

窑泥沟人工湿地应用研究及新构思

刘志勇¹, 陈建中²

(1. 昆明市计划供水节约用水办公室, 云南 昆明 650051; 2. 昆明理工大学环境科学与工程学院, 云南 昆明 650093)

摘要 :以云南省澄江县污染最为严重的窑泥沟为研究对象,从植物、填料和工艺流程等方面,分析和研究了复合型人工湿地对污染物的去除情况,尤其是在不同季节进水浓度变化较大时氮磷的去除情况,并由此找出了存在的一些问题,提出了解决的构思。

关键词 :复合型人工湿地; N、P 污染; 污水净化; 去除率

中图分类号: X522 文献标识码: A 文章编号: 1004-693X(2006)02-0023-04

Studies and ideas on composite constructed wetland in Yaonigou

LIU Zhi-yong¹, CHEN Jian-zhong²

(1. Kunming Office of Plan Water Supply and Water Saving, Kunming 650051, China; 2. Department of Environmental Science and Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China)

Abstract :Taking Yaonigou, the most seriously polluted area in Dengjiang County, as an example, the removal ratio of pollutants by composite constructed wetland was analyzed from the aspect of plants, substrates, and technical process. The removal rates of nitrogen and phosphorus under the condition of various influent concentrations in different seasons were discussed in detail. Problems and countermeasures were put forward.

Key words :composite constructed wetland; pollution of nitrogen and phosphorus; purification of wastewater; removal rate

1 概 述

1.1 窑泥沟基本情况

窑泥沟是云南省澄江县县城凤麓镇的排污河道,县城内生活污水及上游农田径流由此排入抚仙湖,其污染与其他入湖河道相比最为严重。入湖污水污浊不堪, TN 平均质量浓度达到 8.43 mg/L, 远远高于其他河流, TP 浓度也仅次于上游为磷矿区的代村河,其中还携带大量固体垃圾,对抚仙湖水质造成了严重污染,破坏了局部生态景观。

距窑泥沟不到 100 m 的农灌中沟汇集了径流区上万亩农田的排水,现窑泥沟河道改道并入了农灌中沟,因此处理重点在于去除漂浮垃圾、泥沙,以及大幅度削减大流量低浓度废水中 N、P 含量。但是,常规的生化处理对于低浓度 N、P 废水的去除效果

微弱,而人工湿地由于植物对 N、P 的吸附能力强,且根系能为微生物提供好氧、厌氧环境,因此人工湿地可大大加强对低浓度污水中 N、P 的去除,适合抚仙湖河口污水净化工程。

1.2 窑泥沟、马料河人工湿地的对比情况

窑泥沟、马料河均属于抚仙湖北岸主要入湖河流,流经澄江县城凤麓镇,相比其他河流,它们的污染最为严重。2002 年玉溪市环境监测站监测资料表明,马料河的污染程度仅次于窑泥沟。

窑泥沟、马料河人工湿地在同一区域均采用经营性复合型人工湿地。但原窑泥沟的污染已非常严重,现并入农灌中沟后,其中 N、P 的污染负荷更大,在北岸入湖河流中居首位,因此,对窑泥沟人工湿地的应用研究显得尤为重要,更具代表意义。

作者简介:刘志勇(1977—),男,云南昆明人,硕士研究生,研究方向为污水控制。E-mail: jzhn_lzy@sina.com

2 窑泥沟人工湿地应用现状

窑泥沟人工湿地是经营性复合型人工湿地。所谓“经营性”就是把我国传统的湿生经济作物栽培应用于湿地经营,把污水湿地净化和农业生产有机地结合起来,这样不仅可降低建设成本和运行费用,并且在防止植物饱和老化、湿地持续稳定运行方面超过了一般的人工湿地。窑泥沟人工湿地 2002 年已投入运行,目前湿地生产的一些水生性蔬菜作物(水芹菜、莲藕等)已进入市场,带来了经济价值,而淤泥、植物残体则作为堆肥用于农业生产。

窑泥沟湿地是由氧化塘、表流型人工湿地与潜流型人工湿地等几部分共同组成的复合型人工湿地。工艺流程见图 1。

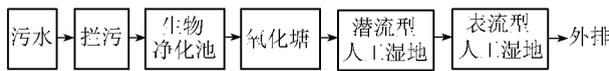


图 1 窑泥沟人工湿地工艺流程

2.1 工艺机理及运行情况

2.1.1 拦污池

拦污池的主要功能是去除入湖河水中所携带的漂浮垃圾。据 2002 年的观测统计,共清除各类漂浮垃圾 967.7t, 月均清除量达 69.1t, 最高月清除 169.9t。

2.1.2 生物净化池

生物净化池的主要功能以沉淀为主,池内种植满江红、香蒲等植物,这些挺水植物可起到拦截、促淤和生物降解等作用。

据观测,满江红月均生物产出量为 8 kg/m^2 , 香蒲月均生物产出量为 9.6 kg/m^2 。

2.1.3 氧化塘系统

氧化塘属兼性塘性质,并列有 3 个。水深在 1.5 ~ 2.0m, 塘内好氧和厌氧生化反应兼有之。在上部水层中,白天藻类光合作用旺盛,加上塘面风力搅动,塘水维持好氧状态,形成好氧层,而在夜晚,光合作用停止,溶解氧下降接近于零,塘底由可沉固体和藻、菌类残体形成的污泥进行厌氧发酵,形成厌氧层。而在好氧与厌氧层间存在一个兼性层。

氧化塘内主要种植水芹菜,年生产量为 80 kg/m^2 , 平均每年对 N, P 和有机质的吸收净化量分别为 0.19 kg/m^2 , 0.069 kg/m^2 和 4.88 kg/m^2 。氧化塘的净化在提高湿地工程的耐冲击性和促进沉降等方面起到了很大的作用。

2.1.4 人工湿地

a. 表流型人工湿地。表流型人工湿地中废水在填料表面漫流,与自然湿地最为相似。这种类型的湿地具有投资少、操作简单、运行费用低等优点,

但占地面积较大,水力负荷率较小,去污能力有限。该湿地中氧的来源主要靠水体表面扩散、植物根系的传输和植物的光合作用,但传输能力十分有限,系统的运行受气候影响较大,夏季有孳生蚊蝇的现象。绝大多数有机物的去除是由植物根、茎上的生物膜完成的,因此这种湿地不能完全利用填料和丰富的植物根系。

b. 潜流型人工湿地。窑泥沟潜流型人工湿地采用的是水平流,这类湿地因污水从一端水平流过填料床而得名。它由一个或多个填料床组成,床体填充基质,床底设有防渗层,防止污染地下水。水在填料表面下渗流,因而可充分利用填料表面和植物根系的生物膜及其他各种作用来处理污水。该湿地的水力负荷和污染负荷比表流型人工湿地大,COD, BOD₅, SS 及重金属等污染物质的去除效果较好,卫生条件较好,其缺点是控制技术相对复杂,N, P 去除效果不如垂直流人工湿地。

2.2 工艺运行结果分析

2.2.1 植物

由于多种植物在不同季节的生长方式并不相同,即使是同一种植物,在不同季节生长也不相同,所以在不同季节应该选择不同的植物品种。目前,窑泥沟人工湿地系统中常选的植物有水芹菜、莲藕、慈姑、香蒲和凤眼莲等品种。经过运行后发现,其中水芹菜具有较强的适应性,在抚仙湖区一年四季都有较强的生长能力,可以作为主要的常选植物品种。根据由文辉教授在华东师范大学校园内丽娃河所开展的利用水生经济植物净化受污水体的生态工程研究^[1],水芹菜对 TN, TP 的去除率高达 82.77% 和 94.77%,毫不逊色于凤眼莲。莲藕、慈姑在春、夏季生长旺盛,去污能力强,但在秋、冬季停止生长,对污水没有净化能力。尽管凤眼莲、满江红等耐污能力强的植物对水体中 $\text{NO}_3^- - \text{N}$, $\text{NO}_2^- - \text{N}$, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$, P 均有较好的去除效果^[2],但由于经济性差,大多用作季节性补充植物。

2.2.2 各项指标的去除情况

窑泥沟人工湿地 2003 年 8 月进、出水水质各项指标的统计数据见表 1。由于废水内含有的污染物质随季节变化很大,水量又极不稳定,所以下面从不同季节的去除率情况分析各项污染指标的去除效果。2002 年不同月份各项指标的去除率见表 2,去除率变化趋势见图 2。

由图 2 可见,SS 的去除率在 90% 以上,而且随着时间的推移逐步升高。COD, TN, TP 受进水量及进水浓度的影响较大,在雨季,因进水浓度偏低,所

表 1 各流程进、出水水质情况

采样点	$\rho(\text{SS}) / (\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	$\rho(\text{BOD}_5) / (\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	$\rho(\text{COD}) / (\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	$\rho(\text{NH}_4^+ - \text{N}) / (\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	$\rho(\text{TN}) / (\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	$\rho(\text{TP}) / (\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	pH 值
进水口	53	4.30	25.40	2.002	6.168	0.506	8.07
生物沉淀池出口	19	4.02	22.40	2.022	4.679	0.484	7.93
氧化塘出口	11	2.90	22.80	3.202	5.115	0.433	7.80
潜流型湿地出口	8	1.90	17.05	1.718	2.109	0.365	7.81
表面流湿地出口	6	3.40	17.60	1.091	1.616	0.319	7.63

表 2 2002 年不同月份各项指标的去除率 %

月份	SS	COD	TN	TP
3	72.97	57.13	36.01	59.48
4	90.32	51.00	64.09	60.65
5	93.44	61.14	73.08	67.62
7	98.22	87.60	60.68	59.52
12	98.36	50.00	30.27	34.80

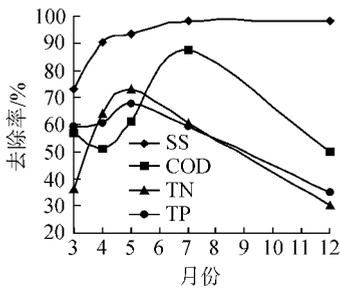


图 2 去除率的季节变化趋势

以整体去除率高,去除效果好。到了秋、冬季,由于水量不足,致使进水的 C/N 比偏低,故 TN 的去除受到影响。此外,植物的生长状况直接影响去除效果。在春、夏季,植物生长迅速,整体的去除率都有提高,随着生物量的增加,植物对 P 的吸收加快,出水中 P 的含量减少,故此阶段 P 的去除率在一年中是最高的。到了冬季,一些植物死亡,所以除 SS 外,整体去除率偏低,尤其是死亡的植株会把 P 释放到湿地中,致使出水的 P 含量上升,某些时候无机 P 含量甚至高于进水。

2.2.3 经济性

人工湿地净化系统从 20 世纪 70 年代研究起,就因其基建投资低、运行成本低、维修技术低、不能耗、生态效益高,被称为“三低一不高”污水净化工艺。人工湿地系统不依赖于动力的强化,而是有效地充分发挥生物净化的天然功能,尤其是在治理湖泊富营养化、控制面源污染时,通常较常规污水处理工艺更具经济性。

以传统的普通活性污泥法和人工湿地工艺进行主要经济技术指标对比。假定污水处理规模为 15000 t/d;COD, BOD₅, NH₄⁺-N, PO₄³⁻-P 的进水水质分别为 300 mg/L, 150 mg/L, 30 mg/L, 3 mg/L;出水水质分别为 60 mg/L, 20 mg/L, 15 mg/L 和 1 mg/L。活性污泥法与人工湿地工艺多项主要经济技术指标比较

结果见表 3。

表 3 “活性污泥法”与“人工湿地系统”经济技术指标比较

指标	活性污泥法	人工湿地工艺
占地面积/m ²	6000	30000
工程投资/万元	1800	600
管网配套工程/(万元·km ⁻²)	100	巧借地形条件和现有农田集排沟渠,基本不需要管网配套投资
运行费用/(元·t ⁻¹)	0.53	0.03
操作管理	较复杂	简单,运行稳定
景观效益	差	优良
生态效益	无	增加生物多样性,延长食物链,创造优质景观,生态效益高
经济效益	无	可利用各种经济性、景观性植物产生一定的经济效益
布置方式	须集中处理	可根据需要,灵活分散布置
缓冲能力	对不同的来水水质和水量,只能在设计的定额范围内处理	对不同的来水水质和水量,具有较大的适应能力和缓冲能力
其他说明	对于 $\rho(\text{COD}) < 200 \text{ mg/L}$ 的污水难以运行	对于任何浓度的城市生活污水和面源污染都能正常运行

由表 3 可知,窑泥沟人工湿地工艺与活性污泥法(当地常规污水处理方法)相比,具有基建投资小、运行成本低、维护技术简便、不能耗、生态效益高和见效快等工艺特点。此外,湿地中种植的莲藕、水芹菜等植物进入市场后也带来了良好的经济效益和社会效益。

3 新构思

窑泥沟人工湿地自 2002 年正式投入运行至今,已取得了较好的处理效果,但还存在着一些问题,如 N, P 的去除率受进水水质和季节变化影响,时高时低,不能持续、稳定,而 N, P 是造成水体富营养化的限制性因子,所以必须强化人工湿地去除 N, P 的能力。经过一段时间运行,由于植物残体、部分悬浮物的沉积及生物膜的增厚,填料易出现堵塞。此外,湿地占地面积大,因此提高其水力负荷显得尤其重要。

根据窑泥沟人工湿地的实际运行情况,笔者结合实际提出以下几点构思。

3.1 填料的选择

对于床体的填充材料,除砂石、砾石等常规填料

外,可试验利用其他廉价的、对 N、P 吸附效果好的材料。因为目前湿地所采用的常规填料,其吸附能力易于饱和,对 N、P 的去除效果有一定局限性。

蛭石以其地质储量丰富、价格低廉、吸附容量大、对环境无毒无害且容易再生等优点,在污水处理中应用前途广阔,尤其在脱氮方面是比较有前途的一类吸附填料。试验表明^[3],当 pH 值为 2.0~6.0,温度在 10~35℃,NH₄⁺-N 初始质量浓度小于 200 mg/L 时,NH₄⁺-N 去除率随蛭石用量增加而提高。因此,非常适合窑泥沟湿地进水浓度较低的情况。

从前面的运行结果分析可见,窑泥沟人工湿地工艺中潜流型湿地的除氮能力远远大于除磷能力。这是因为氮可以通过硝化、反硝化作用转化为 N₂ 逸出,而 P 的去除目前在碎石床中主要是通过植物的吸收及对植物的收割来实现的,因此为提高 P 的去除率,必须采用含 Ca、Fe、Al 高的填料。研究结果表明^[4],填料中 Ca、Fe、Al 等含量的变化对 P 的去除影响达 32.7%,pH 值占 20.8%。当 pH 值 > 6 时,P 的去除主要靠 Fe、Al 氧化物的物理吸附和溶解性磷酸钙的沉淀,而在 pH 值较低时,主要依靠 Fe、Al 等磷酸盐的沉淀。所以,针对窑泥沟湿地 pH 值大于 6 的情况,采用含钙量高的填料比较适合。

除了上述所提的填料,还可以选择煤渣、草炭混合基质来作填料。实验表明^[5],采用煤渣-草炭作填料,湿地床中不种植植物和种植植物对 TP 的去除率分别为 76.8%~91.6%和 77.6%~85.0%。说明该基质对 P 具有较强的吸附能力,完全可以用作人工湿地系统中除磷的特殊填料。

3.2 植物的选择

在复合人工湿地中,兼性塘对 P 的去除不明显,这一现象同塘底污泥的有机磷再释放有关,异养生物对含 P 物质仅作了形态上的转变,导致兼性塘对 P 的去除能力降低。因此,对 P 的去除主要是在人工湿地系统中完成的,而植物则是其中重要的一个环节。因为一方面植物吸收和同化 P,另一方面植物根系输氧量的变化为微生物提供了好氧与厌氧环境,这有利于聚磷菌的摄磷^[6]。植物根系直接影响到湿地容水体积,影响到出水量、出水速率及停留时间,是影响系统水力学特点的主要因素。相对而言,须根系比根状茎、匍匐茎等具有更好的污水净化效果。研究表明^[7],芦苇对污水中 N、P 的去除能力明显高于香蒲,但小麦冬的去除效果则是芦苇的 5 倍。所以,窑泥沟湿地除了保证种植富有经济效益的水芹菜、莲藕等当地蔬菜品种外,还应多更换一些处理效果好的季节性植物,如小麦冬、风车草等。

此外,选择水葫芦也比较适合窑泥沟人工湿地。有研究结果显示^[8],用水葫芦处理污水 27.5 h,能有效去除 70% 的 BOD₅,70% 的 COD,60% 的 NH₄⁺-N,65% 的 PO₄³⁻-P 和 99% 的肠细菌。尽管水葫芦有繁殖速度过快、容易堵塞、侵占水体、易造成蚊子等害虫大量繁殖等弊端,但只要管理得当,善于兴利避害,将其用作季节性植物,残体用于喂养牲畜,这样水葫芦对窑泥沟湿地而言,也不失为一种理想的季节性补充植物。

3.3 工艺流程的选择

窑泥沟复合人工湿地工艺中,碎石床湿地采用的是水平流潜流型湿地,但由于进水水质变化很大,水量不稳定,以及占地面积等因素的限制,因此加入垂直流湿地或以此替代水平流湿地,显得尤为重要。垂直流湿地集合了表面流和水平流潜流人工湿地两者的优点,具有占地面积较小、污水处理负荷高、污染物去除率高、出水水质好等特点。垂直流湿地硝化能力高于水平潜流湿地,但控制相对复杂,建造要求高。对官厅水库的研究表明^[9],当进水 NH₄⁺-N 的质量浓度为 1.5~3.5 mg/L 时,NH₄⁺-N 的去除率大于等于 80%,其出水质量浓度小于 0.5 mg/L。

此外,加入垂直流人工湿地还可提高水力负荷。目前,我国通用的水力负荷为 0.2~0.4 m³/(m²·d),在不影响处理效果的前提下,加入垂直流人工湿地可在一定程度上加大水力负荷。星云湖人工湿地的研究表明,在湿地工艺中加入垂直流湿地,水力负荷提高到了 0.8~1.0 m³/(m²·d)。因此,在窑泥沟复合人工湿地工艺中,加入垂直流人工湿地不但可以提高 N、P 的去除率,而且能加大水力负荷,缩小湿地占地面积。

4 结 语

窑泥沟河道来水具有季节性,泥沙和垃圾污染严重,流量变幅大,水质属低浓度化学污染。从窑泥沟人工湿地的运行情况来看,复合型人工湿地在广大乡村地区面源污染治理中,具有投资少、去除率高、适应范围广、耐冲击能力强、处理效果稳定、管理容易、运行成本低等特点,值得大力推广。窑泥沟人工湿地应用性的研究实践,不仅显著改善了抚仙湖的进水水质,美化了当地的旅游景观,而且为高原湖泊富营养化的治理提供了新的思路和新的模式。

参考文献:

[1] 由文辉,刘淑媛,钱晓燕.水生经济植物净化受污染水体研究[J].华东师范大学学报:自然科学版,2003,3(1):

接饮用,提高了用水效率,南京市供水节水处作出规定要求新建住宅一律禁止使用9L以上的坐便器,推广使用6L坐便器以节约用水。④建立水资源宏观控制和水资源微观定额指标体系为基础的水权管理制度,前者用以明确各地区、各行业等可以使用的的水资源量,后者用以规定每项产品或工作的具体用水与节水指标,从而层层落实节水责任,以保证配水方案的有效实施,建立水资源的经济运行制度,以水价为杠杆,根据利用效益来合理分配水资源、实现分层动态管理,协调水资源开发利用中宏观调控与市场机制间的关系。2004年南京市出台新的自来水计价方式,以节能提效为目的、以“多消费、多计费”为原则,根据江苏省物价局、建设厅出台的《江苏省城市供水价格管理暂行办法》,在部分小区尝试实行人水越多价格越贵的三级“阶梯式计量水价”,级差为1:1.5:2,各级水量基数将由物价结合本市实际情况确定。也就是说,如果用水时只顾畅快不思节约,就意味着你可能要比别人多钱用“高价水”。⑤组织和各阶段、各社会层次的水资源可持续利用公共宣传、教育与信息服务,以提高公众对水资源特性及其重要性的认识,培养全社会的节水意识,引导绝大部分人理解并积极参与水资源管理,并在水资源勘探与评估、各种水利工程建设与运行、水资源净化与循环利用、海水淡化、水资源保护与水环境整治等领域,加强科技创新工作的组织、推进与管理,增强水资源利用专业人员的科研与工作技能,以保证水资源政策和管理方案的有效实施。2002年“世界水日”活动中南京市开展了以“节水”为主题的水知识普及教育活动,包括节水知识系列讨论、节水宣传网页设计竞赛、节水知识竞赛及节水校园设计大奖赛(包括各种节水器具设计)等;南京市供水节水处亦已上门到各大企业、单位宣传节水意义,并推广使用8000多套6L洁具。

d. 水资源可持续利用行为系统在发展过程中将实施将运行状态反馈给约束系统,并且支持系统亦向决策系统动态输入运行状态参数,从而形成新一轮城市水资源可持续利用的系统调控。

4 结 语

城市水资源持续利用是一项系统工程,然而该领域以往的研究与实践工作多集中于对具体的水利工程、水环境治理工程或水资源开发管理模式等的方法与技术进行探讨,却忽视了从整体上对水资源

利用各环节的协调进行相应的机制研究,而实际上水资源的利用又确实在一定程度上存在着从规划制定到工程具体实施的运作体系不畅问题。因此本文试图探索了一套应用现代系统理论来构建“城市水资源可持续利用调控”的方法与实现途径,然而这只是一种初步的理论尝试,还需要结合进一步的区域实证来检验、发展、实践和推广该理论。

参考文献:

- [1] 刘昌明. 21世纪中国水资源若干问题的讨论[J]. 水利水电技术, 2002, 33(1): 15-19.
- [2] 许有鹏. 城市水资源与水环境[M]. 贵阳: 贵州人民出版社, 2003: 235-283.
- [3] 王济干, 张婕, 董增川. 水资源配置的和谐性分析[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2003, 31(6): 702-705.
- [4] 陈明忠, 刘恒, 耿雷华, 等. 流域水资源可持续利用模式研究[J]. 水利水电科技进展, 2004, 24(3): 5-7.
- [5] 宋克强. 水资源系统结构与模型[J]. 水文水资源, 2001, 22(1): 6-8.
- [6] 冯尚友. 水资源持续利用与管理导论[M]. 北京: 科学出版社, 2004: 18-23, 65-71, 120-127.

(收稿日期: 2005-01-25 编辑: 高渭文)

(上接第26页)

- [2] 黄世玉, 陈家友. 几种水生植物改良鳖池水质效果的比较研究[J]. 集美大学学报: 自然科学版, 2000, 5(2): 34-37.
- [3] 聂发辉, 吴晓芙, 胡日利. 人工湿地中蛭石填料净化污水中氨氮能力[J]. 城市环境与城市生态, 2003, 16(6): 280-282.
- [4] ARIAS C A. Phosphorus removal by sands for use as media in subsurface flow constructed reed bed[J]. Wat Res, 2001, 35(5): 1159-1168.
- [5] 崔理华, 朱夕珍, 骆世明, 等. 煤渣-草炭基质垂直流人工湿地系统对城市污水的净化效果[J]. 应用生态学报, 2003, 14(4): 597-600.
- [6] 沈耀良, 王宝贞. 废水生物处理新技术[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1999: 275-276.
- [7] AOLCOCK P W, GANF G G. Growth-characteristics of three macrophyte species growing in a natural and constructed wetland system[J]. Water Sci Technol, 1994, 29(4): 95-102.
- [8] 李旭冬, 杨芸. 废水处理技术及应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2003: 125-126.
- [9] 代明利, 欧阳威, 刘培斌, 等. 垂直流式人工湿地处理官厅水库入库水研究[J]. 中国给水排水, 2003, 19(3): 4-7.

(收稿日期: 2005-10-27 编辑: 徐娟)