

基于系统动力学的南方水稻灌区生态沟塘系统空间布局模拟

张博超¹, 陈阳¹, 时元智¹, 张宇婷², 崔远来^{2*}

(1. 南京水利科学研究院 水灾害防御全国重点实验室, 南京 210029;

2. 武汉大学水资源工程与调度全国重点实验室, 武汉 430072)

摘要: 灌区生态沟塘系统的有效应用不仅取决于单个沟塘的设计与运行管理, 还与空间布局(系统面积和单元连接方式)有关。针对现有研究对灌区生态沟塘系统水量水质动态变化与多级响应刻画不足、难以支撑空间布局优化的问题, 该研究提出一种基于系统动力学的灌区生态沟塘系统空间布局方法。利用系统动力学仿真工具 Vensim 构建综合考虑水量平衡、污染物去除及多级沟塘水力联系的田沟塘系统模型, 使用试验区实测数据进行模型验证, 并以南方典型双季稻高标准农田示范区为案例, 开展典型年份不同空间布局方案模拟。模型验证结果表明, 所建模型能较好模拟田沟塘系统水量和氮磷浓度的动态变化。案例分析结果表明: 1) 随着沟塘-稻田面积比的增加, 田沟塘系统的氮磷去除率随之增加, 但整体增长趋势逐渐变缓, 沟塘-稻田面积比宜为 5%~9%; 2) 在晚稻期间或沟塘-稻田面积比较大时, 将塘堰湿地集中布置于单一排水路径的去除率明显低于其他连接方式; 3) 在进行生态沟塘系统的空间布局时, 建议首先根据污染物削减目标确定适宜的沟塘-稻田面积比, 之后根据实地情况将塘堰湿地集中布置于主排水沟出口或将多个塘堰湿地并联布置在各排水路径。研究成果可为农田面源污染的生态防控提供科学依据。

关键词: 水稻灌区; 面源污染; 生态沟塘; 空间布局; 系统动力学

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202510197

中图分类号: S276.3

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2026)-12-0144-11

张博超, 陈阳, 时元智, 等. 基于系统动力学的南方水稻灌区生态沟塘系统空间布局模拟[J]. 农业工程学报, 2026, 42(12): 144-154. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202510197 <http://www.tcsae.org>

ZHANG Bochao, CHEN Yang, SHI Yuanzhi, et al. Simulation of the spatial layout for ecological ditch-pond systems in irrigation districts based on system dynamics[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2026, 42(12): 144-154. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202510197 <http://www.tcsae.org>

0 引言

农田面源污染具有随机性强、污染排放不固定和污染负荷变化大等特点, 控制起来比点源污染更难, 农业和农村发展引起的水污染已成为中国可持续发展的最大挑战之一^[1]。针对中国南方水稻灌区的特点, 茆智^[2]提出了由“稻田-生态沟-塘堰湿地”(田沟塘)系统构成的“三道防线”技术, 已广泛应用于农田面源污染治理^[3-5]。然而, 生态沟和塘堰湿地(生态沟塘)在实际应用中存在净化效果波动、占地面积较大等问题, 给灌区面源污染调控和土地资源集约利用带来严峻挑战^[6]。在保障水质净化能力的前提下, 科学优化生态沟塘系统空间布局(系统面积和单元连接方式), 对于提高农田面源污染治理成效、促进灌区可持续发展具有重要意义^[7]。

合理的生态沟塘设计运行参数是保障其水质净化能力的关键^[8]。大量研究探究了单个沟塘设计运行参数对其处理性能的影响, 主要包括植物种类^[9]、植物密度^[10]、长宽比^[11]、进出口布置^[12]、水深^[13]、水力负荷^[9]及污染

物负荷^[14]等。然而, 灌区生态沟塘系统通常由与农田交错分布的多级沟塘组成^[15]。沟塘单元的面积配比及各级沟塘之间的水力联系直接影响排水路径、水力停留时间和污染物在多级单元间的分配, 进而决定系统对面源污染的整体去除效果^[16]。沟塘系统的有效应用不仅取决于单个沟塘的设计与运行管理, 还与空间布局有关。实践中, 常因沟塘与农田面积比例失配或空间连接方式不合理, 排水系统的蓄滞与净化能力未能充分发挥, 造成资源浪费和净化效果不佳^[17]。部分国外研究基于对多个野外湿地观测数据的统计分析, 提出了湿地与农田面积比的建议值, 较小为 1%~2%^[18], 较大为 5%~7%^[8], 少部分研究的推荐值超过 10%^[19]。然而, 这些研究多针对在排水系统末端集中布置的大型人工湿地, 与中国南方水稻灌区零散分布的多级沟塘系统有较大差异。此外, 国外研究多聚焦于大型湿地内部水流分布和水力性能的优化, 而较少涉及多级排水系统的空间布局优化。部分国内研究结合水稻灌区灌溉排水系统的特点, 利用田间水文水质模型^[20]、沟塘浓度衰减模型^[21]或流域水文模型^[22], 初步探讨了沟塘系统空间布局对其净化效果的影响。灌区沟塘系统受降雨和灌溉驱动, 各单元的水量水质随时间动态变化, 并在空间上通过排水路径逐级影响。因此, 沟塘系统的空间布局模拟需综合考虑水量平衡、污染物去除及多级沟塘间的水力联系^[23]。然而, 现有研究多侧重田间尺度水文水质模拟, 对沟塘污染物降解仅采用简化的一级动力学方程而忽略水量变化, 难以准确

收稿日期: 2025-10-24 修订日期: 2026-01-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(52579043)

作者简介: 张博超, 博士, 研究方向为灌区节水减排与水生态环境修复。

Email: bczhang@nhri.cn

*通信作者: 崔远来, 教授, 博士生导师, 研究方向为节水灌溉及其生态环境效应。Email: YLCui@whu.edu.cn

反映沟塘系统对稻田排水的拦截净化过程。

综上，现有研究未能充分刻画生态沟塘系统内部水量水质的动态变化与多级响应，难以有效支撑其空间布局优化，制约了生态沟塘系统去污效能提升与灌区土地资源集约利用。本文基于系统动力学仿真工具 Vensim 构建田沟塘系统水量水质模拟模型，模拟总氮和总磷浓度动态变化，结合试验区实测数据检验田沟塘系统模型合理性；以南方典型双季稻高标准农田示范区为案例，开展典型年份不同空间布局方案模拟，优化生态沟塘系统面积和连接方式，以为农田面源污染的生态防控提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

以江西省赣抚平原灌区典型双季稻区为对象，开展试验监测、模型验证与情景模拟，研究区域分为用于模型验证的试验区（116.011°E, 28.430°N）和用于情景模拟的高标准农田示范区（116.005°E, 28.435°N）两部分。试验区位于江西省南昌县向塘镇礼坊村，该村地处赣抚平原灌区二干渠中段，属于亚热带季风气候，主要作物为水稻，种植模式为早晚双季稻。2013 年，当地实施了水环境治理与生态修复工程，系统应用了江西省灌溉试验中心站（距离试验区 1 km）总结的田间水肥综合调控与生态沟塘修复技术，形成了较完整的田沟塘系统。目前为止，仍保持生态修复工程形成的系统布局，为本研究提供了实测数据支撑。鉴于当前高标准农田建设多聚

焦产能提升，对排水系统空间布局关注不足^[24]，本研究在完成模型验证后，以距试验区 850 m 的拟建高标准农田示范区为情景模拟对象，开展不同空间布局方案模拟。

试验区概况如图 1a 所示，总面积 12.47 hm²，其中农田面积 10.18 hm²，承担农田排水的沟渠和塘堰面积 0.74 hm²，占农田面积的 7.27%。塘 3~塘 6 主要用于承接生活污水或养殖废水，故不作分析，其余农田、沟塘的水力联系如图 1b 所示。根据排水路径，试验区划分为 4 个农田分区，各分区水稻种植均采用间歇灌溉+多次施肥组合模式。水稻间歇灌溉水层控制标准见表 1。早稻田间水层落于 4 d 后复灌，晚稻落于 3 d 后复灌；此外，在分蘖后期进行晒田，在黄熟后期自然落干。早晚稻氮肥施用量均为 180 kg/hm²，按照基肥、蘖肥、穗肥比例 5: 3: 2 施用；磷肥施用量为 67.5 kg/hm²，全部用作基肥。早稻于 2013 年 4 月 26 日移栽，7 月 13 日收获，生育期共 79 d；晚稻于 2013 年 7 月 27 日移栽，10 月 22 日收获，生育期共 88 d。试验区排水沟塘系统包括 2 条农沟（农沟 1、农沟 2），4 段斗沟（OP、AB、CD、DE），2 个塘堰（塘 1、塘 2）和出口塘堰。农沟为梯形断面，土质边坡，植物以自然演替草本为主。斗沟 OP、AB 和 CD 为梯形断面，植草砖护坡，种植香根草、再力花、菖蒲等植物。斗沟 DE 为复式断面，中部设置水槽以便于水流快速通过，采用生态袋护坡，种植茭白、莲藕等植物。各排水斗沟进出口均设有控水建筑物，用于控制水位。生态塘采用生态袋护坡，其中塘 1 种植莲藕，塘 2 种植菱角。

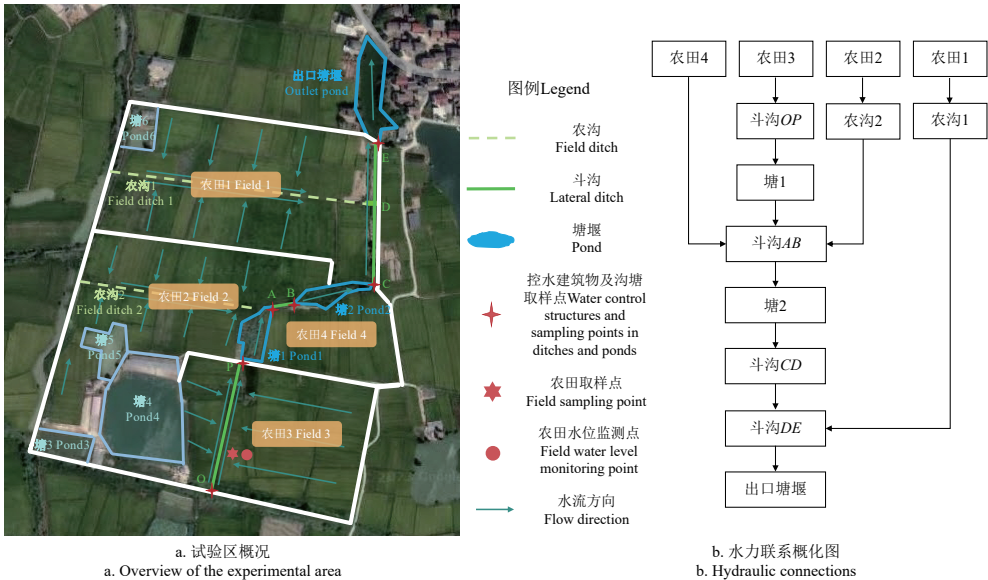


图 1 试验区概况及水力联系概化图
Fig.1 Overview of the experimental area and schematic diagram of hydraulic connections

表 1 水稻间歇灌溉水层控制标准

Table 1 Water depth control criteria for intermittent irrigation of rice								mm
灌水下限-灌水上限-蓄雨上限 Lower irrigation threshold – Upper irrigation threshold – Rainwater storage limit								
稻季 Rice season	返青期 Seedling establishment stage	分蘖前期 Early tillering stage	分蘖后期 Late tillering stage	拔节孕穗期 Jointing and booting stage	抽穗开花期 Heading and flowering stage	乳熟期 Grain filling stage	黄熟期 Yellow ripening stage	
早稻 Early rice	0-20-40	0-30-40 (落干 4 d)	晒田	0-30-50 (落干 4 d)	0-30-50 (落干 4 d)	0-30-50 (落干 4 d)	0-20-30 后期落干	
晚稻 Late rice	0-20-30	0-30-40 (落干 3 d)	晒田	0-30-50 (落干 3 d)	0-30-50 (落干 3 d)	0-30-50 (落干 3 d)	0-20-30 后期落干	

在农田 3 选取典型田块，安装水尺，于 2013 年早稻和晚稻生育期内每日人工观测田间水层深度。田面水样的取样时间为每次施肥后的第 1、3、5、7、9 天，用于测定总氮（total nitrogen, TN）和总磷（total phosphorus, TP）

浓度。在排水沟 OP 、 AB 和 DE 的进出口设置水质取样点, 当农田产生排水时, 采集水样测定 TN 和 TP 浓度。 TN 采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法 (GB11894-89) 测定, TP 采用钼酸铵分光光度法 (GB11893-89) 测定。

用于情景模拟的高标准农田示范区概况见图 2a。该区域农田布局规整, 排水路径清晰, 便于设计不同空间

布局方案, 所得结果可为高标准农田生态排水系统优化设计提供科学依据。按现有规划, 示范区农田面积 70.56 hm^2 , 沟渠面积 2.37 hm^2 , 占农田面积的比例为 3.36% , 主要包括 12 条农沟、2 条斗沟和 1 条支沟。由于斗沟两侧排水系统对称分布, 示范区水力联系可概化为图 2b 所示结构。

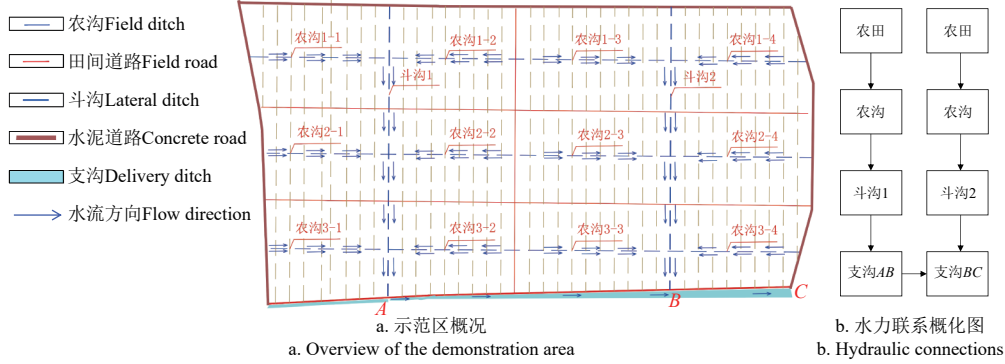


图 2 示范区概况及水力联系概化图

Fig.2 Overview of the demonstration area and schematic diagram of hydraulic connections

1.2 田沟塘系统水量水质模拟模型

1.2.1 稻田水量水质模拟模型

为了模拟田沟塘系统的水量水质变化, 首先构建稻田单元模型和沟塘单元模型, 之后基于系统动力学方法, 结合研究区实际的沟塘空间布局形成田沟塘系统模型。

稻田水深变化由时段内的来水、耗水和排水等决定^[25]:

$$H_t = \begin{cases} 0, & H_{t-1} + P_{t-1} - ET_{t-1} - Sf_{t-1} \geq IH_{\min} \\ IH_{\max} - (H_{t-1} + P_{t-1} - ET_{t-1} - Sf_{t-1}), & H_{t-1} + P_{t-1} - ET_{t-1} - Sf_{t-1} < IH_{\min} \end{cases} \quad (1)$$

$$D_t = \max(0, H_{t-1} + P_{t-1} - ET_{t-1} - Sf_{t-1} - H_{\max}) \quad (3)$$

式中 $IH_{\min}$ 、 $IH_{\max}$ 、 $H_{\max}$ 分别为第 t 天的灌水下限、灌水上限和蓄雨上限, mm 。

稻田田面水浓度的计算综合考虑施肥、污染物一阶去除和降雨灌溉带入污染物的影响^[26]:

$$C_{f,t} = \begin{cases} C_{f,\text{fert}} & (\text{施肥日期}) \\ \frac{C_{f,t-1} e^{-k_f \Delta t} H_{f,t-1} + C_p P_{t-1} + C_l I_{f,t-1}}{H_{f,t}} & (\text{未施肥日期}) \end{cases} \quad (4)$$

式中 $C_{f,t-1}$ 、 $C_{f,t}$ 分别为第 $t-1$ 天和第 t 天的田面水浓度, mg/L ; $C_{f,\text{fert}}$ 为施肥后田面水浓度, mg/L ; C_p 、 C_l 分别为降雨、灌溉水中污染物浓度, mg/L ; k_f 为稻田去除速率系数, $1/\text{d}$; Δt 为间隔时间, d 。

1.2.2 生态沟塘水量水质模拟模型

沟塘单元的水量变化取决于降雨、蒸发蒸腾、渗漏、上游来水量以及排水量^[20]:

$$V_t = V_{t-1} + (P_{t-1} - ET_{t-1} - S_{t-1})/10^3 A + W_{t-1} - X_{t-1} \quad (5)$$

式中 V_{t-1} 、 V_t 分别为第 $t-1$ 天和第 t 天沟塘单元的水量, m^3 ; ET_{t-1} 、 S_{t-1} 分别为沟塘单元的蒸发蒸腾量、深层渗漏量, mm ; A 为沟塘单元的面积, m^2 ; W_{t-1} 为上游来水量, m^3 ; X_{t-1} 为排水量, m^3 。

上游来水量为与该沟塘单元直接相连的上游稻田排水量与沟塘排水量之和:

$$H_t = H_{t-1} + P_{t-1} - ET_{t-1} - Sf_{t-1} + If_{t-1} - D_{t-1} \quad (1)$$

式中 H_{t-1} 、 H_t 分别为第 $t-1$ 天和第 t 天的稻田水层深度, mm ; P_{t-1} 、 ET_{t-1} 、 Sf_{t-1} 、 If_{t-1} 、 D_{t-1} 分别为第 $t-1$ 天的单位面积降雨量、稻田蒸发蒸腾量、深层渗漏量、灌水量和地表排水量, mm 。

稻田灌水量和排水量根据稻田水深与灌水下限、灌水上限及蓄雨上限确定^[25]:

$$W_t = \sum_{i=1}^M (D_{i,t}/10^3 Af_i) + \sum_{j=1}^N X_{j,t} \quad (6)$$

式中 M 为上游稻田的数量; N 为上游沟塘单元的数量; $D_{i,t}$ 为上游第 i 块稻田的单位面积排水量, mm ; Af_i 为第 i 块稻田的面积, m^2 ; $X_{j,t}$ 为上游第 j 个沟塘单元的排水量, m^3 。

沟塘单元的排水量取决于内部蓄水量, 当水量超过最大允许蓄水量时下泄流出:

$$X_t = \max(0, V_{t-1} + (P_{t-1} - ET_{t-1} - S_{t-1})/10^3 A + W_{t-1} - V_{\max}) \quad (7)$$

式中 $V_{\max}$ 为沟塘单元的最大蓄水量, m^3 。

对于任一沟塘单元, 其每天的初始浓度是上游各单元排水浓度与本单元残留污染物浓度的混合^[7]:

$$C_{0,t} = \frac{\sum_{k=1}^M (D_{k,t}/10^3 Af_k C_{f,k,t}) + \sum_{j=1}^N (X_{j,t} C_{j,t}) + C_{t-1} V_{t-1}}{V_t} \quad (8)$$

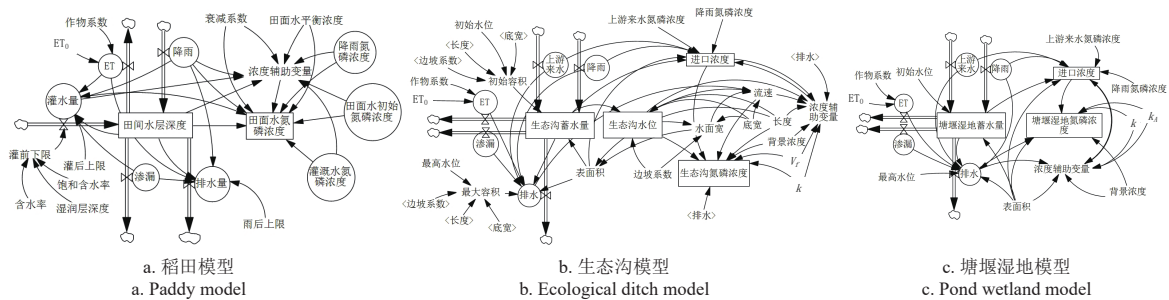
式中 $C_{0,t}$ 为第 t 天沟塘单元的初始浓度, mg/L ; C_{t-1} 为第 $t-1$ 天沟塘单元的浓度, mg/L ; $C_{f,k,t}$ 为上游第 k 块稻田的田面水浓度, mg/L ; $C_{j,t}$ 为上游第 j 个沟塘单元的浓度, mg/L 。

沟塘的运行模式分为静态蓄水减污和动态排水减污。当沟塘单元无排水时, 污染物浓度通过考虑背景浓度的一级动力学方程计算^[27]。当沟塘单元产生排水时, 生态沟的浓度通过以传质系数为核心参数的浓度衰减模型计

算^[28]，塘堰湿地的浓度通过浓度衰减模型计算^[29]：

$$C_t = \begin{cases} (C_{0t} - C^*)e^{-k\Delta t} + C^* & (X_t = 0) \\ C_{0t}e^{-\frac{-V_f L}{u_i H_t}} & (X_t > 0 \text{ 且为生态沟}) \\ (C_{0t} - C^*)e^{-\frac{-k_A A}{Q_t}} + C^* & (X_t > 0 \text{ 且为塘堰湿地}) \end{cases} \quad (9)$$

式中 C_t 、 C_{0t} 、 C^* 分别为第 t 天沟塘单元的浓度、第 t 天初始浓度和背景浓度， mg/L ； k 为静态模式下沟塘单元的去除速率系数， $1/\text{d}$ ； V_f 为生态沟传质系数， m/d ； L 为生态沟长度， m ； u_i 为生态沟流速， m/d ； H_t 为生态沟水深， m 。 k_A 为塘堰湿地面积去除速率系数， m/d ； Q_t 为塘堰湿地流量， m^3/d ； X_t 为排水量， m^3 。



注：ET₀ 为参考作物蒸发蒸腾量，mm；ET 为蒸发蒸腾量，mm； k 为静态模式下沟塘单元的去除速率系数， d^{-1} ； V_f 为生态沟传质系数， $\text{m}\cdot\text{d}^{-1}$ ； k_A 为塘堰湿地面积去除速率系数， $\text{m}\cdot\text{d}^{-1}$ 。
Note: ET₀ is the reference crop evapotranspiration, mm; ET is the actual evapotranspiration, mm; k is the removal rate coefficient for the ditch and pond units under static mode, d^{-1} ; V_f is the mass transfer coefficient of the ecological ditch, $\text{m}\cdot\text{d}^{-1}$; k_A is the areal removal rate coefficient for the pond wetland, $\text{m}\cdot\text{d}^{-1}$.

图 3 稻田、生态沟及塘堰湿地模型的系统动力学流程图
Fig.3 System dynamics flow diagrams of paddy field, ecological ditch and pond wetland models

1.3 研究区模型构建及模拟方案

1.3.1 试验区模型构建及评价

根据图 3 各部分的模型流程图及图 1 的水力联系，可以得到试验区田沟塘系统的模型流程图，如图 4 所示。田沟塘系统模型的输入包括水量平衡要素、水层控制标准、浓度模拟参数及田沟塘面积，见表 2。

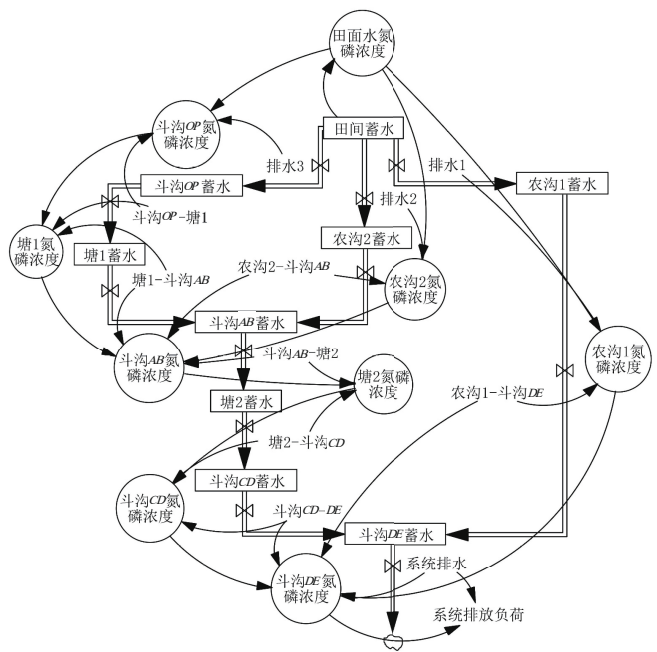


图 4 试验区田沟塘系统模型流程图
Fig.4 Flow diagram of the field-ditch-pond system model in the experimental area

1.2.3 系统动力学模型

系统动力学是一种研究复杂系统动态行为的建模与仿真方法，适用于分析复杂、动态变化、相互关联的系统问题，符合灌区生态沟塘系统的特征^[30]。系统动力学模型的构建包括 3 个核心步骤：1) 明确研究问题和系统变量，绘制因果关系图；2) 建立变量间的反馈机制与模型流图，设定各变量关系式形成模型；3) 通过仿真试验调整参数并验证模型，基于仿真结果进行分析与决策^[31]。采用 Vensim 作为建模平台，其可视化界面便于实现系统结构的概念化与动态仿真。基于系统动力学原理，根据 1.2.1 和 1.2.2 节中的模型公式，可以得到稻田模型、生态沟模型和塘堰湿地模型的流图，如图 3 所示。

表 2 试验区田沟塘系统模型输入设置
Table 2 Input settings for the field-ditch-pond system model in the experimental area

数据类型 Data type	变量名称 Variable name	取值或依据 Value or basis
水量平衡要素 Water balance elements	降雨	早稻总量：456.6 mm 晚稻总量：119.6 mm
	蒸发蒸腾	早稻作物系数：0.74~1.16 晚稻作物系数：0.83~1.32 沟塘作物系数：1.50~2.90
	深层渗漏	早稻：0.93~1.69 mm 晚稻：0.76~1.99 mm 沟塘：1.3 mm
	灌水下限	表 1
水层控制标准 Water depth control criteria	灌水上限	表 1
	蓄雨上限	表 1
	最大蓄水量	根据沟塘面积和最高水深确定
浓度模拟参数 Concentration simulation parameters	降雨中污染物浓度	TN: 2 TP: 0.2 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$
	灌溉水中污染物浓度	TN: 1.5 TP: 0.1 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$
	沟塘背景浓度	TN: 0.2 TP: 0.02 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$
	施肥后田面水浓度	TN: 90(基肥) 100(药肥) 40(拔节肥) $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ TP: 2(基肥) $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$
	稻田去除速率系数	TN: 0.5 TP: 0.12 d^{-1}
	沟塘去除速率系数	TN: 0.07 TP: 0.07 d^{-1}
田沟塘系统面积 Field-ditch-pond system area	生态沟传质系数	TN: 0.3 TP: 0.4 $\text{m}\cdot\text{d}^{-1}$
	塘堰湿地面积去除速率系数	TN: 0.1 TP: 0.2 $\text{m}\cdot\text{d}^{-1}$
田沟塘系统面积 Field-ditch-pond system area	稻田面积	10.18 hm^2
	沟塘单元面积	0.74 hm^2

注：TN 为总氮；TP 为总磷。下同。
Note: TN is total nitrogen; TP is total phosphorus. Same as below.

降雨量采用江西省灌溉试验中心站（距试验区 1 km）的实测气象数据。稻田和沟塘蒸发蒸腾量根据气象数据、

Penman-Monteith 公式和作物系数计算。作物系数和深层渗漏量根据在江西省灌溉试验中心站开展的水稻水肥调控试验^[32-34]及湿地植物需水规律试验结果^[35]确定。稻田水层控制标准按表 1 中间歇灌溉模式设定。稻田面积、沟塘面积和沟塘最大蓄水量由试验区实地调查获取。降雨中污染物浓度 C_p 、灌溉水中污染物浓度 C_i 、施肥后田面水浓度 $C_{f_{fert}}$ 及沟塘背景浓度 C^* 根据试验区实测数据确定, 其余浓度模拟参数则需通过手动调参确定。

使用纳什效率系数 (Nash-Sutcliffe efficiency coefficient, NSE)、相关系数 (r) 和相对均方根误差

(relative root mean square error, RRMSE) 评价模型的模拟效果, 计算方法见文献^[36]。根据 MORIASI 等^[37]提出的模型模拟效率等级划分标准, NSE 在 0.5~0.65、0.65~0.75 和 0.75~1 分别对应令人满意、良好和非常好的模型性能。

1.3.2 示范区模型构建及模拟方案

根据模型构建原理及图 2 示范区的水力联系, 可以得到示范区田沟系统的模型流程图, 如图 5 所示。示范区为拟建工程的模拟情景, 因此除模型流程图及田沟系统面积等特征参数外, 其余模型输入与试验区模型保持一致。

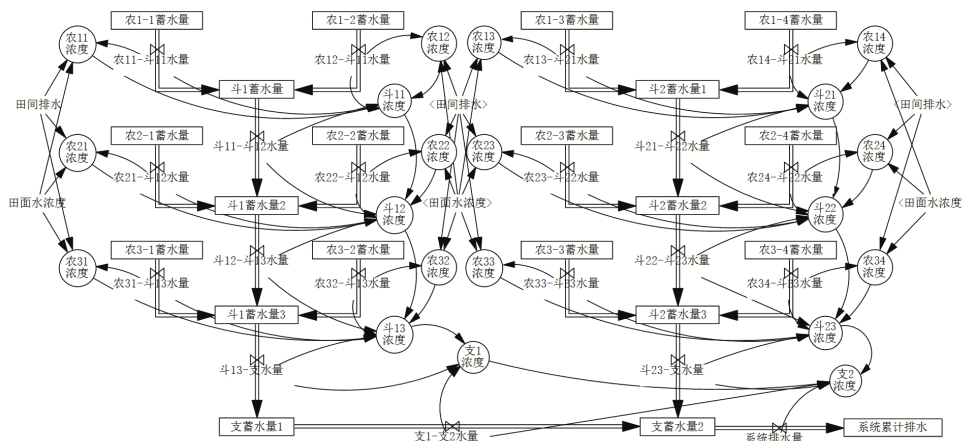


图 5 示范区田沟系统模型流程图

Fig.5 Flow diagram of the field-ditch system model in the demonstration area

根据南昌站 1957—2013 年气象资料 (中国气象数据网), 得到早晚稻丰水年、平水年和枯水年的对应年份 (早稻分别为 1996 年、1982 年和 1972 年, 晚稻分别为 1984 年、2008 年和 1964 年)。构建示范区模型后, 首先模拟分析现状规划条件下仅包含生态沟时田沟系统在不同水文年的氮磷减排效果。之后在系统出口位置添加一定面积的塘堰湿地, 分析不同沟塘-稻田面积比的影响。最后, 改变沟塘连接方式, 探讨其对氮磷减排的影响。本文设置了如图 6 所示的 4 种沟塘连接方式, 旨在探究塘堰湿地的布置形式 (串联、并联)、空间位置 (斗沟末端、支沟末端) 及面积配比 (均匀分布于各排水路径、集中于单一排水路径) 对系统氮磷净化效果的影响。连接方式 1 为对照情景, 在支沟末端布置 1 个塘堰湿地, 与支沟串联。方式 2 将方式 1 中的 1 个塘堰湿地拆分为 2 个面积相等、串联布置的塘堰湿地。方式 3 将方式 1 中的塘堰湿地位置移至第 1 条排水路径的斗沟末端。方式 4 将 2 个塘堰湿地并联布置在斗沟末端, 塘堰湿地的面积按照农田的控制面积进行分配。

使用系统出口的污染物排放负荷 (M_{load}) 和平均浓度 (C_{mean}) 评价不同情景下田沟塘系统的污染物输出水平, 使用污染物去除率 (η) 评田沟塘系统的氮磷减排效果^[38]:

$$\left\{ \begin{aligned} \eta &= \frac{M_f - M_{out}}{M_f} \\ M_f &= \sum_{t=1}^{t_{all}} \sum_{i=1}^M C_{f_{i,t}} D_{i,t} A_{f_i} / 10^3 \\ M_{out} &= \sum_{t=1}^{t_{all}} C_{out,t} X_{out,t} \end{aligned} \right. \quad (10)$$

$$M_{load} = 10 M_{out} / (A_{fall} + A_{all}) \quad (11)$$

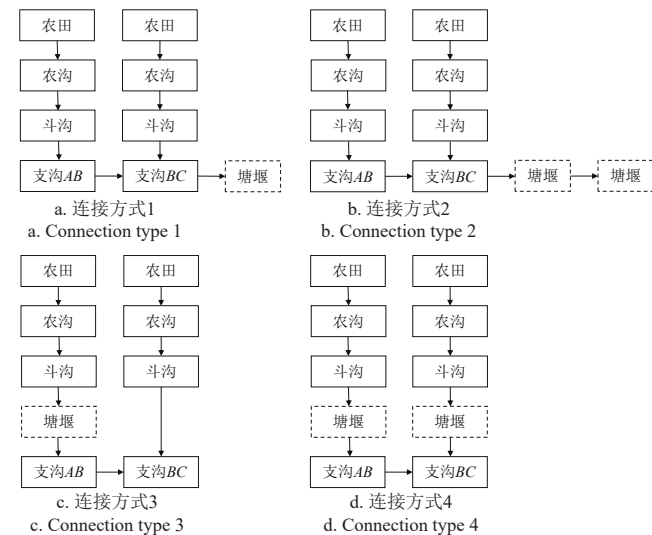


图 6 不同沟塘连接方式示意图

Fig.6 Schematic diagram of different connection types for ditches and ponds

$$C_{mean} = M_{out} / \sum_{t=1}^{t_{all}} X_{out,t} \quad (12)$$

式中 t_{all} 为水稻生育期总天数, d; M 为稻田田块数量; M_f 为稻田排放的污染物总量, g; M_{out} 为系统出口排放的污染物总量, g; $C_{f_{i,t}}$ 为第 t 天第 i 块稻田的污染物浓度, mg/L; $D_{i,t}$ 为第 t 天第 i 块稻田的排水量, mm; A_{f_i} 为第 i 块稻田的面积, m^2 ; $C_{out,t}$ 为系统出口沟塘单元的污染物浓度, mg/L; $X_{out,t}$ 为系统出口沟塘单元的泄水量, m^3 ; M_{load} 为系统出口的污染物排放负荷, kg/hm^2 ; A_{fall} 和 A_{all}

分别为稻田总面积和沟塘总面积， m^2 ； C_{mean} 为系统出口的污染物排放平均浓度， mg/L 。

2 结果与分析

2.1 田沟塘系统水量水质模拟模型评价

本文聚焦生态沟塘系统对农田排水的净化效果，从农田产流和出口响应 2 个方面开展模型验证。利用试验区典型田块的田面水层深度和氮磷浓度观测数据，检验稻田模型的水量水质模拟能力。受限于现场监测条件，未在沟塘布设水位观测设备，缺乏连续的沟塘水位数据。水质浓度变化是水动力、生物吸收及化学转化等多种过程综合作用的结果，能够反映模型的整体模拟能力。本文以系统出口处斗沟 DE 的实测 TN 和 TP 浓度作为验证要素，检验模型对田沟塘系统出口响应的模拟能力。

各验证指标模拟值与实测值的对比见图 7，模型精度评价指标汇总于表 3。图 7 中模拟值与实测值的变化基本吻合。表 3 中 10 项模拟要素中有 8 项的 NSE 大于 0.5，其中 6 项大于 0.65，3 项大于 0.75，7 项模拟要素的 r 大于 0.85，表明模型整体表现良好。仅早稻期间斗沟 DE 段 TN 和 TP 浓度模拟的 NSE 介于 0.3~0.5 之间，模拟效果较差，但其 RRMSE 仅为 0.33 和 0.20，说明相对偏差可控。早稻期间降雨频繁且强度较大，沟塘对农田排水的拦截受限，导致排水中氮磷浓度普遍高于晚稻，并呈现多个浓度峰值，增加了模拟难度。同时，早稻期间水量充沛、水循环更为复杂，而模型未考虑侧向渗流及回归水重复利用等过程，导致早稻期间田沟塘系统出口水质的模拟精度低于晚稻。综合各项指标结果，本文构建的模型可用于田沟塘系统水量水质模拟。

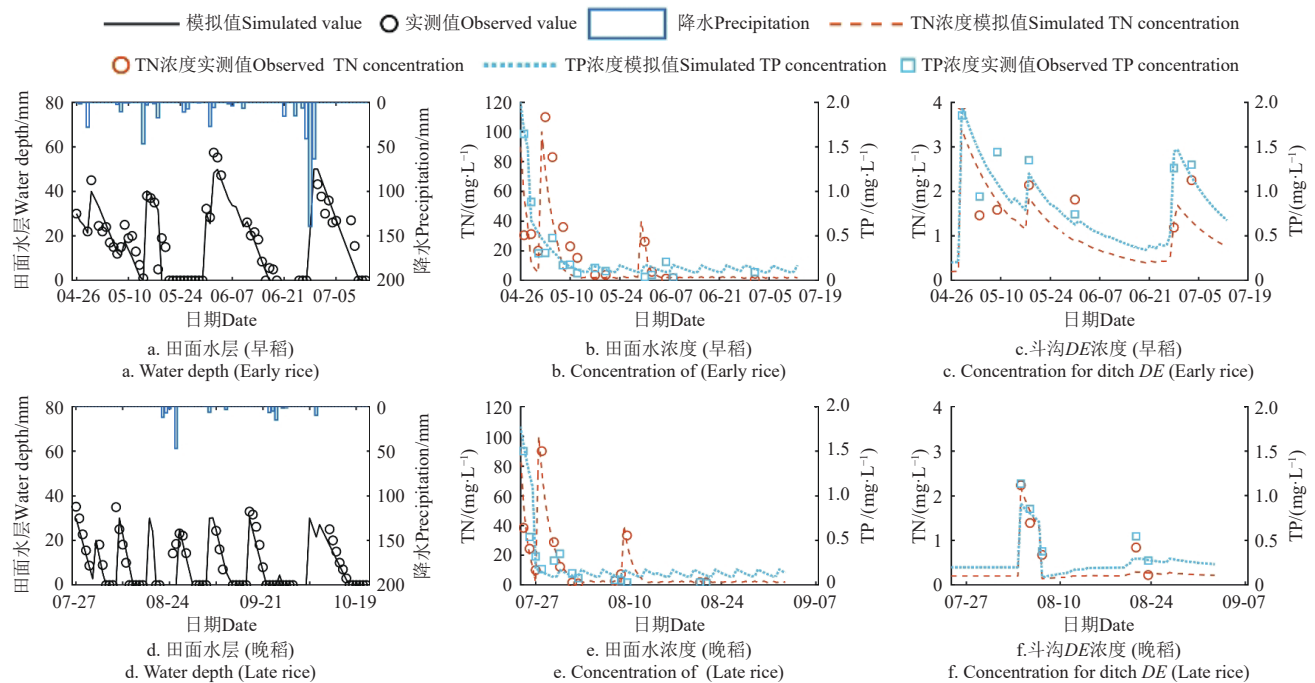


图 7 试验区田沟塘系统模拟值与实测值对比
Fig.7 Comparison of simulated and observed results for the field-ditch-pond system in the experimental area

表 3 试验区田沟塘系统模型精度评价指标
Table 3 Accuracy evaluation metrics for the field-ditch-pond system model in the experimental area

稻季 Rice season	模拟要素 Simulated element	NSE	r	RRMSE
早稻 Early rice	田面水层	0.82	0.92	0.39
	田面总氮浓度	0.59	0.84	0.75
	田面总磷浓度	0.93	0.96	0.36
	斗沟 DE 总氮浓度	0.37	0.69	0.33
	斗沟 DE 总磷浓度	0.38	0.74	0.20
晚稻 Late rice	田面水层	0.70	0.85	0.69
	田面总氮浓度	0.92	0.96	0.36
	田面总磷浓度	0.68	0.89	0.80
	斗沟 DE 总氮浓度	0.72	0.93	0.34
	斗沟 DE 总磷浓度	0.60	0.93	0.31

注：NSE 为纳什效率系数； r 为相关系数；RRMSE 为相对均方根误差。
Note: NSE is the Nash-Sutcliffe efficiency coefficient; r is the correlation coefficient; RRMSE is the relative root mean square error.

2.2 现状条件下生态沟的氮磷净化效果

利用典型年的气象数据驱动示范区模型，得到现状条件下示范区生态沟的氮磷净化效果，见表 4。整体而

言，随着不同典型年降雨量的减少，生态沟对稻田排水的拦截净化能力增强，氮磷排放负荷和平均浓度下降，去除率增加。然而，氮磷输出不仅受降雨总量影响，还与降雨分布特征密切相关，高浓度产流期的集中降雨会导致系统拦截净化能力受限。平水年晚稻期间的降雨集中分布在田面水总磷浓度较高的时期，因此表 4 中会出现晚稻枯水年 TP 排放负荷和平均浓度略大于平水年的情况。不同典型年下早稻期间的 TN、TP 去除率仅在 10.3%~22.5%、18.6%~21.7% 之间；晚稻期间去除率较高，TN、TP 去除率分别在 47.7%~80.9%、48.7%~72.8% 之间。虽然晚稻期间的氮磷排放负荷较小且去除率较高，但由于降雨量和排水量少，导致排水中氮磷的平均浓度相对较高^[39]。早稻期间系统排水的氮、磷水质类别分别处于Ⅲ类~劣Ⅴ类和Ⅱ类~Ⅲ类，晚稻期间系统排水的氮、磷水质类别分别为Ⅳ类~劣Ⅴ类和Ⅱ类~Ⅴ类。上述结果表明，在仅依靠现有生态沟净化稻田排水时，系统的减排效果较差。

表4 现状条件下示范区生态沟的氮磷净化效果

Table 4 Nitrogen and phosphorus purification effects of ecological ditches in the demonstration area under current conditions

污染物 Pollutant	典型年 Typical year	早稻 Early rice			晚稻 Late rice		
		$M_{load}/$ ($kg \cdot hm^{-2}$)	$C_{mean}/$ ($mg \cdot L^{-1}$)	$\eta / \%$	$M_{load}/$ ($kg \cdot hm^{-2}$)	$C_{mean}/$ ($mg \cdot L^{-1}$)	$\eta / \%$
TN	丰水年	26.692	6.695	10.3	8.504	17.202	55.6
	平水年	4.035	1.012	22.5	1.006	3.956	47.7
	枯水年	1.839	0.997	19.0	0.390	1.428	80.9
	均值	10.86	2.90	17.3	3.30	7.53	61.4
TP	丰水年	0.324	0.081	21.7	0.173	0.350	55.0
	平水年	0.574	0.144	18.6	0.023	0.089	48.7
	枯水年	0.205	0.111	18.6	0.037	0.134	72.8
	均值	0.37	0.11	19.7	0.08	0.19	58.8

注: M_{load} 为系统出口的污染物排放负荷; C_{mean} 为污染物平均浓度; η 为污染物去除率。

Note: M_{load} is the pollutant discharge load at the system outlet; C_{mean} is the average pollutant concentration; η is the pollutant removal efficiency.

2.3 不同沟塘-稻田面积比的氮磷净化效果

在现有支沟末端增加塘堰湿地以提高整个系统的净化能力, 并通过改变塘堰湿地面积探究不同沟塘-稻田面积比的氮磷净化效果, 结果见图8。

由图8可知, 随着面积比的增加, 系统氮磷去除率

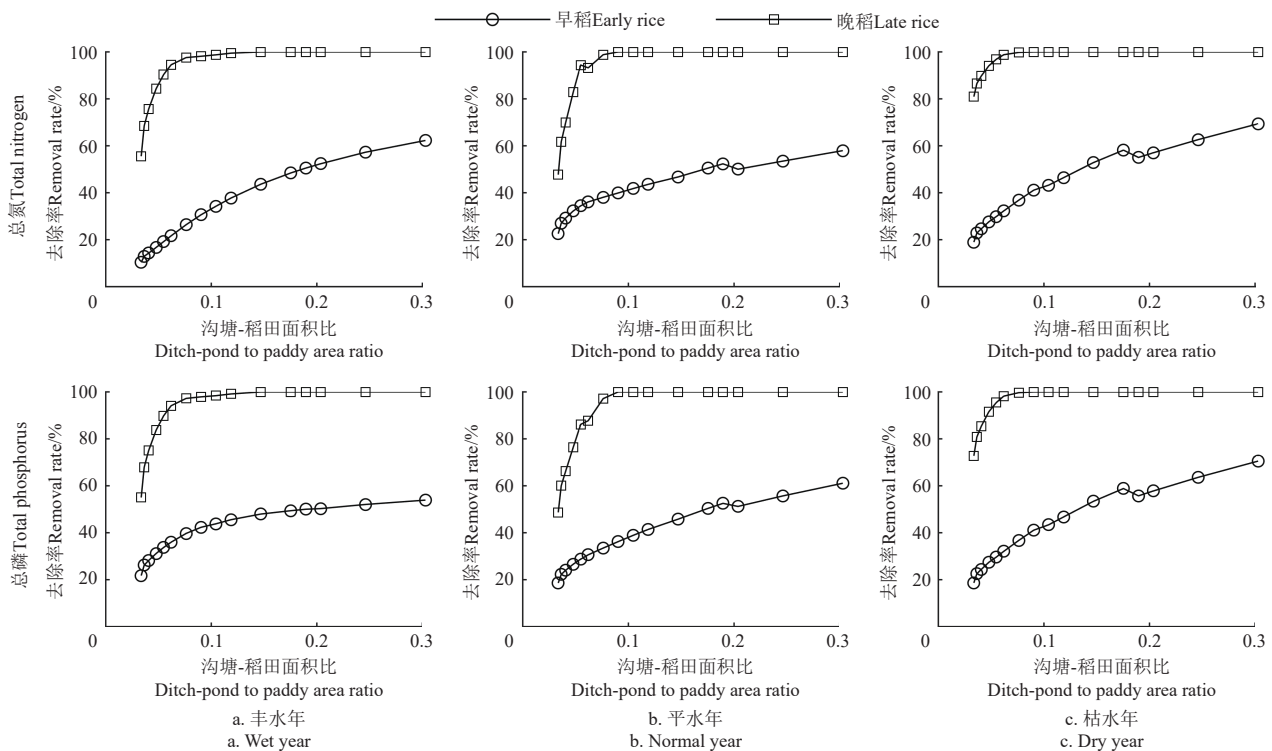


图8 各典型年田沟塘系统氮磷去除率随沟塘-稻田面积比的变化情况

Fig.8 Variation of nitrogen and phosphorus removal rates in the field-ditch-pond system with the ditch-pond to paddy area ratio across typical years

2.4 不同沟塘连接方式的氮磷净化效果

图9是各典型年田沟塘系统氮磷去除率随连接方式的变化情况。在早稻期间或沟塘-稻田面积比较小时, 不同沟塘连接方式的氮磷去除率差异较小, 说明当降雨过多或沟塘面积有限时, 沟塘连接方式并非制约系统净化效果的主要因素。而在晚稻期间或沟塘-稻田面积比较大时, 连接方式3的去除率明显低于其他方式。当存在多条排水路径时, 将塘堰湿地集中布置于单一路径会导致沟塘与农田面积比例失配, 部分区域排水未经有效拦截

随之增加, 但增长趋势逐渐变缓。早稻期间去除率增长的拐点出现在面积比约为5%处。晚稻期间去除率的变化速率明显快于早稻, 当面积比小于9%时, 晚稻去除率增长明显。面积比在5%时, 不同典型年晚稻期间的TN、TP去除率分别可达90%和85%以上; 早稻期间的TN、TP去除率分别在19%~34%和28%~34%之间。平水年早稻不同面积比TN和TP去除率分别为34.41%~39.89%和28.74%~36.21%。面积比达到9%时, 晚稻期间的TN和TP去除率基本为100%, 沟塘基本承接所有田间排水; 早稻期间的TN、TP去除率分别在31%~41%和36%~42%之间。面积比超过9%后, 早稻丰水年期间氮磷去除率的增长趋势变缓, 晚稻期间氮磷去除率不再增加。LI等^[40]对长江中游单季稻种植区的研究表明, 沟塘-稻田面积比为5.2%时, 在不同年份和不同气候条件下的水稻生育期内, 沟塘能够减少38%氮负荷和29%的磷负荷, 与本文早稻结果类似。NAN等^[8]建议湿地-流域面积比至少为5%, 以实现去除50%总氮的目标。综合本文模拟结果及相关研究, 为了兼顾净化效果与系统效率, 沟塘-稻田面积比宜为5%~9%。

即外排, 造成塘堰湿地净化能力的浪费^[7]。连接方式1、2和4的去除率接近, 表明当塘堰湿地集中布置于主排水沟出口或均匀分布在各排水路径时, 其串并联形式和空间位置对系统的净化效果影响有限。

需指出, 本文仅模拟了塘堰湿地与斗沟及支沟间的水力联系变化, 并且示范区内农田和排水沟分布较为均匀, 这些因素可能共同限制了塘堰串并联形式和空间位置对系统整体性能的影响。综合上述结果, 在设计生态沟塘系统的空间布局时, 建议首先根据污染物削减目标确定

适宜的沟塘-稻田面积比，之后将塘堰湿地集中布置于主排水沟出口或将多个塘堰湿地并联布置在各排水路径。

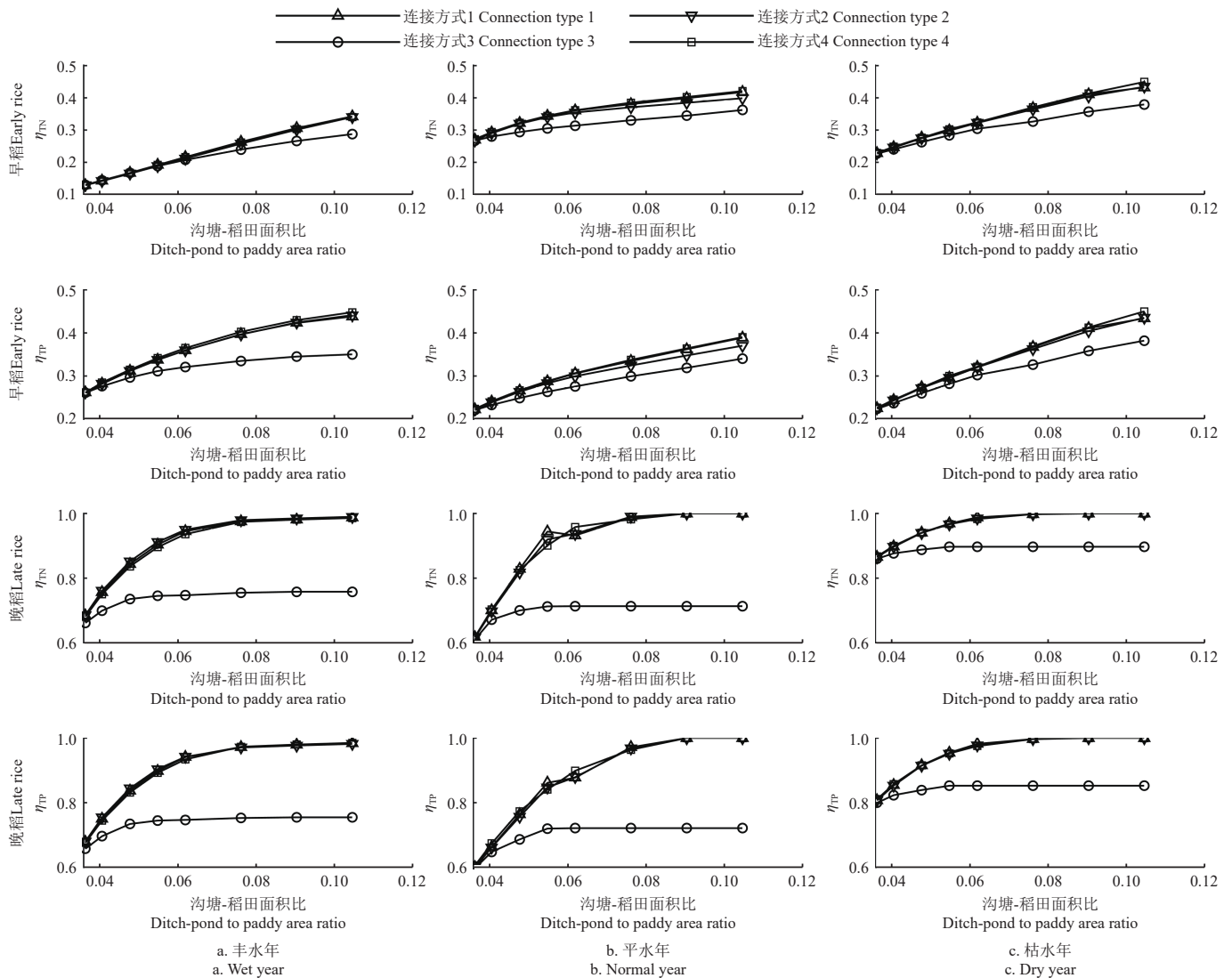


图 9 各典型年田沟塘系统氮磷去除率 (η_{TN} 和 η_{TP}) 随连接方式的变化情况

Fig.9 Variation of nitrogen and phosphorus removal rates (η_{TN} and η_{TP}) in the field-ditch-pond system with connection types across typical years

3 讨论

生态沟塘系统的空间布局模拟需综合考虑多级沟塘的水力联系及水量水质过程。本文基于系统动力学方法对南方水稻灌区生态沟塘系统的空间布局进行模拟分析。与现有研究相比，本文在以下两方面有所突破：1) 在模拟方法上，构建了综合考虑水量平衡、污染物浓度衰减和多级沟塘水力联系的系统动力学模型，能够较为客观地反映水稻灌区的灌排管理方式与沟塘空间分布特征，为多级湿地系统的模拟提供了方法参考；2) 在结果分析上，系统探究了水文年型、沟塘-稻田面积比和沟塘连接方式对净化效果的影响，量化了不同情景下田沟塘系统的污染输出水平和去除能力，为生态沟塘系统的空间布局优化提供了科学依据。

田沟塘系统涉及复杂的水文与生态过程，受观测条件和模型结构限制，本文构建的模型仍存在若干不足。在水量模拟方面，作物需水量和深层渗漏量依赖经验系数估算，且未考虑地形高差引起的侧向渗流及其对区域

水平衡的影响^[41]。在水动力模拟方面，模型侧重水量模拟，未充分刻画生态沟塘中的植被阻水作用及控水建筑物对污染物停留时间的动态影响^[42]。在水质模拟方面，主要采用一级动力学方程描述污染物浓度衰减，未细化不同形态氮磷的迁移转化机制^[43]。在现有条件下完全精细模拟上述过程仍面临挑战，本文模型可视为模型复杂性与实用性的平衡，对田沟塘系统建模研究具有借鉴参考意义。此外，本文采用的系统动力学框架具备良好的拓展性，未来可进一步整合精细化的水量、水动力与水质模块，并融合高分辨率地形数据和污染机理研究成果，增强模型在复杂实际条件下的模拟能力。

4 结论

为了优化灌区生态沟塘系统的空间布局，提高其净化效果与土地利用效率，本文基于系统动力学方法构建综合考虑水量平衡、污染物去除及多级沟塘水力联系的田沟塘系统模型，使用试验区实测数据进行模型验证，

并以南方典型双季稻高标准农田示范区为案例,开展典型年份不同空间布局方案模拟,主要结论如下:

1) 早稻和晚稻期间田沟塘系统田面水层、总氮浓度和总磷浓度模拟的纳什效率系数大多大于 0.5, 其中 6 项大于 0.65, 7 项模拟要素的相关系数大于 0.85, 表明模型整体表现良好, 本文构建的模型可用于田沟塘系统水量水质模拟。

2) 整体而言, 随着不同典型年降雨量的减少, 生态沟对稻田排水的拦截净化能力增强, 氮磷排放负荷和平均浓度下降, 去除率增加。但氮磷输出还受降雨分布特征影响, 高浓度产流期的集中降雨会造成系统拦截净化能力受限, 导致出现枯水年排放负荷和平均浓度偶尔高于平水年的情况。

3) 随着沟塘-稻田面积比的增加, 田沟塘系统的氮磷去除率随之增加, 但整体增长趋势逐渐变缓。为了兼顾净化效果与系统效率, 沟塘-稻田面积比宜为 5%~9%。在此范围内, 平水年早稻期间总氮和总磷去除率分别为 34.41%~39.89% 和 28.74%~36.21%, 平水年晚稻期间总氮和总磷去除率分别可达 90% 和 85% 以上。

4) 在降雨过多或沟塘面积有限时, 不同沟塘连接方式的氮磷去除率差异较小。而在晚稻期间或沟塘-稻田面积比较大时, 将塘堰湿地集中布置于单一排水路径的去除率明显低于其他连接方式。在进行生态沟塘系统的空间布局时, 建议首先根据污染物削减目标确定适宜的沟塘-稻田面积比, 之后根据实地情况将塘堰湿地集中布置于主排水沟出口或将多个塘堰湿地并联布置在各排水路径。

本文利用田沟塘系统模型开展了灌区生态沟塘系统空间布局模拟研究, 为多级湿地系统的建模提供了方法参考。然而, 当前模型仍存在优化空间, 未来可进一步完善田沟塘系统水循环与污染物迁移转化过程的模拟, 提升模型精度和适用性。

[参 考 文 献]

- [1] 施卫明, 王远, 闵炬. 中国农业面源污染防控研究进展与工程案例[J]. *土壤学报*, 2023, 60(5): 1309-1323.
SHI Weiming, WANG Yuan, MIN Ju. Progress in research and engineering application cases of agricultural non-point source pollution control in China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2023, 60(5): 1309-1323. (in Chinese with English abstract)
- [2] 茆智. 构建节水防污型生态灌区[J]. *中国水利*, 2009(19): 28.
- [3] 董越勇, 鲁长根, 王志荣, 等. 浙江省农田氮磷生态拦截沟渠系统功能实现结构化评估体系的探讨与实证[J]. *浙江农业科学*, 2022, 63(4): 843-849, 867.
- [4] 霍铁珍, 曾祥, 郭富强, 等. 河套灌区生态沟与湿地削减农田排水污染物研究[J]. *长江科学院院报*, 2024, 41(12): 40-47.
HUO Yizhen, ZENG Xiang, GUO Fuqiang, et al. Effect of ecological ditch and wetland in reducing farmland drainage pollutant in Hetao irrigation district[J]. *Journal of Changjiang River Scientific Research Institute*, 2024, 41(12): 40-47. (in Chinese with English abstract)
- [5] 方荣杰, 邹传林, 徐保利, 等. 不同时期生态沟对农业污水中氮磷沿程削减效应研究[J]. *中国农村水利水电*, 2022(8): 199-205.
FANG Rongjie, ZOU Chuanlin, XU Baoli, et al. Effects of ecological ditch on nitrogen and phosphorus reduction of agricultural wastewater in different periods[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2022(8): 199-205. (in Chinese with English abstract)
- [6] 马震, 崔远来, 郭长强, 等. 基于水力性能和净化效果的表面流人工湿地设计参数优化[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(12): 157-164.
MA Zhen, CUI Yuanlai, GUO Changqiang, et al. Optimization of design parameters of surface flow constructed wetland based on hydraulic performance and pollutant purification effect[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2019, 35(12): 157-164. (in Chinese with English abstract)
- [7] 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)
- [8] NAN X, LAVRNIC S, MANCUSO G, et al. Effects of design and operational conditions on the performance of constructed wetlands for agricultural pollution control – critical review[J]. *Water, Air & Soil Pollution*, 2023, 234(7): 434.
- [9] 张宇婷, 张博超, 顾世祥, 等. 植物种类和入塘流量对塘堰湿地净化效果和水力性能的影响[J]. *中国农村水利水电*, 2023(7): 139-146, 152.
ZHANG Yuting, ZHANG Bochao, GU Shixiang, et al. The effects of plant species and inlet flow rate on the treatment performance and hydraulic performance of pond wetlands[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2023(7): 139-146, 152. (in Chinese with English abstract)
- [10] SABOKROUHIYEH N, BOTTACIN-BUSOLIN A, TREGNAGHI M, et al. Variation in contaminant removal efficiency in free-water surface wetlands with heterogeneous vegetation density[J]. *Ecological Engineering*, 2020, 143: 105662.
- [11] 王佳儿, 崔远来, 张博超, 等. 基于 EFDC 模型的表面流人工湿地水力性能和净化效果影响因素分析[J]. *农业工程学报*, 2024, 40(7): 172-181.
WANG Jiaer, CUI Yuanlai, ZHANG Bochao, et al. Factors affecting the hydraulic performance and purification efficiency of free-water-surface constructed wetlands based on EFDC model[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2024, 40(7): 172-181. (in Chinese with English abstract)
- [12] OUEDRAOGO F R, ZHANG J, TEJADA-MARTINEZ A E. Inlet retrofitting improves the hydraulic performance of a waste stabilization pond[J]. *Ecological Engineering*, 2023, 193: 107006.
- [13] LIU J, DONG B, GUO C Q, et al. Variations of effective volume and removal rate under different water levels of constructed wetland[J]. *Ecological Engineering*, 2016, 95: 652-664.
- [14] WU H, WANG R, YAN P, et al. Constructed wetlands for pollution control[J]. *Nature Reviews Earth and Environment*, 2023, 4(4): 218-234.
- [15] 时红, 才硕, 孙占学, 等. 田-沟-塘系统纳洪减污效应研究进展[J]. *节水灌溉*, 2024(1): 16-22.
SHI Hong, CAI Shuo, SUN Zhanxue, et al. Research progress on the effect of flood control and pollution reduction in field-

- ditch-pond System[J]. *Water Saving Irrigation*, 2024(1): 16-22. (in Chinese with English abstract)
- [16] SUN C, CHEN L, LIU H B, et al. New modeling framework for describing the pollutant transport and removal of ditch-pond system in an agricultural catchment[J]. *Water Resources Research*, 2021, 57(12): e2021WR031077.
- [17] JIA Z, CHEN C, LUO W, et al. Hydraulic conditions affect pollutant removal efficiency in distributed ditches and ponds in agricultural landscapes[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 649: 712-721.
- [18] VYMAZAL J. The use of constructed wetlands for nitrogen removal from agricultural drainage: A review[J]. *Scientia Agriculturae Bohemica*, 2017, 48(2): 82-91.
- [19] HOFFMANN C C, HEIBERG L, AUDET J, et al. Low phosphorus release but high nitrogen removal in two restored riparian wetlands inundated with agricultural drainage water[J]. *Ecological Engineering*, 2012, 46: 75-87.
- [20] 梁浩, 胡宗芸, 杨士红, 等. 稻田-沟塘系统水氮动态模拟与灌排调控模型构建[J]. *农业工程学报*, 2021, 37(22): 49-57. LIANG Hao, HU Zonghui, YANG Shihong, et al. Simulation of the water and nitrogen dynamics for paddy field-ditch pond system and model construction of irrigation and drainage regulation[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2021, 37(22): 49-57. (in Chinese with English abstract)
- [21] 刘馨井雨, 王修贵, 田英, 等. 基于湿地和生态沟处理的稻田排水水质模拟[J]. *灌溉排水学报*, 2018, 37(2): 101-107. LIU Xinjingyu, WANG Xiugui, TIAN Ying, et al. Water quality modeling for wetland and ecological ditch to treat drainage water from paddy fields[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2018, 37(2): 101-107. (in Chinese with English abstract)
- [22] 刘连华, 欧阳威, 白艳, 等. 基于田-沟-塘系统优化的稻作流域氮素面源污染减排潜力评估[J]. *中国环境科学*, 2025, 45(5): 2693-2699. LIU Lianhua, OUYANG Wei, BAI Yan, et al. Evaluation on the reduction potential of diffuse nitrogen pollution in paddy field watersheds based on field-ditch-pond system optimization[J]. *China Environmental Science*, 2025, 45(5): 2693-2699. (in Chinese with English abstract)
- [23] MASI M, MASSERONI D, CASTELLI F. Coupled hydrologic, hydraulic, and surface water quality models for pollution management in urban-rural areas[J]. *Journal of Hydrology*, 2025, 657: 133172.
- [24] 陈雅雯, 罗纨, 朱卫彬, 等. 高标准农田建设中排水沟塘系统改造对排水水质的影响[J]. *农业工程学报*, 2025, 41(13): 114-122. CHEN Yawen, LUO Wan, ZHU Weibin, et al. Effects of drainage ditch and pond system renovation on drainage water quality in high standard farmland construction[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2025, 41(13): 114-122. (in Chinese with English abstract)
- [25] 陈梦婷, 杨琳, 吴光星, 等. 考虑降雨有效利用的水稻灌溉模式的优化[J]. *排灌机械工程学学报*, 2021, 39(8): 832-837. CHEN Mengting, YANG Lin, WU Guangxing, et al. Optimization of paddy rice irrigation schedule considering effective utilization of rainfall[J]. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering (JDIME)*, 2021, 39(8): 832-837. (in Chinese with English abstract)
- [26] RUAN S, ZHUANG Y, ZHANG L, et al. Improved estimation of nitrogen dynamics in paddy surface water in China[J]. *Journal of Environmental Management*, 2022, 312: 114932.
- [27] CANET-MARTÍ A, GRÜNER S, LAVRNIĆ S, et al. Comparison of simple models for total nitrogen removal from agricultural runoff in FWS wetlands[J]. *Water Science and Technology*, 2022, 85(11): 3301-3314.
- [28] 韩焕豪. 稻田-生态沟-塘堰湿地系统氮素迁移转化规律及机理研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2019. HAN Huanhao. Study on the Law and Mechanism of Nitrogen Transfer and Transformation in Paddy Field Eco-ditch Wetland System[D]. Wuhan: Wuhan University, 2019. (in Chinese with English abstract)
- [29] ZHANG B, CUI Y, LIAO B, et al. Experimental checking and modeling of the influence of operation conditions on the first order kinetic constants in free water surface wetlands[J]. *Journal of Environmental Management*, 2023, 331: 117348.
- [30] 周专, 苗帅, 袁铁江. 提升风电消纳的绿氢钢铁冶炼系统动力学建模[J]. *中国电力*, 2024, 57(8): 36-45. ZHOU Zhuang, MIAO Shuai, YUAN Tiejian. System dynamics modeling of green hydrogen steel smelting to improve wind power consumption[J]. *Electric Power*, 2024, 57(8): 36-45. (in Chinese with English abstract)
- [31] 王智琦, 李建国, 彭彬彬, 等. 基于系统动力学的交通碳排放达峰模拟分析[J]. *环境科学*, 2025, 46(11): 6806-6811. WANG Zhiqi, LI Jianguo, PENG Binbin, et al. Simulation and analysis of transportation carbon emissions peaking based on system dynamics[J]. *Environmental Science*, 2025, 46(11): 6806-6811. (in Chinese with English abstract)
- [32] 才硕, 时红, 许亚群, 等. 赣抚平原灌区双季稻优化灌溉方式研究[J]. *中国农村水利水电*, 2014(4): 11-14. CAI Shuo, SHI Hong, XU Yaqun, et al. Research on the intensifying irrigation modes of double season rice in irrigation areas of Ganfu plain[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2014(4): 11-14. (in Chinese with English abstract)
- [33] 时元智, 时红, 崔远来, 等. 基于涡度相关法的长江中下游稻田水分利用效率变化规律[J]. *农业工程学报*, 2021, 37(4): 130-139. SHI Yuanzhi, SHI Hong, CUI Yuanlai, et al. Variation of water use efficiency in a paddy field in the middle and lower reaches of the Yangtze River using eddy covariance method[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2021, 37(4): 130-139. (in Chinese with English abstract)
- [34] 刘博, 汪文超, 崔远来, 等. 基于水碳通量耦合的长江中下游稻田蒸散发组分分解[J]. *农业工程学报*, 2021, 37(24): 94-101. LIU Bo, WANG Wenchao, CUI Yuanlai, et al. Partitioning evapotranspiration using the water-carbon flux coupling in a paddy field in the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River in China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2021, 37(24): 94-101. (in Chinese with English abstract)
- [35] 王力, 崔远来, 时元智, 等. 鄱阳湖流域典型湿地植物需水规律研究[J]. *节水灌溉*, 2014(12): 6-9, 15. WANG Li, CUI Yuanlai, SHI Yuanzhi, et al. Water requirement rule of typical wetland vegetation in Poyang lake basin[J]. *Water Saving Irrigation*, 2014(12): 6-9, 15. (in Chinese with English abstract)
- [36] 王璟京, 高红凯, 刘敏, 等. 参数区域化在全球水文模型 FLEX-Global 中的应用[J]. *中国科学: 地球科学*, 2021, 51(5): 805-823. WANG Jingjing, GAO Hongkai, LIU Min, et al. Parameter regionalization of the FLEX-Global hydrological model[J].

- Science China Earth Sciences, 2021, 51(5): 805-823. (in Chinese with English abstract)
- [37] MORIASI D N, ARNOLD J G, VAN LIEW M W, et al. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations[J]. *Transactions of the ASABE*, 2007, 50(3): 885-900.
- [38] 彭正艺. 南方丘陵灌区不同尺度水氮循环特征及回归水利用的节水减排效果[D]. 太原: 太原理工大学, 2025.
PENG Zhengyi. Characteristics of Water and Nitrogen Cycling at Different Scales and Effects of Water Saving and Emission Reduction on Regression Water Utilization in Southern Hilly Irrigation Area[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2025. (in Chinese with English abstract)
- [39] 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.
DONG Bin, MAO Zhi, LI Xinjian, et al. Introduction, adaptation and application of wetland-reservoir-subirrigation-system in rice-based irrigation systems of south China[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2009(11): 9-12, 15. (in Chinese with English abstract)
- [40] LI S, LIU H, ZHANG L, et al. Potential nutrient removal function of naturally existed ditches and ponds in paddy regions: Prospect of enhancing water quality by irrigation and drainage management[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 718: 137418.
- [41] 邵培寅, 熊玉江, 袁念念, 等. 南方丘陵灌区水田-塘堰-沟道系统水循环特征及回归水重复利用规律分析[J]. 农业工程学报, 2023, 39(11): 106-117.
SHAO Peiyin, XIONG Yujiang, YUAN Niannian, et al. Hydrological cycle for Paddy-Ponds-Ditches system and reuse of return flow in Southern hilly irrigated areas[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2023, 39(11): 106-117. (in Chinese with English abstract)
- [42] ZHANG B, CUI Y, SHU Y, et al. Comparative analysis and selection criteria for residence time distribution models in free water surface constructed wetlands[J]. *Journal of Hydrology*, 2024, 629: 130620.
- [43] SHU Y, WANG J, LIAO B, et al. Mechanistic study on the role of design and management factors in regulating nitrogen treatment performance in constructed wetlands[J]. *Ecological Engineering*, 2025, 217: 107645.

Simulation of the spatial layout for ecological ditch-pond systems in irrigation districts based on system dynamics

ZHANG Bochao¹, CHEN Yang¹, SHI Yuanzhi¹, ZHANG Yuting², CUI Yuanlai^{2*}

(1. State Key Laboratory of Water Disaster Prevention, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 2. State Key Laboratory of Water Resources Engineering and Management, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: Ecological ditch-pond systems are important measures for controlling agricultural non-point source pollution, yet their practical application is constrained by unstable purification performance and large land occupancy. The effective application of such systems in irrigation districts depends not only on the design and operation management of individual units, but also significantly on their spatial layout (including system area and unit connection pattern). Existing studies often fail to adequately capture the multi-level dynamic responses of water volume and water quality in such systems, which hinders their support for spatial layout optimization. Against this backdrop, this study proposes a system dynamics-based simulation method for optimizing the spatial layout of ditch-pond systems in irrigation districts. A field-ditch-pond system model was developed using the system dynamics simulation tool Vensim, integrating water balance, pollutant removal processes, and hydraulic connections among ditches and ponds. The water depth in the paddy model was determined by inflows, outflows, and water consumption during each time step, while the total nitrogen and total phosphorus concentrations were simulated by considering fertilization, first-order pollutant decay, and inputs from rainfall and irrigation. For the ditch-pond unit model, water volume changes were governed by rainfall, evapotranspiration, seepage, upstream inflow, and drainage discharge. Pollutant concentrations in the ditch-pond unit model were calculated using two modes: static storage-based reduction and dynamic drainage-based reduction. The paddy and ditch-pond unit models were linked through system dynamics into an integrated field-ditch-pond system model, which was calibrated and validated using field monitoring data. A case study was conducted in a typical double-cropping paddy high-standard farmland demonstration area in southern China. The model verification results show that the developed model can effectively simulate the dynamic variations of water volume and pollutant concentrations in the system. The case analysis results show that: 1) With increasing ditch-pond to paddy area ratio, nitrogen and phosphorus removal rates rise, but the rate of increase gradually slows down, suggesting an optimal range of 5%-9%; 2) During the late rice season or under larger area ratios, concentrating wetlands in a single drainage path results in a significantly lower removal rate compared to other layouts; 3) For practical implementation, it is recommended to first determine an appropriate area ratio based on target pollutant reduction goals. Subsequently, wetlands may be placed either at the main drainage outlet or distributed in parallel across different drainage pathways, depending on site-specific conditions. The findings provide a methodological reference for modeling multi-level wetland systems and offer a scientific basis for ecological control of agricultural non-point source pollution. Future work may further refine the simulation of water cycling and pollutant transformation processes within field-ditch-pond systems to enhance model accuracy and applicability.

Keywords: rice irrigation district; non-point source pollution; ecological ditch and pond; spatial layout; system dynamics