朱金格, 张晓姣, 刘　鑫, 等. 生态沟-湿地系统对农田排水氮磷的去除效应[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(2): 405-411.
ZHU Jin-ge, ZHANG Xiao-jiao, LIU Xin, et al. Removal of nitrogen and phosphorus from farmland drainage by ecological ditch-wetland system[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(2): 405-411.

生态沟-湿地系统对农田排水氮磷的去除效应

朱金格[1], 张晓姣[2], 刘　鑫[3], 郭西亚[3]

(1.中国科学院南京地理与湖泊研究所湖泊与环境国家重点实验室, 南京 210008; 2.南京中科水治理股份有限公司, 南京 210016; 3.中国科学院大学, 北京 100049)

摘　要: 为探讨生态拦截系统对农田尾水氮、磷的去除效应及其应用前景,在太湖水源地陆域保护区原位构建生态沟-湿地系统对涵盖施肥期的农田尾水进行了拦截净化。结果表明,生态沟-湿地系统可对TN、NH_4^+-N、TP平均浓度分别为23.45、19.87 mg·L^{-1}和0.341 mg·L^{-1}的高浓度农田尾水有效净化,出流最低TN、NH_4^+-N分别可达地表Ⅴ类水和Ⅳ类水标准,出流TP稳定达到地表Ⅲ类水标准。生态沟对农田排水TN、NH_4^+-N、TP平均去除率分别为49.95%、48.55%和53.22%,尾水进入人工湿地后得到再次净化,去除率分别为18.4%、9.43%和23.35%,系统总体去除率分别为59.6%、51.69%和60.92%。研究表明,生态沟末端配置人工湿地能有效提高氮、磷去除效率,系统具有一定的环境经济效益和可移植性,为太湖东部同类型农田排水的生态拦截提供案例参考。

关键词: 生态沟;湿地;氮;磷;农田尾水;面源污染
中图分类号: X52　　**文献标志码:** A　　**文章编号:** 1672-2043(2019)02-0405-07　　doi:10.11654/jaes.2018-0511

Removal of nitrogen and phosphorus from farmland drainage by ecological ditch-wetland system

ZHU Jin-ge[1], ZHANG Xiao-jiao[2], LIU Xin[3], GUO Xi-ya[3]

(1.State Key Laboratory of Lake Science and Environment, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 2.Nanjing Zhongke Water Environment Engineering Co.,Ltd, Nanjing 210016,China; 3.University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: In order to better understand the effect of ecological interception systems on removal of nitrogen and phosphorus from farmland drainage, an ecological ditch-wetland system was constructed to treat the farmland drainage during the fertilization period. The results showed that the ditch-wetland system effectively purified drainage water with an average TN, NH_4^+-N, and TP concentration of 23.45 mg·L^{-1}, 19.87 mg·L^{-1}, and 0.341 mg·L^{-1}, respectively. The lowest concentration in the outflow met the class Ⅴ requirement for TN and the class Ⅳ requirement for NH_4^+-N defined in the surface water environmental quality standards(SWQS). The average concentration of TP in the outflow met the class Ⅲ requirement. The removal rates of TN, NH_4^+-N, and TP were 49.95%, 48.55%, and 53.22% respectively with the ecological ditch, and 18.4%, 9.43%, and 23.35% respectively with the constructed wetland, resulting in total removal rates of 59.6%, 51.69%, and 60.92% respectively. Our results indicated that constructing the wetland at the end of ecological ditch effectively increased the removal efficiency of nitrogen and phosphorus. The system is simple to use and presents environmental and economic benefits. Thus, the results of this case study can be applied to the ecological interception of similar type of farmland drainage generated east of Taihu Lake.

Keywords: ecological ditch; wetland; nitrogen; phosphorus; farmland drainage; non-point source pollution

收稿日期: 2018-04-17　　**录用日期:** 2018-07-09

作者简介: 朱金格(1983—),男,河南灵宝人,博士,助理研究员,从事湖泊生态系统动力学研究。E-mail:jgzhu@niglas.ac.cn

基金项目: 国家自然科学基金项目(51609235);江苏省自然科学基金项目(BK20151063);国家水体污染治理重大专项(2017ZX07603-004-03, 2017ZX07205002)

Project supported: The National Natural Science Foundation of China(51609235); Natural Science Foundation of Jiangsu Province(BK20151063); Major Science and Technology Program for Water Pollution Control and Treatment(2017ZX07603-004-03, 2017ZX07205002)

农业面源污染已成为水环境污染的重要来源[1]。氮、磷作为植物生长的必需养分,在农业生产中被广泛应用,未被植物吸收的氮、磷随降雨和灌溉渗入地表水和地下水,造成水体污染和富营养化[2-4]。研究发现农业面源对中国东部湖泊氮、磷负荷的贡献率超过60%[5],近50%的地下水被农业氮、磷污染[6]。农业面源污染的源头控制、过程阻断、养分再利用和生态修复技术成为当前地表水环境治理研究的热点之一[7]。

利用生态拦截沟对农田流失的氮磷进行截留和去除,是削减农田污染的重要途径。生态沟遵循生态学原理,在保证水土、气土交换和生态结构不破坏前提下,通过工程措施进行地形改造,构建稳定生态系统进而实现净化水质和拦截污染物的功能。生态拦截沟渠技术不需要额外占用土地、投资少,已在全国范围内广泛应用,在农田面源污染控制中发挥重要作用[8]。当前研究成果从物理、化学、生物等方面较为清晰地揭示了生态拦截沟的作用机制及污染物去除效率,为生态沟的地形重塑、物种配置和维护管理提供了科学指导[9-10]。与生态拦截沟相比,人工湿地蓄水量和水体滞留时间相对较长,可以充分发挥植物对污染物的吸收作用[11-12],在处理低浓度的氮、磷污染水体时具有较好的效果[13]。生态拦截沟末端配置人工湿地可以更为高效地处理农村复合污水,对TN、TP去除率达到88%和83%[14]。大量研究结果表明,现有的各种生态沟和人工湿地等拦截技术均能有效拦截面源污染的输移,对氮、磷的去除率可达48%~68%和41%~70%[15-17]。

农田排水生态拦截措施的全面推广,除了需要技术手段做支撑,更依赖于系统操作的便利性、经济效益和农民易接受程度等非技术因素,尤其是太湖流域等人多地少的经济发达地区。因此,在因地制宜并且兼顾环境效益和土地经济成本的基础上,推广应用生态拦截设施具有重要现实意义。太湖流域农田、河道、沟塘纵横交错,农田尾水污染物很容易进入河网区,最终增加入湖污染负荷。本研究针对太湖金墅湾水源地陆域保护区普遍存在的农田面源污染问题,利用现有生态拦截技术对农田周边已有沟塘进行改造,构建生态沟-湿地系统对高氮、磷浓度的农田排水进行拦截净化,评估其环境经济效益,以期为太湖地区利用已有沟塘进行农田尾水氮、磷的原位拦截提供借鉴及关键参数。

1 材料与方法

1.1 实验系统

生态沟-湿地系统位于太湖贡湖湾东部,处于水源地二级保护区陆域范围以内,试验区所在农田面积121 480 m²(图1)。对农田排水沟渠进行基底和边坡

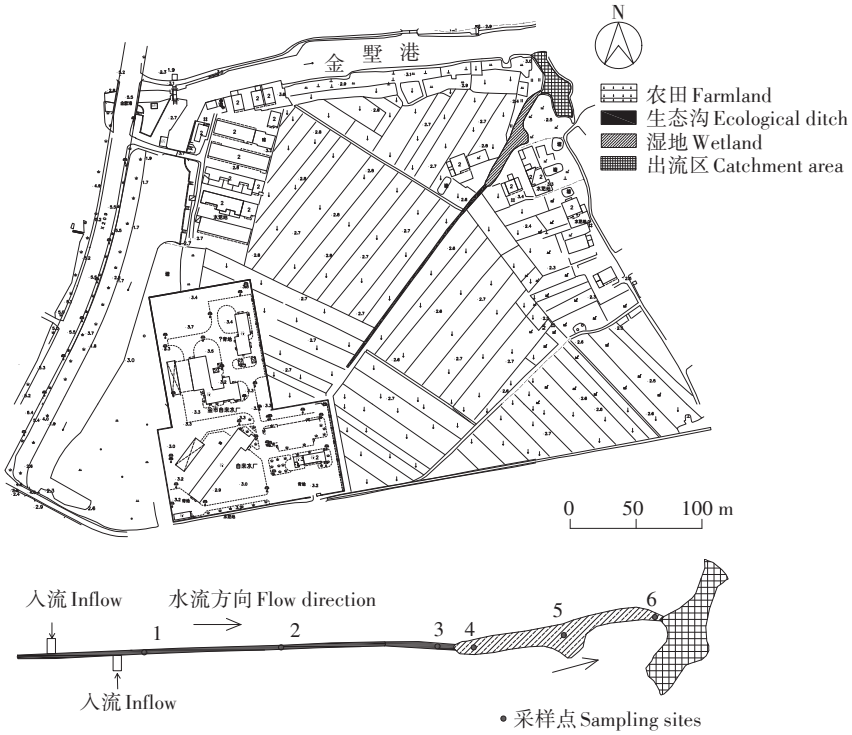


图1 生态沟-湿地实验系统结构及采样点分布

Figure 1 Ecological ditch – wetland system and sampling sites

平整改造,营造适宜的生境条件进行湿生植物引种,构建生态沟。建成的生态沟贯穿于水稻种植区,长100 m,横断面为倒梯形,上、下口宽分别为1.4 m和0.8 m,垂向深度1 m。引种的水生植物为当地土著植物茭草,种植密度50株·m^{-2}。对生态沟下游基底裸露的集水域进行生境改造,构建人工湿地对生态沟尾水进一步净化,最终汇入与金墅港连接的出水区。建成的人工湿地为细长的不规则形状,长度71 m,最大宽度14.3 m,平均宽度6.8 m,面积485 m^2。试验期间生态沟最大水深0.32 m,蓄水量30.1 m^3,此时生态沟蓄水量155.2 m^3,湿地水力停留时间约为生态沟的5.16倍。湿地外围浅水区引种芦苇和茭草形成挺水植物群落,中央集水域引种粉绿狐尾藻。其中,茭草种植面积110 m^2,种植密度50株·m^{-2},芦苇种植面积135 m^2,种植密度16株·m^{-2},粉绿狐尾藻种植面积240 m^2,生长盛期生物量26 kg·m^{-2}。

1.2 样品采集与分析

2014年3月至7月,在生态沟的农田排水口(1号点)、生态沟中段(2号点)和末端(3号点),以及人工湿地进水口(4号点)、人工湿地中间(5号点)和人工湿地末端(6号点)分别布点进行了水样采集。在每个采样点取样时,每次抽取水面下方5 cm处水样50 mL,连续抽取3次共150 mL装入塑料瓶。上述水样当日带回至太湖湖泊生态系统研究站,参照《湖泊富营养化调查规范》中的方法进行总氮(TN)、氨氮(NH_4^+-N)、总磷(TP)水化指标的分析。其中,TN、TP的分析方法为碱性过硫酸钾紫外分光光度法,NH_4^+-N的分析方法为纳氏试剂分光光度法。

1.3 统计分析

利用SPSS 13软件进行Pearson相关性分析,统计各指标去除率与初始深度的相关性,以及TN和NH_4^+-N浓度相关性。在上述统计中,$P<0.05$代表具有显著性。

为了探讨实验系统对氮、磷的去除效果,采用公式(1)分别计算总去除率(R_t)、生态沟去除率(R_d)和湿地去除率(R_w)。

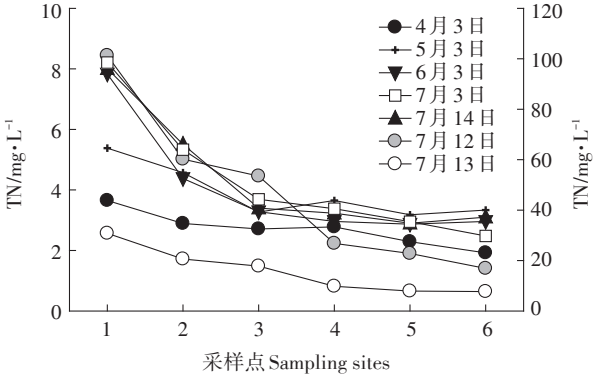
$$R_t=(c_1-c_6)/c_1\times100\%,\ R_d=(c_1-c_4)/c_1\times100\%,\ R_w=(c_4-c_6)/c_6\times100\%, \quad (1)$$

式中:c_1、c_4、c_6分别为1、4号点和6号点TN、NH_4^+-N和TP浓度。

2 结果与分析

2.1 实验系统中氮的变化特征

实验期内,农田排水最大、最小和平均TN浓度分别为101.30、2.65 mg·L^{-1}和23.45 mg·L^{-1},远超地表Ⅴ类水标准(GB 3838—2002)(图2)。7月8—11日农田进行了集中施肥,7月12日是施肥后的第一次灌溉,因此1号点TN浓度高达101.30 mg·L^{-1},7月13日下降至30.8 mg·L^{-1},7月14日TN浓度接近施肥前的正常水平。农田尾水经过生态沟的物理拦截和生物吸收,排出生态沟的最大、最小和平均TN浓度分别为26.8、2.58 mg·L^{-1}和7.51 mg·L^{-1},较入流相比氮的浓度显著降低。人工湿地进一步对尾水进行了吸收净化,最终出流的最大、最小和平均TN浓度分别为16.9、1.92 mg·L^{-1}和5.48 mg·L^{-1},最低浓度达到地表Ⅴ类水标准,生态沟-湿地系统对高TN浓度的农田尾水表现出了有效的净化作用。



7月12日、13日为右侧纵坐标
July 12 and 13 refer to the right Y-axis

图2 生态沟-湿地系统中水体TN浓度沿程变化

Figure 2 Variation of TN concentrations in ecological ditch-wetland system

在本研究中,氮的形态以NH_4^+-N为主,其在TN中的平均比例为67.5%,因此NH_4^+-N浓度的时空变化趋势与TN高度相似(r=0.999,P<0.01)。实验期间农田排水最大浓度为94.0 mg·L^{-1}(7月12日),最小浓度为1.39 mg·L^{-1},平均浓度为19.87 mg·L^{-1}(图3)。排出生态沟的最大、最小和平均NH_4^+-N浓度分别为23.6、1.25 mg·L^{-1}和5.84 mg·L^{-1},平均浓度较入流降低70.6%。经过人工湿地的净化后,最终出流的最大、最小和平均NH_4^+-N浓度分别为16.4、1.30 mg·L^{-1}和4.54 mg·L^{-1},最低浓度可达地表Ⅳ类水标准。

2.2 实验系统中磷的变化特征

农田施肥以氮素为主,因此对水体磷的含量影响较小。实验期间,农田排水最大TP浓度为0.506 mg·L^{-1}(7月12日),最小浓度为0.232 mg·L^{-1},平均浓度为0.341 mg·L^{-1},达到地表Ⅴ类水标准(GB 3838—2002)

(图4)。经过生态沟的净化作用,水体TP浓度最大、最小和平均值分别为0.237、0.114 mg·L^{-1}和0.154 mg·L^{-1},平均浓度较入流降低54.8%,达到地表Ⅲ类水标准。人工湿地进一步对水体中的TP进行了拦截吸收,最终排出系统的最大、最小和平均TP浓度分别为0.187、0.104 mg·L^{-1}和0.128 mg·L^{-1},稳定达到地表Ⅲ类水标准。

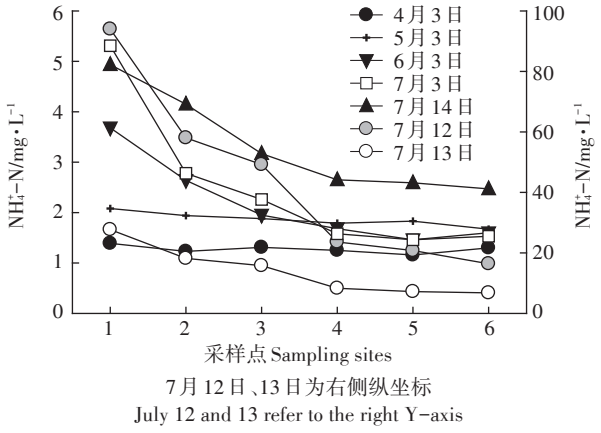
3 讨论

3.1 生态沟-湿地系统对氮的去除作用

生态沟和湿地系统对氮素的去除主要通过物理拦截、植物吸收、微生物硝化和反硝化作用等过程实现[18-19]。在本实验系统中,农田尾水经过生态沟-湿地系统的净化作用后,TN和NH_4^+-N浓度较入流大幅降低。系统对TN的平均去除率59.6%,最大去除率可达83.3%(图5),发生在施肥后首次排水;其次是75.0%,发生在首次排水后的第2 d。两次高的去除率均发生在初始浓度较高的时期。统计结果显示TN去除率与TN初始浓度正相关,但并不具显著性(r=0.654,P=0.111)。

生态沟对TN的去除率变化范围为-4.91%~73.54%,平均去除率为49.95%。在初始浓度相对较低(2.65 mg·L^{-1})时,去除率为-4.91%,此时生态沟沿程3个观测点(1号、2号、3号)的TN浓度分别为2.89、2.71 mg·L^{-1}和2.78 mg·L^{-1},表明生态沟在净化初始浓度较低的水体时效果并不明显。人工湿地对TN去除率变化范围为0.34%~36.94%,平均去除率为18.4%,低于生态沟去除率,但湿地在净化TN初始浓度较低水体时具有更好的效果。

系统对NH_4^+-N的去除率介于6.48%~82.53%(图6),平均去除率51.69%,最大的去除率同样发生在施肥后的首次排水,为82.53%。NH_4^+-N的去除主要由



7月12日、13日为右侧纵坐标
July 12 and 13 refer to the right Y-axis

图3 生态沟-湿地系统中水体NH_4^+-N浓度沿程变化

Figure 3 Variation of NH_4^+-N concentrations in ecological ditch-wetland system

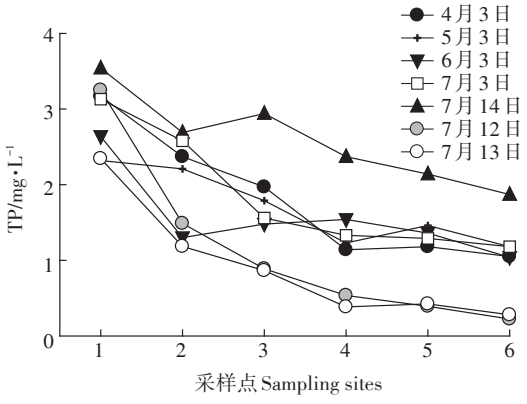


图4 生态沟-湿地系统中水体TP浓度沿程变化

Figure 4 Variation of TP concentrations in ecological ditch-wetland system

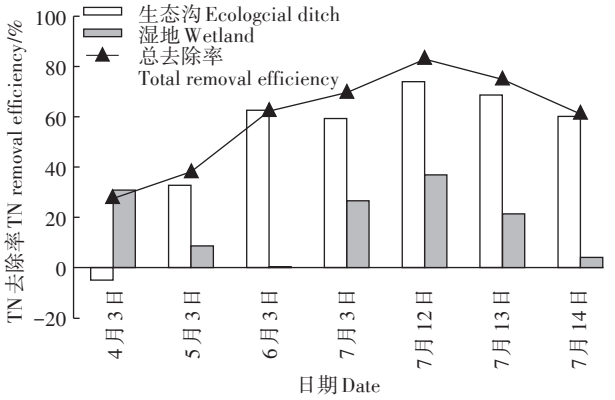


图5 生态沟-湿地系统对TN的去除率变化趋势

Figure 5 TN removal efficiency for ecological ditch - wetland system

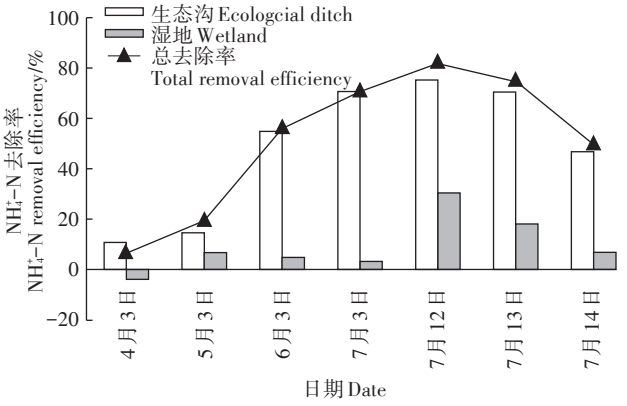


图6 生态沟-湿地系统对NH_4^+-N的去除率变化趋势

Figure 6 NH_4^+-N removal efficiency for ecological ditch-wetland system

硝化过程实现，与供氧环境密切相关，因此生态沟的NH_4^+-N的去除效率变化较大[17]。在本研究中，生态沟和湿地在削减优于Ⅳ类水的低浓度NH_4^+-N尾水时效率较低。当初始浓度为1.39 mg·L^{-1}时，沿程各点NH_4^+-N浓度在1.16~1.31 mg·L^{-1}，湿地最终出水浓度1.3 mg·L^{-1}。NH_4^+-N去除率同样会随初始浓度的升高而增大，但二者之间相关性并不显著（r=0.603，P=0.152）。

在本研究中，生态沟对NH_4^+-N的去除率变化范围为10.07%~74.89%，平均去除率为48.55%，而人工湿地对NH_4^+-N最大去除率为30.51%，平均去除率为9.43%。与生态沟相比，较长的水力滞留时间以及较大的水生植物现存量，使得湿地在夏季容易处于缺氧状态，不利于NH_4^+-N的吸收转化。此外，大量的湿地植物残体在高温下腐烂分解对水体造成二次污染，增加了湿地水体NH_4^+-N总量[13,19]。因此湿地在处理低NH_4^+-N浓度水体时，一般需要进行水力调控和水生植物的人工收割，以维持净化效率[20]。本研究中，在不考虑初始浓度较高（7月12和7月13）的情况下，湿地对NH_4^+-N的平均去除率仅为3.49%。湿地对NH_4^+-N的去除效率随初始浓度的升高而增大，二者显著正相关（r=0.934，P=0.002）。

3.2 生态沟-湿地系统对磷的去除作用

基质吸附和植物吸收是磷的迁移转化过程中最为重要的环节，适宜的基质条件和植物结构可以有效提升磷的去除效率。与氮素相比，生态沟和湿地对磷的去除效率更高，出流TP浓度可以达到地表Ⅰ类水或Ⅱ类水[16]。水生植物塘在生长盛期对TP的去除率甚至可以达到96%[21]。在本研究中，生态沟和湿地对TP的平均去除率分别为53.22%和23.35%（图7），系统对TP的总去除率介于47.18%~74.71%，平均去除率60.92%，有效降低了农田尾水中TP的含量。

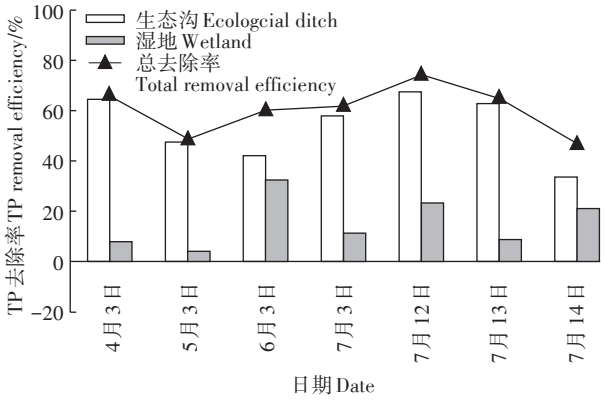


图7 生态沟-湿地系统对TP的去除率变化趋势

Figure 7 TP removal efficiency for ecological ditch-wetland system

实验系统所引种的3种植物对氮、磷的去除效率为粉绿狐尾藻 > 茭草 > 芦苇[16,22-24]，湿地植物总量和单位面积生物量均超过生态沟，但统计结果显示生态沟氮磷去除效率超过湿地，表明本实验系统中物理拦截和沉降在削减农田排水氮磷浓度方面起着重要作用。初始氮磷浓度较高的农田排水首先进入生态沟，因而具有相对较高的去除率。实际上，当初始浓度较低时，生态沟的去除效率明显下降，而湿地在净化较低初始浓度TN、TP水体时具有更好的效果。

3.3 系统环境经济效益及其应用前景

太湖东部湖区分布有集中式饮用水源地6个，设计取水能力达到226万m^3·d^{-1}，确保东部湖区水质稳定达标对于保障苏州和上海地区供水安全至关重要。目前太湖东部湖区面临富营养化威胁的超标指标为TN，其次是TP，因此控制外源氮、磷输入是首要任务。太湖东部苏州地区有32万hm^2农田，农作物类型主要为水稻、小麦和油菜，耕作制度为稻-麦、稻-油连作，在农作中普遍存在农户氮肥投入过量、分蘖期淹水时间过长的现象，导致灌溉和降雨期排水增多，氮素流失问题严重[25-26]。据估算，太湖地区稻麦轮作系统农田养分的排放净负荷：氮为34.1 kg·hm^{-2}，其中稻季19.4 kg·hm^{-2}、麦季14.7 kg·hm^{-2}；磷为1.75 kg·hm^{-2}，其中稻季1.16 kg·hm^{-2}、麦季0.59 kg·hm^{-2}[27]。苏州地区经济发达，土地利用类型多样，农田涉及到395个合作社、11万个农户[28]。虽然调整土地利用方式和提倡秸秆覆盖等保护性耕作习惯，可以降低氮、磷流失，但一定程度上会影响农民的切身利益，增加劳动付出，因此短期内普遍推广存在较大难度。

本研究以农村为用户单元改造已有沟塘建设生态拦截设施，建设成本由人工费和种苗费两部分组成。其中生态沟人工费和种苗费分别为0.5万元和0.65万元，湿地人工费和种苗费分别为0.9万元和1.85万元，生态沟-湿地系统成本共计3.9万元，平均每平方米农田处理成本0.32元。根据同为稻麦轮作系统农田氮、磷的排放净负荷[21]，估算本研究区农田氮、磷排放总量分别为414.2 kg和21.3 kg。按照系统对TN、TP平均去除率59.6%和60.92%计算，拦截吸收氮磷的综合成本约为150.3元·kg^{-1}。生态沟-湿地系统在有效降低农田排水氮、磷浓度的同时，建设成本又处于较低的水平，引种的水生植物芦苇、茭草为当地居民熟悉的太湖地区常见物种，因此系统具有一

定的可移植性，为太湖东部同类型农田排水的处理提供一种参考。

4 结论

对已有沟渠进行改造，构建生态沟-湿地系统可对TN、NH_4^+-N、TP平均浓度分别为23.45、19.87 mg·L^{-1}和0.341 mg·L^{-1}的高浓度农田尾水有效净化，出流最低TN、NH_4^+-N分别可达地表Ⅴ类水和Ⅳ类水标准，出流TP稳定达到地表Ⅲ类水标准。

生态沟对农田排水TN、NH_4^+-N、TP平均去除率分别为49.95%、48.55%和53.22%，尾水进入人工湿地得到再次净化，去除率分别为18.4%、9.43%和23.35%，系统总体去除率分别为59.6%、51.69%和60.92%。

生态沟末端配置人工湿地能有效提高氮、磷去除效率，系统具有一定的环境经济效益和可移植性，为太湖东部同类型农田排水的生态拦截提供一种案例参考。

参考文献：

[1] Kaushal S S, Groffman P M, Band L E, et al. Tracking nonpoint source nitrogen pollution in human-impacted watersheds[J]. *Environmental Science & Technology*, 2011, 45(19): 8225-8232.

[2] 李强坤, 李怀恩, 胡亚伟, 等. 黄河干流潼关断面非点源污染负荷估算[J]. 水科学进展, 2008, 19(4): 460-466.
LI Qiang-kun, LI Huai-en, HU Ya-wei, et al. Estimation of non-point source pollution loading on Tongguan section of the Yellow River[J]. *Advances in Water Science*, 2008, 19(4): 460-466.

[3] 欧阳威, 蔡冠清, 黄浩波, 等. 小流域农业面源氮污染时空特征及与土壤呼吸硝化关系分析[J]. 环境科学, 2014, 35(6): 2411-2418.
OUYANG Wei, CAI Guan-qing, HUANG Hao-bo, et al. Temporal-spatial distribution of agricultural diffuse nitrogen pollution and relationship with soil[J]. *Environmental Science*, 2014, 35(6): 2411-2418.

[4] 宋立芳, 王 毅, 吴金水, 等. 水稻种植对中亚热带红壤丘陵区小流域氮磷养分输出的影响[J]. 环境科学, 2014, 35(1): 150-156.
SONG Li-fang, WANG Yi, WU Jin-shui, et al. Impact of rice agriculture on nitrogen and phosphorus exports in streams in hilly red soil earth region of central subtropics[J]. *Environmental Science*, 2014, 35(1): 150-156.

[5] 郭鸿鹏, 朱静雅, 杨印生. 农业非点源污染防治技术的研究现状及进展[J]. 农业工程学报, 2008, 24(4): 290-295.
GUO Hong-peng, ZHU Jing-ya, YANG Yin-sheng. Research status and development of technologies for controlling the agricultural non-point source pollution[J]. *Transactions of the CSAE*, 2008, 24(4): 290-295.

[6] 崔 键, 马友华, 赵艳萍, 等. 农业面源污染的特性及防治对策[J]. 中国农学通报, 2006, 22(1): 335-340.
CUI Jian, MA You-hua, ZHAO Yan-ping, et al. Characteristic and countermeasures for control and prevention of multiple area-pollution in agriculture[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2006, 22(1): 335-340.

[7] 杨林章, 施卫明, 薛利红, 等. 农村面源污染治理的"4R"理论与工程实践：总体思路与"4R"治理技术[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(1): 1-8.
YANG Lin-zhang, SHI Wei-ming, XUE Li-hong, et al. Reduce-Retain-Reuse-Restore technology for the controlling the agricultural non-point source pollution in countryside in China: General countermeasures and technologies[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(1): 1-8.

[8] 施卫明, 薛利红, 王建国, 等. 农村面源污染治理的"4R"理论与工程实践：生态拦截技术[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(9): 1697-1704.
SHI Wei-ming, XUE Li-hong, WANG Jian-guo, et al. A Reduce-Retain-Reuse-Restore technology for controlling rural non-point pollution in China: Eco-retain technology[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(9): 1697-1704.

[9] 王孜颜, 罗 梅, 陈国梁, 等. 长广溪清水廊道新型生态沟技术中试试验研究[J]. 环境科学与技术, 2017, 40(3): 91-95.
WANG Zi-yan, LUO Mei, CHEN Guo-liang, et al. Pilot experimental study of a novel ecological ditch technique for clear water gallery construction on Changguangxi River[J]. *Environmental Science & Technology*, 2017, 40(3): 91-95.

[10] Liu F, Xiao R L, Wang Y, et al. Effect of a novel constructed drainage ditch on the phosphorus sorption capacity of ditch soils in an agricultural headwater catchment in subtropical central China[J]. *Ecological Engineering*, 2013, 58: 69-76.

[11] Coban O, Kuschk P, Kappelmeyer U, et al. Nitrogen transforming community in a horizontal subsurface-flow constructed wetland[J]. *Water Research*, 2015, 7: 203-212.

[12] 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.
LU Shao-yong, JIN Xiang-can, YU Gang. Nitrogen removal mechanism of constructed wetland[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(8): 2670-2677.

[13] Zhu J G, Hu W P, Hu L M, et al. Variation in the efficiency of nutrient removal in a pilot-scale natural wetland[J]. *Wetlands*, 2012, 32: 311-319.

[14] Wu Y H, Kerr P G, Hu Z Y, et al. Eco-restoration: Simultaneous nutrient removal from soil and water in a complex residential-cropland area[J]. *Environmental Pollution*, 2010(158): 2472-2477.

[15] 余红兵, 肖润林, 杨知建, 等. 灌溉和降雨条件下生态沟渠氮、磷输出特征研究[J]. 长江流域资源与环境, 2014, 23(5): 686-692.
YU Hong-bing, XIAO Run-lin, YANG Zhi-jian, et al. Study on the characteristics of nitrogen and phosphorus transportation through ecological ditch during irrigation and rainfall[J]. *Resources and Environmental in the Yangtze Basin*, 2014, 23(5): 686-692.

[16] 张树楠, 肖润林, 刘 锋, 等. 生态沟渠对氮、磷污染物的拦截效应[J]. 环境科学, 2015, 36(12): 4516-4522.

ZHANG Shu-nan, XIAO Run-lin, LIU Feng, et al. Interception effect of vegetated drainage ditch on nitrogen and phosphorus from drainage ditches[J]. *Environmental Science*, 2015, 36(12):4516-4522

[17] 王 迪, 李红芳, 刘 锋, 等. 亚热带农区生态沟渠对农业径流中氮素迁移拦截效应研究[J]. 环境科学, 2016, 37(5):1717-1723.
WANG Di, LI Hong-fang, LIU Feng, et al. Interception effect of ecological ditch on nitrogen transport in agricultural runoff in subtropical China[J]. *Environmental Science*, 2016, 37(5):1717-1723.

[18] Stottmeister U, Wiener A, Kuschk P, et al. Effects of plants and microorganisms in constructed wetlands for wastewater treatment[J]. *Biotechnology Advances*, 2003, 22(1/2):93-117.

[19] Hu L M, Hu W P, Deng J C, et al. Nutrient removal in wetlands with different macrophyte structures in eastern Lake Taihu, China[J]. *Ecological Engineering*, 2010, 36:1725-1732.

[20] 余红兵, 杨知建, 肖润林, 等. 水生植物的氮磷吸收能力及收割管理研究[J]. 草业学报, 2013, 22(1):294-299.
YU Hong-bing, YANG Zhi-jian, XIAO Run-lin, et al. Absorption capacity of nitrogen and phosphorus of aquatic plants and harvest management research[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2013, 22(1):294-299.

[21] 熊 飞, 李文朝, 潘继征, 等. 人工湿地脱氮除磷的效果与机理研究进展[J]. 湿地科学, 2005, 3(3):228-234.
XIONG Fei, LI Wen-chao, PAN Ji-zheng, et al. Efficiency and functioning of nitrogen and phosphorus removal in constructed wetlands: A review[J]. *Wetland Science*, 2005, 3(3):228-234.

[22] 马永飞, 杨小珍, 赵小虎, 等. 污水氮浓度对粉绿狐尾藻去氮能力的影响[J]. 环境科学, 2017, 38(3):1093-1101.
MA Yong-fei, YANG Xiao-zhen, ZHAO Xiao-hu, et al. Effect of wastewater nitrogen concentrations on nitrogen removal ability of *Myriophyllum aquaticum*[J]. *Environmental Science*, 2017, 38(3):1093-1101.

[23] 谭 啸, 刘春学, 徐 杉, 等. 滇池湖滨湿地植物对环境影响及经济效益分析[J]. 安徽农业科学, 2015, 43(9):240-242, 273.
TAN Liang, LIU Chun-xue, XU Shan, et al. Influence analysis of the aquatic plant to the environment and economic benefit in Dianchi Lake wetland[J]. *Journal of Anhui Agri Sci*, 2015, 43(9):240-242, 273.

[24] 高 敏, 种法岭, 孔令苹, 等. 不同水生经济植物对南四湖富营养化水体的净化效果[J]. 农业工程, 2016, 6(4):33-40.
GAO Min, ZHONG Fa-ling, KONG Ling-ping, et al. Effects of different aquatic economic plants on water purification in Lake Nansi eutrophication[J]. *Agricultural Engineering*, 2016, 6(4):33-40.

[25] 马立珊, 汪祖强, 张水铭, 等. 苏南太湖水系农业面源污染及其控制对策研究[J]. 环境科学学报, 1997, 17(1):39-47.
MA Li-shan, WANG Zu-qiang, ZHANG Shui-ming, et al. Pollution from agricultural non-point sources and its control in river system of Taihu Lake, Jiangsu[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 1997, 17(1):39-47.

[26] 段 亮, 段增强, 常 江, 等. 地表管理与施肥方式对太湖流域旱地氮素流失的影响[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(3):813-818.
DUAN Liang, DUAN Zeng-qiang, CHANG Jiang, et al. Effect of surface management and fertilization mode on nitrogen runoff from upland in Taihu Lake region[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(3):813-818.

[27] 杨林章, 王德建, 夏立忠. 太湖地区农业面源污染特征及控制途径[J]. 中国水利, 2004, 20:29-31.
YANG Lin-zhang, WANG De-jian, XIA Li-zhong. Features and ways of control of non-point agricultural pollution in Taihu area[J]. *China Water Resources*, 2004, 20:29-31.

[28] 张 导, 张 琰, 宋学宏. 苏州市环太湖农业面源污染调查及控制对策[J]. 农业环境与发展, 2009, 6:71-75.
ZHANG Dao, ZHANG Yan, SONG Xue-hong. Investigation of agricultural non-point source pollution and its countermeasures in Taihu Lake, Suzhou City[J]. *Agro-Environment & Development*, 2009, 6:71-75.