

沟渠及塘堰湿地系统对稻田氮磷污染的去除试验

何 军^{1,2}, 崔远来¹, 吕 露^{1,3}, 易 帆¹, 段中德¹

(1.武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 武汉 430072; 2.三峡大学水利与环境学院, 湖北 宜昌 443002; 3.中国水电顾问集团中南勘测设计研究院, 长沙 410014)

摘 要:为研究原位状态下灌区沟渠及塘堰湿地系统对稻田氮磷污染的去除效应和规律,在湖北省漳河灌区选取农沟~斗沟尺度的3段典型排水沟渠和一处塘堰,分别于2009—2010年5—9月水稻生育期在沟渠和塘堰进出水口采集水样进行氮磷浓度化验分析。结果表明,灌区农沟~斗沟尺度典型排水沟渠对总氮、硝态氮、铵态氮、总磷整体去除率分别为44.6%、9.9%、37.3%、35.1%;塘堰对总氮、硝态氮、铵态氮、总磷的平均去除率分别为15.2%、15.6%、30.2%、-6.5%。典型沟渠和塘堰对氮磷污染的去除表现出一定的抗冲击自修复性。原位条件下,由于排水沟中水力停留时间都不长,使得种植不同植被的沟段之间对氮磷的去除效应差异性不明显。塘堰湿地系统中植被的选育及其管理对去除稻田排水氮磷污染具有重要意义。

关键词:稻田;沟渠;塘堰;氮;磷;去除率

中图分类号:S181 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2011)09-1872-08

Experiments on Removal Effects of Ditch-Pond Wetland System on N and P Pollutants from Paddy Field

HE Jun^{1,2}, CUI Yuan-lai¹, LV Lu^{1,3}, YI Fan¹, DUAN Zhong-de¹

(1.State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 2.College of Hydraulic & Environmental Engineering, China Three Gorges University, Yichang 443002, China; 3.Mid-South Design and Research Institute, China Hydropower Engineering Consulting Group Co., Changsha 410014, China)

Abstract: In order to study removal effect and laws of irrigation area ditch-pond wetlands system to paddy drainage water nitrogen and phosphorus pollutants under natural condition, three typical drainage ditches and one pond at the scale from field ditch to lateral ditch were selected in Zhanghe Irrigation System, Hubei Province. Water samples at inlet and outlet of the ditches and pond were collected for nitrogen and phosphorus analysis during the whole rice growing season from May to September in 2009 and 2010. The results show that the average total removal rates from field ditch to lateral ditch on total nitrogen, nitrate nitrogen, ammonium nitrogen, total phosphorus in drainage water from paddy field were 44.6%, 9.9%, 37.3% and 35.1%, respectively; and the average removal rates of typical pond on total nitrogen, nitrate nitrogen, ammonium nitrogen, total phosphorus in drainage water were 15.2%, 15.6%, 30.2% and -6.5%, respectively. The experiment also showed certain anti-impact and self-repairing effects of the wetland system to nitrogen and phosphorus pollutants. Generally the removal rate was significant in the earlier growing stage of paddy rice, then decreased or even appeared negative value in the middle, and finally recovers in the later growing stage. In natural condition, the hydraulic retention time(HRT) of each ditch was not long enough, which made the difference of removal effect on nitrogen and phosphorus pollutants between different ditches not significant. The pond's removal effect on paddy drainage water nitrogen and phosphorus pollutants in 2009 when it was planted with pollen typhae were better than that in 2010 without pollen typhae in the pond. The cultivation of vegetation and its management of ditches-pond wetland system is of great significance to remove drainage water nitrogen and phosphorus pollutants from paddy field.

Keywords: paddy field; ditches; ponds; nitrogen; phosphorus; removal rate

非点源污染已成为全球水环境恶化的主要污染源之一,其中农业非点源污染又占据绝对主导地位^[1-3]。农

田排水沟渠及塘堰系统作为农田与水体之间的一个过渡带,具有排水和生态湿地双重功效,能够通过土壤吸附、植物吸收、生物降解等一系列作用,降低进入下游水体中的氮、磷化合物的含量,成为目前农业非点源污染防治研究的热点^[4-10]。李跃勋等^[4]以废弃鱼塘改造建立的表面流人工湿地系统,对非点源 COD、

收稿日期:2011-03-10

基金项目:国家自然科学基金项目(50839002)部分内容

作者简介:何 军(1981—),男,湖北荆门人,博士研究生,研究方向为农业面源污染模拟与防控。E-mail:hejun50@163.com

TN、TP 的去除率分别达到 28.1%、35.9%、4.9%；杨林章等^[5]针对太湖流域非点源污染现状提出一种由工程部分和植物系统组成的生态拦截型沟渠系统,该系统对农田径流中 TN、TP 的去除率分别达 48.4%、40.5%；彭世彰等^[6]在灌区内修整承泄沟塘、重建水生植物系统,结果表明沟塘出流水中 TN、TP 平均浓度分别比入口减少 22.0%、9.6%；Ray 等^[8]的研究表明,在农田排水沟渠中装设 FGD 石膏板,径流中可溶性磷的去除率达 35%~90%。以上研究成果多在受控条件下或以田间小区域尺度对排水控制、人工改造湿地等为背景获得,流域及灌区原位条件下的研究较为少见。

本文选取我国南方典型水稻种植区湖北省漳河灌区开展原位观测试验,分析沟渠、塘堰等农田湿地系统对农田排放氮磷的去除效应和规律,以期正确评价水稻灌区沟渠及塘堰湿地对农业非点源污染的去除效果、为合理制定农业非点源污染防治措施提供参考。

1 材料和方法

1.1 试验区概况及设计

试验在湖北省漳河灌区进行。漳河灌区位于北纬 30°00′~31°42′,东经 111°28′~111°53′,灌区自然面积 5 543.93 km²,设计灌溉面积 1 737.67 km²。漳河水库为灌区主要灌溉水源,总库容 20.35 亿 m³,辅以灌排沟渠及各中小型水库、塘堰等形成“长藤结瓜”式灌排系统。灌区地形起伏,北高南低,为典型的丘陵地带,主要农作物为一年两季稻油(麦)轮作。水稻生产主要施用化肥包括:碳酸氢铵、尿素、过磷酸钙和氯化钾。2009、2010 年灌区水稻平均施肥水平为:氮肥(以 N 计),180 kg·hm⁻²,基肥用碳酸氢铵,追肥(分蘖肥)用尿素,二者施 N 量之比为 5:5;磷肥(以 P₂O₅ 计)40 kg·hm⁻²;钾肥(以 K₂O 计)70 kg·hm⁻²。磷、钾肥作为基肥一次性施入。

在 2009、2010 年的 5 月至 9 月水稻生育期,在灌区三千渠一分干附近选取典型排水沟段和塘堰并在其进出水口采集水样进行分析,按式(1)计算典型排水沟段和塘堰对稻田排水氮磷污染的去除率。

$$R = \frac{C_{in} - C_{out}}{C_{in}} \times 100\% \quad (1)$$

式中:R 为典型排水沟段或塘堰对稻田排水氮磷污染物的去除率,%;C_{in}、C_{out} 分别为进水口、出水口对应氮磷污染物的质量浓度,mg·L⁻¹。

试验模式为原位条件纯自然状态,农民根据生产需要在沟渠(塘堰)中筑坝蓄水灌溉、掘沟排水等包括在内。选取的典型排水沟段相对封闭,除进出水口外无其余客水进入、排出,该排水沟上游段相当于排水农沟,下游段相当于排水斗沟。按沟中不同植被生长状况选取 3 段,从上游到下游分别为沟段一无草(non grass),沟段二水草(float grass),沟段三水花生(alternanthera philoxeroides),每段长约 100.0 m,沟段断面尺寸、边坡系数及渠底纵坡降见表 1。选取的典型塘堰 2009 年种有蒲草(pollen typhae),2010 年蒲草被刈除(当地农民自然行为),水面面积约 320.0 m²,平均水深约 1.2 m,该塘堰串联在排水沟上。

1.2 水样采集分析

采集水样分析指标和方法为:总氮、硝态氮用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法(GB 11894—1989)测定,铵态氮用纳氏试剂比色法测定,总磷用钼酸氨分光光度法(GB 11893—1989)测定。水样采集后 2 h 内在实验室分析,遇连续取样较多时,4℃低温保存,24 h 内处理完毕。

2 结果与讨论

2.1 典型沟段对氮磷污染的去除

2.1.1 2009 年试验结果

表 2 为 2009 年典型时段(水稻分蘖后期)不同典型沟段对稻田排水总氮、硝态氮、铵态氮的去除效应。可知,沟段一对总氮、硝态氮均产生一定的富集,对铵态氮的去除较紊乱但呈现出一定的抗冲击自修复性:6 月 28 日—6 月 29 日平均去除率为 23.6%,6 月 30 日下降为-397.5%,7 月 1 日—2 日平均去除率上升为 50.6%,7 月 3 日明显富集为-167.7%,7 月 4 日去除率又达到 45.8%。

表 1 典型排水沟段断面结构及渠道坡降

Table 1 Cross section structure and channel slope of typical drainage ditches

典型沟段	渠道坡降 <i>i</i>	进口断面			出口断面		
		底宽/m	右岸坡度 <i>m</i> ₁	左岸坡度 <i>m</i> ₂	底宽/m	右岸坡度 <i>m</i> ₁	左岸坡度 <i>m</i> ₂
沟段一(无草)	1:174.4	0.78	0.00	0.00	1.10	0.00	0.00
沟段二(水草)	1:200.9	2.35	0.00	0.00	2.60	0.00	0.00
沟段三(水花生)	1:162.8	0.47	0.35	5.52	1.65	4.36	2.75

沟段二对总氮晴天去除效果较明显,平均去除率为 16.9%。对硝态氮平均去除率为 11.0%,也表现为晴天去除效果比雨天好。对铵态氮的去除率除 7 月 3 日的异常值外,其余日期均表现出明显去除效应,平均去除率为 51.6%。

沟段三对总氮去除效果较好,平均去除率为 54.8%,且雨天去除效果比晴天好。对硝态氮产生富

集,不考虑 7 月 4 日异常值,则晴天平均去除率为 9.4%,雨天为-13.2%,6 月 29 日为-41.9%,可能是由于硝态氮主要随径流迁移,水流流速较大、水深较深时硝态氮随径流易产生富集。对铵态氮具有明显去除效应,平均去除率为 43.7%,雨天去除效果比晴天好。

综合对比而言,沟段三对总氮的去除效果最好,平均去除率为 45.4%,沟段二次之,平均去除率为

表 2 典型沟段对总氮、硝态氮、铵态氮去除效应(2009 年)
Table 2 Removal effect of typical drainage ditches on total nitrogen, nitrate nitrogen, ammonium nitrogen (2009)

典型沟段		项目	水样采集日期/天气							平均去除率/%
			6.28/雨	6.29/雨	6.30/雨	7.1/雨	7.2/晴	7.3/晴	7.4/晴	
沟段一(无草)	总氮	$C_{in}/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	0.929	2.815	1.338	11.358	1.608	2.094	0.536	-13.2
		$C_{out}/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	1.775	2.484	1.272	9.080	1.277	1.591	0.977	
		$R/\%$	-91.2	11.8	4.9	20.1	20.6	24.0	-82.5	
		雨/晴天去除率/%	-13.6/-12.6							
	硝态氮	$C_{in}/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	0.265	0.332	0.878	0.836	1.200	0.178	0.126	-7.1
		$C_{out}/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	0.291	0.424	0.863	0.865	1.166	0.186	0.137	
		$R/\%$	-9.9	-27.9	1.8	-3.5	2.9	-4.5	-8.7	
		雨/晴天去除率/%	-9.9/-3.5							
	铵态氮	$C_{in}/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	7.330	2.363	0.987	2.613	1.073	3.278	3.102	4.5
		$C_{out}/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	4.336	2.214	4.909	1.499	0.445	8.777	1.680	
		$R/\%$	40.8	6.3	-397.5*	42.6	58.5	-167.7	45.8	
雨/晴天去除率/%		29.9/-21.2								
沟段二(水草)	总氮	$C_{in}/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	2.529	0.886	0.644	4.752	1.003	1.726	0.560	1.4
		$C_{out}/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	2.692	0.875	0.721	5.891	0.969	1.591	0.339	
		$R/\%$	-6.4	1.2	-12.0	-24.0	3.4	7.8	39.4	
		雨/晴天去除率/%	-10.3/16.9							
	硝态氮	$C_{in}/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	0.296	0.332	0.567	0.676	0.766	0.146	0.070	11.0
		$C_{out}/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	0.345	0.253	0.548	0.562	0.635	0.108	0.065	
		$R/\%$	-17.0	23.9	3.2	16.8	17.2	26.1	7.1	
		雨/晴天去除率/%	6.7/16.8							
	铵态氮	$C_{in}/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	4.389	2.865	3.469	1.990	7.884	1.076	0.000	51.6
		$C_{out}/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	1.322	2.511	1.790	0.622	3.266	4.989	0.000	
		$R/\%$	69.9	12.3	48.4	68.7	58.6	-363.7*		
雨/晴天去除率/%		49.8/58.6								
沟段三(水花生)	总氮	$C_{in}/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	—	4.755	2.264	3.841	1.014	2.253	0.916	45.4
		$C_{out}/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$		0.588	0.511	0.000*	0.77	1.566	0.842	
		$R/\%$		87.6	77.4		23.7	30.5	8.0	
		雨/晴天去除率/%	82.5/20.7							
	硝态氮	$C_{in}/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	—	0.291	0.553	0.471	0.486	0.04	0.048	-23.3
		$C_{out}/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$		0.413	0.553	0.460	0.479	0.033	0.105	
		$R/\%$		-41.9	0.0	2.4	1.3	17.5	-118.8*	
		雨/晴天去除率/%	-13.2/-33.3							
	铵态氮	$C_{in}/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	—	4.017	*	1.328	0.451	4.499	1.790	43.7
		$C_{out}/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$		1.191	*	0.368	0.285	5.015	0.887	
		$R/\%$		70.3	*	72.3	36.7	-11.7	50.5	
雨/晴天去除率/%		71.3/25.2								

说明:*,表示异常值或化验失败;6.28 沟段三受人为点源污染影响(有人在沟里扔有腐烂死鱼),未取样。

1.4%,沟段一产生富集。沟段二对硝态氮具有一定去除效果,平均去除率为11.0%,沟段一、沟段三对硝态氮均产生富集。沟段二、沟段三对铵态氮的去除效果均较好,平均去除率分别为51.6%、43.7%。

2.1.2 2010年试验结果

2010年针对水稻不同生育期选择典型时段开展观测分析。

图1a中,沟段一水稻生育前期对总氮、硝态氮均有较好的去除效果,去除率介于14.3%~44.5%,拔节孕穗期往后较差,平均去除率分别为12.9%、3.6%。对铵态氮的去除水稻全生育期变幅较大,变差系数值达5.44,但呈现出明显的抗冲击自修复性:去除率返青复苗期为21.8%,分蘖前期下降至-48.7%,分蘖

后期、拔节孕穗期上升到53.0%、57.2%,抽穗开花期、乳熟期下降为-49.5%、-26.3%,黄熟期又上升至50.3%,平均去除率为8.3%。

图1b中,沟段二水稻生育期对总氮、硝态氮具有较好的去除效果,平均去除率分别为11.6%、19.4%,均呈现出一定的抗冲击自修复性:对总氮的去除率从返青复苗期32.4%下降至分蘖后期-43.7%,再上升至抽穗开花期49.8%,乳熟期下降为-11.9%,黄熟期上升至40.1%;对硝态氮的去除率从返青复苗~分蘖后期逐渐下降,介于57.6%~15.7%,拔节孕穗期下降至最低-4.4%,抽穗开花~黄熟期从9.7%上升为16.9%。对铵态氮的去除具有较大变幅,平均去除率为-24.6%。

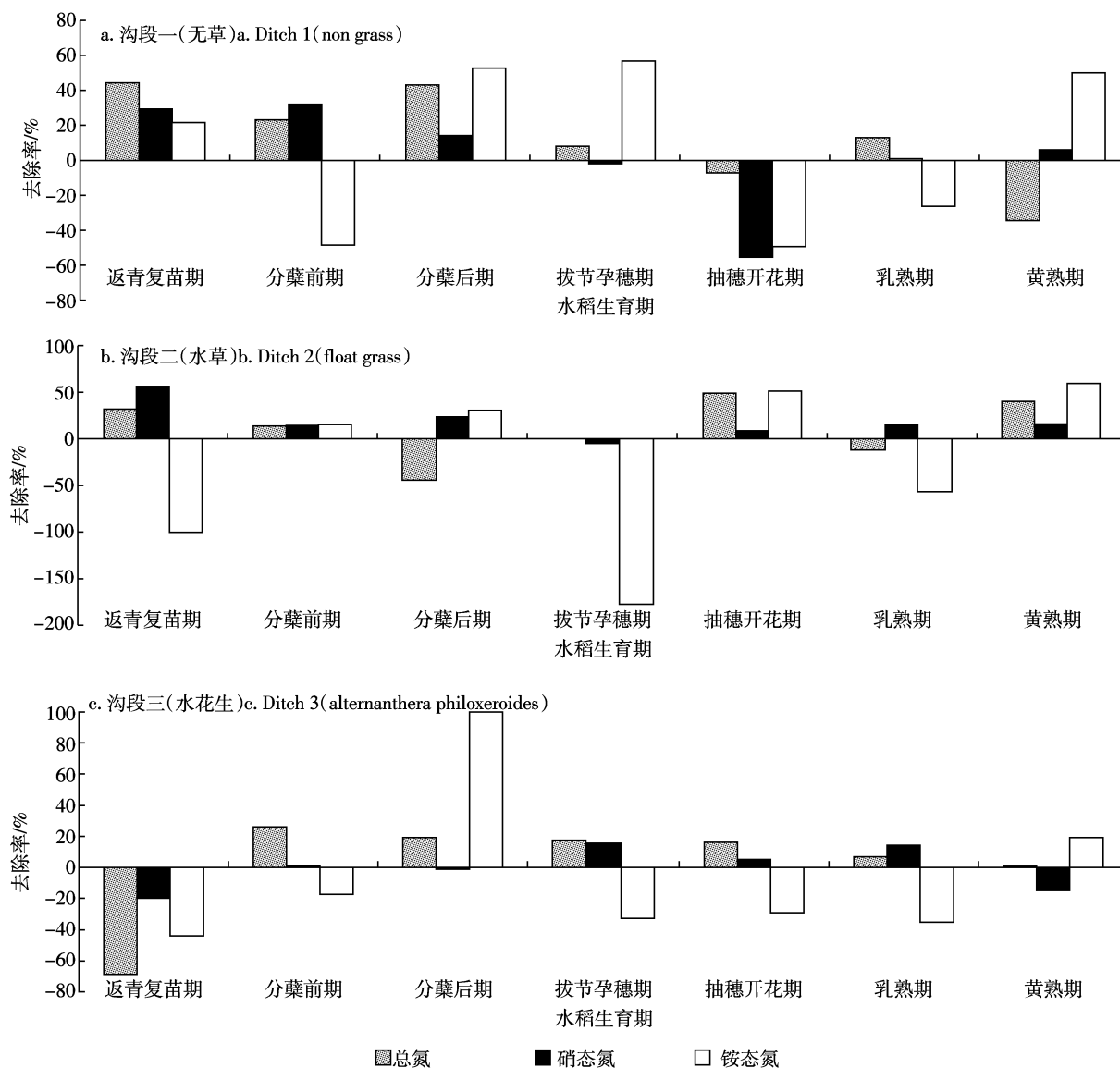


图1 典型沟段对总氮、硝态氮、铵态氮去除效应(2010年)

Figure 1 Removal effect of typical drainage ditches on total nitrogen, nitrate nitrogen, ammonium nitrogen(2010)

图 1c 中,沟段三对总氮的去除率返青复苗期为 -68.8%,分蘖前期为 26.3%,逐渐下降至黄熟期 0.4%,平均去除率为 2.5%。对硝态氮的去除较稳定,介于-19.5~15.4%,全生育期平均去除率为 0.1%。对铵态氮的去除率分蘖后期、黄熟期分别为 100%、19.5%,其余生育期介于-43.7%~-17.2%,平均去除率为-5.5%。

综合对比而言,沟段一对氮污染具有较好去除效果,尤其是水稻生育前期明显好于其余沟段,原因在于沟段一位于该排水沟塘系统最上游,直接承受农田排水,氮污染浓度较高,生育前期沟中本底氮负荷较低,所以去除率较高,这与唐峰^[1]研究结论相一致。

2.1.3 两年试验结果综合分析

2 年的试验表明,不同沟段对不同类型氮污染的去除效应有差异但表现相同趋势,总体而言,2009 年去除效果好于 2010 年,可能是不同水文年份及取样时段的关系。2009、2010 年水稻生育期降雨量分别为 502.6、394.3 mm,降雨较大的年份,稻田排放的氮污染浓度高,相应的去除率较高^[11]。另外,2 年的取样时段也有差异。同时可以看出:不同的水文条件下不同沟段对农田排水硝态氮、铵态氮的去除需要一定的水力停留时间,可能在某一个时间段(或水稻生育期)存在影响去除效应的临界值,水力停留时间小于临界值则起不到去除效果,超过临界值则有明显的去除效应。水稻全生育期对氮素污染的去除呈现出抗冲击自修复性。总体来说,表现为生育前期由于沟段本底氮浓度较低,对污染有较好去除效应,中期由于沟段氮

负荷增加,使得去除效果降低甚至有富集效应,后期由于植物吸收、底泥吸附及农田氮污染排放相对前期减少^[12],沟段氮负荷降低,去除效果有所恢复。抗冲击自修复性直观规律又因氮素污染物的形态、沟段植物类型、水稻生育阶段及沟段尺寸的不同表现各异。水稻全生育期不同沟段对铵态氮的去除效应不稳定,表现为较大变幅,可能与铵态氮带正电荷,易与带负电荷的土壤颗粒结合,难随径流迁移等有关。

表 3 中,沟段一对总磷的去除效果较好,平均去除率为 13.6%,且晴天去除效果好于雨天。沟段二去除效果较差,平均去除率为-15.0%。沟段三去除效果晴天比雨天好,晴天平均去除率为 10.6%,雨天则表现富集。结合表 2 可知,总体而言,不同沟段对氮磷污染的去除效果晴天要好于雨天。对于磷污染,原因主要在于晴天水流流速较低,水力停留时间较长,利于磷素自身化学沉淀以及沟段底泥充分吸附;对于氮污染,原因在于晴天温度较高,利于氨挥发以及氮污染的反硝化作用而得到有效去除^[13-14],同时水力停留时间较长也利于沟中植物吸收降解。

图 2 中,沟段一对总磷的去除率在拔节孕穗期、抽穗开花期较低,其余生育期具有较好且稳定的去除效果,介于 15.6%~43.4%,全生育期平均去除率为 15.9%。沟段二分蘖后期、乳熟期分别为-36.2%、-10.4%,返青复苗、黄熟期具有较好去除效果,去除率分别为 28.3%、26.1%,全生育期平均去除率为 3.8%。沟段三返青复苗期达 16.5%,分蘖前期下降至-5.7%,逐渐上升至乳熟期 14.1%,黄熟期下降为 4.1%,全生育

表 3 典型沟段对总磷去除效应(2009 年)

Table 3 Removal effect of typical drainage ditches on total phosphorus(2009)

典型沟段	项目	水样采集日期/天气							平均去除率/%
		6.28/雨	6.29/雨	6.30/雨	7.1/雨	7.2/晴	7.3/晴	7.4/晴	
沟段一(无草)	$C_{in}/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	0.072	0.09	0.072	0.047	0.054	0.017	0.009	13.6
	$C_{out}/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	0.065	0.063	0.078	0.055	0.045	0.011	0.006	
	$R/\%$	9.5	30.3	-9.6	-18.3	16.1	31.4	36.0	
	雨/晴天去除率/%	3.0/27.8							
沟段二(水草)	$C_{in}/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	0.051	0.043	0.053	0.045	0.028	0.009	0.000	-15.0
	$C_{out}/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	0.058	0.044	0.046	0.048	0.029	0.017	0.029	
	$R/\%$	-13.4	-4.0	13.0	-7.6	-6.2	-71.9	*	
	雨/晴天去除率/%	-3.0/-39.1							
沟段三(水花生)	$C_{in}/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	—	0.013	0.068	0.064	0.054	0.048	0.049	7.3
	$C_{out}/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$		0.046	0.063	0.065	0.05	0.037	0.048	
	$R/\%$		-241.9*	7.5	-2.7	6.4	21.8	3.5	
	雨/晴天去除率/%	-79.0/10.6							

说明:*,表示异常值。

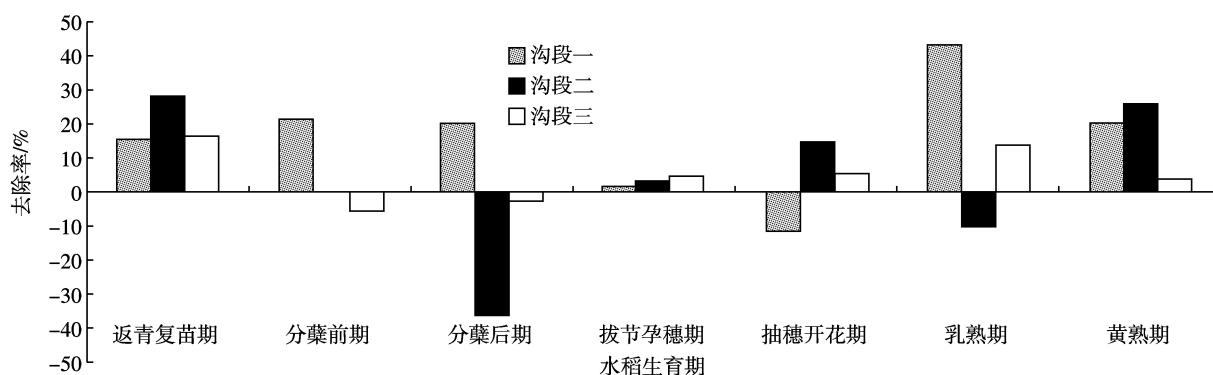


图2 典型沟段对总磷去除效应(2010年)

Figure 2 Removal effect of typical drainage ditches on total phosphorus of 2010

期平均去除率为5.3%。同氮素污染物一样,不同典型沟段对总磷的去除均呈现出一定的抗冲击自修复性。

总体来说,灌区自然条件下典型沟段对总磷去除效应并不明显,可能与磷素排放以颗粒物形式为主有关^[15],相较而言,沟段一对总磷去除效果较好,沟段三次之,沟段二最差。

水力停留时间是影响沟渠及塘堰湿地系统有效去除氮磷污染的重要因子^[13],原位条件下,不同沟段农田排水的水力停留时间都不长,使得种植不同植被的沟段之间对氮磷的去除效应差异性不明显。本文仅从晴天水流流速较低、水力停留时间较长,反之雨天则较短进行了定性的判断,并未进行实测数据,这将是下一步的研究重点。

选取的三段典型沟渠:沟段一(无草)、沟段二(水草)、沟段三(水花生),属于灌区排水系统中农沟~斗沟尺度同一串联的沟渠,采用式(2)计算评价该尺度系统对氮磷污染物的整体去除效应。

$$R_{Total} = 1 - (1 - L_1 \cdot \sigma_1) \times (1 - L_2 \cdot \sigma_2) \times (1 - L_3 \cdot \sigma_3) \quad (2)$$

式中: R_{Total} 为农沟~斗沟尺度排水系统沟段对氮磷污染的整体去除率,%; σ_1 、 σ_2 、 σ_3 分别为沟段一、沟段二、沟段三对稻田排水氮磷污染单位长度去除率,其值由典型沟段对氮磷污染去除率 R 除以沟段长度100.0 m得出, $\% \cdot m^{-1}$; L_1 、 L_2 、 L_3 分别为灌区农沟~斗沟尺度排水系统主要植被状况(无草、水草、水花生)沟段的概化长度,m,现场实测值分别为247.2、179.5、120.5 m。

综合表2、表3,图1、图2,计算可得2009年农沟~斗沟尺度的排水系统沟段对总氮、硝态氮、铵态氮、总磷整体去除率 R_{Total} 分别为41.5%、-20.8%、96.9%、23.2%;2010年分别为47.8%、40.7%、-22.4%、46.9%。灌区农沟~斗沟尺度的排水系统沟段对总氮、

硝态氮、铵态氮、总磷整体去除率两年平均水平分别为44.6%、9.9%、37.3%、35.1%。

2.2 典型塘堰对氮磷污染的去除

图3a中,2009年典型塘堰水稻生育期对总氮的平均去除率为29.3%,返青复苗、分蘖后期对总氮去除较好,去除率分别为57.5%、55.1%,乳熟、黄熟期分别为25.0%、27.5%,生育中期较差,拔节孕穗、抽穗开花期去除率分别为14.2%、4.5%。塘堰对硝态氮的去除规律类似总氮。表明典型塘堰对总氮、硝态氮的去除具有一定的抗冲击自修复性,同典型排水沟段类似,水稻生育前期典型塘堰本底氮浓度较低,对总氮、硝态氮可起到明显去除效果,生育中期塘堰氮负荷增加,净化功能下降,一定程度起到负增长作用,表现为由“汇”转化为“源”,生育后期由于塘堰中植物吸收、底泥吸附以及农田氮污染排放相对前期减少,塘堰氮负荷降低,使得对总氮、硝态氮的净化去除有所恢复。塘堰对铵态氮的去除效应水稻全生育期较明显且稳定,去除率返青复苗期为19.5%,其余生育期介于49.4%~67.9%,全生育期平均去除率为53.1%。与典型排水沟段相同,塘堰对农田排水中硝态氮、铵态氮的有效去除需要一定的水力停留时间。

图3b中,2010年塘堰对总氮的去除效果最好的是在水稻分蘖前期,去除率达66.1%,其余生育期介于-27.6%~21.4%,全生育期平均去除率为1.0%。对硝态氮的去除率介于-17.8%~18.4%,平均去除率为2.1%。对铵态氮的去除率变幅较大,返青复苗期、分蘖后期去除率分别为60.0%、74.0%,拔节孕穗期为-61.6%,平均去除率为7.3%。

由图4可知,2009年典型塘堰水稻生育前期对总磷去除效果较差,生育中期具有一定去除效果,全生育期平均去除率为-10.2%。2010年典型塘堰对总

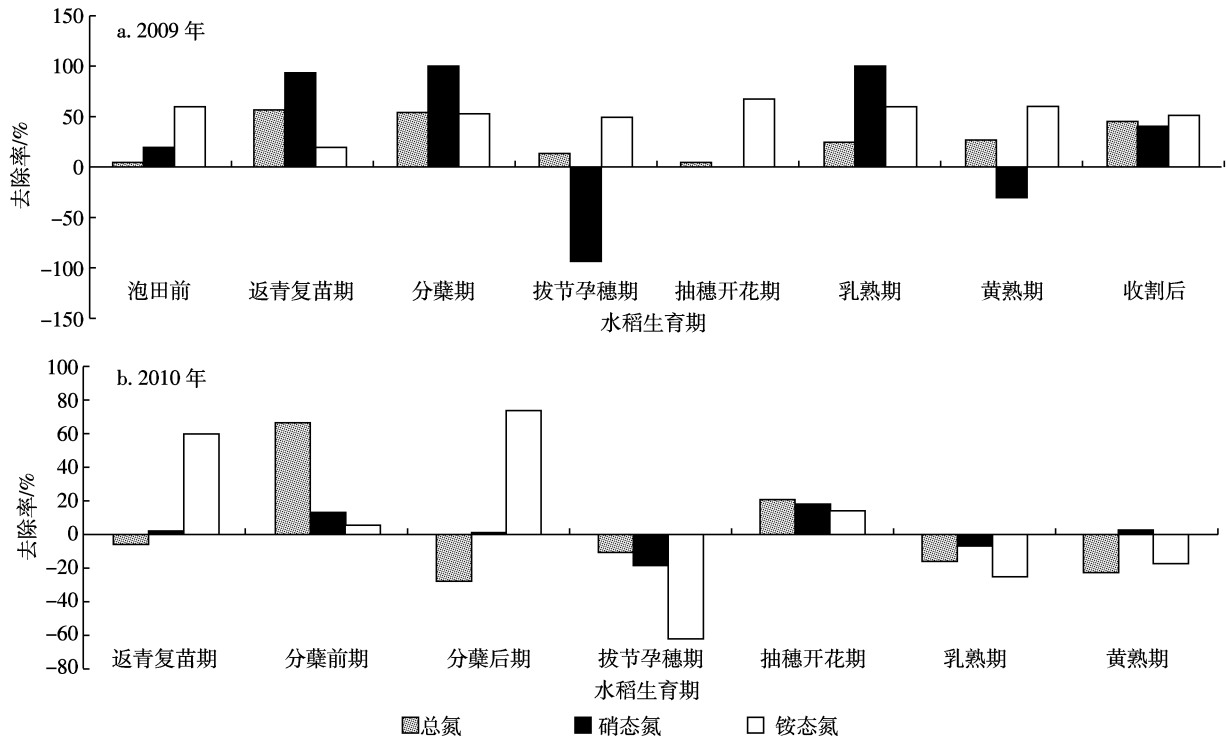


图 3 典型塘堰对总氮、硝态氮、铵态氮的去除效应

Figure 3 Removal effect of typical pond on total nitrogen, nitrate nitrogen, ammonium nitrogen

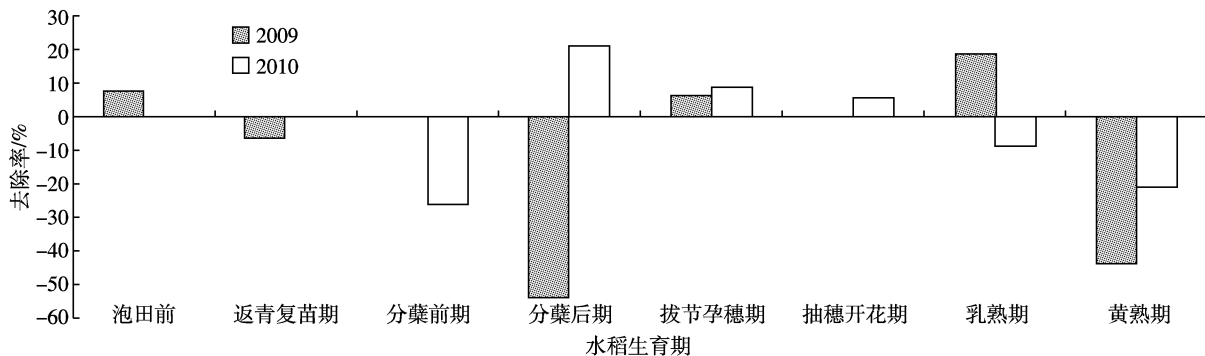


图 4 典型塘堰对总磷去除效应

Figure 4 Removal effect of typical pond on total phosphorus

磷去除水稻生育前期较差(同 2009 年),分蘖后期-乳熟期去除率从 21.4%逐渐降至 5.9%,全生育期平均去除率为-2.8%。相比氮素污染,灌区原位条件下典型塘堰对总磷去除效应并不明显,这可能与磷素的排放主要是以颗粒物形式有关^[15],主要包括含磷矿物、含磷有机质和被吸附在土壤颗粒上的磷,不能被植物直接吸收,随地表径流迁移易产生一定富集。

通过 2 年的试验结果对比可知,塘堰对稻田排水氮磷污染的去除效果相差较大,除去不同水文年型的原因,更为可能的一点应是塘堰中不同的植被状况,试验表明种植有蒲草的 2009 年对氮磷污染的去除效

果要好于蒲草被刈除的 2010 年。因此,加强沟渠塘堰湿地系统植被的选育及其管理对氮磷污染的去除具有重要意义。典型塘堰对总氮、硝态氮、铵态氮、总磷的平均去除率分别为 15.2%、15.6%、30.2%、-6.5%。

3 结论

本文选取湖北省漳河灌区为研究对象,于 2009、2010 年水稻生育期在原位条件纯自然状态下开展典型沟渠湿地系统对稻田氮磷污染去除效应试验研究,结论归纳如下:

(1)典型农沟~斗沟尺度的排水系统沟段对稻田

排水中总氮、硝态氮、铵态氮、总磷整体去除率分别为44.6%、9.9%、37.3%、35.1%，但沟段之间对氮磷的去除效应差异性不明显；典型塘堰对稻田排水中总氮、硝态氮、铵态氮、总磷的平均去除率分别为15.2%、15.6%、30.2%、-6.5%。

(2)典型沟段、塘堰等湿地系统对稻田排水中氮磷污染的去除均呈现出一定的抗冲击自修复性，总体来说，表现为水稻生育前期有较好去除效应，中期则降低甚至有富集效应，后期则又重新具有一定去除效果。

(3)通过不同典型沟段去除率的比较，以及典型塘堰2009、2010年有无蒲草条件下去除率的比较，表明塘堰自然湿地中植被类型及其分布对去除率有重要的影响，为提高自然湿地的去除效率，应加强湿地植被的选育及管理。

灌区原位条件纯自然状态下沟渠及塘堰湿地系统对农田排水中氮磷污染的去除净化效果显著且极具规律性。随着农业非点源污染对环境恶化影响的加剧，进一步深入研究农田排水沟渠及塘堰湿地系统对氮磷污染的去除机理，识别和提升其影响因子特征参数等对于构建高效去除农业非点源污染之经济合理人工湿地系统及其管理等具有重要指导作用。

参考文献:

- [1] 第一次全国污染源普查公报 [EB/OL]. http://cpsc.mep.gov.cn/jryw/201002/t20100222_185945.htm. 2010, 2.
First national census on pollution sources of China[EB/OL]. http://cpsc.mep.gov.cn/jryw/201002/t20100222_185945.htm. 2010, 2.
- [2] 朱兆良, 孙波. 中国农业面源污染现状、原因和控制对策[J]. 中国农学通报, 2008, 24(增刊): 1-2.
ZHU Zhao-Liang, SUN Bo. Actualities, reasons and control counter-measures of Non-point Pollution of Agriculture in China[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2008, 24(suppl): 1-2.
- [3] Poe G L, Schulze W D. Final Report: An experimental economics examinations of incentive mechanisms for reducing ambient water pollution levels from agricultural non-point source pollution[EB/OL]. <http://cfpub.epa.gov/ncer/abstracts/index.cfm/fuseaction/display.abstractDetail/abstract/6237/report/F>, 2009-11-12.
- [4] 李跃勋, 徐晓梅, 洪昌海, 等. 表面流入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.
LI Yue-xun, XU Xiao-mei, HONG Chang-hai, et al. The application study on surface constructed wetlands for non-point source pollution control at the Dianchi lakeshore region[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(10): 2155-2160.
- [5] 杨林章, 周小平, 王建国, 等. 用于农田非点源污染控制的生态拦截型沟渠系统及其效果[J]. 生态学报, 2005, 24(11): 1371-1374.
YANG Lin-zhang, ZHOU Xiao-ping, WANG Jian-guo, et al. Ecological ditch system with interception function and its effects on controlling farmland non-point pollution[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2005, 24(11): 1371-1374.
- [6] 彭世彰, 高焕芝, 张正良. 灌区沟塘湿地系统对稻田排水中氮磷的原位消减效果及机理研究[J]. 水利学报, 2010, 41(4): 406-411.
PENG Shi-zhang, GAO Huan-zhi, ZHANG Zheng-liang. Effect of pond wetland on N and P removal in drainage water from paddy field and its mechanism[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2010, 41(4): 406-411.
- [7] 彭世彰, 张正良, 罗玉峰, 等. 灌排调控的稻田排水中氮素浓度变化规律[J]. 农业工程学报, 2009, 25(9): 21-26.
PENG Shi-zhang, ZHANG Zheng-liang, LUO Yu-feng, et al. Variation of nitrogen concentration in drainage water from paddy fields under controlled irrigation and drainage[J]. *Transactions of the CSAE*, 2009, 25(9): 21-26.
- [8] Ray B Bryant, Anthony B, Peter K, et al. Using FGD gypsum to remove soluble phosphorus from agricultural drainage waters [C]. 2010 Annual Meetings theme: Green Revolution 2. 0: Food + Energy and Environmental Security. CA. US 2010. 11.
- [9] 曹向东, 王宝贞, 蓝云兰, 等. 强化塘-人工湿地复合生态塘系统中氮和磷的去除规律[J]. 环境科学研究, 2000, 13(2): 15-19.
CAO Xiang-dong, WANG Bao-zhen, LAN Yun-lan, et al. Removal of nitrogen and phosphorus in the pond-wetland combined system[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2000, 13(2): 15-19.
- [10] 晏维金, 尹澄清, 孙濮, 等. 磷氮在水田湿地中的迁移转化及径流流失过程[J]. 应用生态学报, 1999, 10(3): 312-316.
YAN Wei-jin, YIN Cheng-qing, SUN Pu, et al. Phosphorus and nitrogen transfers and runoff losses from rice field wetlands of Chaohu Lake[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1999, 10(3): 312-316.
- [11] 唐峰. 塘/湿地生态系统对微污染水体的去除机制研究[D]. 上海: 东华大学, 2007.
TANG Feng. Study on removal mechanism of light pollution water in ecological pond/wetland system[D]. Shanghai: Donghua University, 2007.
- [12] 赵树君, 崔远来, 何军, 等. 不同水肥处理稻田氮素流失规律试验研究[C]//第六届中国农业水土工程学术年会论文集, 昆明: 2010, 8: 248-253.
ZHAO Shu-jun, CUI Yuan-lai, HE Jun, et al. Nitrogen loss under different water and fertilizer supply for paddy rice[C]. 6th Annual Academic Conference of Chinese Society of Agricultural, Soil and Water Engineering, Kunming: 2010, 8: 248-253.
- [13] 姜翠玲. 沟渠湿地对农业非点源污染物的截留和去除效应 [D]. 南京: 河海大学, 2003.
JIANG Cui-ling. Retention and removal effect of ditch wetlands on non-point source pollutants from agricultural drainage [D]. Nanjing: Hohai University, 2003.
- [14] 周利. 农业非点源污染迁移转化机理及规律研究[D]. 南京: 河海大学, 2006.
ZHOU Li. Research on transport and transformation law of agricultural non-point source pollution[D]. Nanjing: Hohai University, 2006.
- [15] 何军, 崔远来, 王建鹏, 等. 不同尺度稻田氮磷排放规律试验[J]. 农业工程学报, 2010, 26(10): 56-62.
HE Jun, CUI Yuan-lai, WANG Jian-peng, et al. Experiments on nitrogen and phosphorus losses from paddy fields under different scales[J]. *Transactions of the CSAE*, 2010, 26(10): 56-62.