

3 种湿地植物对农田沟渠水体氮、磷的消减作用

张震^{1,2}, 刘伸伸¹, 胡宏祥¹, 何金铃³, 马友华¹, 王一帆¹, 代宇雨¹, 徐微¹

(1. 安徽农业大学 资源与环境学院, 安徽 合肥 230036; 2. 安徽农业大学 农田生态保育与污染防控安徽省重点实验室, 安徽 合肥 230036; 3. 安徽农业大学 生命科学学院, 安徽 合肥 230036)

摘要: 由于农业生产过程中过量施放化肥, 农田氮、磷流失从而对周边水体产生一定的面源污染。为探讨水生植物种植对农田排水沟渠中流失氮、磷的吸附拦截效果, 在农田沟渠内种植水芹 *Oenanthe javanica*, 石菖蒲 *Acorus tatarinowii* 和刺苦草 *Vallisneria spirulosa*, 测定植物对农田沟渠内氮、磷营养物质的消减作用。结果表明: 通过种植植物, 沟渠内总氮去除率为 56.18%~74.58%, 铵态氮去除率为 36.23%~59.33%, 硝态氮去除率为 34.35%~66.88%, 总磷去除率为 44.38%~76.35%; 随水流路径的延长沟渠中氮、磷的质量浓度均呈递减趋势; 随时间增加, 沟渠内各采样点氮、磷质量浓度呈明显下降趋势。表明水芹、石菖蒲和刺苦草对农田沟渠中氮、磷具有较好的去除效果, 可应用于湖泊及其周边等污染水体的生态修复治理。图 6 表 1 参 32

关键词: 植物生态学; 湿地植物; 生态拦截; 农田沟渠; 氮; 磷; 去除率

中图分类号: Q948.1; S718.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-0756(2019)01-0088-08

Removal of nitrogen and phosphorus in farmland ditches using three aquatic plants

ZHANG Zhen^{1,2}, LIU Shenshen¹, HU Hongxiang¹, HE Jinling³, MA Youhua¹, WANG Yifan¹, DAI Yuyu¹, XU Wei¹

(1. School of Resources and Environment, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, Anhui, China; 2. Anhui Key Lab of Farmland Ecological Conservation and Pollution Prevention, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, Anhui, China; 3. School of Life Science, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, Anhui, China)

Abstract: Due to heavy fertilizer application and improper management in the process of agricultural production, large amounts of nitrogen (N) and phosphorus (P) in farmlands have been lost and have affected surrounding water bodies. To study the effect of aquatic plants on the absorption of N and P in farmland drainage ditches, *Oenanthe javanica*, *Acorus tatarinowii*, and *Vallisneria spirulosa* were planted in ecological ditches. In June 2015, the change of N and P content with the water flow in the ditch were estimated through field investigation and laboratory bioassay. Results showed that plants in ditches had a total nitrogen (TN) removal rate of 56.18%–74.58%, an ammonium (NH₄⁺) nitrogen removal rate of 36.23%–59.33%, a nitrate (NO₃⁻) nitrogen removal rate of 34.35%–66.88%, and a total phosphorus (TP) removal rate of 44.38%–76.35%. From the point of view of the monitoring sites, the concentration of N and P in ditches decreased overall with a prolonged water flow path. Also, with an increase in time, the concentration of N and P in different sampling sites showed a strong downward movement. Thus, this study could be a guide for ecological restoration projects in lakes or other water bodies with aquatic plants. [Ch, 6 fig. 1 tab. 32 ref.]

Key words: plant ecology; aquatic plant; ecological interception; farmland ditch; nitrogen; phosphorus; removal rate

收稿日期: 2018-01-12; 修回日期: 2018-04-04

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0200604; 2018YFD0800301-05); 国家自然科学基金资助项目(31772235, 31540051); 安徽省国土资源厅科技项目(2015-K-14); 安徽省自然科学基金资助项目(1508085ME91)

作者简介: 张震, 副教授, 博士, 从事植物生态学和生态恢复研究。E-mail: xjzhangzhen@163.com

农业面源污染是非点源污染的主要形式之一,常指在农业生产活动中产生的氮、磷等营养物质、农药以及其他有机物和污染物质通过地表径流和农田渗漏而形成的水环境污染^[1-3]。中国农业面源污染的迅速扩展主要与农业生产过程中化肥和农药等的过量使用、施肥方式的落后等有关^[4-5]。据统计,中国化肥年使用量达 4.12×10^7 t,施肥量高达 $400 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 以上;但农作物对氮肥利用率仅为30%~35%,磷肥为10%~25%,钾肥为35%~50%^[6]。而欧美国家为防止过量施肥对环境产生的污染,设置平均化肥使用量限值为 $225 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。农业面源污染不仅污染农田土壤,改变原有土壤的结构和特性,造成土壤板结、土壤质量下降;还通过农田径流引发对水体的有机污染,富营养化污染,甚至污染地下水和空气,直接损害人体健康^[7-8]。巢湖作为中国五大淡水湖之一,面临着较为严峻的面源污染问题^[9]。据统计,每年因水土流失而输入巢湖的总氮达945 t,总磷达567 t,有机质达 1.4×10^4 t;每年总计约有4 200 t农业化肥、100 t农药流入巢湖^[10]。巢湖流域作为安徽省重要的农业区,耕地面积约 $5.02 \times 10^5 \text{ hm}^2$ ^[9],由于复种指数高,作物种植面积大,对化肥的需求量较大,造成施肥结构极不合理,施用氮肥过量明显,而有机肥严重不足,造成大量的氮、磷源源不断流入巢湖,导致巢湖水体富营养化程度过高。目前,关于农业面源污染控制的技术有人工湿地技术、前置库技术、缓冲带和水陆交错带技术、水土保持技术、农业生态工程技术等^[11]。其中,人工湿地技术具有投资成本低、操作简单、处理效果好等特点,已较多地运用于生活污水和某些工农业废水、垃圾渗滤液等的净化^[12]。生态沟渠即采用人工湿地技术在农田沟渠内种植不同的植物,使沟渠内氮、磷等进入受纳水体前通过沟渠拦截、植物滞留而吸收,最终减少水体的污染负荷,实现生态拦截功能^[13]。钱银飞等^[14]研究了沟渠内水生植物香根草 *Vetiveria zizanioides*, 茭白 *Zizania latifolia* 和白莲 *Nelumbo nucifera* 对双季稻田施肥期间氮磷污染物的净化效果,发现处于生长旺盛期的水生植物对沟渠水体中氮、磷污染物的去除率最高。张树楠等^[15]通过将原农业排水沟渠改建成生态沟,以美人蕉 *Canna indica*, 黑三棱 *Sparganium stoloniferum*, 灯心草 *Juncus effusus*, 铜钱草 *Hydrocotyle vulgaris* 和绿狐尾藻 *Myriophyllum elatinoides* 等为试验植物,探讨了生态沟渠对农业面源污染的阻控效应,发现生态沟渠对氮、磷污染物有较好的拦截效应。本研究以石菖蒲 *Acorus tatarinowii*, 水芹 *Oenanthe javanica* 和刺苦草 *Vallisneria spirulosa* 等3种湿地植物作为沟渠拦截植物,分析沟渠内氮、磷质量浓度的拦截效果,以期为巢湖流域及其周边等污染水体的生态修复治理提供参考。

1 研究地区与方法

1.1 实验区概况

研究地点位于巢湖市下朱新村水稻田(31.63°N, 117.87°E),距巢湖入湖河流鸡裕河不足2 km。该区属北亚热带季风气候,雨量适中,光照充分,热量条件较好,无霜期长,常年平均气温为16.0℃。1月平均气温普遍在0℃以上,7月平均气温为25.0℃左右,冬夏风向有明显变化。年降水量一般在1 000 mm以上,主要集中在夏季5-8月,约占全年降水量的55%^[16]。

1.2 实验材料

所选用的石菖蒲、水芹和刺苦草等3种植物,可以药用或食用,具有较高经济价值,且为巢湖流域常见且易于获得的植物。其中石菖蒲,属天南星科 Araceae 菖蒲属 *Acorus* 禾草状多年生常绿草本植物,对湿润环境具有较强的适应性,根茎常作药用;水芹,属伞形科 Umbelliferae 水芹属 *Oenanthe* 多年水生宿根草本植物,耐低温,生活在河沟、水田旁,富含营养物质,药用价值较高;刺苦草,水鳖科 Hydrocharitaceae 苦草属 *Vallisneria* 沉水草草本植物,通常生长于2 m以内的水域,以根状茎越冬。实验所用苗株采购于安徽农业大学高新技术农业园区。

1.3 实验设计

本研究中沟渠总长300 m,形状为上宽下窄的倒梯形,上部宽度为1.2 m,底部宽度为0.6 m,沟渠一侧为水稻田,另一侧为道路(图1)。选取长势良好、株高相当的幼苗在沟渠中栽种(2015年3月20日),隔10 m依次栽植石菖蒲、水芹和刺苦草。3种植物的种植密度为 $36 \text{ 株} \cdot \text{m}^{-2}$,株间距为20 cm。同时,在生态沟两侧沟壁上栽植络石 *Trachelospermum jasminoides*, 黑麦草 *Lolium perenne* 和常春藤 *Hedera nepalensis*,以防止稻田水土流失。沟渠水流为循环式水体,从水泵站流出后经排灌沟回到泵站。由于实验区位于村落附近,水稻生长需定期进行灌溉,因而有部分农村生活用水经稻田流入沟渠。研究区于

2015年5月6日播种水稻,6月15日移栽,2015年9月28日收获。水稻的生育过程分为前、中、后3个时期,在水稻生长过程中共施肥4次,基肥、分蘖肥、穗肥和粒肥。研究区于5月30日在稻田施加基肥,6月15日移栽,7月15日追施分蘖肥,8月10日、9月5日分别施加穗肥和粒肥。

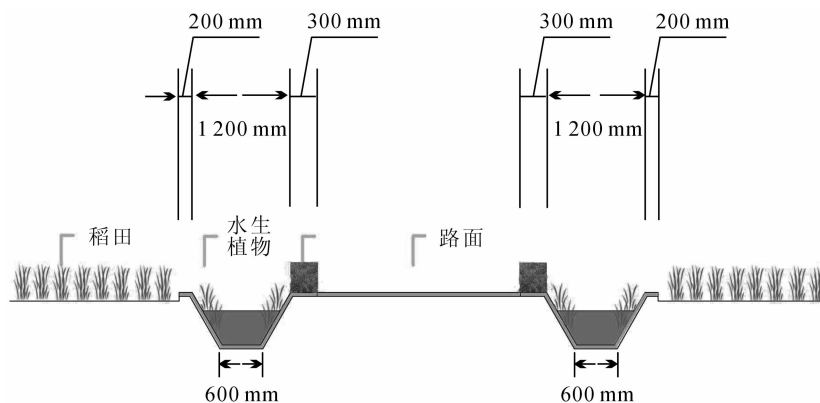


图1 下竹新村沟渠道路剖面图

Figure 1 Ditch road profile of Xiazhuxin Villiage

1.4 样品采集

选取巢湖市下朱新村的基本水稻田作为研究区,选择1条长为300 m的水田沟渠,沿着沟渠水流方向设立5个采样点,分别记为P1~P5(图2),P5位于泵站附近,各样点分别间隔55 m。2015年6月20日在沟渠中定期采集5个样点的径流水样,同一取样点同一时间取样3次,以后隔10 d取样1次。获取的水样经0.45 μm尼龙膜过滤后装入聚乙烯塑料瓶,放入4℃低温冰箱中保存,用于测定径流水样中不同形态氮、磷质量浓度,探讨生态拦截沟对农田径流中氮磷的去除效果。

1.5 分析方法

主要监测指标有总氮、铵态氮、硝态氮、总磷。总氮用过硫酸钾氧化-紫外分光光度法,铵态氮采用纳氏试剂比色法,硝态氮采用酚二磺酸比色法;总磷采用过硫酸钾氧化-钼锑抗比色法^[17]。水质情况判定依据表1进行^[18]。

去除率计算公式: $R = [(C_0 - C_1) / C_0] \times 100\%$ ^[19]。其中: R 为对应指标的去除率; C_0 为进水端污染物质量浓度; C_1 为出水端污染物质量浓度。

采用Origin 7.5及SPSS 13.0进行数据处理及统计分析。

2 结果与分析

2.1 生态沟渠中不同形态氮的变化

2.1.1 生态沟渠内总氮的变化 由图3可见:进水中总氮质量浓度为0.98~7.39 mg·L⁻¹,其最小值和最大值分别出现在9月8日和6月20日。9次采样中有6次进水未达到地表水V类标准(≤2.00 mg·L⁻¹),其中只有3次达到地表水IV类标准(≤1.50 mg·L⁻¹)。稻田来水经生态沟渠处理后,出水中总氮质量浓度有

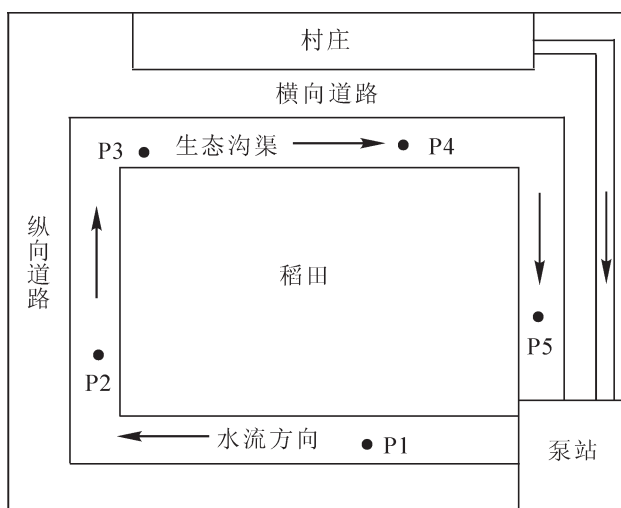


图2 下竹新村样地平面示意图

Figure 2 Schematic diagram of sample plot of Xiazhuxin Villiage

表1 水质分类等级

Table 1 Water quality evaluation			
分类	$\rho_{\text{铵态氮}} / (\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	$\rho_{\text{总磷}} / (\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	$\rho_{\text{总氮}} / (\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$
I	≤0.15	≤0.02	≤0.2
II	≤0.50	≤0.10	≤0.5
III	≤1.00	≤0.20	≤1.0
IV	≤1.50	≤0.30	≤1.5
V	≤2.00	≤0.40	≤2.0

显著降低($P<0.01$), 并和进水质量浓度有相同的变化趋势, 其中有2次达到地表水Ⅱ类标准, 5次达到Ⅲ类水标准, 1次为Ⅴ类水。分析表明: 生态沟渠对总氮的去除率受季节影响明显, 夏季去除率较高, 最大值为8月19日的74.58%, 最小值为7月10日的53.86%, 监测期间对总氮的平均去除率为65.11%。

2.1.2 生态沟渠内铵态氮的变化 如图4所示: 在6-9月, 生态沟渠进水中铵态氮质量浓度在0.18~1.48 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 6月和7月的质量浓度要高于8月和9月。田间排水经生态沟渠处理后, 出水中铵态氮质量浓度出现明显降低。其中, 9次采样中有1次出水水质达到地表水Ⅰ类水质标准($\leq 0.15 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$), 7次达Ⅱ类标准($\leq 0.50 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$), 1次达Ⅲ类标准($\leq 1.00 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)。在试验监测期间, 铵态氮的平均去除率达到48.71%, 最高值59.33%和最低值36.23%分别出现在9月8日和8月29日, 去除率随时间变化而波动。

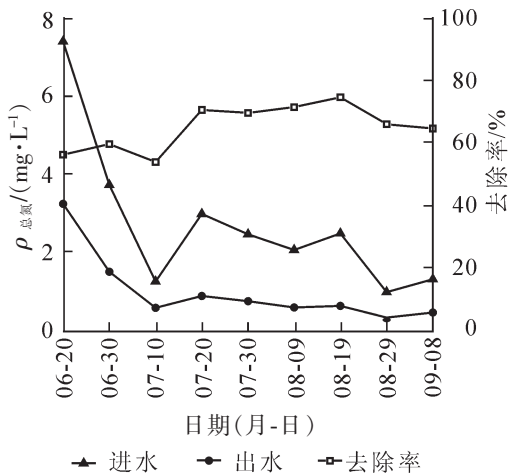


图3 进出水中总氮(TN)质量浓度及去除率变化

Figure 3 Variation of TN mass concentration and removal rate in water

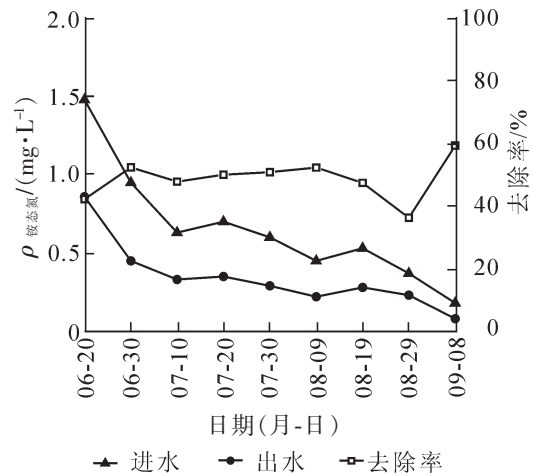


图4 进出水中铵态氮($\text{NH}_4^+\text{-N}$)质量浓度及去除率变化

Figure 4 Variation of $\text{NH}_4^+\text{-N}$ mass concentration and removal rate in water

2.1.3 生态沟渠内硝态氮的变化 图5表明: 7和8月沟渠进水中硝态氮质量浓度较高, 6和9月则相对较低, 6月20日质量浓度最高, 为3.72 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 最低值0.57 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 出现在7月10日。来水经沟渠中植物吸收净化后, 出水中硝态氮质量浓度明显低于进水中的质量浓度($P<0.01$), 且出水质量浓度受进水质量浓度影响, 存在显著正相关关系($P<0.01$)。在监测期间, 生态沟渠对硝态氮的去除率在7月和8月较高。其中, 去除率最低为7月10日的34.35%, 6月20日出现去除率最高值(66.88%), 生态沟渠对硝态氮平均去除率为51.58%。

2.2 生态沟渠中总磷的变化

生态沟渠进出水中总磷质量浓度为0.119~0.484 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 最小值和最大值分别出现在7月1日和6月20日(图6)。稻田来水经生态沟渠处理后, 出水中总磷质量浓度有显著降低($P<0.01$), 并和进水质量浓度有相同的变化趋势, 其中有8次达到地表水Ⅲ类标准($\leq 0.20 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$), 1次达到Ⅳ类水标准。生态沟渠对总磷的去除率受季节影响明显, 夏秋季去除率较高, 最大值为8月19日的74.58%, 监测期间对总磷的平均去除率58.92%。

3 讨论与结论

湿地植物是水生生态系统的重要组成部分, 既可以直接吸收氮、磷等营养成分, 也可以在根区促进氮物质的氧化分解^[20]。水生植物可通过体内发达的通气系统使氧从茎叶向根处转移, 在根区附近形成有氧环境; 其根系可作为微生物附着的良好界面, 并分泌一些有机物促进微生物的代谢, 为好氧微生物群落提供了一个适宜的生长环境; 而根区以外则适于厌氧微生物群落的生存, 进行反硝化和有机物的厌氧降解^[21]。当总氮进入水体后, 先经过微生物的氨化作用转化为铵态氮, 然后挥发或直接被植物吸收; 铵态氮则通过硝化作用氧化成硝态氮成为植物吸收利用的另一种形式^[22]; 有机氮在矿化作用下转化为铵态

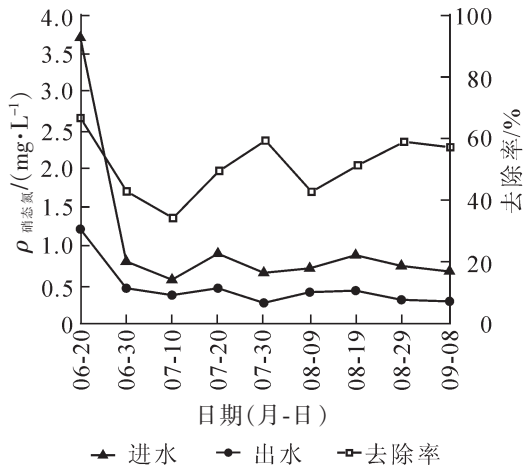


图5 进出水中硝态氮($\text{NO}_3\text{-N}$)质量浓度及去除率变化

Figure 5 Variation of $\text{NO}_3\text{-N}$ mass concentration and removal rate in water

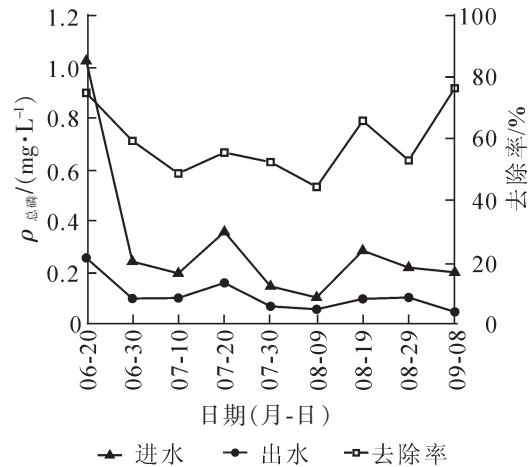


图6 进出水中总磷(TP)质量浓度及去除率变化

Figure 6 Variation of TP mass concentration and removal rate in water

氮, 通过硝化细菌作用进一步转化为硝态氮, 最后在厌氧条件下发生反硝化作用形成氮气(N_2)和氧化亚氮(N_2O), 挥发进入大气^[23]。当农田排水进入沟渠后, 水体中的铵态氮和有机态氮会被底泥土壤中带负电荷胶体颗粒所吸附固定, 因而沟渠中铵态氮的去除率要高于硝态氮^[24]。在试验区, 水体含氮污染物在沟渠迁移过程中易发生氧化作用转换为硝态氮, 因而沟渠进水中硝态氮的含量要高于铵态氮。与氮相比, 底泥对磷的吸附能力和速度要更强大。无机磷是植物必需的营养元素, 水体中有机磷在微生物作用下分解氧化为无机磷, 然后在植物吸收及同化作用下转化成植物所需的 ATP, DNA, RNA 等有机成分, 最后通过植物的收割而移去^[25]。

由于野外实验受自然条件的影响较大, 不可控因素较多, 氮、磷的去除效果呈现一定的波动性。降雨和施肥是影响氮素、磷素径流输出的主要因子, 结合氮、磷元素输出负荷, 发现三者之间具有极显著的二元一次非线性相关关系^[26]。施肥过程中受不定期降雨和径流的影响, 各样点氮、磷质量浓度呈波动变化。7月15日, 实验区内人工对稻田追施分蘖肥。受7月18日降雨和径流的影响, 至7月20日各样点氮、磷均有所回升, 之后继续呈波动下降趋势, 这与于会彬等^[27]的研究相符。水稻 *Oryza sativa* 是喜水作物, 田面需要保持一定的水深以利于水稻生长。由于传统灌水方式蓄水较多且利用效率不高, 经常将肥料随水一齐排出, 导致排水径流中含有大量的氮素和磷素, 氮、磷淋失量较大。石丽红等^[28]通过单次径流事件中径流水的氮、磷研究发现, 氮、磷流失量与其施用量存在极显著线性正相关, 流失量随施肥量的增加而增大。8月10日追施惠肥后, 8月15日, 稻田进行蓄水, 一周后放水。随水流的不断向外渗透, 各样点氮、磷质量浓度在8月19日有所回升。

在沟渠中, 氮、磷等污染物的去除依赖于植物的吸收、底泥的吸附以及微生物的降解转化作用, 而季节和温度对这些作用的发挥影响较大。植物的生长受到温度的制约, 在适宜的生长温度范围内, 植物的光合作用随温度的升高而相应升高, 其对氮、磷的吸收作用也不断增强。KOVACIC 等^[29]研究发现: 在夏秋季节, 植物处于生长的适宜温度期, 其对氮、磷的吸收效果较为显著。本研究的采样集中于6-9月, 此时水生植物处于生长旺盛期, 对水体中氮、磷的去除效率逐渐升高。在此阶段植物光合作用较强, 随着光合作用的增大, 植物根际的生长以及微生物活性的提高, 更有利于植物对氮、磷的吸收。本研究表明: 通过在沟渠中种植水芹、石菖蒲和刺苦草, 沟渠内总氮去除率为 56.18%~74.58%, 铵态氮去除率为 36.23%~59.33%, 硝态氮去除率为 34.35%~66.88%, 总磷去除率为 44.38%~76.35%, 说明水芹、石菖蒲和刺苦草 3 种植物对富营养化水体具有良好的净化作用^[30-32]。

本研究选取的 3 种植物均具有一定的药用或食用价值, 在沟渠内栽植可以产生一定的经济效益。同时, 在农田生态沟渠中栽植此类水生植物可对农田径流中的氮、磷污染物起到较好的截留作用, 在农业面源污染防治中具有一定的应用价值, 有利于减轻巢湖的污染负荷。本研究仅从植物对水质的净化作用开展了相关研究, 今后可结合植物对氮、磷的吸收及沟渠底泥对氮、磷的吸附等方面进行综合研究。

4 参考文献

- [1] 余进祥, 刘娅菲. 农业面源污染理论研究及展望[J]. 江西农业学报, 2009, **21**(1): 137 - 142.
YU Jinxiang, LIU Yafei. Theoretic study and expectation on non-point source pollution from agriculture [J]. *Acta Agric Jiangxi*, 2009, **21**(1): 137 - 142.
- [2] 唐浩, 熊丽君, 黄沈发, 等. 农业面源污染防治研究现状与展望[J]. 环境科学与技术, 2011(增刊2): 107 - 112.
TANG Hao, XIONG Lijun, HUANG Shenfa, *et al.* Review on the characteristic and control measurements of agricultural non-point source pollution [J]. *Environ Sci Technol*, 2011(suppl 2): 107 - 112.
- [3] 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 Youhua, ZHAO Yanping, *et al.* Characteristic and countermeasures for control and prevention of multiple area-pollution in agriculture [J]. *Chin Agric Sci Bull*, 2006, **22**(1): 335 - 340.
- [4] 章明奎. 我国农业面源污染可持续防控对策与技术的探讨[J]. 浙江农业科学, 2015, **56**(1): 10 - 14.
ZHANG Mingkui. Research progress of the sustainable control and methods of non-point source pollution in China [J]. *J Zhejiang Agric Sci*, 2015, **56**(1): 10 - 14.
- [5] 张坤, 张海珍, 于文涛. 我国农业面源污染成因分析[J]. 现代农业科技, 2017(12): 191, 204.
ZHANG Kun, ZHANG Haizhen, YU Wentao. Formation mechanism of non-point source pollution in China [J]. *Modern Agric Sci Technol*, 2017(12): 191, 204.
- [6] 黄晶晶, 林超文, 陈一兵, 等. 中国农业面源污染的现状与对策[J]. 安徽农学通报, 2006, **12**(12): 47 - 48.
HUANG Jingjing, LIN Chaowen, CHEN Yibing, *et al.* Actualities and countermeasures of non-point pollution of agriculture in China [J]. *Anhui Agric Sci Bull*, 2006, **12**(12): 47 - 48.
- [7] 朱德龙, 杨春妍. 农村面源污染现状与防治[J]. 辽宁科技大学学报, 2010, **33**(4): 415 - 417.
ZHU Delong, YANG Chunyan. Current situation and countermeasures of rural non-point source pollution [J]. *J Univ Sci Technol Liaoning*, 2010, **33**(4): 415 - 417.
- [8] 宋家永, 李英涛, 宋宇, 等. 农业面源污染的研究进展[J]. 中国农学通报, 2010, **26**(11): 362 - 365.
SONG Jiayong, LI Yingtao, SONG Yu, *et al.* Research and prospect on non-point pollution from agriculture [J]. *Chin Agric Sci Bull*, 2010, **26**(11): 362 - 365.
- [9] 刘洁, 马友华, 石润圭, 等. 巢湖流域农业面源污染现状分析及防治对策思考[J]. 农业环境与发展, 2008(6): 13 - 16.
LIU Jie, MA Youhua, SHI Rungui, *et al.* Status analysis and measures taken for non-point source pollution in Chao Lake Basin [J]. *Agro-Environ Dev*, 2008(6): 13-16.
- [10] 王桂苓, 马友华, 石润圭, 等. 巢湖流域种植业面源污染现状与防治对策[J]. 中国农学通报, 2008, **24**(11): 242 - 245.
WANG Guiling, MA Youhua, SHI Rungui, *et al.* Current situation and control measures of non-point source pollution in Chaohu River Basin [J]. *Chin Agric Sci Bull*, 2008, **24**(11): 242 - 245.
- [11] 柴世伟, 裴晓梅, 张亚雷, 等. 农业面源污染及其控制技术研究[J]. 水土保持学报, 2007, **20**(6): 192 - 195.
CHAI Shiwei, PEI Xiaomei, ZHANG Yalei, *et al.* Research on agricultural diffuse pollution and controlling technology [J]. *J Soil Water Conserv*, 2007, **20**(6): 192 - 195.
- [12] COLEMAN J, HENCH K, GARBUTT K, *et al.* Treatment of domestic wastewater by three plant species in constructed wetlands [J]. *Water Air Soil Pollut*, 2001, **128**(3/4): 283 - 295.
- [13] 徐红灯, 席北斗, 王京刚, 等. 水生植物对农田排水沟渠中氮、磷的截留效应[J]. 环境科学研究, 2007, **20**(2): 84 - 88.
XU Hongdeng, XI Beidou, WANG Jinggang, *et al.* Study on the interception of nitrogen and phosphorus by macrophyte in agriculture drainage ditch [J]. *Res Environ Sci*, 2007, **20**(2): 84 - 88.
- [14] 钱银飞, 邓国强, 陈先茂, 等. 沟渠不同水生植物对双季稻田氮磷污染物净化效果的研究[J]. 江西农业学报, 2015, **27**(12): 103 - 106.
QIAN Yinfei, DENG Guoqiang, CHEN Xianmao, *et al.* Purifying effects of different aquatic macrophytes in ditch on nitrogen and phosphorus pollutants from paddy field of double-cropping rice [J]. *Acta Agric Jiangxi*, 2015, **27**(12):

103 – 106.

- [15] 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 Shunan, XIAO Runlin, LIU Feng, *et al.* Interception effects of vegetated drainage ditch on nitrogen and phosphorus from drainage ditches [J]. *Environ Sci*, 2015, **36**(12): 4516 – 4522.
- [16] 江波, 杨书运, 马友华, 等. 耕作方式对圩区冬小麦温室气体排放通量的影响[J]. 安徽农业大学学报, 2014, **41**(2): 241 – 247.
JIANG Bo, YANG Shuyun, MA Youhua, *et al.* Effects on emission of greenhouse gas by different tillage treatments to winter wheat in polder areas [J]. *J Anhui Agric Univ*, 2014, **41**(2): 241 – 247.
- [17] 国家环境保护局《水和废水监测分析方法》编委会. 水和废水检测分析方法[M]. 4版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [18] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB 3838-2002 中华人民共和国地表水环境质量标准[S]. 北京: 中国标准出版社, 2002.
- [19] 李家科, 高志新, 汪琴琴, 等. 不同水深下多级串联人工湿地对城市地面径流的净化效果[J]. 水土保持学报, 2014, **28**(3): 125 – 133.
LI Jiake, GAO Zhixin, WANG Qinqin, *et al.* Purification effects of multi-level series constructed wetlands on urban surface runoff under differ water depths [J]. *J Soil Water Conserv*, 2014, **28**(3): 125 – 133.
- [20] 姜翠玲, 范晓秋, 章亦兵. 农田沟渠挺水植物对 N, P 的吸收及二次污染防治[J]. 中国环境科学, 2004, **24**(6): 702 – 706.
JIANG Cuiling, FAN Xiaoqiu, ZHANG Yibing. Absorption and prevention of secondary pollution of N and P by emergent plants in farmland ditch [J]. *China Environ Sci*, 2004, **24**(6): 702 – 706.
- [21] 种云霄, 胡洪营, 钱易. 大型水生植物在水污染治理中的应用研究进展[J]. 环境污染治理技术与设备, 2003, **4**(2): 36 – 40.
ZHONG Yunxiao, HU Hongying, QIAN Yi. Advances in utilization of macrophytes in water pollution control [J]. *Tech Equip Environ Pollut Control*, 2003, **4**(2): 36 – 40.
- [22] 陈海生, 王光华, 宋仿跟, 等. 生态沟渠对农业面源污染物的截留效应研究[J]. 江西农业学报, 2010, **22**(7): 121 – 124.
CHEN Haisheng, WANG Guanghua, SONG Fanggen, *et al.* Retention and removal effects of ecological ditch on agricultural non-point source pollutants [J]. *Acta Agric Jiangxi*, 2010, **22**(7): 121 – 124.
- [23] 翟丽华, 刘鸿亮, 席北斗, 等. 农业源头沟渠沉积物氮磷吸附特性研究[J]. 农业环境科学学报, 2008, **27**(4): 1359 – 1363.
ZHAI Lihua, LIU Hongliang, XI Beidou, *et al.* Property of nitrogen and phosphate adsorption on sediments in head-water ditches [J]. *J Agro-Environ Sci*, 2008, **27**(4): 1359 – 1363.
- [24] 徐红灯, 席北斗, 翟丽华. 沟渠沉积物对农田排水中氨氮的截留效应研究[J]. 农业环境科学学报, 2007, **26**(5): 1924 – 1928.
XU Hongdeng, XI Beidou, ZHAI Lihua. Interception effect of ditch sediment on $\text{NH}_4^+\text{-N}$ in agricultural drainage ditch [J]. *J Agro-Environ Sci*, 2007, **26**(5): 1924 – 1928.
- [25] 钟成华, 李杰, 邓春光. 人工湿地废水处理中氮、磷去除机理研究[J]. 重庆建筑大学学报, 2008, **30**(4): 141 – 146.
ZHONG Chenghua, LI Jie, DENG Chunguang. Advances in the study of nitrogen and phosphorus removal mechanisms in constructed wetlands [J]. *J Chongqing Jianzhu Univ*, 2008, **30**(4): 141 – 146.
- [26] 梁新强, 田光明, 李华, 等. 天然降雨条件下水稻田氮磷径流流失特征研究[J]. 水土保持学报, 2005, **19**(1): 59 – 63.
LIANG Xinqiang, TIAN Guangming, LI Hua, *et al.* Study on characteristic of nitrogen and phosphorus loss from rice field by natural rainfall runoff [J]. *J Soil Water Conserv*, 2005, **19**(1): 59 – 63.
- [27] 于会彬, 席北斗, 郭旭晶, 等. 降水对农田排水沟渠中氮磷流失的影响[J]. 环境科学研究, 2009, **22**(4): 409 – 414.
YU Huibin, XI Beidou, GUO Xujing, *et al.* Effects of rainfall runoff on nitrogen and phosphorus loss in farming

- drainage ditch [J]. *Res Environ Sci*, 2009, **22**(4): 409 – 414.
- [28] 石丽红, 纪雄辉, 李洪顺, 等. 湖南双季稻田不同氮磷施用量的径流损失[J]. 中国农业气象, 2010, **31**(4): 551 – 557.
- SHI Lihong, JI Xionghui, LI Hongshun, *et al.* Nitrogen and phosphorus losses from surface runoff under different application in the double cropping rice fields in Hunan [J]. *Chin J Agrometeorol*, 2010, **31**(4): 551 – 557.
- [29] KOVACIC D A, DAVID M B, GENTRY L E, *et al.* Effectiveness of constructed wetlands in reducing nitrogen and phosphorus export from agricultural tile drainage [J]. *J Environ Qual*, 2000, **29**(4): 1262 – 1274.
- [30] 赵迪, 徐文娟, 李勇, 等. 刺苦草对富营养化水体净化作用的研究[J]. 中国农学通报, 2010, **26**(2): 189 – 192.
- ZHAO Di, XU Wenjuan, LI Yong, *et al.* Purification of eutrophicated water by *Vallisneria spinulosa* [J]. *Chin Agric Sci Bull*, 2010, **26**(2): 189 – 192.
- [31] 祝宇慧, 赵国智, 田光明. 湿地植物对模拟污水的净化能力研究[J]. 农业环境科学学报, 2009, **28**(1): 166 – 172.
- ZHU Yuhui, ZHAO Guozhi, TIAN Guangming, *et al.* Purification ability of wetland plants for simulated wastewater [J]. *J Agro-Environ Sci*, 2009, **28**(1): 166 – 172.
- [32] 宋超, 刘盼, 朱华, 等. 水芹对富营养化水体的净化效果研究[J]. 水生态学杂志, 2011, **32**(3): 145 – 148.
- SONG Chao, LIU Pan, ZHU Hua, *et al.* Research of purification effect on eutrophic water by *Oenanthe javanica* [J]. *J Hydroecol*, 2011, **32**(3): 145 – 148.