

农田排灌水湖滨带湿地处理系统的设计与运行

卢少勇, 张彭义, 余 刚, 祝万鹏, 桂 萌, 向长生

(清华大学环境科学与工程系, 北京 100084)

摘 要:依据背景调查资料对滇池东岸王家庄湿地处理系统进行了设计并对工程的经济性进行了分析。本工程自 2002 年 8 月开始投入运行, 运行效果表明, 湿地对于总氮、氨氮、总磷和 COD 的负荷削减量分别为 5.6、1.9、0.5、114.7 t · hm⁻² · a⁻¹。本工程的总投资和运行费均低于传统活性污泥法。

关键词:农田排灌水; 湖滨带湿地; 设计; 运行; 示范

中图分类号:X703 **文献标识码:**A **文章编号:**1672 – 2043(2004)05 – 0998 – 05

Design and Operation of Lakeside Wetland for Treatment of Irrigation and Drainage

LU Shao-yong, ZHANG Peng-yi, YU Gang, ZHU Wan-peng, GUI Meng, XIANG Chang-sheng
(Department of Environmental Science and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Wangjiazhuang lakeside wetland was located to the east of the Dianchi Lake, with an area of 12 000 m², length of 300 m, and averaged width of 80 m. It was designed to treat wastewater from five ditches from the upstream. Irrigation and drainage were an important component of the Dianchi Lake's non – point pollution source. Various natural plants were selected to be used as indicators in the wetland, including *Zizania caduciflora*, *Phragmites australis*, *Acrois calamus*, Willow tree, Lotus root and Magic taro. The design and the economic analysis of the wetland were made according to site investigation. The contaminant load mainly came during rainy season, from May to September, due to a large inflow during the period. The flow and the influent pollutant exhibited significantly daily and seasonal variance. Though acreage per ton wastewater of this wetland was larger than that of conventional activated sludge process, gross investment and operation cost of this wetland were lower than those of conventional activated sludge process. The high cost of this wetland construction was for the borderline construction, due to the loose ground resulted from the long – term flooded soils near Dianchi Lake. The aim of this research was to investigate the effects of lakeside wetland in the treatment of irrigation and drainage water used for ecological restoration. And then it can act as a demonstration model for others to design similar lakeside wetland. Comprehensive monitoring had been in operation since August 2002. The operation result, from March 2003 to September 2003, indicated that the averaged inflow was 674.5 m³ · d⁻¹, the total nitrogen (TN), ammonia, total phosphorus (TP) and chemical oxygen demand (COD) of the wetland influent were 5.06, 1.60, 0.37 and 106 mg · L⁻¹, respectively. The monthly average hydraulic retention times in the wetland ranged from 0.3 to 3.7 days and the monthly average hydraulic load from 2.7 to 36.7 cm · d⁻¹, the average organic load 8.6 g COD · m⁻² · d⁻¹. The TN, ammonia, TP and COD removal rate in the wetland were 53.8%, 58.4%, 68.8% and 52.4%, respectively. The TN, ammonia, TP and COD load reduction amounts were 5.6, 1.9, 0.5 and 114.7 t · hm⁻² · a⁻¹, respectively.

Keywords: Irrigation and drainage; lakeside wetland; design; operation; demonstration

2000 年滇池的 TN、TP 面源负荷量分别占滇池总污染负荷的 27% 和 45%, 面源污染是滇池外海水质恶化的重要原因, 需采取有效措施^[1,2]。滇池东岸坝区

(大棚覆盖率达 85% 以上) 产业基地的地表径流(主要是农田排灌渠来水) 是氮磷入湖量的重要组成部分, 其中总氮(TN) 占 39%, 总磷(TP) 占 38% (滇池水污染治理技术研究项目投标书, 投标单位: 清华大学, 2000, 3)。

自然湿地系统易淤积、效率低、占地大。而 20 世纪 70 年代从欧洲起源的人工湿地技术具有高效率、低投资、低运转费用、低维持技术、用地少和基本不耗电的特点, 在发展中国家是最有前景的废水处理技术

收稿日期: 2004 – 02 – 26

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)

作者简介: 卢少勇(1976—), 男, 湖南郴州人, 清华大学博士生, 研究方向为水污染治理。E-mail: lsy01@mails.tsinghua.edu.cn

联系人: 张彭义

之一,尤其适用于管理水平不高的城郊或乡村^[3,4]。

国外已有人工湿地处理农田排灌水的相关报道^[5~7],姜翠玲^[8]总结了湿地在农业面源治理中的应用前景,但国内未见湿地处理农田排灌水的工程报道。本研究选择滇池东岸坝区的王家庄废弃地建设处理农田排灌水的湖滨带湿地,削减入湖面源污染负荷。

1 背景调查

1.1 位置描述

废弃地位于昆明市大渔乡王家庄下游,地势东高西低,如图 1。西边界为滇池防浪堤,东边界为一条不连续的农埂,南、北边界为王家庄通向滇池的水泥路。

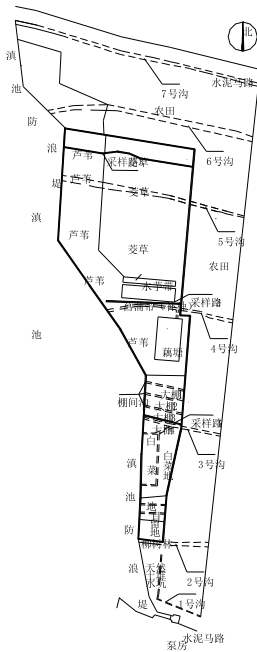


图 1 湿地位置示意图

Figure 1 Location schematic diagram of the wetland studied

1.2 原有植物

废弃地中大部分面积上的植物为茭草 (*Zizania caduciflora*)、芦苇 (*Phragmites australis*),也有部分柳树 (*Willow tree*)、水花生 (*Alternanthera philoxeroides*)、莲藕 (*Lotus root*)、水芋 (*Magic taro*)、浮萍 (*Lemna minor*)、满江红 (*Azolla imbricata*)、滇水凤仙 (*Alternanthera philoxeroides*) 和水葱 (*Schoenoplectus tabernaemontani*) 等。

1.3 来水沟渠分布

有 7 条沟渠 (从南到北编号为 1 到 7 号) 从东到西经废弃地后流入滇池,包括流经王家庄村落的过境渠和王家庄下游农田的排灌渠。考虑到 6 号和 7 号渠

流量小,且下游大棚多,土地协商困难,本设计不予考虑。沟渠的基本尺寸如表 1。

表 1 沟渠基本尺寸

Table 1 Essential sizes and diagrams for the tested ditches

	1 号	2 号	3 号	4 号	5 号
平均沟宽/m	0.62	1.33	1.03	1.20	0.50
平均截面积/m ²	0.47	0.86	0.43	0.82	0.34

1.4 研究区域的农田排灌方式

研究区域为典型的大棚种植区,村民以种植大棚蔬菜和花卉为主,农田中大棚覆盖率占 85% 以上,农田中的地表径流主要通过穿田而出的明渠入滇池,这些明渠是灌溉来水和排水的主渠。该地区主要的排灌方式表述如下:距主渠近且地势高的大棚,直接从主渠引水灌溉;距主渠远而引水不便的大棚,在田间开挖水井灌溉;地势低洼而距滇池很近的大棚,无需从主渠引水灌溉而需排水,其中以引水灌溉为主。

当地主要灌溉方式需泵站抽水。抽水日:非抽水日 = 2:3 ~ 3:2。沟渠排水量主要集中在抽水日,研究区的某沟渠在抽水日的平均流量为 365 m³ · d⁻¹,非抽水日的平均水量为 35 m³ · d⁻¹。日照、风力和农作物收获对于沟渠排水量影响大。如在 2002 年 12 月初辣椒收获期间,日照强,农田用水量大,连续抽水 5 d。监测结果表明,农排沟来水具间歇性,抽水日内水量随时间变化大。水量高峰集中于 11:30 ~ 13:30,18:00 ~ 20:00。

由上述可知,滇池附近农田的径流污染在旱季不显著,多余水量自然蒸发或下渗,无排放水量。而雨季降水量大,靠近滇池的低洼地带被滇池水淹没,这部分田间的氮、磷大部分直接进入滇池;在地势较高、滇池水淹不到的农田中,农民为防止雨水在田中聚集而淹田,会将原排灌渠上的进水口打开来泄洪,由此导致初期雨水置换出大量田间小沟中的灌溉存水,同时也冲刷出大量富含氮磷的土壤颗粒和田间垃圾 (丢弃的花卉和蔬菜的根、茎、叶等),通过排灌渠进入滇池。这两项是农田面源污染的主要组成部分。因此,研究区农田面源污染主要来自雨季。

2 设计原则、依据、参数与内容

2.1 设计原则

将沟渠来水合理分配到湿地,削减暴雨期间的水量负荷以及进水中的氮、磷,避免或减轻滇池高水位时湿地上游农田水淹状况;不影响上游农田耕作,不改变沟渠原有功能;湿地为动物和植物提供栖息地,

湿地建成后具有较佳的美学景观,湿地的植物产量可创造部分经济利益。

2.2 设计依据

(1)气候条件:昆明全年主风向为西南风,无最大冻土深度,最大积雪深度为 0.17 m。研究区年均水温 15.0℃,冬季平均水温 9.9℃。年均降雨量为 802.98 mm,年均蒸发量为 2 092.50 mm。

(2)地形与地下水位:2002 年 1 月的测绘图(1:500)表明,湿地上游 50m 内农田地面平均标高 1 887.164 m,湿地进水明渠平均沟底标高 1 886.524 m,测绘日平均水面标高 1 887.224 m。湿地平均标高 1 886.904 m。地下水位较高,平均在地面以下 0.30 m 左右。

依滇池保护条例(2002.2),滇池外湖(外海)控制运行水位为:正常高水位 1 887.4 m;二十年一遇最高洪水位 1 887.5 m。

2.3 设计参数

(1)处理水量与水质:1 到 5 号沟所辖农田汇水面积为 0.79 km²。2002 年 3 至 8 月监测得到的平均水量为:旱季 400 m³·d⁻¹,雨季 700 m³·d⁻¹,年均流量 526 m³·d⁻¹。水质监测指标主要有 TN,氨氮,TP 和

表 2 进水平均水质与负荷结果
Table 2 Composition of inflow water and load

		TN	氨氮	TP	COD
旱季	水质/mg·L ⁻¹	2.07	0.66	0.09	45.82
	负荷/kg·d ⁻¹	0.83	0.26	0.04	18.33
雨季	水质/mg·L ⁻¹	10.4	1.24	0.16	77.17
	负荷/kg·d ⁻¹	7.28	0.87	0.11	54.02

COD,水质测定采用标准方法^[9]。水质测定结果见表 2,可见沟渠来水污染物浓度雨季明显高于旱季。

(2)来水负荷:按年均流量计算,由表 2 可见雨季的污染负荷明显高于旱季的污染负荷。

(3)水力停留时间:湿地平均有效水深 0.15 m,湿地容积 1 800 m³。旱季水力停留时间 4.5 d;雨季水力停留时间 2.6 d。

(4)出水水质要求:削减来水中 TN、TP 负荷的 50%。

2.4 设计内容

2.4.1 工艺流程

限于地下水位高,采用自由表面流人工湿地,工艺流程见图 2。

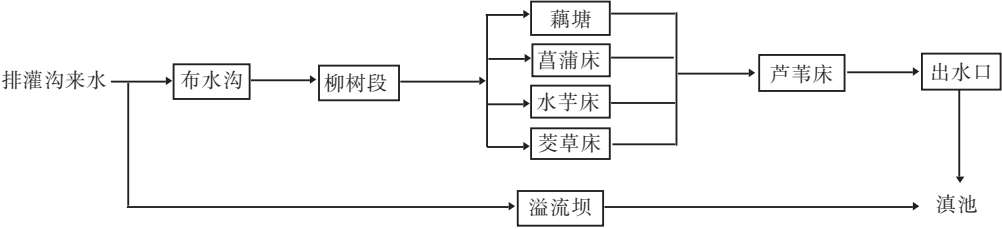


图 2 工艺流程图

Figure 2 Flow diagram for the process in the present project

为防止水量过大时,排水不畅而危及上游农田,在 2 号沟末端设高于沟底 0.34 m 的溢流坝。水量大时,部分水进湿地,多余水溢流。水量小时,坝拦水进湿地。

2.4.2 湿地内部设计

2.4.2.1 进、出水堰设计

整修所有沟渠进湿地前的 5 m 段,加设护坡板,沟底适当清淤。清淤后的沟底设计标高 1 886.724 m。确保水流顺利汇入布水渠。为防止短流,合理分布布水沟堰口。布水沟分 4 段,布水沟底面平。因各段流量不同,布水堰高度不同。根据当地实际情况,挡墙与堰的设计如表 3 所示。监测数据表明 2 号沟来水量占总来水量的 50% 以上。

2.4.2.2 植物床设计

边界:东边界用毛石修砌成宽 0.60 m 的齐整道路,南北边界分别为 2 号渠和 5 号渠下游的天然土

埂,西边界为滇池防浪堤。湿地东、南和北边界顶部标高 1 887.444 m,高于滇池正常高水位 0.044 m。

杂草清理、土地整平与植物栽种:清理湿地内部杂草,确保植物以选择的芦苇、茭草、菖蒲、藕和水芋为主。并在运行中拟采用水位调节来抑制杂草生长。整平湿地内部的地势较高部分,将土回填或外运到地势较低部分。湿地地表整平为 1 886.854 m。在进水堰堰口西侧 1 m 处从南到北每隔 2 m 种植柳树。为避免柳树长高后挡住湿地东侧农田的阳光,定期进行柳树剪裁。依据天然地形,修整藕塘(面积 60 m²)、水芋田(面积 20 m²)引种菖蒲带(面积 100 m²)。

流态:开挖宽 20 cm 深 5 cm 的之字沟,延长停留时间且在湿地低水位时供底栖生物栖息。湿地内原废弃大棚棚间沟渠深 1.2 m 以上,长 20 m 以上,因此在这些沟中南北向填土墙以形成隔断,避免短流。

表 3 挡墙与堰设计

Table 3 Design of the retaining wall and weir

区段	挡墙长度/m	堰西侧概况	设计考虑	堰口数	堰口高度/m	堰
1 号沟至 2 号沟	35. 0(石墙)	天然土堆和水坑	引水,西侧为景观	0	—	无堰
2 号沟之北柳树段	28. 0(砖墙)	农民自留地	便于农民出入农田	0	—	砖堰
柳树段之北至 3 号沟	74. 9(石墙)	非农用地	布水,西侧为湿地	2	0. 37 ~ 0. 36	砖堰
3 号沟至 4 号沟	73. 0(石墙)	非农用地	布水,西侧为湿地	20	0. 36 ~ 0. 32	砖堰
4 号沟至 5 号沟	69. 6(石墙)	非农用地	布水,西侧为湿地	40	0. 32 ~ 0. 28	砖堰
5 号沟以北	27. 9(石墙)	大棚密集	便于农民出入农田	4	0. 28 ~ 0. 27	土堰

注:布水渠宽 0. 7 m,堰口平均坡度 0. 000 5。

坡度:进水堰西侧低于堰口 7 cm,湿地内坡度取 0. 004,从进水端坡向出水端。

采样路:如图 1,3 条取样路大体均布于湿地,将湿地分为从南到北互通的 4 块,面积分别为 890、1 600、2 380 和 1 050 m²。

3 工程经济性分析

工程总投资见表 4。最大费用是边界建设(因原地基常年浸泡水中,强度差,基础平均深度 1. 2 m),每米建设费约 350 元。

表 4 工程投资(万元)

Table 4 Investment of the project (× 10⁴ yuan)

项目	场地测绘	边界建设	施工抽排水	溢流坝、采样路	土地平整	植物移栽	征地	合计
投资	0. 4	10. 6	0. 5	0. 1	1. 2	0. 7	0. 8	14. 3

经济性分析见表 5,湿地的总投资与当地土地征用费、水力水文条件、预处理方法、进水水质、出水要求、建筑物结构形式和景观设计等因素有关。因而各湿地的总投资会有较大差异,且湿地通常无能耗,运行费用低。籍国东^[13]等报道人工湿地塘床系统的处理费用仅为

普通活性污泥工艺的 25% ~ 50%。虽然湿地工程的占地常大于传统活性污泥法,但在有废弃地可利用而征地费不高的情况下是合适的,本湿地即属于此种情况。本湿地于 2002 年 8 月建设完毕即投入运行,总面积 1. 2 hm²,南北长 300 m,东西宽 15 ~ 120 m,平均宽 40 m。

表 5 王家庄湿地与其他工程费用比较^[12~14]

Table 5 Comparison of the cost between Wangjiazhuang Wetland and other projects

处理工艺	总投资/万元	单位污水投资/元 · m ⁻³	单位污水处理费/元 · m ⁻³	单位污水处理占地/m ² · m ⁻³
深圳某厂活性污泥	3 300	660	> 0. 20	2. 67
鼓风曝气	1 500	833	> 0. 20	1. 20
氧化沟	574	574	0. 20	1. 20
复合垂直流构建湿地	56. 2	351	0. 09	2. 1
白泥坑人工湿地	42. 9	138	0. 02	2. 79
新村人工湿地	14. 7	425	0. 01	21. 0
王家庄湖滨带湿地	14. 3	272	0. 01	22. 8
上海塘湾人工湿地	4. 2	2 801	0. 65	60

4 运行效果

2003 年 3 月—9 月的运行结果表明,平均流量 674. 5 m³ · d⁻¹,进水 TN、氨氮、TP 和 COD 的平均浓度分别为 5. 06、1. 60、0. 37、106 mg · L⁻¹。逐月平均水力停留时间范围为 0. 3 ~ 3. 7 d。逐月平均水力负荷范围为 2. 7 ~ 36. 7 cm · d⁻¹(高于高拯民等^[14]推荐的 2 ~ 20 cm · d⁻¹),平均有机负荷 8. 6 gCOD · m⁻² · d⁻¹。总氮、氨氮、总磷和 COD 的平均去除率分别为 53. 8%、58. 4%、68. 8%、52. 4%。湿地对 TN、氨氮、TP 和 COD

的削减量分别为 5. 6、1. 9、0. 5、114. 7 t · hm⁻² · a⁻¹。

5 结语

目前处于运行中的王家庄湿地是滇池流域东部农业区的非点源污染控制工程和湖滨带生态保护工程,可期为类似水体的湖滨带湿地设计提供示范。

背景调查表明所研究区域的水量水质随时间的差异变化较大。抽水日排水高峰时段为 11: 30 ~ 13: 30,18:00 ~ 20:00。抽水日流量约为非抽水日流量的 10 倍。污染物浓度与负荷,雨季高于旱季。

经济性分析表明本系统的总投资和运行费比传统二级活性污泥处理系统的低得多,而且湿地能促进如芦苇、茭草等水生植物的生长和发育,为保护生物的多样性,改善流域生态景观起到积极的作用,适合于农业面源污染的治理。

运行结果表明,所采用技术在水力负荷较高、平均进水浓度较低的条件下,能实现预定的降解来水中 50% 的总氮和总磷的目标。湿地对总氮、总磷和 COD 的负荷削减量分别为 5.6、0.5、114.7 t · hm⁻² · a⁻¹, 所采用技术对于类似水体的农业面源污染治理具有参考价值。

参考文献:

[1] 刘丽萍. 滇池富营养化发展趋势分析及其控制对策[J]. 云南环境科学, 2001, 20(增刊): 25 – 27.

[2] 栢元蒙. 滇池富营养化现状、趋势及其综合防治对策[J]. 云南环境科学, 2002, 21(1): 35 – 38.

[3] 丁疆华,舒强. 人工湿地在处理污水中的应用[J]. 农业环境保护, 2000, 19(5): 320 – 封三.

[4] Campbell C S, Ogden M H. Constructed Wetlands in the Sustainable Landscape[J]. *John Wiley & Sons*, 1999, 93 – 122.

[5] Sun G, Gray K R, Biddlestone A J. Treatment of Agricultural Wastewater in Downflow Reed Beds: Experimental Trials and Mathematical Model [J]. *J agric Engng Res*, 1998, 69: 63 – 71.

[6] Kern J, Idler J. Treatment of domestic and agricultural wastewater by reed bed systems[J]. *Ecological Engineering*, 1999, 12: 13 – 25.

[7] Borin M, Bonaiti G, Santamaria G and Giardini L. A constructed surface flow wetland for treating agricultural wastewaters[J]. *Wat Sci Tech*, 2001, 44(11 – 12) : 523 – 530.

[8] 姜翠玲,崔广柏. 湿地对农业非点源污染的去除效应[J]. 农业环境保护, 2002, 21(5): 471 – 473, 476.

[9] 国家环保局《水和废水监测分析方法》编委会编. 水和废水监测分析方法[M]. 北京:中国环境科学出版社, 1997.

[10] 吴振斌,詹德昊,张晟,等. 复合垂直流构建湿地的设计方法及净化效果[J]. 武汉大学学报(工学版), 2003, 36(1): 12 – 15, 41.

[11] 张毅敏,张永春. 利用人工湿地治理太湖流域小城镇生活污水可行性探讨[J]. 农业环境保护, 1998, 17(5): 232 – 234.

[12] 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.

[13] 籍国东,孙铁珩,郭书海,等. 稠油采出水的人工湿地塘床处理系统设计[J]. 中国给水排水, 2002, 18(5): 62 – 64.

[14] 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, 1991.