

文章编号:0559-9350(2013)06-0657-07

## 稻田与沟塘湿地协同原位削减排水中氮磷的效果

彭世彰<sup>1</sup>, 熊玉江<sup>1</sup>, 罗玉峰<sup>1</sup>, 顾宏<sup>2</sup>

(1. 河海大学 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098; 2. 高邮市水务局, 江苏 高邮 225600)

**摘要:** 农田排水中过多的氮磷会造成水体富营养化以及面源污染等一系列水环境问题。本文提出控制农田面源污染的稻田沟塘湿地协同系统, 研究了该系统及其各组成部分对农田排水中氮磷的削减效果及机理。研究结果表明: 该系统可有效地减少稻田排水量, 降低稻田排水中氮磷浓度, 对稻田排水中氮磷实现原位削减。其较传统灌排系统减少排水量 73.03%, 分别减少总氮(TN)和总磷(TP)流失负荷 90.17%和 79.53%; 该系统中各组成部分都具有控污效果, 其中稻田控制灌排可有效地减少稻田排水、降低排水中氮磷浓度和田间产污能力, 控制灌溉稻田 TN 和 TP 负荷较传统灌溉减少 53.72%和 37.45%, 明沟控制排水对稻田排水中 TN 和 TP 的去除率达到 64.59%和 54.35%, 沟塘湿地能够有效地净化稻田排水中氮磷等污染, TN 去除率达到 37.13%, TP 去除率达到 27.32%。本文研究结果可为该系统在我国的应用提供理论支持及实践指导。

**关键词:** 稻田; 控制灌溉; 控制排水; 沟塘湿地; 氮磷

**中图分类号:** X592; S276

**文献标识码:** A

农田不合理的灌溉排水和施肥是引起面源污染和水体富营养化的主要原因<sup>[1-3]</sup>, 如何有效防治农田面源污染、修复水环境是目前亟待解决的问题。解决农田排水引起的面源污染的主要途径有源头控制、氮磷污染迁移途中去除净化和末端处理<sup>[4]</sup>。因此, 水肥高效利用及节水减污等成为近年研究热点问题<sup>[5-6]</sup>。近年来, 以水利技术为主的农田排水氮磷流失控制措施已逐渐受到人们重视。针对节水灌溉农田氮磷随地表径流、农田排水迁移机制以及沟塘湿地等对氮磷污染物的去除效应展开了广泛的研究, 尤其是节水灌溉、控制排水和湿地净化等单项措施对农田排水氮磷流失影响的研究, 取得了不少成果, 例如节水灌溉可以在不降低水稻产量的同时, 减少农田氮磷的流失<sup>[5-6]</sup>; 控制排水技术通过对农田水位的调控, 减少排水量, 降低排水中氮磷浓度, 从而有效减少农田氮磷流失<sup>[7-9]</sup>; 沟塘湿地对氮磷有很强的去除能力, 并能截留降雨径流, 有效控制农田面源污染的输出<sup>[10-11]</sup>。本文针对典型南方灌区稻麦轮作、自流灌溉、明沟排水等实际情况, 提出了稻田与明沟湿地协同系统(Paddy Eco-Ditch and Wetland System, PEDWS), 并研究了 PEDWS 系统对稻田排水中氮磷浓度以及排放负荷变影响, 为提高灌区水分利用效率和控制农田面源污染提供依据。

## 1 稻田与明沟湿地协同系统简介

稻田与明沟湿地协同系统(PEDWS)是控制农田面源污染的水资源综合管理系统, 由灌溉稻田、排水明沟和沟塘湿地组成。该系统通过联合运用控制灌溉技术、控制排水技术和水塘湿地生态净化技术, 使稻田、排水明沟和沟塘湿地系统紧密联结成为一个有机系统(见图1)。

收稿日期: 2013-01-19

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划项目(2011BAD25B07, 2012BAD08B04); 国家自然科学基金资助项目(51179048, 51179049)

作者简介: 彭世彰(1959-), 男, 上海人, 教授, 博士生导师, 主要从事节水灌溉理论与农田生态效应研究。

E-mail: szpeng@hhu.edu.cn

通讯作者: 罗玉峰(1977-), 男, 江西遂川人, 副研究员, 博士, 主要从事灌区水循环模拟与节水灌溉研究。

E-mail: yfluo@hhu.edu.cn

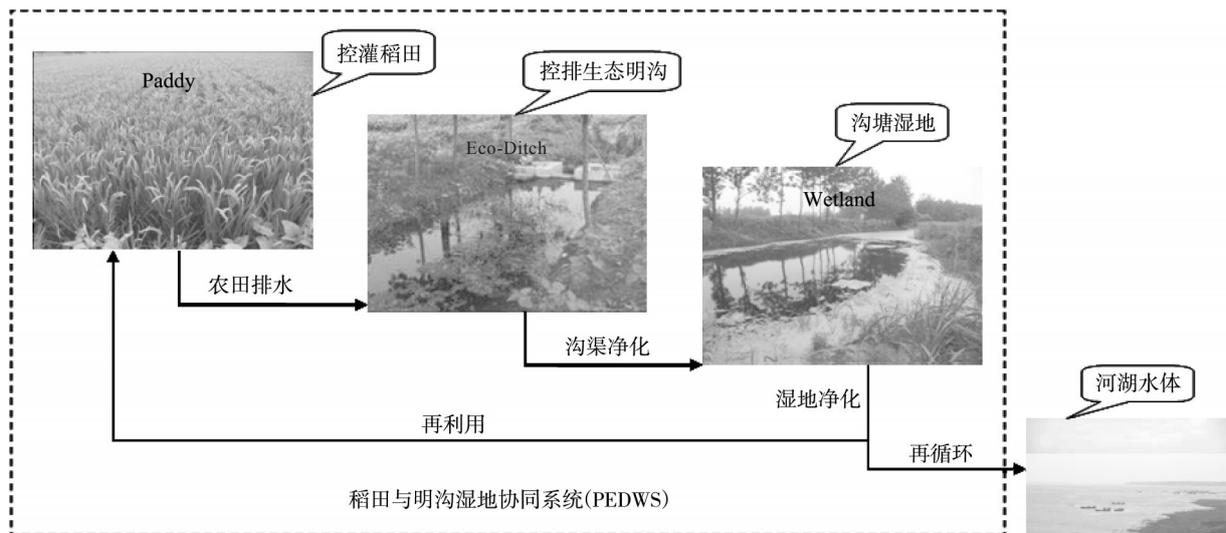


图1 稻田与明沟湿地协同系统(PEDWS)组成

PEDWS中稻田采用先进的控制灌溉技术,不超过允许蓄水上限且田面积水不超过5d时,雨水在田间得到调蓄净化,超过积水时间或水层深度时就进行田间排水;稻田排水进入控制排水生态明沟系统(农、斗、支沟),蓄水至上限3~7d,逐级调蓄排入下一级排水沟直至进入湿地;进入湿地的排水通过调控,一般在湿地中滞留1~2周,湿地通过底泥吸附、植物吸收和生物降解等作用,降低水体中氮磷等农田污染物后排出。排水经湿地蓄水净化后排至系统外部河流湖泊,或通过抽水灌溉再次利用。PEDWS通过联合调度控制灌溉稻田、控制排水明沟和沟塘湿地,能够实现节水和控污的和谐统一,在当今水资源短缺和水污染严重形势下,较传统系统更能满足对农业生产高效清洁的要求。

## 2 材料与方方法

**2.1 试区概况** 试验区位于江苏省高邮灌区周庄示范区(119°11'E, 32°35'N),属亚热带季风气候区,最高气温38.5℃,最低气温-18.5℃,年平均气温14.6℃,无霜期242d,常年降雨量1037mm,多年平均蒸发量1060mm。灌区为自流灌溉,供试土壤耕层质地为黏壤土,0~20cm土层有机碳21.88g/kg,全氮1.79g/kg,全磷1.4g/kg,全钾20.86g/kg, pH值7.4, 0~30cm土壤容重1.32g/cm<sup>3</sup>。

**2.2 处理设计** 水稻供试品种为镇稻99,于2009、2010年6—10月开展试验。试验区设PEDWS和传统灌排两套系统(图2),分别位于三支渠东西两侧,灌溉和排水试验在2个试验区同步进行。传统灌排和PEDWS试验区稻田面积分别为8.91hm<sup>2</sup>(33块标准条田)和17.28hm<sup>2</sup>(64块标准条田),典型田块规格均为30m×90m。PEDWS稻田采用控制灌溉技术、排水明沟采用控制排水技术,稻田排水经过排水沟汇入湿地,再排入河湖水体;传统灌排系统采用当地浅湿灌溉处理,排水处理采用自由排水。试验区采用明渠灌溉,斗渠直接灌水进入稻田,灌水方向为南北向,与水稻种植方向一致(见图2)。

(1)灌溉处理设计。控制灌溉稻田除返青期在田面保持10~30mm薄水层返青活苗,其余各生育阶段灌水后田面均不建立水层,以根层土壤含水率作为控制指标,确定灌水时间和灌水定额<sup>[12]</sup>。传统灌溉稻田除分蘖后期晒田和黄熟期自然落干外,其余阶段均建立水层,水稻不同生育期灌水时间间隔为:泡田栽插期4d左右、分蘖期5d左右、晒田以后6d左右,每次灌水持续15~18h,自流灌溉至田间存有4~8cm水层。2009、2010年不同灌溉处理时间灌溉制度见表1。

(2)排水处理设计。控制排水明沟通过在排水沟(农、斗)末端安装水位控制闸门,实现明沟排水系统的排水调蓄。排水上限水位为控制田面平均高程,明沟排水后保留20cm生态水深;传统排水即根据当地农民排水习惯采用开敞式明沟自由排水。

(3)湿地设计。将连接农田与下游水体之间的废弃生产河和堰塘改造成湿地,长约300m,宽

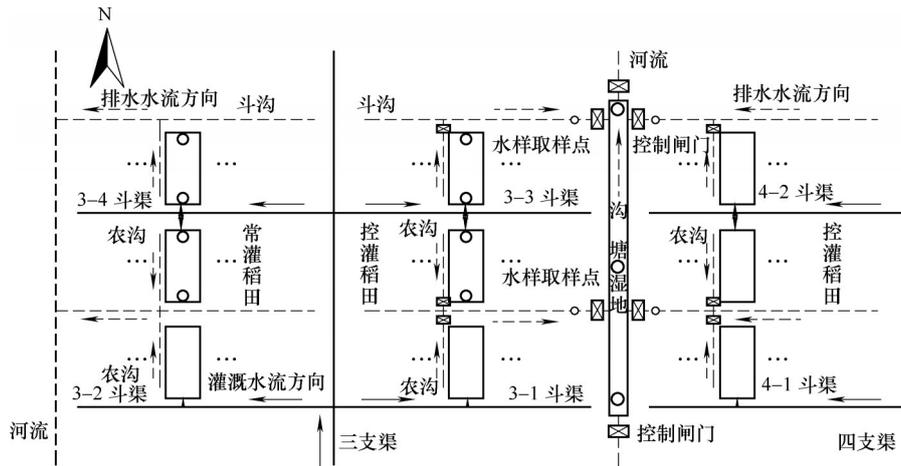


图2 试验区处理设计布置

表1 稻田各生育阶段灌水量(江苏高邮)

| 年份   | 灌溉处理 |           | 泡田期 | 返青期 | 分蘖期 | 拔节孕穗期 | 抽穗开花期 | 乳熟期 | 合计  |
|------|------|-----------|-----|-----|-----|-------|-------|-----|-----|
| 2009 | 控制灌溉 | 灌水次数/次    | 1   | 2   | 5   | 2     | 1     | 3   | 14  |
|      |      | 平均灌水定额/mm | 100 | 40  | 35  | 20    | 20    | 30  | 505 |
|      | 传统灌溉 | 灌水次数/次    | 1   | 2   | 6   | 2     | 1     | 3   | 15  |
|      |      | 平均灌水定额/mm | 100 | 50  | 50  | 30    | 30    | 35  | 695 |
| 2010 | 控制灌溉 | 灌水次数/次    | 1   | 4   | 5   | 2     | 1     | 1   | 14  |
|      |      | 平均灌水定额/mm | 100 | 40  | 40  | 30    | 30    | 20  | 570 |
|      | 传统灌溉 | 灌水次数/次    | 1   | 4   | 6   | 2     | 2     | 1   | 16  |
|      |      | 平均灌水定额/mm | 100 | 45  | 45  | 40    | 35    | 30  | 730 |

10m, 稻季水深一般在1.8~2.1m, 总面积约3 000m<sup>2</sup>, 约为控制稻田面积的1.74%。为了提高湿地净化能力, 整治构建水生植物系统, 植入沉水植物黑藻、挺水植物茭白和茭草、浮水植物莲藕和菱以及当地水生杂草, 保证水生植物总面积不超过水面面积1/3。

(4)施肥处理设计。水稻各生育期施氮比例约为, 基肥:返青肥:分蘖肥:穗肥=3:3:3:1。2009、2010年稻田全生育期纯氮施用量分别为445和410kg/hm<sup>2</sup>。2009、2010年磷肥(主要成分P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)施入量25kg/hm<sup>2</sup>, 钾肥(主要成分K<sub>2</sub>O)施入量为10kg/hm<sup>2</sup>。

**2.3 观测内容与方法** (1)水质观测内容、取样频率及取样点。2009年观测排水中氮磷浓度变化动态和负荷, 2010年观测排水中氮磷流失负荷。按规范在试验区田间、排水沟出口和沟塘湿地内及出口处取样(见图2)。当排水明沟有排水需要时进行取样; 定期监测湿地水质, 每隔5d取样一次, 遇降雨则加测。(2)水质分析。依照《水和废水监测分析方法》, 分别采用碱性过硫酸钾消解-紫外分光光度法和钼锑抗分光光度法分析化验水中全氮(TN)和全磷(TP)含量。(3)灌排水量。灌水量由斗渠首安装的超声波流量计测定。排水量由排水容积变化计。每条沟选取3~5个代表断面测量尺寸计算面积, 排水前用刻度尺读取水深。

### 3 结果与分析

2009、2010年控灌稻田灌水量分别为505和570mm, 平均537.5mm; 传统灌溉稻田灌水量分别为695和730mm, 平均712.5mm。2009、2010年试验区在水稻生育期均降雨15场次, 其降雨总量分别为480.4和531.2mm, 其中暴雨发生次数分别为4次和1次, 大于20mm的降雨分别发生5次和9次。稻田排水主要通过降雨径流形式排出, 2009、2010年, 控制灌溉稻田分别排水5次和7次, 其排水量分别为1 088.31和1 716.67m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>, 平均为1 402.49m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>; 传统灌排稻田分别排水6次和12次排水量

分别为 2 750.00 和 3 300.00m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>，平均为 3 025m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>。

**3.1 稻田明沟湿地协同系统氮磷负荷削减效果** PEDWS与传统灌排系统对比，能够有效地减少系统出口排水量，2009、2010年分别较传统灌排系统排水量减少 2 009.17 和 2 408.77m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>，减幅分别达到 73.06% 和 72.99%，平均为 73.03%；系统出口排水中 TN 和 TP 的浓度也明显低于传统灌排系统，其中 TN 的浓度降低较为明显，2009、2010 年 TN 浓度较传统灌排系统降幅平均为 63.51%，TP 浓度降幅平均为 27.50%；PEDWS 能够有效地控制稻田排水中 TN 和 TP 负荷，2009、2010 年 TN 排出负荷仅为 2.68 和 3.98kg/hm<sup>2</sup>，与传统灌排系统相比降幅平均为 90.17%；TP 负荷降幅平均为 79.53%（见表 2）。通过两年的试验研究发现，PEDWS 对稻田排水具有良好的控制作用，既减少稻田排水的量，又降低了氮磷的流失浓度，对稻田排水中氮磷等污染物实现原位削减。

表 2 PEDWS 系统氮磷流失负荷(江苏高邮)

| 项目                                     | 2009 年 |         |         | 2010 年 |         |         |
|--|--------|---------|---------|--------|---------|---------|
|  | PEDWS  | 传统灌排系统  | 控灌稻田    | PEDWS  | 传统灌排系统  | 控灌稻田    |
| 排水量/(m <sup>3</sup> /hm <sup>2</sup> ) | 740.83 | 2750.00 | 1088.31 | 891.23 | 3300.00 | 1716.67 |
| TN 平均浓度/(mg/L)                         | 3.62   | 11.20   | 13.17   | 4.47   | 10.99   | 9.73    |
| TN 负荷/(kg/hm <sup>2</sup> )            | 2.68   | 30.80   | 14.33   | 3.98   | 36.28   | 16.70   |
| TP 平均浓度/(mg/L)                         | 0.12   | 0.15    | 0.21    | 0.21   | 0.30    | 0.40    |
| TP 负荷/(kg/hm <sup>2</sup> )            | 0.09   | 0.41    | 0.23    | 0.19   | 1.00    | 0.69    |

注：表中平均浓度均为水量加权平均浓度。

随着农田排水引起的农业面源污染日益严重，以水利技术为主的解决农田面源污染的综合管理系统的研究受到了广泛关注，其中以俄亥俄州立大学开发的“地下灌溉-排水-湿地综合管理系统”（Wetland Reservoir Sub-Irrigation System, WRSIS）应用最为广泛。俄亥俄州立大学研究小组在 3 个地区通过多年的试验研究，WRSIS 系统可吸收大约 68% 的氮和 43% 的磷<sup>[13]</sup>。国内对 WRSIS 的研究从 2006 年开始，董斌等<sup>[14]</sup>改进 WRSIS 系统后将其应用在南方水稻区，试验结果表明改进的 WRSIS 系统对 TN 和 TP 的去除率分别为 50.9% 和 2.3%。对比试验结果表明 PEDWS 对稻田排水中的氮磷净化能力显著高于 WRSIS 系统，能更加有效地控制农田面源污染。

**3.2 控制灌溉稻田排水中氮磷径流失规律** 有效地控制稻田排水量和降低排水中氮磷浓度是减轻农业面源污染的重要途径。控灌稻田与传统灌排稻田对比，能够大幅减少稻田排水量（见表 2），2009、2010 年控灌稻田的排水量较传统灌溉稻田分别减少 1 661.69 和 1 583.33m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>，减幅达到 60.43% 和 47.98%，平均达到 54.21%。主要原因在于控灌稻田在各生育期（除返青期）灌水后田面均不建立水层，与传统灌排稻田相比具有更大的调蓄能力，有效截留降雨，减少地表径流的产生。不同灌溉处理条件下稻田排水中 TN 的浓度差别不大，2009 年控灌稻田排水中 TN 平均浓度较传统灌排处理高出 17.59%，而 2010 年却低于传统灌排处理 11.46%。稻田排水中 TP 浓度在不同灌溉处理下存在差异，2009、2010 年控灌稻田排水 TP 浓度分别高出传统灌排处理 40.00% 和 33.33%，平均高出 36.67%。控灌稻田脱水过程有利于氮磷向土壤中转移，但控灌稻田多处于无水层状态，降雨对稻田土壤的扰动较大。稻田磷素主要吸附于土壤颗粒，所以控灌稻田排水中磷素浓度高于传统灌排处理。2009、2010 年控灌稻田 TN 的流失负荷仅为 14.33 和 16.70kg/hm<sup>2</sup> 分别较传统灌排处理降低了 53.47% 和 53.97%，降幅平均为 53.72%；TP 负荷为 0.23 和 0.69kg/hm<sup>2</sup> 分别较传统灌排处理减少 43.90% 和 31.00%，减幅平均为 37.45%，有效地减少稻田氮素和磷素的流失。

国内外学者在研究节水灌溉稻田排水中也得出相似的结论，Hitomi 等<sup>[15]</sup>研究发现节水灌溉稻田排水量仅为传统灌溉稻田的 27%，其原因是节水灌溉增加了稻田蓄雨能力，减少了降雨排水量；国内学者乔欣等<sup>[6]</sup>、洪林等<sup>[16]</sup>研究发现稻田采用节水灌溉后排水中 TN 和 TP 浓度高出常灌 14.77% 和 3.96%，但节水灌溉稻田排水量的减少占主导作用。因此，节水灌溉稻田 TN 和 TP 的排放总量得到有效减少。张丽娟等<sup>[17]</sup>的研究结果表明节水灌溉稻田 TN 和 TP 的流失量较传统灌溉降低 23% 和 10%。

**3.3 控制排水明沟截污效果** 控制排水明沟氮素流失主要发生在水稻生育前期，磷素流失主要发生在拔节孕穗期；对比入沟负荷与出沟负荷，控制排水明沟对TN的去除能力随生育期逐渐下降，而对TP的去除能力在生育末期出现反弹(见图3、图4)。控制排水明沟对农田排水中氮磷具有显著的去除效果，2009、2010年入沟TN负荷分别为14.33和16.70kg/hm<sup>2</sup>，经过控制排水明沟净化以后出沟负荷仅为3.67和7.55kg/hm<sup>2</sup>，TN的去除率分别为74.39%和54.79%，平均达到64.59%；入沟TP负荷分别为0.23和0.69kg/hm<sup>2</sup>，而出沟负荷仅为0.12和0.27kg/hm<sup>2</sup>，TP的去除率分别为47.83%和60.87%，平均达到54.35%。控制排水明沟能够有效地削减稻田排水中氮磷负荷峰值，6月22日入沟TN和TP负荷分别为9.38和0.064kg/hm<sup>2</sup>，在控制排水明沟中滞留3d和5d后排出，出沟TN负荷总量为1.90kg/hm<sup>2</sup>，TP负荷总量为0.030kg/hm<sup>2</sup>，TN和TP的去除率分别达到79.74%和53.13%。以上结果表明，控制排水明沟能够有效地截留农田排水中氮磷。其原因在于控制排水抬高了沟水位从而降低了稻田排水水力梯度，有利于排水中氮磷沉降，同时促进了稻田排水向沟边农田补给；延长了稻田排水在明沟中的停留时间，有利于排水中氮磷沉降和沟中植物和底泥对其吸收，增加了水面蒸发消耗，减少了明沟系统出口的排水量，降低了排水中氮磷等污染物的浓度。2009、2010年平均入沟水量为1402.49mm，平均出沟水量仅为725.06mm，减少排水量48.30%。2009、2010年排水沟出口排水TN和TP的浓度平均为7.73和0.27mg/L，较入沟浓度11.06和0.33mg/L分别减少30.11%和18.18%。

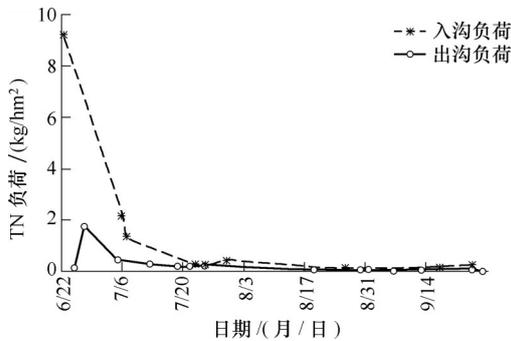


图3 控制排水明沟TN进出负荷(江苏高邮, 2009年)

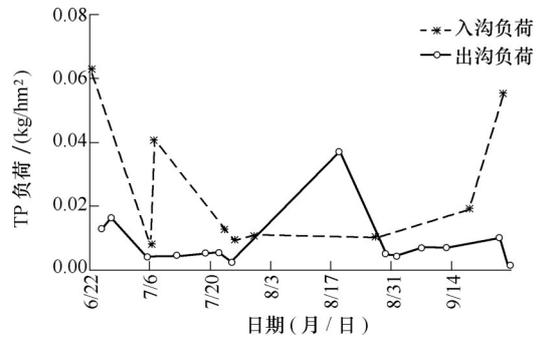


图4 控制排水明沟TP进出负荷(江苏高邮, 2009年)

国内外学者也得出了相似的结果，Ingrid等<sup>[7]</sup>研究得出控制排水与传统排水相比能减少排水量79%~94%，分别减少氮磷流失79%~94%和58%~85%；Lalonde等<sup>[18]</sup>还设置了不同的控制水位，发现随着控制水位的升高，排水量和氮磷流失量减少；国内学者罗纨等<sup>[19]</sup>和郭相平等<sup>[20]</sup>人研究表明控制排水能够有效地减少排水量和氮磷等污染物的流失。

**3.4 湿地截污净化效果** 沟塘湿地氮素流失主要发生在生育前期，而磷素流失主要集中在生育后期，对比湿地氮磷进出负荷，湿地氮磷流失负荷主要受进入湿地氮磷负荷影响(见图5、图6)。合理调控湿地排水可有效减少PEDWS排水中污染物的排出，2009、2010年湿地出口排水中TN负荷分别为2.68和3.98kg/hm<sup>2</sup>，与进入湿地负荷相比分别减少26.98%和47.28%，平均减少37.13%；TP负荷分别为0.09和0.19kg/hm<sup>2</sup>，与湿地输入负荷相比分别减少25.00%和29.63%，平均减少27.32%。沟塘湿地系统可大幅削减进入湿地的氮磷峰值，2009年进入湿地的TN和TP负荷峰值为1.77和0.037kg/hm<sup>2</sup>，而湿地出口排出负荷分别为0.52和0.021kg/hm<sup>2</sup>，仅为进入负荷峰值的29.38%和56.76%。

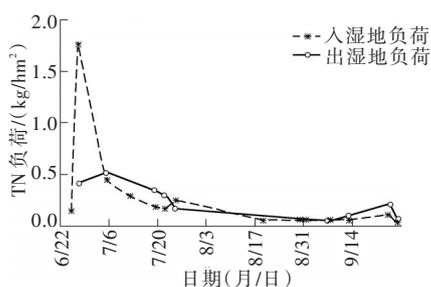


图5 沟塘湿地TN进出负荷(江苏高邮, 2009年)

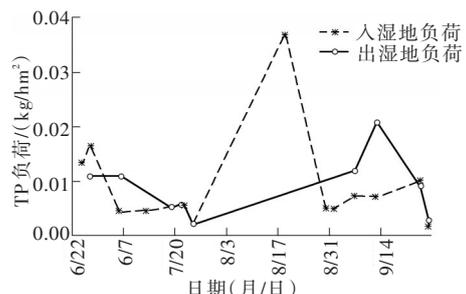


图6 沟塘湿地TP进出负荷(江苏高邮, 2009年)

湿地系统能够通过土壤吸附、植物吸收和生物降解等一系列作用,降低湿地水体中的氮、磷化合物的浓度,同时减缓水流速度,促进氮、磷等污染物沉降,净化农田排水中氮磷等污染物。2009、2010年湿地出口排水中TN和TP的平均浓度为6.15和0.22mg/L,较进入湿地水体的浓度分别减少22.44%和18.52%。国内外的大量研究结果也表明沟塘湿地具有显著的减污效果,潘乐等<sup>[21]</sup>研究了人工湿地对早稻排水和晚稻排水TN和TP的去除率分别达到26%~64%和8%~76%;余江等<sup>[22]</sup>研究了不同输入负荷下人工湿地对氮磷的滞留效果,TN和TP的去除率分别达到60%~86%和80%~90%;国外学者Braskerud<sup>[23]</sup>和Yates等<sup>[24]</sup>研究发现人工湿地对磷素的滞留量达到21%~44%。

#### 4 结论

通过对稻田与明沟湿地协同系统(PEDWS)的研究发现:(1)控制灌溉稻田大幅减少了稻田排水量,有效地减少了稻田氮磷排放负荷。控制灌溉稻田排水量分别较传统灌溉减少54.21%,降低了田间排污能力。控制灌溉稻田TN和TP排放负荷较传统灌溉减少53.72%和37.45%。(2)明沟控制排水能够减少明沟排水量,降低明沟出口排水中氮磷浓度,有效截留稻田排水中的氮磷等污染物。湿地能够有效地净化水体中氮磷等污染物,降低湿地出口排水中氮磷浓度,发挥截污净化效果。控制排水减少明沟排水量48.30%,降低明沟出口排水中氮磷浓度30.11%和18.18%,TN和TP去除率分别64.59%和54.35%;明沟排水进入湿地滞留1~2周,TN去除率达到37.13%,TP去除率达到27.32%。因此,通过合理的调控明沟和湿地排水,可有效地发挥沟塘净化作用。(3)PEDWS可有效地减少系统出口排水量,降低系统排水中氮磷浓度,实现对稻田排水中氮磷的原位削减。PEDWS较传统灌排系统减少系统排水量73.03%,系统出口TN和TP浓度分别降低63.51%和25.00%,TN和TP流失负荷分别减少90.17%和79.53%。PEDWS可为控制农业面源污染,改善灌区水环境,走可持续农业的发展道路提供一条行之有效的途径。

#### 参 考 文 献:

- [ 1 ] Jin S Kim, Seung Y Oh, Kwang Y Oh . Nutrient runoff from a Korea rice paddy watershed during multiple storm events in the growing season[J] . Journal of Hydrology, 2006, 327: 128-139 .
- [ 2 ] Abha Chhabra, Manjunath K R, Sushma Panigrahy . Non-point source pollution in Indian agriculture: Estimation of nitrogen losses from rice crop using remote sensing and GIS[J] . International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2010, 12: 190-200 .
- [ 3 ] Peng Shizhang, Yang Shihong, Xu Junzeng, et al . Field experiments on greenhouse gas emissions and nitrogen and phosphorus losses from rice paddy with efficient irrigation and drainage management[J] . Science in China: Technological Sciences, 2012, 54(6): 1581-1587 .
- [ 4 ] 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 .
- [ 5 ] 崔远来,李远华,吕国安,等 . 不同水肥条件下水稻氮素运移与转化规律研究[J] . 水科学进展, 2004, 15(3): 280-285 .
- [ 6 ] 乔欣,邵东国,刘欢欢,等 . 节灌控排条件下氮磷迁移转化规律研究[J] . 水利学报, 2011, 42(7): 862-868 .
- [ 7 ] Ingrid Wesström, Ingmar Messing, Harry Linnér, et al . Controlled drainage-effect on drain outflow and water quality[J] . Agricultural Water Management, 2001, 47: 85-100 .
- [ 8 ] Ingrid Wesström, Ingmar Messing . Effects of controlled drainage on N and P losses and N dynamics in a loamy sand with spring crops[J] . Agricultural Water Management, 2007(87): 229-240 .
- [ 9 ] 罗纨,贾忠华,方树星,等 . 灌区稻田控制排水对排水量及盐分影响的试验研究[J] . 水利学报, 2006, 37(5): 608-614 .
- [ 10 ] Zhang Ting, Xu Dong, He Feng, et al . Application of constructed wetland for water pollution control in China during 1990-2010[J] . Ecological Engineering, 2012, 47: 189-197 .

- [ 11 ] 彭世彰, 高焕芝, 张正良. 灌区沟塘湿地对稻田排水中氮磷的原味消减效果及机理研究[J]. 水利学报, 2010, 41(4): 406-411.
- [ 12 ] 彭世彰, 徐俊增. 水稻控制灌溉理论与技术[M]. 南京: 河海大学出版社, 2011: 30-34.
- [ 13 ] 燕红, 山广茂. 稻田退水污染处理方法初探——WRSIS 技术引进与改良[J]. 长春大学学报, 2012, 22(6): 698-700.
- [ 14 ] 董斌, 茆智, 李新建, 等. 灌溉-排水-湿地综合管理系统的引进和改造应用[J]. 中国农村水利水电, 2009, 11: 9-12.
- [ 15 ] Tadayoshi Hitomil, Yusaku Iwamoto, Asa Miura, et al. Water-saving irrigation of paddy field to reduce nutrient runoff[J]. Journal of Environmental Sciences, 2010, 22(6): 885-891.
- [ 16 ] 洪林, 李瑞鸿. 南方典型灌区农田地表径流氮磷流失特性[J]. 地理研究, 2011, 30(1): 115-124.
- [ 17 ] 张丽娟, 马友华, 石英尧, 等. 灌溉与施肥对稻田氮磷径流流失的影响[J]. 水土保持, 2011, 25(6): 7-12.
- [ 18 ] Lalonde V, Madramootoo C A, Trenholm L, et al. Effect of controlled drainage on nitrate concentrations in sub-surface drain discharge[J]. Agricultural Water Management, 1996, 29: 187-199.
- [ 19 ] 罗纨, 贾忠华, 方树星, 等. 灌区稻田控制排水对排水量及盐分影响的试验研究[J]. 水利学报, 2006, 37(5): 608-618.
- [ 20 ] 郭相平, 张展羽, 殷国玺. 稻田控制排水对减少氮磷损失的影响[J]. 上海交通大学学报(农业科学版), 2006, 24(3): 307-310.
- [ 21 ] 潘乐, 茆智, 董斌, 等. 人工湿地对稻田氮磷污染的去除了试验[J]. 武汉大学学报(工学版), 2011, 44(5): 586-589.
- [ 22 ] 余江, 陈文清, 刘建泉, 等. 人工湿地对氮磷去除效果试验研究[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2012, 44(3): 7-12.
- [ 23 ] Braskerud B C. Factors affecting phosphorus retention in small constructed wetlands treating agricultural non-point source pollution[J]. Ecological Engineering, 2002, 19: 41-61.
- [ 24 ] Charlotte R Yates, Shiv O Prasher. Phosphorus reduction from agricultural runoff in a pilot-scale surface-flow constructed wetland[J]. Ecological Engineering, 2009, 35: 1693-1701

## The effect of Paddy Eco-Ditch and Wetland System on nitrogen and phosphorus pollutants reduction in drainage

PENG Shi-zhang<sup>1</sup>, XIONG Yu-jiang<sup>1</sup>, LUO Yu-feng<sup>1</sup>, GU Hong<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Gaoyou Water Authority, Gaoyou 225600, China)

**Abstract:** A series of water environment problems as water eutrophication and non-point pollution are caused by nitrogen and phosphorus loss in farmland drainage. This paper presents a system of water comprehensive management to control agricultural non-point source pollution, which is called Paddy Eco-Ditch and Wetland System (PEDWS). It investigates the mechanism and subtractive effect of the system on nitrogen and phosphorus loss in farmland drainage. The results indicate that PEDWS could effectively decrease the paddy field drainage and concentration of nitrogen and phosphorus in the drainage that realizes nitrogen and phosphorus pollutants reduction in paddy fields. The drainage of PEDWS is 73.03% less than the traditional irrigation and drainage system. The total nitrogen (TN) and phosphorus (TP) loads of PEDWS are 90.17% and 79.53% less than traditional irrigation and drainage system. The components of PEDWS also have effect on pollution control. Controlled irrigation could effectively decrease the paddy field drainage and concentration of nitrogen and phosphorus in the drainage, reducing ability to produce pollution and risk of pollution discharge. The TN and TP loads of controlled irrigation paddy field are 53.72% and 37.45% less than traditional irrigation paddy field. The TN removal rate in controlled eco-ditch reaches 64.59% and 54.35% for TP. Wetland could effectively purify nitrogen and phosphorus loss in drainage. The TN removal rate reaches 37.13% and 27.32% for TP. This research results could provide theoretical support and practical guidance for the application of the PEDWS in China.

**Key words:** paddy field; controlled irrigation; controlled drainage; wetland; nitrogen and phosphorus

(责任编辑: 韩 昆)