

灌排控制措施结合沟塘湿地改善水稻灌区排水水质的模拟分析

邹家荣¹, 罗 纨^{1*}, 李 林², 贾忠华¹, 丁世洪², 张志秀²

(1. 扬州大学水利科学与工程学院, 扬州 225009; 2. 扬州市江都区沿运灌区管理处, 扬州 225261)

摘要: 针对水稻灌区农田排水氮素输出影响水环境的问题, 该研究以大运河扬州段沿运灌区为例, 在大田监测的基础上, 运用田间水文模型——DRAINMOD 模拟分析不同田间灌排控制措施的减排效果, 并探讨利用农田周边沟塘湿地净化排水, 达到灌区小流域不同水质目标的水管理方案。结果表明, 在研究区目前常规灌溉(定额为 9 600 m³/hm², 合水深 960 mm)和常规排水(排水沟深 0.6 m, 等效间距 50 m)模式下, 农田单位面积上的年均排水总量高达 1 162 mm, 是灌溉量与降雨量之和的 59%; 其中地表径流占比 51%, 仅有 25%是由降雨造成的不可控部分。采取理想的避免地表径流的干湿交替控制灌溉措施(年均灌溉量 320 mm)可以显著降低排水量和氮素的输出, 相较于常规灌溉模式, 可削减 55%的排水量和 59%的氮素输出。研究区农田控制排水削减排水总量的效果较差, 且在一定程度上增加了地表径流。由于地表排水中氮素浓度(2.85 mg/L)高于地下排水(其浓度为 1.80 mg/L), 地表排水比例的提高会增加排水对氮素的输出。从研究区小流域范围内沟塘湿地分布考虑, 目前灌溉与排水量均过高, 现有沟塘湿地不足以发挥作用; 只有通过控制灌溉措施显著减少排水量以后, 才有可能利用现存的湿地面积将排水中的氮素浓度降低到地表水水质标准Ⅴ类水。因此, 该研究建议在合理控制灌排水量的基础上, 通过整合、优化灌区现有沟塘湿地资源来有效改善研究区农田排水水质。研究可为类似地区农田排水污染控制提供理论依据。

关键词: 氮; 排水; 灌溉; 水稻灌区; DRAINMOD 模型; 氮素; 水质

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2022.11.011

中图分类号: S276.3; X522

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2022)-11-0098-10

邹家荣, 罗纨, 李林, 等. 灌排控制措施结合沟塘湿地改善水稻灌区排水水质的模拟分析[J]. 农业工程学报, 2022, 38(11): 98-107. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2022.11.011 http://www.tcsae.org

Zou Jiarong, Luo Wan, Li Lin, et al. Simulating the effects of irrigation and drainage control combined with ditch-pond wetlands on drainage water quality improvement in a rice irrigation area[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2022, 38(11): 98-107. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2022.11.011 http://www.tcsae.org

0 引言

长江下游平原区气候温暖、降雨充沛, 现行一年两熟的稻麦轮作制度最大限度地利用了当地有限的土地资源和丰富的光热资源, 创造了“鱼米之乡”粮食生产的奇迹。然而, 农业生产过程中普遍使用化肥农药等物质, 这些物质部分随农业排水进入下游水体, 成为了区域水环境的污染源。氮素是粮食生产过程中最重要的营养元素, 其利用率较低, 极易随农田径流过程发生流失。对于农田氮素流失的控制需要从源头到末端进行综合治理^[1-2]。中国近年来广泛开展了化肥农药双减措施, 从源头上控制农田氮素流失已取得了一定的成效^[3]; 但在末端治理方面成效不突出。目前关于农田氮素输出过程的控制以及末端处理效果的研究还不充分, 对不同田间管理措施下从灌溉端和排水端进行农田氮素流失控制的方法和效果均缺

乏深入研究。此外, 农区现存沟塘湿地系统对污染物的末端拦截能力及其对田间氮素流失控制措施的响应等都值得深入探讨。

由于水稻耗水量大, 即使在湿润的南方平原区, 稻田仍需补充一定的灌溉水来满足水稻生长要求。近年来, 随着水稻节水灌溉研究的深入, 一种节水灌溉方法——干湿交替灌溉在水稻种植中逐渐得到认可^[4-5]。徐云姬等^[6-8]通过对水稻干湿交替灌溉方法的系列研究发现, 轻度干湿交替灌溉既可保证水稻产量又有益于品质的提高; 他们建议干湿交替灌溉应用于壤土区时的控制下限以稻田地下水位降至田面以下 20~25 cm 为宜。在稻麦轮作区, 为满足旱作小麦降渍要求, 农田都配套有相应的排水系统。在水稻生长季, 开敞的排水农沟形成的水力梯度造成了稻田水分损失过快, 降低了灌溉水和雨水资源的利用率。因此, 可以在适当的时段抬高排水沟出口高度, 降低农田排水强度, 削减排水量。农田控制排水是自 20 世纪 70 年代起在欧美等地大力推行的农田排水管理模式, 其削减排水量及氮素输出负荷的效果得到了肯定^[9-11]。但现有研究大多针对旱作区埋深较大的暗管排水情况, 控制排水减少氮素流失的效果主要体现在对以硝态氮为主的氮素总负荷的削减; 对于水稻种植区的减排效果, 尤其是对氨氮浓度和总量输出的削减作用仍有

收稿日期: 2021-12-23 修订日期: 2022-03-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(51979239); 江苏省水利科技项目(2018052)

作者简介: 邹家荣, 博士生, 研究方向为农业水资源管理与环境保护。

Email: zjr3580@163.com

*通信作者: 罗纨, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为农业水资源管理与环境保护。Email: luowan@yzu.edu.cn

待进一步研究。

一般认为，随机性较强的暴雨过程造成了农田氮素的流失；但灌区相对固定的灌溉制度与随机降雨过程的叠加作用是氮素随农田排水过程大量流失的重要原因。从理论上讲，对于相对可控的灌溉排水过程进行合理控制可以减少氮素的输出^[12-13]；但此类措施的实施效率受到复杂多变的气象、土壤、农作情况影响，存在极大的不确定性^[14-15]。尤其是水稻生长的夏秋季节，频发的暴雨事件使得田间控制措施的作用受到限制。Hansen 等^[16]研究指出，田间措施依赖于农户参与和政府补贴，其回报低且效果不佳；相对而言，利用湿地对排水进行异地集中处理的方式则更加经济可行^[17]。水稻灌区大都拥有一定数量的排水沟塘湿地，可以对排水中的污染物进行降解。不少研究都提出，一定的湿地面积比可实现对农田排水的有效净化；但是，气象、土壤以及种植结构等条件的差异，使得不同地区达到一定水质净化目标所需的湿地面积也因地而异^[18-19]。水稻灌区现有的沟塘湿地系统对于农业污染物的净化能力与农田排水过程的关系以及匹配效果目前仍不够明晰。

为了揭示田间灌排控制措施削减排水污染的效果及局限性，并探讨水稻灌区排水水质控制的可行性和必要性，本文在大田监测研究的基础上，利用田间水文模型分析了田间就地控制措施（包括灌溉端和排水端）对排水和氮素的影响，并探讨了在小流域尺度上实现水质达标所需要匹配的处理湿地面积。具体的研究内容包括：1) 灌区现状情况下，农田排水总量及地表/地下排水量的占比，由降雨造成的不可控排水量，以及节水减排的潜力；2) 从灌溉和排水两端着手的田间控制措施减排效果及限制因素；3) 利用排水通道上的沟塘湿地系统削减污染物的潜力，以及实现灌区小流域范围内排水水质达标的田间控制措施和处理湿地的匹配面积。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于江苏省扬州市江都区京杭大运河东侧的沿运灌区（119°30'E，32°33'N），属于北亚热带季风湿润气候区；区内地势平坦，土壤多为粉砂壤土；年降雨量约 1 020 mm，其中 5—9 月降雨量占全年总量的 70% 左右；年平均气温 15.6℃，年蒸发量 1 009.6 mm。研究区内普遍实行水稻与冬小麦轮作制度，农田排水以明沟为主，沟深 60 cm，间距 100 m。

1.2 田间水文水质监测方法

为了掌握农田排水及水质变化过程，如图 1 所示，本文于 2018 年 6 月—2021 年 2 月在江苏省扬州市江都区农田水利科学研究所试验田（图 1）及周边开展了监测研究；在试验田内布置了水位监测井以及 2 组深度不等的地下水水质监测井群。水位监测井中安装 HOBO 水位计（U20-001-04 Onset），以 15 min 测试间隔记录水位变化。每组水质监测井群包括 4 个不同深度（分别为 30、60、90 和 120 cm）的单井，取样点位置如图 1 所示。水质监测指标包括硝态氮（NO₃-N）和氨氮（NH₃-N）等，其中，

硝态氮采用紫外分光光度法，氨氮采用纳氏试剂分光光度法检测。监测时间为 2018—2019 年，主要为水稻生长季，即 6—11 月；取样间隔为每 2 周一次。同时，在排水农沟出口处设置了控制堰板，以便在不需排水时抬高排水出口高度。

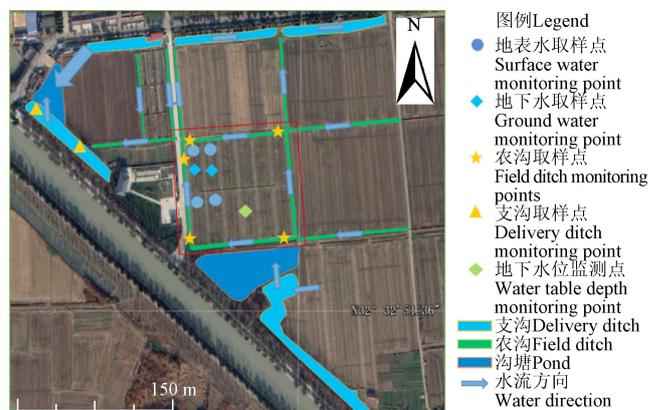


图 1 研究区试验田及排水沟塘和监测点布置

Fig.1 Layout of the experimental fields, drainage ditches and ponds, and monitoring points in the study area

根据现场调查和测量，研究区农田总面积为 5.61 hm²，沟塘总面积为 0.82 hm²；除去农沟外，沟塘与农田的面积比为 12.8%。沟塘系统分布的详细情况参见文献^[20]。根据排水功能及分布特征，研究区排水沟塘系统可以大致分为农沟、支沟和池塘 3 种类型，具体参数列于表 1。图 1 中沟塘系统位置是根据研究区位置图精细划定，部分排水沟是通过涵管连接。另外，由于排水沟功能及地势的原因，排水路线不规则。图中水流方向为夏季大量排水时，排水沟水流的实际流向。

表 1 研究区排水沟塘分布数量及面积

Table 1 Number and area of different types of ditches and ponds in the study area

| 类型 Types | 数量 Number | 面积 Area/hm ² |
|-------------------|-----------|-------------------------|
| 农沟 Field ditch | 10 | 0.10 |
| 支沟 Delivery ditch | 6 | 0.49 |
| 池塘 Pond | 2 | 0.23 |
| 小计 Subtotal | 18 | 0.82 |

1.3 DRAINMOD 原理及输入参数

为了探讨不同田间灌排措施对于排水过程及氮素输出的影响，本文利用田间水文模型——DRAINMOD 分析了不同灌排管理措施的减排效果。DRAINMOD 模型是美国农业部自然资源保护局推荐的一个田间水文预测模型，因其应用简便、预测精度高的优点在世界范围内得到广泛应用^[21]。模型根据输入的气象、土壤和排水系统设计等参数逐日、逐时计算农田两个排水沟/管中间点的水量平衡，包括入渗、蒸发蒸腾量、地表径流、地下排水量和深层渗漏等。模型可预测降雨以及灌溉条件下，常规排水以及控制排水模式下的农田地表、地下径流过程。

本文基于研究区大田监测数据分析 DRAINMOD 模型的适用性。模型所需的气象、土壤以及排水系统设计

等输入参数通过实测获得。气象数据主要包括最高气温、最低气温、风速、日照时数、相对湿度和降雨量等。监测期气象数据由试验田西侧 100 m 处安置的 PC 400 自动气象站 (Campbell Scientific) 进行记录。土壤参数测定包括田间不同土层深度的土壤水分特征曲线、以及土壤垂向和侧向饱和和导水率。分层取土后采用高速恒温冷冻离心机 (CR21N 型, 日本) 测定土壤水分特征曲线; 另外, 用衬片式土壤采样器 (0415SB 型, 荷兰) 在田间钻孔, 采用注水法测定了侧向饱和和导水率。排水系统参数根据研究区实际情况确定。田间调查结果显示, 研究区现有排水农沟深度较小, 为 60 cm, 等效间距为 50 m。本文在实测饱和和导水率和土壤水分特征曲线的基础上, 对无法实测的土壤排空体积、潜水上通量、不透水层深度、排水模数、地表坑洼程度等参数进行率定调参。

在验证模型适用性的前提下, 采用长序列气象数据 (1955—2020 年) 模拟了不同灌溉排水控制措施下农田地表、地下径流过程以及灌溉水量的变化。长序列气象数据源于中国气象局气象数据中心发布的江苏省扬州高邮站 (序号 58 241、位置 119°27'E, 32°48'N, 海拔 5.4 m) 1955—2020 年的逐日气象数据, 包括日最高、最低气温、风速、日照时数、相对湿度和降雨量等。运用 FAO56 Penman-Monteith 公式计算逐日潜在蒸散发 (Potential Evapotranspiration, PET) 后, 生成模型输入格式文件输入 DRAINMOD 模型。

1.4 控制农田排水氮素输出的田间灌排控制措施和沟塘湿地净化效果研究方法

图 2 是在农业小流域范围内控制农田排水氮素输出的田间灌排控制措施以及异地处理湿地净化方法示意图。本文定义的农业小流域是指四周由道路所包围的农业集水区, 主要由农田组成、同时包括一些单个面积相对较小的分布沟塘区域, 排水自此排出后进入水质保护要求较高的大型河湖水体。根据小流域内的排水水文过程, 本文将其实划分为包括农田灌排渠系组成的田间灌排控制 (就地) 系统和由较大排水沟塘湿地组成的湿地处理 (异地) 系统 (图 2)。针对研究目标, 本文采取大田监测和模型模拟相结合的手段开展相关研究。其中, 田间试验旨在获得农田排水中的氮素浓度以及田间水文数据, 并为模型研究提供验证依据; 随后, 应用模拟模型分析长序列气象条件影响下, 不同控制措施 (情景) 对农田排水氮素输出的削减效果。

1.4.1 田间不同灌排控制措施

为了确定田间灌排控制措施对排水水量与水质的影响, 本文将田间控制措施分解成如图 2 所示的灌溉端和排水端行为, 分别确定排水以及水质变化:

1) 灌溉端: 现行的灌溉模式按照既定灌溉制度, 即预定的日期定量灌溉, 未充分考虑降雨的影响。这不仅导致农田排水量的增加, 也造成了雨水资源的浪费。为此, 本文利用 DRAINMOD 模型中的灌溉模块分析了干湿交替的控制灌溉模式运行效果; 模型根据农田地下水埋深、土壤干燥程度来判断是否需要灌溉, 以避免地

表径流发生。考虑灌区土壤多为砂壤土, 在模型中设定田间水位降至田面以下 25 cm 时再进行灌溉, 如遇 10 mm 以上降雨则推迟灌溉。因此, DRAINMOD 模型模拟的是一种较为理想的气候智能型 (Climate smart) 灌溉模式。

2) 排水端: 目前灌区的排水农沟都处在常年开启状态, 导致水稻生长期过度排水。为此, 可通过控制排水出口高度的方式临时降低排水强度, 即在稻作期实行控制排水。模拟过程中, 将农沟排水出口深度在水稻季由 60 cm 深抬高到 20 cm, 以减少排水流量。在 7 月下旬晒田期和 10 月底收获期降低到原来的深度。

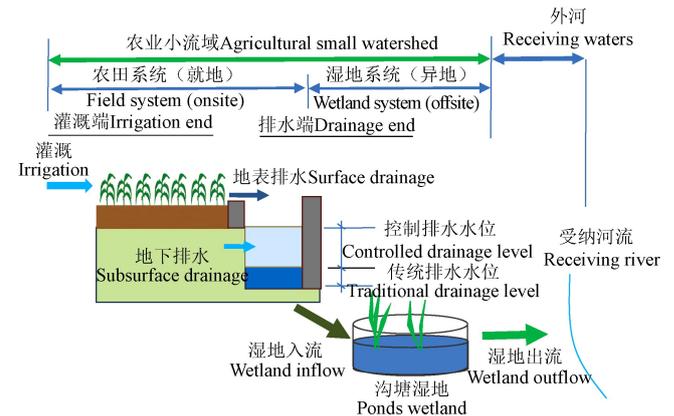


图 2 农业小流域研究范围排水管理过程示意图

Fig.2 Sketch of drainage water management process within research scope of a small agricultural watershed

根据上述在灌溉端和排水端可采取的控制措施, 不同模拟情景组合列于表 2, 分析步骤如下:

1) 确定现状常规灌溉和常规排水模式下, 排水总量及地下、地表排水所占的比例, 明确降雨和灌溉分别对排水量的贡献率, 包括:

①确定分别由灌溉和降雨导致的排水量, 将仅由降雨造成的排水认为是不可控制部分, 由灌溉造成的排水是可控排水量;

②对排水组分进行分割, 确定地表排水和地下排水量;

2) 确定在田间范围内, 从灌溉端和排水端分别采用不同控制措施的效果, 包括:

①灌溉端由现行的灌溉制度改进为避免地表径流的控制灌溉模式;

②排水端在不需要排水的阶段由常规排水模式改为控制排水, 以降低田间排水强度;

③确定上述灌排控制措施削减农田地表径流及地下排水的效果;

3) 确定排水 (包括地表和地下排水) 中氨氮浓度, 以及田间灌排控制措施削减氮素输出的效果和制约因素, 包括:

①不同灌排控制措施对地表和地下排水中氨氮的削减效果;

②造成田间灌排控制措施减排效果不佳的原因。

根据图 2 所示的思路, 在完成农沟排水计算和径流分割以后, 可以得出单位面积上田间排水量 (Q , cm) 及

氮素浓度 (c , mg/L) :

$$Q = Q_d + Q_s \quad (1)$$

$$c = \frac{c_s Q_s + c_d Q_d}{Q} \quad (2)$$

式中 Q_d 为单位面积上地下排水量, cm; Q_s 为单位面积上地表排水量, cm; c_d 为地下排水中氮素浓度, mg/L; c_s 为地表排水中氮素浓度, mg/L。

定义地下排水与地表排水的流量比 k_w 为 Q_d/Q_s , 浓度比 k_c 为 c_d/c_s , 则式 (2) 可以转化为

$$c = c_s \frac{1 + k_c k_w}{1 + k_w} \quad (3)$$

式 (3) 表明排水污染物浓度取决于地表排水和地下排水流量分割及其污染物浓度的差别。

表 2 田间灌溉端和排水端不同控制措施模拟情景

Table 2 Simulation scenarios for different control measures at the irrigation and drainage ends of the field level

| 情景 Scenarios | 控制措施 Control measures | 备注 Notes |
|----------------------|-----------------------------|---|
| 无灌溉 No irrigation | 灌溉量为 0 | 常规排水: 深度为 0.6 m 的农沟处于开敞状态 |
| 情景 1 Scenario 1 | 常规灌溉+ 常规排水 | 控制排水: 水稻季抬高农沟排水出口至田面以下 20 cm, 水稻晒田期 (07-20-07-30) 以及收获期不控制 |
| 情景 2 Scenario 2 | 常规灌溉+ 控制排水 | |
| 情景 3 Scenario 3 | 控制灌溉+ 常规排水 | 常规灌溉: 按照 960 mm 即 9 600 m ³ /hm ² 定期进行 |
| 情景 4 Scenario 4 | 控制灌溉+ 控制排水 | 控制灌溉: 稻田水位降至田面以下 25 cm 方可灌溉至地表积水状态, 常规排水情况下为 320 mm, 控制排水情况下 237 mm |

1.4.2 农业小流域范围内排水水质净化与沟塘湿地面积匹配要求

如图 2 所示, 排水从农田进入排水沟和池塘组成的湿地系统, 其中的污染物可得到一定程度的净化。若要实现农业小流域范围内水质达标, 就需要匹配一定的湿地面积。这里将沟塘合并作为一个整体考虑, 污染物的降解过程用一阶反应方程表示。假设小流域的水质控制目标是将排水中污染物浓度降至 c_t , 在处理湿地中需要的水力停留时间 (t_h , h) 为

$$t_h = -\ln(c_t/c_0)/r \quad (4)$$

式中 c_t 为目标浓度, mg/L; c_0 为初始浓度, mg/L; r 为污染物降解常数。

相应所需处理湿地的面积 (A_w , hm²) 为

$$A_w = Q t_h / h \quad (5)$$

式中 h 为湿地水深, m。

所需处理湿地与农田的面积比 (ε) 为

$$\varepsilon = A_w / A_f = \frac{Q t_h / h}{Q / H_d} = \frac{H_d t_h}{h} \quad (6)$$

式中 A_f 为农田面积, hm²; H_d 为排水平均到农田面积上的水深, m。

2 结果与分析

2.1 模型率定和验证结果

本文利用研究区 2018 年 6 月 5 日—2019 年 6 月 4 日

的地下水位埋深进行 DRAINMOD 模型率定, 利用 2019 年 6 月 5 日—2021 年 2 月 28 日的地下水位进行模型验证, 结果如图 3 所示。在模型率定期, 农田地下水位在降雨和灌溉影响下波动, 模拟值和观测值变化趋势基本同步。在每年 6—10 月水稻生长期, 降雨和灌溉量均较大, 模拟值和实测地下水位都接近地表; 在 7 月底稻田排水晒田, 地下水位有所下降; 每年 11 月—次年 5 月的冬小麦生长期, 研究区基本不灌溉, 地下水位相对较低, 受到间歇降雨的影响, 地下水位的模拟值和实测值的波动较大。总体而言, 模型模拟值与实测值接近, 总体变化趋势一致。率定期模型模拟值与观测值比较, 相关系数为 0.94, 纳什效率系数 (Nash-Sutcliffe efficiency coefficient, NSE) 为 0.84, 均方根误差 (Root Mean Squared Error, RMSE) 为 15.62 cm。验证期内, 模型模拟值与观测值比较, 相关系数为 0.89, 纳什效率系数为 0.61, 均方根误差为 18.62 cm。根据 Skaggs 等^[22]的研究, 对于 DRAINMOD 模型模拟结果, 当地下水位误差在 20 cm 以内、纳什效率系数大于 0.6 时说明模型率定是非常成功的。可见, DRAINMOD 模型能够很好地模拟本研究区稻麦轮作农田地下水位变化情况。经模型率定和验证后获得的参数输入值列于表 3。

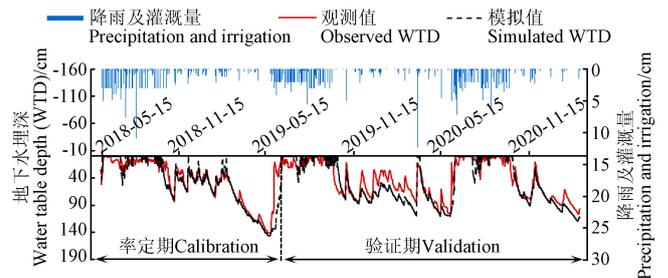


图 3 DRAINMOD 模型率定期和验证期农田地下水位埋深模拟值和实测值

Fig.3 Measured and DRAINMOD simulated field water table depth during the model calibration and validation periods

2.2 DRAINMOD 模型模拟结果分析

2.2.1 现状灌排模式下灌区排水量及其分割

根据研究区 1955—2020 年长序列气象数据, 运用 DRAINMOD 模型模拟的田间水量平衡结果如图 4 所示: 在无灌溉情况条件下 (图 4a), 单由降雨造成的年排水量为 293 mm, 包括 119 mm 的地表排水和 174 mm 的地下排水。相较于人工灌溉情况, 本文将仅由降雨造成的排水量认为是不可控水量。图 4b (情景 1) 显示现状情况下 (常规灌溉+常规排水) 的排水总量及其分割情况: 总排水量为 1 162 mm, 占灌溉量与降雨量之和的 59%, 其中地下和地表排水量接近, 分别为 567 mm (49%) 和 595 mm (51%), 地下排水与地表排水的比例 (k_w) 为 0.95。因灌溉量较大, 上述单由降雨造成的不可控排水量 (293 mm) 只占到总排水量 (1 162 mm) 的 25%, 其中地表排水中不可控的比例为 20%, 地下排水不可控比例为 31%。可见, 本文关注的沿运灌区当前用水存在大引大排现象, 在满足作物需水量的前提下, 适度减少灌溉水量, 可相应地减少排水输出量。

表 3 DRAINMOD 模型主要输入参数
Table 3 Main input parameters for DRAINMOD simulations

| 参数类别 Parameter category | 参数名称 Parameter names | 参数值 Parameter values | | | | | | |
|---|--|-------------------------|-------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 土壤水分特征曲线 Soil water characteristic curve | 吸水水头/cm | 0 | 19 | 102 | 468 | 1 023 | 5 012 | 10 000 |
| | 体积含水率/($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$) | 0.444 | 0.43 | 0.409 | 0.354 | 0.298 | 0.233 | 0.204 |
| 土壤排水特性 Soil drainage characteristics | 地下水位埋深/cm | 0 | 6 | 20 | 40 | 60 | 90 | 150 |
| | 土壤可排空体积/cm | 0 | 0.037 | 0.416 | 1.476 | 3.127 | 6.529 | 18.1 |
| | 潜水上升通量/($\text{cm} \cdot \text{h}^{-1}$) | 0.5 | 0.5 | 0.095 5 | 0.022 9 | 0.008 6 | 0.002 4 | 0.000 3 |
| 排水系统设计 Drainage system design | 排水沟间距/cm | 5 000 | | | | | | |
| | 排水沟埋深/cm | 60 | | | | | | |
| | 不透水层深度/cm | 160 | | | | | | |
| | 排水模数/($\text{cm} \cdot \text{d}^{-1}$) | 2.5 | | | | | | |
| | 明沟水力半径/cm | 1.5 | | | | | | |
| | 农田蓄水深度/cm | 5 | | | | | | |

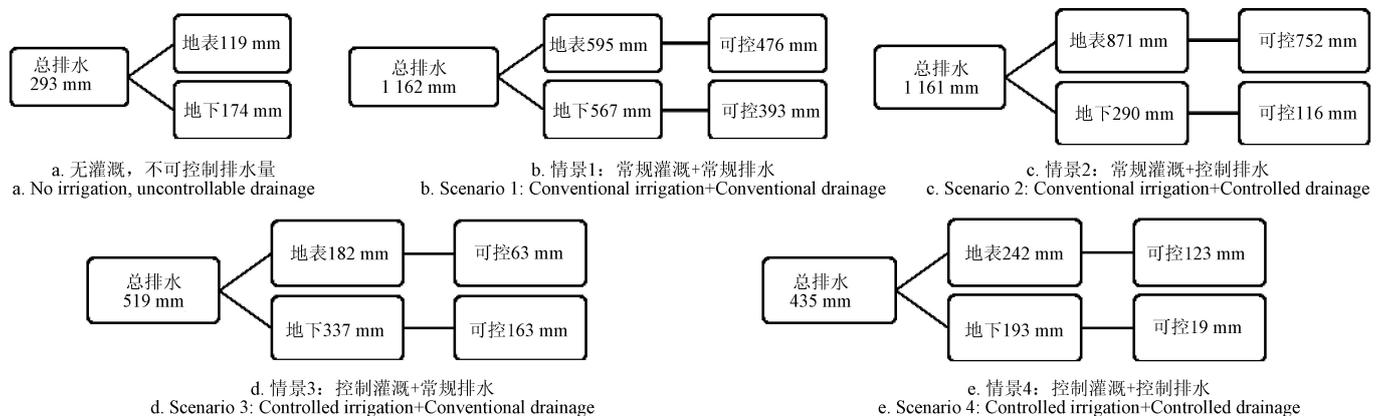


图 4 不同田间排灌控制措施下农田排水量变化及分割情况
Fig.4 Field drainage and its partitions under different irrigation and drainage control measures

2.2.2 灌排控制措施对排水量及排水分割的影响

图 4 情景 2~4 显示了不同田间灌排控制措施组合情形对排水过程的影响。为了更好地比较,表 4 列出了不同情况下相对于现状(情景 1:常规排水+常规灌溉)的排水量削减率。上述结果显示,在情景 2~4 的控制措施下,农田排水量呈下降趋势,尤其是从灌溉和排水两端进行控制。目前灌区的灌溉量偏高,因此,从灌溉端实施的控制措施对排水输出的影响最为明显。在灌溉端采取的控制措施可将灌溉总量从 960 mm 降低到 320 mm,仅为原来定额的 1/3;排水总量则从现状的 1 162 mm 降低到 519 mm,削减率高达 55%。在假定单纯因降雨造成的排水为不可控水量的前提下,可控排水部分从 869 mm 减少到 226 mm(削减率为 74%),其中地下排水部分从 393 mm 降低到 163 mm(削减率为 59%),地表部分则从 476 mm 降低到 63 mm(削减率为 87%)。可见,目前灌区在灌溉端采取控制措施来削减排水存在很大的潜力,是实现节水减排最有效的途径。需要指出的是,DRAINMOD 模型模拟控制灌溉时,灌溉模块只在田间水位降到预定深度(本文参考现有研究成果^[6-8])后设定为稻田田面以下 25 cm)且当日无显著降雨(设定大于 10 mm)的条件下才实施灌溉。所以模型预测的是一种最大可能避免地表径流的气候智能型优化灌溉模式。虽然这在目前还难以实现,但随着灌区智慧水利发展及传感器技术

的应用,未来灌溉过程将逐步接近该优化模式。

模拟结果显示,控制排水措施在减少地下排水的同时,增加了田间湿润状态,因此增加了地表径流量。这里同样以上述常规排水条件下,由降雨造成的排水量为不可控部分为依据,确定不同灌排控制措施下排水总量及其分割情况。

图 4c(情景 2)中的模拟结果显示,单纯控制排水的减排效果主要反映在地表和地下排水比例的变化上。这是因为在常规灌溉条件下,灌溉量(定额)是固定的,作物蒸腾蒸发量(Evapotranspiration, ET)在常规排水和控制排水条件下均能够得到满足,总排水量相差无几(1 161 mm),但是地表和地下排水的比例发生较大变化。例如,现状常规排水的地下径流部分为 49%,地表径流为 51%;而控制排水后,地下部分减少到 25%(占总排水),地表部分则增加到 75%(占总排水)。尽管总排水量接近,但因地表排水和地下排水水质存在差别,这种改变会对污染物输出产生一定的影响。

图 4d(情景 3)中的模拟结果显示,在控制灌溉情况下,田间湿润程度相对较低,排水总量降至 519 mm,此时采取控制排水可将排水总量进一步降至 435 mm(图 4e),削减率为 16%。实施控制灌排措施下,排水径流分割的变化更为显著:控制排水使地下排水部分降低了 43%,而地表部分增加了 33%。可见,排水总量和排

水径流分割都发生了变化；虽然控制排水减少了总排水量，但是地表径流有所增加，这对排水水质会产生一定影响。

表 4 相对于现状（情景 1）不同田间灌排控制措施对排水量的削减率

| 控制情景 Control scenarios | 总量 Total | 地下 Underground | 地表 Surface |
|---------------------------|-------------|-------------------|---------------|
| 情景 2 Scenario 2 | 0 | 49 | -47 |
| 情景 3 Scenario 3 | 55 | 41 | 69 |
| 情景 4 Scenario 4 | 63 | 66 | 59 |

2.2.3 不同灌排控制模式削减氮素输出的效果及制约因素

水稻灌区排水中氨氮浓度是评价水环境质量的一个重要指标。根据研究区 2018—2019 年的田间监测数据，稻田地下排水中氨氮浓度平均为 1.80 mg/L，地表排水中氨氮浓度平均为 2.85 mg/L；这些结果与同类研究接近^[23-24]。已有研究指出，不同的灌排处理对排水中氮素浓度的影响不显著^[14,24]。因此，下面在不考虑灌排控制措施对氮素浓度影响的前提下，分析了不同措施对排水氨氮输出的影响。由于地表排水中氨氮浓度比地下排水高 58%，相应的氨氮输出比例要高于其排水量的比例。如表 5 所示，在情景 1 考虑的常规灌排条件下，DRAINMOD 模拟的研究区多年平均地下排水与地表排水的比例为 49:51，氨氮输出比则为 38:62。在情景 3 模拟的控制灌溉+常规排水情况下，灌溉模式减少了地表径流，地下排水与地表排水量比例增加到了 65:35，然而氨氮输出比例却只有 54:46；这种差别反映了地表排水比例对于氨氮污染物的影响。

表 6 列出了不同灌排控制措施下，排水总量和氨氮输出相对于现状（情景 1：常规灌溉+常规排水）的削减率。在情景 2 模拟的常规灌溉+控制排水条件下，排水总量基本持平，但是地表径流增加了 46%，导致氨氮输出量增加 11%。在情景 3 模拟的控制灌溉条件下，控制排水将排水量进一步削减了 8 个百分点（排水削减率从 55%增加至 63%）；但反映在氨氮削减率上，控制排水仅比现状提高了 3 个百分点（削减率从 59%增加至 62%）；这是由于控制排水条件下地表径流比例增加而造成的。

不同灌排控制措施下，排水总量、氨氮输出总量及氨氮浓度的模拟结果如表 6。可以看出，在常规灌排条件下（情景 1），排水总量和氨氮输出总量都远远高于灌排统一控制条件下（情景 4）的排水输出量。需要指出的是，目前研究区稻作期农田排水中氨氮的平均浓度高于 2 mg/L，即目前中国地表水水质标准中的 V 类水指标。上述分析结果显示，采取控制排水条件下，因地表径流量的增加，排水输出的氨氮浓度还将高于现状浓度；因此，需要在排水输出农业小流域之前进行一定的处理。下面

将分析灌区现有的排水沟塘湿地系统对排水水质的净化作用。

表 5 不同田间灌排控制措施下地下与地表排水量及氨氮输出量比例

Table 5 The ratio of subsurface to surface drainage and ammonia nitrogen loss under different field irrigation and drainage control measures

| 控制情景 Control scenario | 地下与地表排水量比例 Subsurface to surface drainage percentage ratio | 地下与地表排水量比值 Subsurface to surface drainage percentage ratio | 地下与地表排水氨氮输出量比例 Percentage ratio of ammonia nitrogen losses with subsurface and surface drainage |
|--------------------------|---|---|--|
| 情景 1 Scenario 1 | 49:51 | 0.95 | 38:62 |
| 情景 2 Scenario 2 | 25:75 | 0.33 | 17:83 |
| 情景 3 Scenario 3 | 65:35 | 1.85 | 54:46 |
| 情景 4 Scenario 4 | 44:56 | 0.79 | 34:66 |

表 6 不同田间控制措施下排水总量以及氨氮总量与其削减率
Table 6 Total drainage, total ammonia nitrogen and its reduction rates under different irrigation and drainage control measures

| 控制情景 Control scenario | 排水总量 Total drainage/ mm | 氨氮总量 Total ammonia nitrogen/ (kg·hm ⁻²) | 氨氮浓度 Ammonia nitrogen concentration/ (mg·L ⁻¹) | 相较于常规灌排现状 (情景 1) | |
|--------------------------|-------------------------------|---|--|---|--|
| | | | | 排水量 削减率 Drainage reduction rate/% | 氨氮削减率 Ammonia nitrogen reduction rate/% |
| 情景 1 Scenario 1 | 1 162 | 27.152 | 2.34 | - | - |
| 情景 2 Scenario 2 | 1 161 | 30.038 | 2.59 | 0 | -11 |
| 情景 3 Scenario 3 | 519 | 11.259 | 2.17 | 55 | 59 |
| 情景 4 Scenario 4 | 435 | 10.373 | 2.38 | 63 | 62 |

注：负值代表增加。
Note: Negative means increase.

2.3 沟塘湿地对农田排水的净化效果及水质达标需要匹配的湿地面积

上述分析结果显示，在目前灌排运行模式下，研究区农田排水中氨氮浓度高于国家地表水环境质量标准^[25]中 V 类水（2 mg/L）的要求，不利于接纳水体的生态环境保护。为此，可采取相应的异地处理措施，降低水污染风险。下文结合研究区小流域范围内现有的沟塘湿地系统，分析排水经过湿地系统得到净化的程度以及受田间灌排措施的影响。

研究表明^[26]，研究区农业小流域范围内除了农沟以外，现存的支沟和池塘与农田的面积比为 12.7%。这里首先要选取一个合理的污染物降解常数（式（4）中的 r ）。相关研究给出的这一常数数值相差很大，较低值为 0.1/d 左右^[27-31]；较高为 0.3~0.5/d^[32-34]。考虑到本研究区沟塘系统面积较小、水深较浅，效率相对较高，采用较为折中的降解常数 0.2/d。根据本文 1.4.2 节所述方法以及表 6 中的排水输出氨氮总量和平均浓度值，可计算得出不同水质控制目标条件下的沟塘湿地与农田面积比（ ϵ ），结果绘于图 5。其中，控制目标分别设定为将排水中氨氮浓度降至中国地表水水质标准中的 V 类水（2 mg/L）、IV 类

水 (1.5 mg/L) 和 III 类水 (1 mg/L) 标准。

图 5 显示, 在现状的常规灌排条件下, 由于排水量很大, 即使以 V 类水水质为控制目标, 净化排水需要的湿地面积比将远远大于研究区现有湿地面积比, 难以实现。相比之下, 只有在控制灌溉条件下, 研究区的沟塘湿地才能达到 V 类水的净化目标。由此可见, 研究区迫切需要采取控制灌溉的手段来削减排水及污染物输出量。

需要注意的是, 虽然控制灌溉条件下, 常规排水的排水量和氨氮总量都高于控制排水, 但由于常规排水中氨氮浓度较低 (常规排水为 2.17 mg/L; 控制排水为 2.38 mg/L), 其需要的湿地面积反而较小。这是因为本文设置的水质控制指标是氨氮污染物浓度, 而且氨氮在湿地中的降解系数相对较低造成的。在控制排水+常规灌溉情况下, 研究区排水最终达到 V 类水水质标准所需的处理湿地面积比为 14%, 这与研究区现有的沟塘面积大致相当。本文得到的处理湿地面积比高于现有文献中的推荐值; 这些值较小的为 1%~2%^[17,35], 较大的为 5%~7%^[18-19]。造成这一现象的一个重要原因是本文研究的水稻灌区农田排水中的氨氮浓度较高。

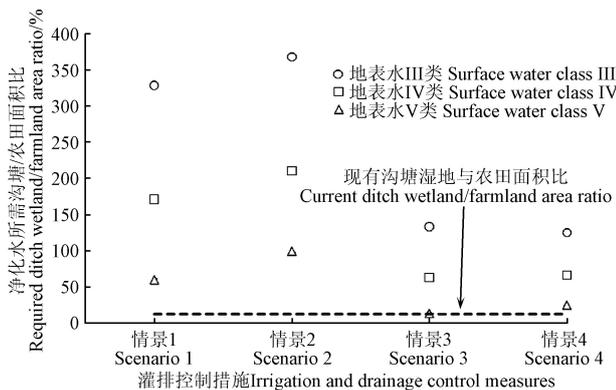


图 5 田间灌排控制措施-水质目标-沟塘湿地面积间的匹配关系
Fig.5 Relationship between irrigation and drainage control measures, water quality goals and the matching ditches and pond wetland area

表 7 列出了本文研究区氨氮浓度监测值的统计指标, 其中可见平均值大大高于中位数, 说明少数峰值的影响显著。表 8 列出了一些现有研究中报告的稻区水体氨氮浓度, 由表可知变化范围很大。其中地下水/渗漏水的最初值为 15.15 mg/L, 最小值为 0.2 mg/L; 地表水/田面水的最高值为 72.01 mg/L, 最小值为 0.17 mg/L。综合分析这些报告值, 地下水/渗漏水平均值为 2.36 mg/L, 地表水/田面水平均值为 4.05 mg/L。由此可见, 当前中国水稻灌区不同水体中氨氮浓度整体较高, 本文取值略为偏小。在类似地区, 如果实际监测到的污染物浓度值与本文采用的值差异较大, 可以通过对式 (4) 中的 c_0 和式 (6) 中的 t_h 进行修正。

此外, 在图 2 显示的分析方法中, 本文将分布在农田不同部位的沟塘集中考虑, 而实际上沟塘的分布特性对于其污染物的去除能力有较大影响。课题组前期研究发现^[26], 分布式沟塘的水质净化能力仅相当于同等面积

集中处理湿地的 70%~90%。因此, 要想实现同等面积湿地处理效果, 需要对分散的沟塘湿地面积进行相应的调整和优化。

表 7 研究区农田排水中氨氮浓度监测值统计

| 指标 Indexes | 地表径流 Surface runoff | 地下排水 Subsurface drainage |
|---------------------|---------------------|--------------------------|
| 平均值 Average | 2.85 | 1.80 |
| 中位数 Median | 0.75 | 0.99 |
| 最大值 Maximum | 9.27 | 7.55 |
| 最小值 Minimum | 0.12 | 0.04 |
| 标准误差 Standard error | 2.08 | 1.91 |

表 8 文献中稻田地表和地下水氨氮浓度统计

| | 浓度范围 Concentration range | 平均浓度 Average concentration | 综合平均浓度 Overall average concentration | 文献来源 Literature source |
|-------------------------------------|--|----------------------------|--------------------------------------|------------------------|
| 地下水/渗漏水 Groundwater/percolation | 0.22~15.15 | 2.97 | 2.36 | [36] |
| | 0.2~0.9 | 0.54 | | [37] |
| | 0.9~12 | 3.47 | | [23] |
| | - | 2.49 | | [38] |
| 地表水/田面水 Surface water/ponding water | 0.23~72.01 | 7.58 | 4.05 | [39] |
| | 1.21~14.3 | 5.12 | | [23] |
| | 0.17~2.58 | 0.99 | | [40] |
| | 常规灌溉: 0.323~6.665 控制灌溉: 0.242~5.841 | 3.49 3.04 | | [24] |

3 结论

本文根据扬州沿运灌区排水与水质大田监测数据, 运用 DRAINMOD 模型研究了农业小流域范围内通过田间灌排控制措施以及沟塘湿地异地处理的方法削减排水及氮素输出的效果, 得出的主要结论如下:

1) 在现状常规灌溉 (960 mm) 和常规排水模式下, 研究区多年平均农田总排水量高达 1 162 mm, 占到灌溉量与降雨量之和的 59%。其中, 51%为地表径流量, 25%是由降雨造成的不可控部分。因此, 通过灌溉和排水管理措施削减田间排水的潜力很大。

2) 基于研究区长序列气象数据的 DRAINMOD 模型模拟结果显示, 采用避免地表径流的控制灌溉措施 (年均灌溉量为 320 mm) 可以显著降低排水量和氨氮输出。由于本文研究区排水沟较浅, 采取控制排水措施会导致地表径流量增加, 加大氨氮污染物的输出。

3) 研究区现有沟塘湿地具有一定的水质净化功能, 但因灌排水量过大, 沟塘湿地作用有限。本文研究结果显示, 通过田间灌排控制措施削减排水量后, 利用现有沟塘系统可以将排水中的氨氮浓度控制在国家地表水环境质量标准 V 类水范围内。

本文分析的 4 种灌排控制情形是根据目前水稻灌区存在的实际问题, 结合科研成果提出的; 在实际工作中,

可据此从灌溉端和排水端着手, 逐步提高和完善灌区水管理工作, 达到节水减排的目的。

[参 考 文 献]

- [1] Chiara D N, Jim R, Peter S, et al. Nitrogen leaching: A crop rotation perspective on the effect of N surplus, field management and use of catch crops[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2018, 255: 1-11.
- [2] 杨林章, 吴永红. 农业面源污染防治与水环境保护[J]. *中国科学院院刊*, 2018, 33(2): 168-176.
Yang Linzhang, Wu Yonghong. Prevention and control of agricultural non-point source pollution and aquatic environmental protection[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2018, 33(2): 168-176. (in Chinese with English abstract)
- [3] 剧成欣, 季红娟, 张春梅, 等. 中国水稻生产“双减”的目的意义与途径方法[J]. *中国农学通报*, 2018, 34(23): 12-18.
Ju Chengxin, Ji Hongjuan, Zhang Chunmei, et al. The meaning and approach of “doublereduction” of rice production in China[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2018, 34(23): 12-18. (in Chinese with English abstract)
- [4] Han H H, Gao R, Cui Y L, et al. Transport and transformation of water and nitrogen under different irrigation modes and urea application regimes in paddy fields[J]. *Agricultural Water Management*, 2021, 255: 107024.
- [5] Amin M G M, Akter A, Jahangir M M R, et al. Leaching and runoff potential of nutrient and water losses in rice field as affected by alternate wetting and drying irrigation[J]. *Journal of Environmental Management*, 2021, 297: 113402.
- [6] 徐云姬, 许阳东, 李银银, 等. 干湿交替灌溉对水稻花后同化物转运和籽粒灌浆的影响[J]. *作物学报*, 2018, 44(4): 554-568.
Xu Yunji, Xu Yangdong, Li Yinyin, et al. Effect of alternate wetting and drying irrigation on post-anthesis remobilization of assimilates and grain filling of rice[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2018, 44(4): 554-568. (in Chinese with English abstract)
- [7] 褚光, 展明飞, 朱宽宇, 等. 干湿交替灌溉对水稻产量与水分利用效率的影响[J]. *作物学报*, 2016, 42(7): 1026-1036.
Chu Guang, Zhan Mingfei, Zhu Kuanyu, et al. Effects of alternate wetting and drying irrigation on yield and water use efficiency of rice[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2016, 42(7): 1026-1036. (in Chinese with English abstract)
- [8] 陈婷婷, 许更文, 钱希昶, 等. 花后轻干-湿交替灌溉提高水稻籽粒淀粉合成相关基因的表达[J]. *中国农业科学*, 2015, 48(7): 1288-1299.
Chen Tingting, Xu Gengwen, Qian Xiyang, et al. Post-anthesis alternate wetting and moderate soil drying irrigation enhance gene expressions of enzymes involved in starch synthesis in rice grains[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48(7): 1288-1299. (in Chinese with English abstract)
- [9] 罗纨, 李山, 贾忠华, 等. 兼顾农业生产与环境保护的农田控制排水研究进展[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(16): 1-6.
Luo Wan, Li Shan, Jia Zhonghua, et al. Advances in research of controlled drainage for crop production and environmental protection[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2013, 29(16): 1-6. (in Chinese with English abstract)
- [10] Evans R O, Skaggs R W, Wendell G J. Controlled versus conventional drainage effects on waterquality[J]. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 1995, 121(4): 271-276.
- [11] Gilliam J W, Skaggs R W, Weed S B. Drainage control to diminish nitrate loss from agricultural fields[J]. *Journal of Environmental Quality*, 1979, 8(1): 137-140.
- [12] 马瑛骏, 万辰, 张克强, 等. 农田排水口高度对地表径流氮磷流失的影响[J]. *农业工程学报*, 2021, 37(15): 114-120.
Ma Yingjun, Wan Chen, Zhang Keqiang, et al. Effects of the heights of farmland drainage outlets on nitrogen and phosphorus loss from surface runoff[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2021, 37(15): 114-120. (in Chinese with English abstract)
- [13] 李亚威, 徐俊增, 刘文豪, 等. 明沟-暗管组合控排下稻田水氮流失特征[J]. *农业工程学报*, 2021, 37(19): 113-121.
Li Yawei, Xu Junzeng, Liu Wenhao, et al. Characteristics of water and nitrogen loss under subsurface pipe-open ditch controlled drainage in paddy fields[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2021, 37(19): 113-121. (in Chinese with English abstract)
- [14] 俞双恩, 李偲, 高世凯, 等. 水稻控制灌排模式的节水高产减排控污效果[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(7): 128-136.
Yu Shuang'en, Li Si, Gao Shikai, et al. Effect of controlled irrigation and drainage on water saving, nitrogen and phosphorus loss reduction with high yield in paddy field[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2018, 34(7): 128-136. (in Chinese with English abstract)
- [15] Xu Z, Yang Z, Ju M, et al. Nitrogen runoff dominates water nitrogen pollution from rice-wheat rotation in the Taihu Lake region of China[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2012, 156: 1-11.
- [16] Hansen A T, Campbell T, Cho S J, et al. Integrated assessment modeling reveals near-channel management as cost-effective to improve water quality in agricultural watersheds[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2021, 118(28): 2024912118.
- [17] Vymazal J, Brezinova T. The use of constructed wetlands for removal of pesticide from agricultural runoff and drainage: A review[J]. *Environment International*, 2015, 75(2): 11-20.
- [18] Moreno-Mateos D, Mander Ü, Comin F A, et al. Relationships between landscape pattern, wetland characteristics, and water quality in agricultural catchments[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2008, 37(6): 2170-2180.
- [19] Mitsch W J, Day J W, Gilliam W, et al. Reducing nitrogen loading to the Gulf of Mexico from the Mississippi River Basin: strategies to counter a persistent ecological problem[J]. *BioScience*, 2001, 51(11/12): 373-388.

- [20] 贾忠华, 陈诚, 罗纨, 等. 农业排水沟塘系统污染物去除监测区代表性分析[J]. 农业工程学报, 2018, 34(3): 110-117. Jia Zhonghua, Chen Cheng, Luo Wan, et al. Analyzing representativeness of monitoring units for pollutant removal in agricultural drainage ditch-pond systems[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2018, 34(3): 110-117. (in Chinese with English abstract)
- [21] Skaggs R W. DRAINMOD Reference Report: Methods for Design and Evaluation of Drainage-water Management Systems for Soils with High Water Tables[M]. Raleigh, USA: North Carolina State University, 1980.
- [22] Skaggs R W, Youssef M, Chescheir G M. DRAINMOD: Model use, calibration, and validation [J]. Transactions of the ASABE, 2012, 55(4): 1509-1522.
- [23] 肖梦华, 俞双恩, 章云龙. 控制排水条件下淹水稻田田面及地下水氮浓度变化[J]. 农业工程学报, 2011, 27(10): 180-186. Xiao Menghua, Yu Shuang'en, Zhang Yunlong. Changes of nitrogen concentration for surface and groundwater in flooding paddy field under controlled drainage[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2011, 27(10): 180-186. (in Chinese with English abstract)
- [24] 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 Shizhang, Zhang Zhengliang, Luo Yufeng, et al. Variation of nitrogen concentration in drainage water from paddy fields under controlled irrigation and drainage[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2009, 25(9): 21-26. (in Chinese with English abstract)
- [25] 中华人民共和国生态环境部. GB3838-2002, 地表水环境质量标准[S]. 北京: 中国环境出版社, 2019.
- [26] 罗纨, 朱金城, 贾忠华, 等. 排水沟塘分布特性及与农田水力联系对水质净化能力的影响[J]. 农业工程学报, 2017, 33(10): 161-167. Luo Wan, Zhu Jincheng, Jia Zhonghua, et al. Effect of distribution characteristic and field hydraulic connection of drainage ditches and ponds on water quality purification[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2017, 33(10): 161-167. (in Chinese with English abstract)
- [27] 王有乐, 周智芳, 王立京, 等. 黄河兰州段氨氮降解系数的测定[J]. 兰州理工大学学报, 2006, 32(5): 72-74. Wang Youle, Zhou Zhifang, Wang Lijing, et al. Test on degradation coefficient of ammonia-nitrogen in Yellow River adjacent to Lanzhou[J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 2006, 32(5): 72-74. (in Chinese with English abstract)
- [28] 张亚丽, 申剑, 史淑娟, 等. 淮河支流污染物综合降解系数动态测算[J]. 中国环境监测, 2015, 31(2): 64-67. Zhang Yali, Shen Jian, Shi Shujuan, et al. Dynamic change of the river pollutions' composite degradation coefficient in Huaihe River's tributary[J]. Environmental Monitoring of China, 2015, 31(2): 64-67. (in Chinese with English abstract)
- [29] 冯帅, 李叙勇, 邓建才. 太湖流域上游河网污染物降解系数研究[J]. 环境科学学报, 2016, 36(9): 3127-3136. Feng Shuai, Li Xuyong, Deng Jiancai. A study on degradation coefficients of pollutants in the upstream river network of the Lake Taihubasin[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2016, 36(9): 3127-3136. (in Chinese with English abstract)
- [30] 王雅钰, 刘成刚, 黄天寅, 等. 不同处理技术对河流污染物降解系数影响的比较[J]. 环境工程学报, 2014, 8(3): 917-923. Wang Yayu, Liu Chenggang, Huang Tianyin, et al. Comparison of effects of different treatment technologies on degradation coefficient of river pollutants[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2014, 8(3): 917-923. (in Chinese with English abstract)
- [31] 刘小容. 生态浮床在污水水质改善中的技术研究与示范[D]. 成都: 四川农业大学, 2014. Liu Xiaorong. The Technical Study and Demonstration of Ecological Floating Bed to Improve Water Quality in Polluted Water[D]. Chengdu: Sichuan Agricultural University, 2014. (in Chinese with English abstract)
- [32] 单铎. 北运河氨氮降解系数测算研究[D]. 北京: 首都师范大学, 2013. Shan Duo. Calculation of Ammonia Nitrogen Degradation Coefficient in North Canal[D]. Beijing: Capital Normal University, 2013. (in Chinese with English abstract)
- [33] 陶威, 刘颖, 任怡然. 长江宜宾段氨氮降解系数的实验室研究[J]. 污染防治技术, 2009, 22(6): 8-9, 20. Tao Wei, Liu Ying, Ren Yiran. Study on ammonia nitrogen degradation coefficient in Yibin section of Yangtze River[J]. Pollution Control Technology, 2009, 22(6): 8-9, 20. (in Chinese with English abstract)
- [34] 郭儒, 李宇斌, 富国. 河流中污染物衰减系数影响因素分析[J]. 气象与环境学报, 2008, 24(1): 56-59. Guo Ru, Li Yubin, Fu Guo. Controlling factors of degradation coefficient on organic pollutant in river[J]. Journal of Meteorology and Environment, 2008, 24(1): 56-59. (in Chinese with English abstract)
- [35] Kay P, Edwards A, Foulger M. A review of the efficacy of contemporary agricultural stewardship measures for ameliorating water pollution problems of key concern to the UK water industry[J]. Agricultural Systems, 2011, 99(2/3): 67-75.
- [36] 叶玉适, 梁新强, 周柯锦, 等. 节水灌溉与控释肥施用对太湖地区稻田土壤氮素渗漏流失的影响[J]. 环境科学学报, 2015, 35(1): 270-279. Ye Yushi, Liang Xinqiang, Zhou Kejin, et al. Effects of water-saving irrigation and controlled-release fertilizer application on nitrogen leaching loss of paddy soil in Taihu Lake region[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2015, 35(1): 270-279. (in Chinese with English abstract)
- [37] 黄明蔚, 刘敏, 陆敏, 等. 稻麦轮作农田系统中氮素渗漏流失的研究[J]. 环境科学学报, 2007, 27(4): 629-636. Huang Mingwei, Liu Min, Lu Min, et al. Study on the nitrogen leaching in the paddy-wheat rotation agroecosystem[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2007, 27(4):

- 629-636. (in Chinese with English abstract)
- [38] 和玉璞, 张展羽, 徐俊增, 等. 控制地下水位减少节水灌溉稻田氮素淋失[J]. 农业工程学报, 2014, 30(23): 121-127. He Yupu, Zhang Zhanyu, Xu Junzeng, et al. Reducing nitrogen leaching losses from paddy field under water-saving irrigation by water table control[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2014, 30(23): 121-127. (in Chinese with English abstract)
- [39] 叶玉适, 梁新强, 金熠, 等. 节水灌溉与控释肥施用对稻田田面水氮素变化及径流流失的影响[J]. 水土保持学报, 2014, 28(5): 105-112. Ye Yushi, Liang Xinqiang, Jin Yi, et al. Dynamic variation and runoff loss of nitrogen in surface water of paddy field as affected by water-saving irrigation and controlled-release fertilizer application[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2014, 28(5): 105-112. (in Chinese with English abstract)
- [40] 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, 15(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]. Journal of Soil and Water Conservation, 2005, 15(1): 59-63. (in Chinese with English abstract)

Simulating the effects of irrigation and drainage control combined with ditch-pond wetlands on drainage water quality improvement in a rice irrigation area

Zou Jiarong¹, Luo Wan^{1*}, Li Lin², Jia Zhonghua¹, Ding Shihong², Zhang Zhixiu²

(1. College of Hydraulic Science and Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China;

2. Administrative Office of Yanyun Irrigated Area in Jiangdu District, Yangzhou 225261, China)

Abstract: Nitrogen loss with the farmland drainage from the rice irrigation areas has been a great threat to the aquatic environment of the receiving water in southern China. In this present study, a systematic investigation was made to clarify the effect of different irrigation and drainage control strategies at the field level on ammonia nitrogen (NH₃-N) reduction. The potential of pollutant reduction with the ditches and ponds was also proposed to meet the requirements of water quality in small agricultural watersheds. A case study was set in the Yanyun Irrigation Area along the Grand Canal in Yangzhou City, Jiangsu Province, China. A field experiment was performed on rice irrigation and drainage in two rice growing seasons. Some parameters were measured, including the soil properties, groundwater depth, and nitrogen concentrations of drainage flow in the field. The field hydrological model-DRAINMOD was used to simulate the different water management scenarios. A conceptual model was developed to predict the nitrogen reduction in the ditches and ponds under different irrigation and drainage management scenarios. The results showed that the annual drainage depth was as high as 1 162 mm, accounting for 59% of the total irrigation and rainfall depth under the current irrigation and drainage practice. The surface runoff depth accounted for 51% of the total drainage, including a 20% uncontrollable portion caused by storm events. A controlled irrigation strategy (or irrigating only when the field water level drops to -25 cm and no significant rainfall was forecasted) was significantly adopted to reduce the drainage and nitrogen losses: 55% reduction in the drainage and 59% reduction in the NH₃-N, compared with the conventional practice. However, the controlled drainage presented a relatively low effect on drainage reduction and surface runoff. The total drainage remained nearly constant for the controlled drainage with the fixed irrigation volume under the current irrigation practice, indicating an increase in the surface runoff from 51% to 75%. The total drainage was reduced from 519 mm to 435 mm (16% reduction), whereas, the surface runoff increased from 35% to 56% under the controlled irrigation practice. The NH₃-N concentration in the surface runoff (2.85 mg/L) was higher than that in the subsurface drainage (1.80 mg/L), indicating the significant increase of NH₃-N losses with the increased surface runoff. Therefore, there were much higher volumes of irrigation and drainage water in the nitrogen reduction, in terms of the ditches and ponds distribution in the small agricultural watershed of the study area. Only when the drainage volume was significantly reduced using the controlled irrigation and drainage practice, the current ditches and ponds (15% of the farmland area) can be expected to gain lower ammonia nitrogen concentration level for the national water quality standards of Class V for surface water. Nevertheless, there is also an adverse impact on the NH₃-N for the shallow depth (60 cm) of the drainage ditches, due to the increase in the surface runoff in the study area. In conclusion, the controlled irrigation of paddy fields can be more effective to reduce drainage and nitrogen losses. Consequently, the reduced amount of drainage water and the integrated management or optimization of the existing wetlands of ditches and ponds can greatly contribute to the water quality of rice irrigation areas in small agricultural watersheds

Keywords: nitrogen; drainage; irrigation; rice irrigation area; DRAINMOD model; ammonia nitrogen; water quality