

塘渠—湿地复合系统治理农业面源污染研究

张 玮¹, 方敏瑜^{1*}, 张建锋¹, 李雪涛², 陈光才¹, 潘春霞²

(1. 中国林业科学研究院亚热带林业研究所, 浙江 富阳 311400; 2. 浙江省安吉县林业局, 浙江 安吉 313300)

关键词: 农业面源污染; 塘渠; 湿地; 治理

中图分类号: X53

文献标识码: A

Study on Agricultural Non-point Source Pollution Control by Pond-Wetland Combined System

ZHANG Wei¹, FANG Min-yu¹, ZHANG Jian-feng¹, LI Xue-tao², CHEN Guang-cai¹, PAN Chun-xia²

(1. Research Institute of Subtropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Fuyang 311400, Zhejiang, China;

2. Anji Forestry Bureau of Zhejiang Province, Anji 313300, Zhejiang, China)

Abstract: The effects of agricultural non-point source pollution control by pond-wetland combined system in Shenxi river basin of Anji county were studied based on nearly one-year's experiment. The removal rate of total nitrogen (TN), total phosphorus (TP) and chemical oxygen demand (COD) of the pond-wetland combined system was also studied with different inlet wastewater concentration and time. The results showed that the removal effect of TN, TP, and COD in pond-wetland combined system was fairly good. The removal rate of TN, TP, and COD in the system could respectively reach 96%, 98%, 82% when the TN, TP, and COD of inlet wastewater reach the highest point 33.3, 0.99, and 121.6 mg · L⁻¹. Generally, the removal effect of the system was better in plant growth season and higher concentration of inlet wastewater period.

Key words: agricultural non-point source pollution; pond channel; wetland; control

农业面源污染是指在农业生产活动中,氮素和磷素等营养物质以及其它有机污染物、无机污染物、土壤颗粒等沉积物,通过农田的地表径流和地下渗漏造成水域环境的污染。由于涉及范围广、控制难度大,农业面源污染已成为影响水体环境质量的重要污染源。对于农业面源污染的调控治理,目前国内还没有一套定型的方案。人工湿地由于其投资省、运行维护方便、处理效果好,在许多地区已经广泛应用^[1-9]。表面流人工湿地是应用最早的一种人工湿地,相对于潜流湿地、垂直流湿地能有效地处理各种废水,如生活污水、工业废水、垃圾渗流液和地

表径流雨水等,对水中的有机污染物、氮素和磷素等营养物、重金属、盐类和病原微生物等具有较高的清除效率,且运行成本低、人工投入少,且还具有一定的景观价值,在农村污水治理方面具有明显优势^[10-17],近年来在我国获得了迅速发展和推广应用。

黄浦江主要源头之一的深溪河纵贯浙江省安吉县全境,河道周边的农田灌溉排水和降雨溢水经河岸渗漏及地表径流进入河道,严重污染深溪河,水质呈现极严重富营养化状态,特别是枯水期对水质的影响最大,对安吉县居民饮用水构成威胁。2004年

收稿日期: 2009-06-01

基金项目: 浙江省科技计划项目“村镇农业面源污染综合控制技术的研究与示范”(2005C13003)

作者简介: 张 玮(1981—),男,山西大同人,研究实习员,硕士,主要从事竹类资源利用与生态学研究。

* 通讯作者: fyangminy@126.com

开始,近自然的、生态的技术工程体系首次运用于浙江省重大科技专项“村镇农业面源污染综合控制技术的研究与示范”工程,对部分进入河道的农田排水进行自然净化,达到了较好的治理效果,为我国农业面源污染控制提供了具有参考价值的技术方法。

1 安吉深溪河流域面源污染治理工程概况

浙江省安吉县深溪小流域的深溪河,全长约18 km,流域面积42 km²,流域年平均降水量1 384 mm,年平均流量约0.37亿 m³。深溪河下游洪家村段流程约8 km,两侧农田耕作以水稻单熟制为主,施肥采用尿素和复合肥,化肥施用强度为260 kg·hm⁻²。

安吉深溪河流域面源污染治理工程体系由人工塘渠系统、近自然的植被系统构成(图1)。首先在农田排水口疏通恢复并新建集水渠总长4 600 m,将污水引入人工水塘,同时在下游建成生态景观拦截湿地。系统占地面积约15 000 m²,采用连续运行方式,设计水力负荷约0.02 m³·m⁻²·d⁻¹,大雨日(暴雨除外)水力负荷约0.03 m³·m⁻²·d⁻¹。

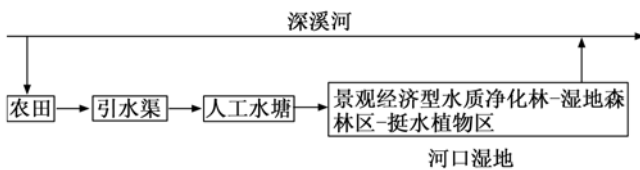


图1 塘渠-湿地复合系统组成

1.1 人工塘渠系统

人工塘渠系统技术为暴雨滞留池、渗透沟和小型前置水库等技术的综合体,布局 and 定位在溪流或河流两侧农区,具体结合已有沟渠系统、现场地形地势及径流发生部位。农田排水收集后,流入人工渠,渠宽0.8 m,渠岸内侧沿河高度0.6 m,近农田侧高0.45 m,深度0.45 m,抛物型断面,由泥土夯实而成,总长4 600 m;水塘深约2 m,面积约1 334 m²,控制大田面积近13.3 hm²,进水口与人工渠相连,排水口连接下游湿地。

1.2 河口湿地

深溪河在洪家村北汇入老石坎水库,于入库口形成一片自然湿地。试验监测的带状湿地总长2 km,面积约1 hm²,按高程和不同植物的适生环境设置3个湿地分区:在深溪河面114~116 m高程地带,构建以红竹(*Phyllostachys iridescens* C. Y. Yao

et S. Y. Chen)、板栗(*Castanea mollissima* Bl.)、枫杨(*Pterocarya stenoptera* C. DC.)等为主林层的景观经济型水质净化林,面积约4 000 m²,通过对现有林(红竹—枫杨林)保护和改造而成。在局部地段的枫杨林及低效益红竹林中伐出林窗,补植美国山核桃(*Carya illinoensis* (Wangenh.) K. Koch.)、北美枫香(*Liquidambar styraciflua* L.)等速生经济、景观树种,林带内套种白茶(*Koilodepas hainanense* (Merr.) Airy Shaw.),共计150余棵,并培育林下野生草本地被,如白茅(*Imperata cylindrical* (Linn.) Beauv.)等,降低径流速度。在深溪河面112~114 m高程地带建设约4 000 m²湿地森林区,种植引进的美国水紫树(*Nyssa aquatica* L.)、沼地紫树(*N. sylvatica* v. *biflora* (Walt.) Sarg.)、纳塔栎(*Quercus nuttallii* Palm.)等11种耐水湿树种,共计1 000余棵,成活率90%以上。挺水植物区主要为原生长芦苇(*Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud)区域,深溪河面高程110 m左右区域,面积为2 000 m²。农田排水经人工塘渠系统进行初步的净化后依次进入景观型水质净化林、湿地森林区和挺水植物区。

2 研究方法

塘渠-湿地复合系统在工程完工、植物移植结束后,即开始连续地进水运行,在系统整体比较稳定后,开始连续性采样和测试工作。2008年5—10月间在主要的监测点即塘、渠的进出水口,湿地的进、出水口进行了取样分析。在无降雨出现的清晨沿水流途径进行采样,每月2次,每次3个重复。

监测指标的分析测定方法:化学需氧量(COD)测定采用重铬酸盐法(GB/T 11914—89);总氮(TN)测定采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法(GB/T 11894—89);总磷(TP)测定采用钼酸铵分光光度法(GB/T 11893—89)。采用Excel 2007软件对数据进行分析,比较不同时间的污染物去除率以及随着不同的季节变化湿地对污染物的去除状况。

污染物去除率按下式计算^[18]:

$$Re = (C_1 V_1 - C_2 V_2) / C_1 V_1 \times 100\%$$

式中: C_1 、 C_2 分别为进、出水中污染物浓度; V_1 、 V_2 分别为进、出水体积。取样分析不考虑蒸散失水,假设 $V_1 = V_2$ 。

3 结果与分析

3.1 人工塘渠系统的净化效果分析

农田出水(渠进水)总氮(TN)、总磷(TP)、化学

需氧量(COD)的监测结果(图2、4、6)表明:总体上农田出水的TN浓度均劣于V类水环境质量标准(GB 3838—2002,下同),农田TN的排放在5月中旬、7月初达到小高峰,7月初农田排水TN浓度最高达到 $33.3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。农田出水TP浓度在5月份达到最高 $0.99 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,其它时段农田出水TP浓度均优于Ⅲ类水质标准。在监测期间农田出水COD平均为 $51.4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,劣于V类水质标准,高峰值出现在5月与7月,COD分别为 $121.99 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。农田氮磷排放高峰正是化肥施用期,并且稻田出水中夹杂了较多悬浮物及有机污染物,导致水质急剧恶化。

3.1.1 人工塘渠系统对TN的去除效果 对人工渠进出水TN的监测结果(图2)表明:总体上人工水渠在进水TN浓度较高时去除率较高,如在5月初和7月初,去除率分别达到84.7%和81.0%;其余时段去除率波动较大且均未超过25%,部分时段还出现了出水TN浓度略高于进水的现象。原因可能是由于人工渠较人工塘水流流速高,水中污染物不易沉淀,遇到暴雨或其它因素导致进渠水流量急速增加时,容易将渠底及渠壁沉淀、吸附或未及时转化的氮素带出,导致出水TN浓度的增高,但TN浓度增高一般比较平缓,不会对出水水质造成很大影响。

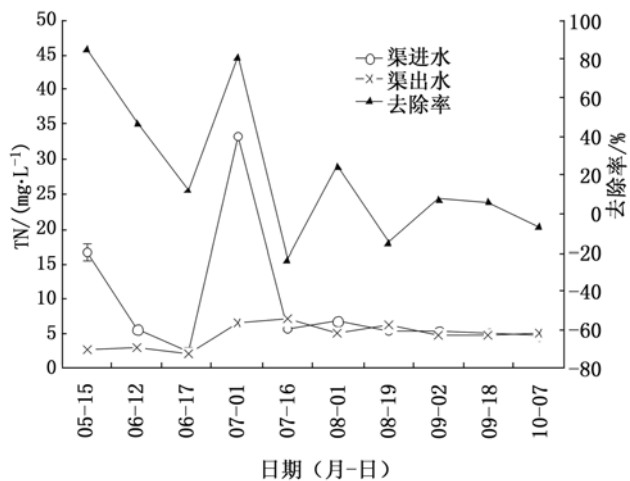


图2 人工渠进出水总氮(TN)浓度的变化

人工塘7月份进水TN浓度较高(图3),达到 $6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以上,此时人工塘对入水TN的去除率也显著高于其它月份,达到53.2%;其它时段人工塘对入水TN的去除率均在30%以下。这主要是由于污水流入水塘后,流速变慢,污水中的不溶性颗粒物通过沉淀、吸附等作用被截留下来,水质得到初步净化;塘中微生物对水中污染物也起到吸附、分解的作用;但

由于人工塘面积有限,对污染物的容纳有限,当进水TN浓度较低时净化作用不明显。这也说明,人工塘系统对污染水体中的污染物浓度变化有一个缓冲的作用。因此,在治理这类农业面源污染时,在污染物集中排放的源头修建人工塘渠系统,可以对径流污水进行截留、净化,实现面源污染的首层控制。

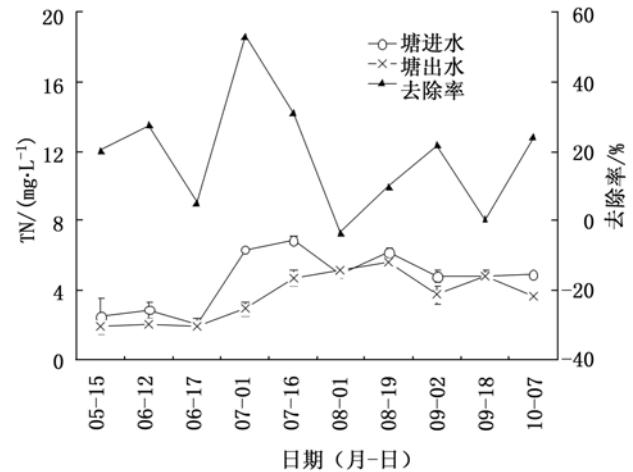


图3 人工塘进出水总氮(TN)浓度的变化

3.1.2 人工塘渠系统对TP的去除效果 人工渠对污水TP的去除结果(图4)表明:人工渠进水TP浓度波动较大,而出水TP浓度比较稳定,均未超过 $0.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。当进水TP浓度达到最高值 $0.99 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,人工渠对TP的去除率最高达到96.1%;其它时段也表现为进水TP浓度较高时去除效果较好。这是由于在人工水渠中污水的流程长,渠道与污水接触的吸附面大,对于高浓度含磷废水有很好的吸附作用。

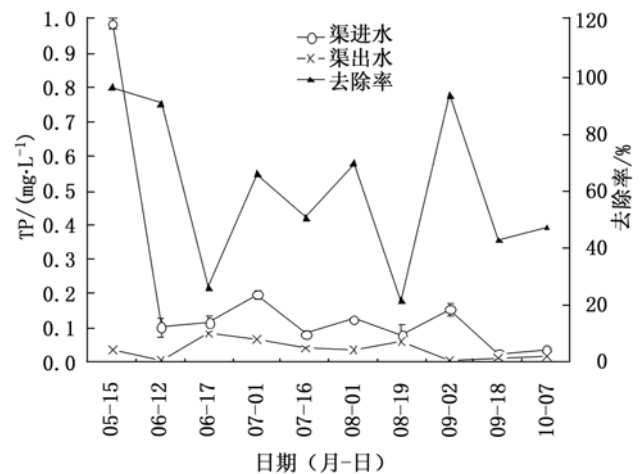


图4 人工渠进出水总磷(TP)浓度的变化

人工塘对污水TP的去除率波动较大(图5),除5

月中旬、6月中下旬及8月中旬外,其它时段出现了出水 TP 略高于进水的现象。其中部分原因是由于人工塘较同体积的人工渠吸附面积小,部分磷素未及转化,因此单位面积人工塘 TP 的去除效果不及人工渠。

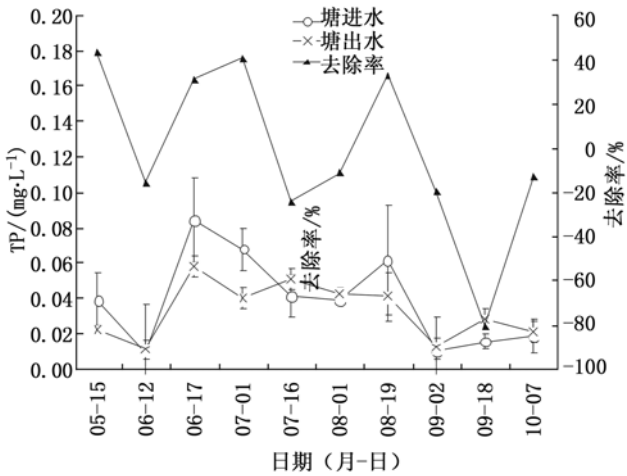


图5 人工塘进出水总磷 (TP) 浓度的变化

3.1.3 人工塘渠系统对 COD 的去除效果 人工塘渠系统对污水 COD 的去除结果(图6、7)表明:人工渠对农田排水 COD 的去除率好于人工塘,总体规律与 TP 类似。当进水 COD 达到最高值 $121.6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,人工渠对 COD 的去除率最高达到 75.3%;而人工塘对污水 COD 的去除率最高仅 35.6%。但人工塘各时段出水 COD 值均小于 $40 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,优于 V 类水环境质量标准。这是因为在沿程前期主要是沉降去除,在排水 COD 值的高峰期水中悬浮物浓度高,COD 可沉降部分多;其次是由于人工渠中污水的流程长,污水与氧气接触面大,部分污染物得以初步氧化,再加上人工塘对水中不溶性颗粒物进行进一步的沉淀过滤,使得出水 COD 有了较大幅度下降。

由以上分析可见,人工塘渠作为面源污染治理第一道关的重要性:对于 TN、TP 浓度较高的污水,人工塘渠可以大大减少水中氮磷的总量,抗高污染负荷的效果好;但当进水水质中氮磷浓度急剧下降后,人工塘渠中沉淀、吸附的氮磷会释放一部分到水中。这也是由人工塘渠的结构特点决定的,人工塘渠容纳污物的体积有限、容易饱和,只有定期对人工塘渠系统的底泥或基质进行置换才能保证有比较稳定的去除效果。将富营养化的农田水通过人工渠引入人工塘进行初步净化,将是一个较为经济、有效的方案。

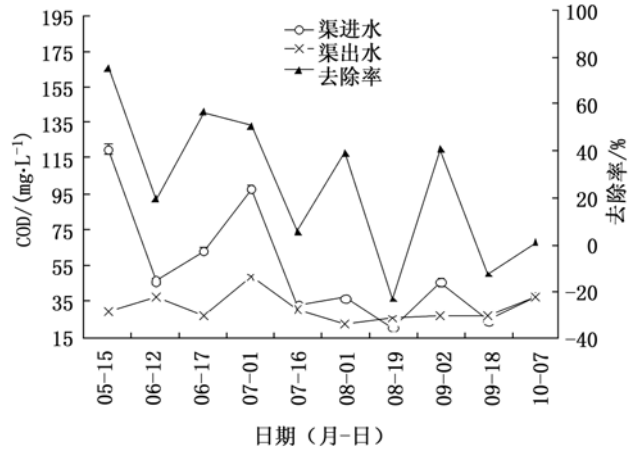


图6 人工渠进出水化学需氧量 (COD) 浓度的变化

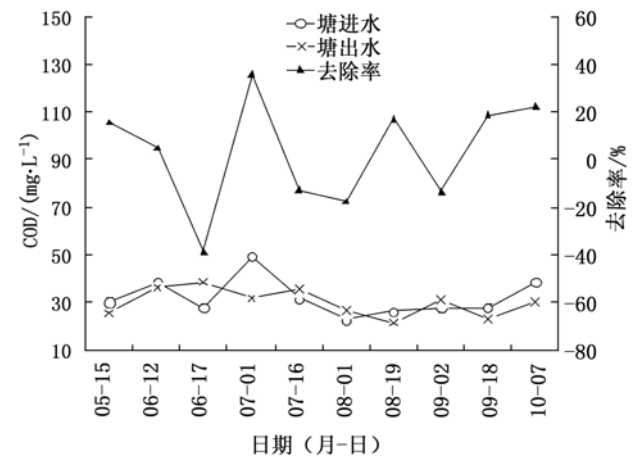


图7 人工塘进出水化学需氧量 (COD) 浓度的变化

3.2 人工湿地系统的净化效果分析

3.2.1 湿地对 TN 的去除效果 河口湿地对水质 TN 的去除结果(图8)表明:6月初至8月初,湿地系统对 TN 的净化效果较好,去除率平均为 52.5%;而其它月份湿地对 TN 去除效果不明显。氮在人工湿地内的转化途径包括土壤吸附和离子交换、水生植物吸收、微生物的硝化、反硝化以及氨的挥发等^[19]。由于硝化细菌和反硝化细菌活性与植物的生长受温度影响较大,因而 TN 的去除也有一定的季节规律^[4]。6—8月是植物、微生物生长的旺季,对污染物去除效果比较明显。

3.2.2 湿地系统对 TP 的去除效果 河口湿地对水质 TP 的去除结果(图9)表明:6—8月湿地系统对 TP 的净化效果较好,去除率平均为 25.5%。主要是由于这个时期是植物生长的旺季,对磷的吸收能力大于其它时段;但在这种表面流人工湿地系统中,磷的去除机理是很复杂的,多方面因素在起作用,湿地

系统中磷的去除机制仍存在较多的分歧^[20]。籍国东等^[9]研究发现,当废水中 TP 的浓度较低时,人工湿地出水磷的浓度会增加,增加的磷主要是来自湿地基质的释放。

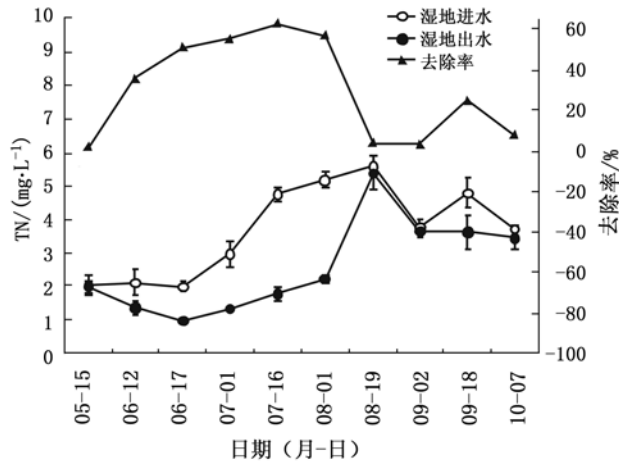


图8 河口湿地进出水总氮(TN)浓度的变化

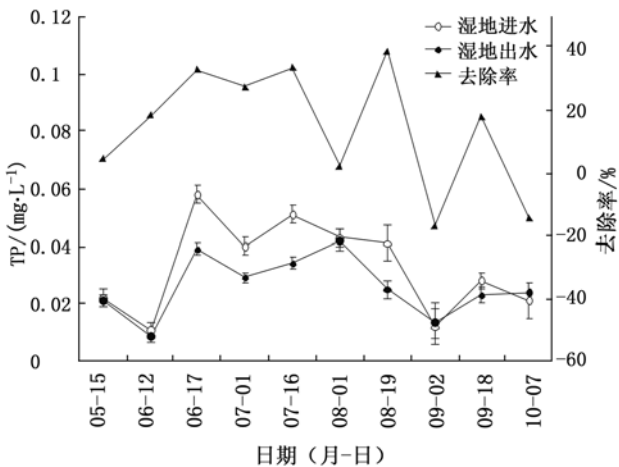


图9 河口湿地进出水总磷(TP)浓度的变化

3.2.3 湿地系统对 COD 的去除效果 河口湿地对水质 COD 的去除结果(图 10)表明:7 月中下旬到 8 月初,湿地系统对 COD 的去除效果较好,去除率平均为 47.4%。在近一半的监测时段湿地出水 COD 并未明显下降,实际上是因为湿地土壤的过滤吸附

能力是有限的,而且在运行过程中会有部分枯落物及有机质释放到水体,当土壤达到了其吸附极限时,过滤吸附就不明显了。

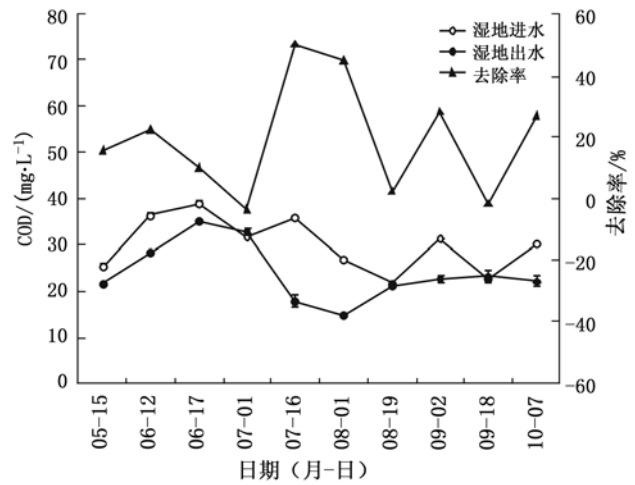


图10 河口湿地进出水化学需氧量(COD)浓度的变化

3.3 人工塘渠-湿地复合系统处理效果

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。总体来说,塘渠-湿地复合系统对深溪河流域面源污染的治理达到了较好的效果(表 1),塘渠湿地复合系统进水浓度变化较大,出水浓度变化幅度较小,系统对 TN、TP、COD 的去除效果在个别月份差异较大。湿地出水监测结果表明:TN、TP、COD 3 项指标基本达到国家 IV 类、II 类和 III 类地表水环境质量标准。虽然部分时间段出水水质中 TN 含量仍劣于 V 类水质标准,但考虑到农田排水的高污特性,达到这样的高去除率是较为理想的。

塘渠-湿地复合系统对 TN、TP 的去除主要是由于污水首先流入人工塘渠系统后,污水中的大部分氮磷通过塘渠系统的沉淀、过滤、吸附等作用被截留下来,水质得到初步净化;湿地中的植物、微生物及土壤基质对水中污染物起到进一步的净化作用,从而使出水水质有较大程度的改观。

表 1 塘渠-湿地复合系统对污染物的综合去除效果

项目	日期(月-日)									
	05-15	06-02	06-17	07-01	07-16	08-01	08-19	09-02	09-18	10-07
TN 去除率/%	88.1	75.2	59.0	96.0	68.3	66.6	-0.1	29.8	29.2	25.0
TP 去除率/%	97.9	91.3	65.8	85.4	59.0	66.9	67.9	90.9	14.8	31.4
COD 去除率/%	82.3	40.4	45.8	66.9	47.1	60.6	0.0	51.5	6.5	43.3

4 小结与讨论

在我国目前已应用的人工湿地中,总氮(TN)、总磷(TP)的平均去除率一般分别在59%~96%和75%~94%之间,化学需氧量(COD)的去除率也可达到52%~90%^[14,21-23]。本文的研究结果表明,人工塘渠-湿地复合系统应用于浙江安吉深溪河流域农业面源污染治理,对部分污水中TN、TP、COD均有很好的去除效果,但与进水浓度关系较为密切。农田排水TN、TP、COD最高峰值均超出V类水环境质量的数倍,此时段人工塘渠-湿地复合系统对TN、TP、COD的去除率最高分别达到96.0%、97.9%和82.3%。塘渠-湿地复合系统进水主要污染物浓度变化较大,出水主要污染物浓度变化幅度较小;其余时段系统对TN、TP、COD的去除率也表现为在进水污染物浓度较高的时期及植物生长旺季系统对污染物去除率较高。系统出水水质各项监测指标达到或接近我国Ⅲ类地表水环境质量标准。

以本系统设计的水力负荷来综合考虑污染物单位面积日削减量情况表明,人工塘、人工渠、湿地系统对TN的平均削减量分别为216.9、356.0、33.6 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$;对TP的平均削减量分别为1.3、12.4、0.2 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$;对COD的平均削减量分别161.3、4 835.9、183.3 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 。可见,人工渠单位面积去除污染物的效率最高,但考虑到人工湿地的总面积较大,因此其污染物去除的总量也是相当可观的。本系统的平均水力负荷与其它人工塘-湿地系统相比偏小^[24-25],但较大的水力负荷可能使系统对单位水体中污染物的去除率下降,因此选择适当的水力负荷,在单位水体污染物的去除率与总污染物的削减量之间作出平衡,也是在设计此类系统时需要考虑的问题。

相对于潜流湿地、垂直流湿地,表面流人工湿地处理效率较低、占地面积大,但却因其运行成本低、人工投入少等特点,在农业面源污染治理方面具有明显优势^[24-25]。对于TN、TP、COD浓度较高的污水,以人工塘渠系统作为面源污染治理的第一道关,可以大大减少水中氮磷的总量;但当进水水质中氮磷浓度急剧下降后,人工塘渠系统中沉淀、吸附的氮磷会释放一部分到水中,造成出水氮磷浓度的小幅波动。在塘渠系统的下游构建湿地系统,可以对污染物作进一步的净化,同时加大对人工塘渠-湿地复合系统的维护,达到面源污染综合治理的效果。

目前研究认为,湿地中基质与植物对污染物去除起主要作用^[12,16,26],本文也支持这个观点,但具体的去除机理如基质与微生物的相互作用以及不同植物对水中营养素的选择性吸收等机理有待进一步研究。但田间试验不同于模拟可控实验,系统的运行稳定、维护方便、低成本成为首要考虑的因素。因此,塘渠-湿地复合系统在我国农业面源污染的治理方面提供了有意义的探索,也期待今后对系统作进一步的完善。

8月19日由于受到强降雨的影响,下游湿地系统已被水全部淹没,但洪水退去后绝大部分树种没有受到影响,生长良好。因此,在人工湿地系统中引入耐水湿的树种可对污染物的净化及湿地系统的稳定起到重要的作用。在湿地上补植的经济植物如白茶、美国山核桃等不仅能起到绿化美化环境、保护水源地的作用,而且能产出较高的经济效益。

参考文献:

- [1] LI Gu, WU Zhen-bin, CHENG Shui-ping, *et al.* Application of constructed wetlands on wastewater treatment for aquaculture ponds[J]. 武汉大学学报:自然科学英文版, 2007, 12(6): 1131-1135
- [2] ZHANG Xiao-bin, LIU Peng, YANG Yue-suo, *et al.* Phytoremediation of urban wastewater by model wetlands with ornamental hydrophytes[J]. 环境科学学报:英文版, 2007, 19(8): 902-909
- [3] HE Lian-sheng, LIU Hong-liang, XI Bei-dou, *et al.* Enhancing treatment efficiency of swine wastewater by effluent recirculation in vertical-flow constructed wetland[J]. 环境科学学报:英文版, 2006, 18(2): 221-226
- [4] PENG Jian-feng, WANG Bao-zhen, WANG Lin. Multi-stage ponds-wetlands ecosystem for effective wastewater treatment[J]. 浙江大学学报:B卷英文版, 2005, 6(5): 346-352
- [5] ZHOU Qi-xing, Bell R W, *et al.* An integrated planning for reuse and wetland strategy of waste water from rural enterprises: A case study[J]. 土壤圈:英文版, 1995, 5(3): 237-243
- [6] 蒋跃平, 葛 滢, 岳春雷, 等. 人工湿地植物对观赏水中氮磷去除的贡献[J]. 生态学报, 2004, 24(8): 1718-1723
- [7] 黄淦泉, 杨昌凤. 人工湿地处理重金属 Pb, Cd 污水的机理探讨[J]. 应用生态学报, 1993, 4(4): 456-459
- [8] 毛战坡, 彭文启, 尹澄清, 等. 非点源污染物在多水塘系统中的流失特征研究[J]. 农业环境科学学报, 2004, 23(3): 530-535
- [9] 籍国东. 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
- [10] 崔丽华, 楼 倩, 周显宏, 等. 两种复合人工湿地系统对东莞运河污水的净化效果[J]. 生态环境学报, 2009, 18(5): 1688-1692
- [11] 田 葳, 秦翠翠. 应用人工湿地技术处理城镇生活污水工艺设计研究[J]. 安徽农业科学, 2009, 37(33): 16500-16501

- [12] 陈永华,吴晓芙,何 钢,等.人工湿地污水处理系统中的植物效应与基质酶活性[J].生态学报,2009,29(11):6051-6058
- [13] 何 强,万 杰,翟 俊,等.复合型人工湿地及其在小城镇污水处理中的应用[J].土木建筑与环境工程,2009,31(5):122-126
- [14] 张超兰,陈秀娟,韦必帽,等.改进型和传统型复合垂直流人工湿地的净化效果研究[J].农业环境科学学报,2009,28(10):2161-2166
- [15] 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
- [16] 魏 成,刘 平,秦 晶.不同基质和不同植物对人工湿地净化效率的影响[J].生态学报,2008,28(8):3691-3697
- [17] 卢少勇,张彭义,余 刚,等.人工湿地处理农业径流的研究进展[J].生态学报,2007,27(6):2627-2635
- [18] 胡绵好,奥岩松,杨肖娥,等.不同N水平的富营养化水体中经济植物净化能力比较研究[J].水土保持学报,2007,21(2):147-150,169
- [19] 卢少勇,金相灿,余 刚.人工湿地的氮去除机理[J].生态学报,2006,26(8):2670-2677
- [20] 李晓东,孙铁珩,李海波,等.人工湿地除磷研究进展[J].生态学报,2007,27(3):1226-1232
- [21] 张 媛,张 驰,郭 旋,等.复合生态床的植物配置与净化效能研究[J].中国给水排水,2010(5):96-99,103
- [22] 梅 瑜,孔旭晖.利用水生植物进行污水净化的研究进展[J].广东农业科学,2010(2):155-157
- [23] 赵玉华,邢国印,赵 杰,等.人工湿地填料处理含氮磷污水实验[J].沈阳建筑大学学报:自然科学版,2010(1):145-149
- [24] 李跃勋,徐晓梅,洪昌海,等.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[J].农业环境科学学报,2009,28(10):2155-2160
- [25] 和丽萍,宁 平,陈 静,等.抚仙湖马料河人工湿地水质净化效果评估研究[J].环境科学导刊,2007,26(1):58-61
- [26] 牛晓音,樊梅英,常 杰,等.人工湿地运行过程中有机物质的积累[J].生态学报,2002,22(8):1240-1246