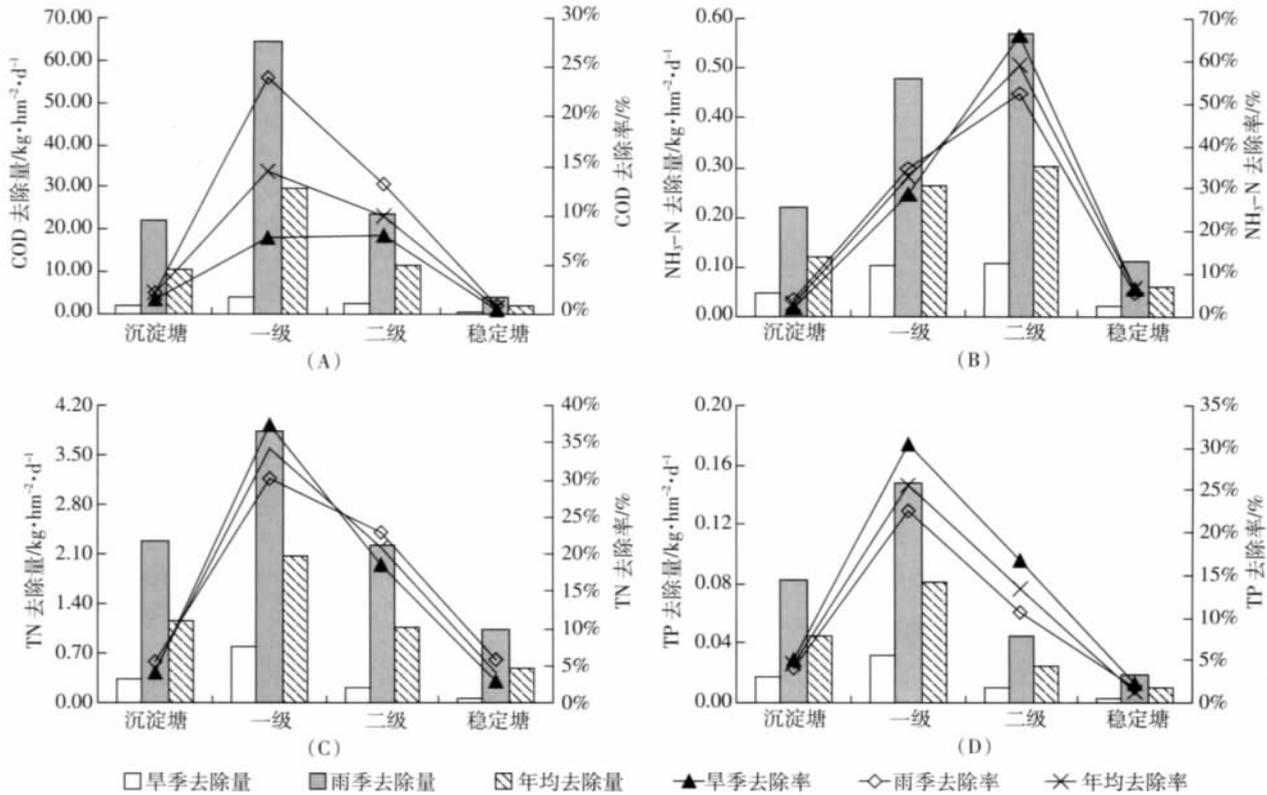


图 4 表面流人工湿地污染物沿程去除量和去除率

Figure 4 Pollutants reduction and reduction rate in various subsystems of constructed surface flow wetland

前段水深较浅,挺水植物生长相对旺盛,对 TP 的吸收作用也较强。

### 2.3 曝气效果

由于湿地对个别污染物去除效果较差,故尝试在一级表面流系统内增加推流曝气,曝气后的系统处理效果如表 5 所示。

通过曝气一方面增加了水中溶解氧的含量,另一方面也起到推流的作用,增加了污水在系统中流动性。如表 5 所示,曝气后,系统对污染物的去除效果有所提高,其中 NH<sub>3</sub>-N、TN、TP 比较明显,去除率分别提高约 39%、23%、21%,而曝气对 COD 的处理效果无明显影响。

对于 NH<sub>3</sub>-N,曝气提高了湿地内部溶解氧的可利用性,有利于硝化微生物生长繁殖和活性增强,同时也在一定程度上促进了 NH<sub>3</sub>-N 从水中向大气的挥发,从

而提高了 NH<sub>3</sub>-N 的去除效果。曝气对 TN 去除率的提高一方面依赖于氨氮的直接大量去除,另一方面,由于微生物和植物对 NH<sub>3</sub>-N 的吸收具有优先性<sup>[14]</sup>,故氨氮浓度降低后,微生物与植物对硝态氮的吸收将会相应增加,间接促进了 TN 从污水中的去除。对于 TP,湿地推流曝气强化了磷与湿地生物和土壤介质的接触,有利于增强介质对磷的吸附去除效果,进而提高磷去除效率。此外,湿地生物除磷是一个好氧吸收-厌氧释放的交替过程,曝气增加了湿地溶解氧供给,有利于湿地微生物的生长繁殖和活性增强,提高了生物对磷的吸收效果。

### 3 结论

在系统经 12 个月连续运行试验,削减 COD、TN、TP 分别为 7 840、650 和 20 kg,单位面积削减量分别

表 5 推流曝气对系统污染物去除效果的影响

Table 5 The effect of plugflow aeration on the pollutants removal rate of system

污染物	COD		NH <sub>3</sub> -N		TN		TP	
	平均值	标准差	平均值	标准差	平均值	标准差	平均值	标准差
去除率/%								
不曝气	15.57	13.62	56.76	21.15	40.37	28.14	35.64	18.84
曝气	17.86	11.33	95.32	21.20	63.32	27.63	56.87	14.59

为 4 704、390 和 12 kg·hm<sup>-2</sup>，削减率分别为 28.02%、35.93% 和 4.86%。农业面源具有不稳定特性，径流量和径流中污染物浓度因水文条件不同而不同，从运行监测结果可以看出，几种主要污染物浓度变化都很大，人工湿地能够适应这种变化。

本系统总投资 55.64 万元(包括泵房、水泵及管道、引水和布水、鱼塘基底修复、水生植物选培等费用)，单位污水建设投资 544.48 元·m<sup>-3</sup>，年运行费用 24 600 元，单位污水处理费用 0.07 元·m<sup>-3</sup>；后期增加推流曝气，以提高系统处理效能，增加直接费用 4.96 万元，年运行费用增加 0.99 万元，单位污水处理费用增加 0.02 元·m<sup>-3</sup>。

研究表明，该系统具有投资少、效益好、抗面源负荷冲击能力强、运行管理方便的优点，利于滇池湖滨带退塘还湖政策实施，在生态系统重建的过程中对废弃鱼塘进行了有效的再利用，起到削减湖滨入湖面源污染负荷的作用，具有较好推广应用前景。

#### 参考文献：

- [1] Scholz M, Xu J. Performance comparison of experimental constructed wetlands with different filter media and macrophytes treating industrial wastewater contaminated with lead and copper[J]. *Bioresource Technology*, 2002, 83 :71-79.
- [2] Hammer D A. Constructed wetlands for wastewater treatment—municipal, industrial and agricultural[M]. Chelsea, MI :Lewis Publishers, 1989 :5-20.
- [3] Braskerud B C. Factors affecting nitrogen retention in small constructed wetlands treating agricultural non-point source pollution[J]. *Ecological Engineering*, 2002, 18 :351-370.
- [4] Carsten S. Treatment of rainbow trout farm effluents in constructed wetland with emergent plants and subsurface horizontal water flow[J]. *Aquaculture*, 2003, 217 :207-221.
- [5] Neely R K, Baker J L. Nitrogen and phosphorus dynamics and the fate of agricultural runoff [C]// van der Velk A G. ed. Northern prairie wetlands. Ames, IA :Iowa State University Press, 1989 :92-131.
- [6] Srinivasan N, Weaver R W, Lesikar B J, et al. Improvement of domestic wastewater quality by subsurface flow constructed wetlands[J]. *Biore-source Technology*, 2000, 75(1) :19-25(7).
- [7] 卢少勇, 张彭义, 余刚, 等. 农田排灌水湖滨带湿地处理系统的设计与运行[J]. *农业环境科学学报*, 2004, 23(5) :998-1002.  
LU Shao-yong, ZHANG Peng-yi, YU Gang, et al. Design and operation of lakeside wetland for treatment of irrigation and drainage[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2004, 23(5) :998-1002.
- [8] 白军红, 欧阳华, 邓伟, 等. 湿地氮素传输过程研究进展[J]. *生态学报*, 2005, 25(2) :326-333.  
BAI Jun-hong, OUYang Hua, DENG Wei, et al. A review on nitrogen transmission processes in natural wetlands[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(2) :326-333.
- [9] Bastian R K, Hammer D A. The use of constructed wetlands for wastewater treatment and recycling[C]// Moshiri G A. ed. Constructed wetlands for water quality improvement. Boca Raton :Lewis Publishers, 1993 :59-68.
- [10] 张军, 周琪, 何蓉. 表面流人工湿地中氮磷的去除机理[J]. *生态环境*, 2004, 13(1) :98-101.  
ZHANG Jun, ZHOU Qi, HE Rong. Mechanism of nitrogen and phosphorus removal in free-water surface constructed wetland[J]. *Wetland Ecology and Environment*, 2004, 13(1) :98-101.
- [11] Knight R L, Ruble R W, Kadlec R H, et al. Wetland for wastewater treatment performance database in constructed wetland for water quality improvement[C]//Moshiri G A. ed. Constructed wetlands for water quality improvement. Boca Raton :Lewis Publishers, 1993 :35-38.
- [12] Eddy K R, Kadlec R H, Flaig E, et al. Phosphorus assimilation in streams and wetland critical reviews[J]. *Environmental Science and Technology*, 1996, 31 :41-48.
- [13] Ng N M, William J M. A detailed ecosystem model of phosphorus dynamics in created riparian wetlands[J]. *Ecological Engineering*, 2000, 126 :101-130.
- [14] Metcalf and Eddy Inc. Wastewater engineering treatment, disposal and reuse[M]. New Delhi :McGraw-Hill Companies. Inc, 2003 :940-982.