

基于 SWAT 模型的南方水稻灌区全生育期 面源污染特征及控制模拟

陈丽娜, 张文硕, 徐俊增, 孙一淼

(河海大学农业科学与工程学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 为了解水稻生育期内灌区面源污染的输出特征及其对下游控制断面水质的影响, 选取某典型南方水稻灌区为研究对象, 基于 SWAT 模型构建田-沟-塘-控制断面的面源污染全过程数值模拟模型, 量化分析水稻全生育期 9 种污染控制方案下控制断面水质动态响应。结果表明: 退水和氮、磷污染物均呈脉冲式排放, 水稻生育期前半段, 即移植返青期、分蘖期和拔节孕穗期是稻田面源污染发生的高峰期; 控制灌溉、生态工程和控制排水措施在水稻生育期前半段对氮、磷污染物的削减效果较好, 实施综合措施后削减效果显著提升, 对 TN 和 TP 全生育期的削减率超过 90%; 单项措施的水质提升效果有限, 施肥管理导致分蘖期出现更多脉冲式 TN 质量浓度峰值, 综合措施可显著提升水质达标率, 其中施肥管理、控制排水、生态工程的组合措施和控制灌溉、施肥管理、控制排水、生态工程的组合措施可以实现 TN 和 TP 质量浓度稳定达标。

关键词: 水稻灌区; 面源污染; 水稻全生育期; 控制断面; SWAT 模型

中图分类号: X52

文献标志码: A

文章编号: 1004-6933(2024)06-0198-08

Simulation of non-point source pollution characteristics and control effect in southern paddy irrigation district based on SWAT model during paddy growth period//CHEN Li'na, ZHANG Wenshuo, XU Junzeng, SUN Yimiao (College of Agricultural Science and Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: To understand the output characteristics of non-point source pollution in the irrigation area during the paddy growth period and its impact on the water quality of downstream control sections, a typical paddy irrigation district in southern China was selected as the research object, and a numerical model for simulation of non-point source pollution processes in the field, gully, pond, and control section was constructed based on the SWAT model. The model was used to quantitatively analyze the dynamic response of water quality at the control section under 9 pollution control schemes throughout the entire paddy growth period. The results showed that retreated water and nitrogen and phosphorus pollutants were discharged in a pulsed manner, and the peak of non-point source pollution in paddy field occurred in the first half of paddy growth period, including the transplant regreening stage, tillering stage, and jointing booting stage. Measures of controlled irrigation, ecological engineering, and controlled drainage had good effects on reducing nitrogen and phosphorus pollutants in the first half of paddy growth period, and the reduction effect was significantly improved after the implementation of comprehensive measures, with the reduction rates of TN and TP exceeding 90% during the whole paddy growth period. The effects of single measures on water quality improvement were limited, and fertilization management led to more pulsatile TN mass concentration peaks at the tillering stage. Comprehensive measures could significantly improve the water quality compliance rate, especially, the combined measure of fertilization management, controlled drainage, and ecological engineering and the combined measure of controlled irrigation, fertilization management, controlled drainage, and ecological engineering could ensure the TN and TP mass concentrations to reach the water quality standard.

Key words: paddy irrigation district; non-point source pollution; whole paddy growth period; control cross-section; SWAT model

农业面源污染是导致水体污染的主要源头, 严重威胁着区域水环境安全^[1-2]。2020 年国家生态环境

部发布的《第二次全国污染源普查公报》显示, 从农业污染源排放出的化学需氧量、总氮(TN)、总磷

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目(522031911); 江苏省环境工程技术有限公司自主立项科研项目(JSEP-GJ20220013-RE-ZL); 江苏省生态环境科研项目(2023013); 安徽省住房城乡建设科学技术计划项目(2023-SF045)

作者简介: 陈丽娜(1982—), 女, 副教授, 博士, 主要从事农田污染物迁移转化机制和面源污染治理研究。E-mail: chenlina2001@163.com

通信作者: 徐俊增(1980—), 男, 教授, 博士, 主要从事农业高效灌排和农田生态效应研究。E-mail: xjz481@hhu.edu.cn

(TP) 分别占地表水体污染物总负荷的 49.8%、46.5% 和 67.2%，是我国地表水污染的首要贡献者。典型的农业面源污染发生过程具有多界面(水-土-气)^[3]、多过程(迁移、淋溶、挥发)^[4]、多尺度(田块、流域、区域)^[5]等特点。农业面源污染由于来源分散、成分多变、发生随机等特征，使其流失量难以直接监测，流失过程难以追踪，最终对水质的影响难以定量^[6]，严重制约着受农业面源污染区域水环境的水质稳定性及达标率。水稻是我国南方最主要的作物类型，伴随水稻主要生育期内人工排水和降雨径流等退水行为的发生，田间大量的氮、磷等养分随退水流失，导致稻田周边水塘及河湖水体富营养化^[7]。

国内外已研发了多种流域面源污染过程评估模型^[8-10]，这些模型成为流域面源污染时空过程定量评估的重要工具，但都存在一定的局限性。Hydrus 和 MIKE SHE 模型侧重于水文过程的描述，需要耦合其他水质模型来模拟流域营养物质的迁移与转化^[11]；DRAINMOD 模型侧重模拟田间的水文特性、氮素及盐分运移情况；HSPF (hydrological simulation program-Fortran) 模型则采用过多经验方程来描述物理过程^[12]；AnnAGNPS (annualized agricultural non-point source pollution model) 则没有考虑地下水的影响^[13]。以上这些模型的缺点限制了其在农业面源污染模拟领域的应用。近年来，SWAT (soil and water assessment tool) 模型被广泛应用于非点源污染负荷计算、流域管理措施及其对水环境的影响研究^[14-16]。SWAT 模型可以准确模拟流域面源污染的产生、迁移和转化过程，还可应用于模拟和预测各种管理措施的实施效果，以减少面源污染负荷，改善水质和保护水环境^[17-20]。

目前对于水稻生育期内面源污染的模拟研究较少，且缺少田间面源污染负荷与流域控制断面水质响应关系的研究，对流域面源污染的模拟未能达到较高的精度。本文基于 SWAT 模型构建田-沟-塘-控制断面的面源污染全过程数值模拟模型，模拟分析南方某水稻灌区全生育期内面源污染的演变特征，量化分析各污染控制措施对氮、磷污染物的削减效

果及其对控制断面水质的提升程度，研究结果可为灌区面源污染精细化防控提供依据。

1 研究区概况

研究区位于江苏省昆山市锦溪镇红光灌区 (31°11'44"N、120°54'11"E)，东临白莲湖，属北亚热带南部季风气候区，如图 1 所示。多年平均气温 17.6℃，多年平均降水量 1 200.4 mm，多年平均日照时间 1 789.2 h。土壤为潴育型黄泥土，耕层土壤为重壤土。当地主要种植作物为水稻，常规灌溉方式为淹灌，施肥方式见表 1。灌区面积 6.67 hm²，设有 2 条沟渠，农沟 1 长 210 m，接纳 2.67 hm² 的稻田排水；农沟 2 长 270 m，接纳 4 hm² 的稻田排水。基于《江苏省地表水(环境)功能区划》，研究区域属于急水港吴江工业、农业用水区，水质目标为Ⅳ类地表水标准，即 $\rho_{\text{TN}} \leq 1.5 \text{ mg/L}$ 、 $\rho_{\text{TP}} \leq 0.3 \text{ mg/L}$ 。研究区农田退水流入下游河道，常年流量为 5 m³/s，水质达Ⅳ类标准，控制断面位于灌区出口下游 1 000 m 处。

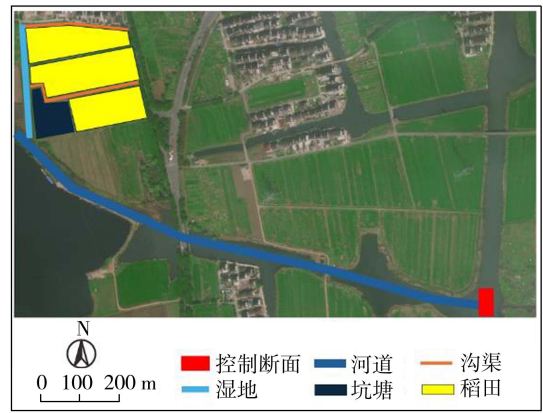


图 1 研究区概况

Fig. 1 Overview of study area

2 研究方法

2.1 SWAT 模型

SWAT 模型是一个连续的、基于 GIS 的水文和水质模型，常用于流域评价及未来情景分析，可以模拟不同土壤类型、土地利用方式、农业管理等对流域产流、产沙、营养物质转移及面源污染等的影响。

SWAT 模型河道水质模块采用 QUAL2E 河流综

表 1 施肥方式

Table 1 Fertilization methods

肥料类别	肥料种类	施肥时间		氮肥施用量/(kg/hm ²)	
		常规施肥	改进施肥	常规施肥	改进施肥
基肥	复合肥; $w(\text{N}) : w(\text{P}_2\text{O}_5) : w(\text{K}_2\text{O}) = 16\% : 12\% : 17\%$ 农用碳酸氢铵; $w_{\text{TN}} \geq 17.1\%$	6月28日	6月8日	56.3	45.0
		7月4日	6月21日	69.6	52.2
蘖肥	尿素; $w_{\text{TN}} \geq 46.2\%$	7月13日	7月10日	69.6	87.0
穗肥	尿素; $w_{\text{TN}} \geq 46.2\%$	8月8日	7月31日	87.0	69.6
合计				282.5	253.8

合水质模型,可模拟河道中泥沙、有机氮、有机磷、氨氮、可溶性磷、亚硝酸盐、生化需氧量、农药等不同水质指标的质量浓度变化过程。模型通过设置灌水量、施肥量及耕作方式等模拟不同农田管理情景,通过设置坑塘、湿地或水库等水体模拟控制排水措施,其中,湿地出流量受湿地正常水位和最高水位控制,计算公式为

$$V_f = \begin{cases} 0 & V < V_{nor} \\ (V - V_{nor})/10 & V_{nor} \leq V \leq V_{max} \\ V - V_{max} & V > V_{max} \end{cases} \quad (1)$$

式中: V_f 为湿地出流量; V 为湿地蓄水量; V_{max} 为最高水位时湿地蓄水量; V_{nor} 为正常水位时湿地蓄水量。

2.2 模型构建

2.2.1 数据类型及模型构建

利用 SWAT 模型构建灌区田-沟-塘-断面的面源污染全过程数值模拟模型,模型数据库包含两类数据:①空间数据,包括数字高程(DEM)、土地利用类型(包括农田、水体和非建设用地)、土壤类型(包括人为堆积土和水体)、排水渠系等数据;②属性数据,包括气象、水文、水质等数据,将水文和水质实测数据用于模型率定和验证。模型数据库数据信息见表2。基于DEM和实测河网水系划分子流域,基于划分的子流域,结合土地利用类型、土壤类型和坡度进一步将子流域细分为水文响应单元。水量和营养

表2 模型数据库数据信息

Table 2 Model database data information

数据名称	数据类型	数据来源
高程、坡度	空间数据	实地高程测量
土壤类型和分布	空间数据	现场调研
土地利用类型和分布	空间数据	现场调研
气象站点降雨、气温、风速	属性数据	现场气象站获取
逐日径流量和TN、TP质量浓度	属性数据	现场实测
灌区水系分布	空间数据	现场调研

表3 径流和水质参数率定结果

Table 3 Calibration results of runoff and water quality parameters

参数符号	参数说明	单位	取值范围	最终值
r_CN2. mgt	土壤水分条件为一般湿润时初始 SCS 径流曲线数		-0.3~0.3	-0.123
r_SOL_Z. sol	土层底部埋深	mm	-0.5~0.5	0.335
v_ALPHA_BF. gw	基流 α 因子	d	0~1	0.350
v_CH_N2. Rte	主河道曼宁系数		0~0.4	0.090
v_CH_K2. Rte	主河道冲积物有效渗透系数	mm/h	0~150	57.750
v_IRR_SQ. mgt	灌溉水地表径流比		0.1~0.8	0.710
r_FRT_SURFACE. mgt	残留在土壤表层 10 mm 内肥料质量占施肥总质量的比例		-0.2~0.2	-0.190
r_NPERCO. bsn	氮渗透系数		-0.2~0.2	0.060
r_USLE_K(.). sol	土壤侵蚀因子		-0.2~0.2	0.170
v_PHOSKD. bsn	土壤磷分配系数	m^3/t	100~200	124.500
v_PPERCO. bsn	磷渗透系数	m^3/t	5~20	7.600
v_RS2. swq	沉积物提供可溶性磷的速率	$mg/(m^2 \cdot d)$	0.1~0.5	0.140

物输出负荷在每个水文响应单元汇总,然后经过河道、坑塘汇集到稻田灌区出口。

2.2.2 模型率定与验证

利用 SWAT-CUP 软件对径流和水质参数进行率定,结果见表3,假设参数设定范围为 $[a, b]$,初始值 c ,当率定方式为 r 时,该参数在 $[c(1-a), c(1+b)]$ 内遍历;当率定方式为 v 时,该参数在 $[a, b]$ 内遍历。选择决定系数 R^2 和纳什效率系数 E_{ns} 评价模型率定和验证效果。模型进行率定和验证时需要现场实测的水文、水质数据,具体包括径流和TN、TP质量浓度,均为日尺度数据。选取2011年(枯水年)8—9月的数据进行模型率定与验证,设置8月1—22日为模型率定期,8月22日至9月3日为模型验证期。模型对径流和水质的率定和验证结果如图2所示,率定期和验证期的 R^2 和 E_{ns} 均大于0.7,说明模型对径流和水质的模拟效果较好,可应用于模拟灌区面源污染负荷。

2.3 灌区面源污染控制措施

根据灌区面源污染特征,选取施肥管理、控制灌溉、控制排水、生态工程及5种综合措施构成9种控制方案^[21-22],如表4所示,其中控制排水措施中田-沟-塘多级拦蓄表示分别在稻田、排水沟和坑塘湿地内对退水进行拦蓄,设置代表田、沟的水库正常水位蓄水量分别为0.06、0.15万 m^3 ,代表塘的湿地正常水位蓄水量为1万 m^3 ;生态工程措施中设置植被缓冲带的宽度为3m,河道植被覆盖因子为1.97。

3 结果与分析

3.1 稻田退水量及氮、磷污染负荷

利用率定验证后的模型模拟水稻全生育期(6月27日至10月25日)内稻田的退水量及TN、TP的输出量。如图3(a)所示,稻田退水呈脉冲式排放,降雨或灌水后的1~3d退水量出现峰值,最高

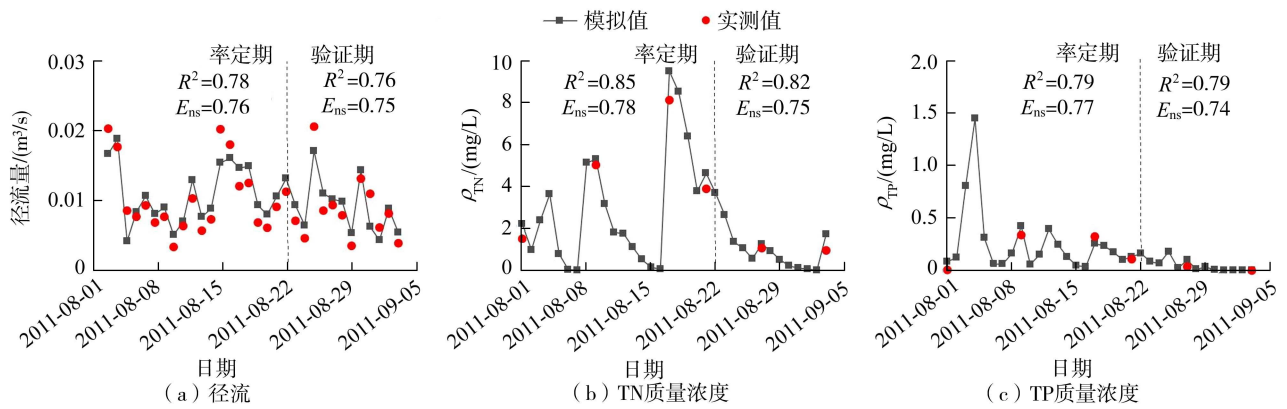


图2 径流和水质率定和验证结果

Fig. 2 Calibration and validation results of runoff and water quality

表4 各方案控制措施

Table 4 Control measures in different schemes

方案	控制措施	措施内容
1	控制灌溉	采用节水灌溉措施,优化灌溉日期与水深
2	施肥管理	采用改进施肥措施,优化施肥日期与施肥量
3	控制排水	实施田-沟-塘多级拦蓄
4	生态工程	设置植被缓冲带,提升河道植被覆盖度
5	综合措施	方案1和2组合
6	综合措施	方案2和3组合
7	综合措施	方案2,3和4组合
8	综合措施	方案1,2和3组合
9	综合措施	方案1,2,3和4组合

退水量可达 $0.056 \text{ m}^3/\text{s}$,退水高峰期集中在移植返青期、分蘖期和拔节孕穗期,退水量与降雨和灌水频次、强度呈正相关关系。高学睿等^[23]的模拟结果也显示退水主要集中在移植返青期、分蘖期和拔节孕穗期;而陈会等^[24]的模拟结果显示,排水沟在水稻生育后期(乳熟期和黄熟期)也有着较高的退水量,这可能是因为其研究区在东北地区,水稻播种期开始时间比低纬度地区早,一般8月就进入乳熟期和黄熟期^[25],此时是降水量较大的汛期,因此产生较多的稻田排水。

如图3(b)所示,氮、磷污染物也呈脉冲式排放,在施用基肥(6月28日)和穗肥(8月8日)后的1~3d,灌区出口处TN和TP输出量出现峰值,TN最高为50kg以上,TP最高为15kg以上,且主要集中在移植返青期、分蘖期和拔节孕穗期,而施用孽肥(7月13日)后1~2d灌区出口处TN和TP输出量没有出现峰值,原因是降水量很小,此时也没有灌水。8月8日之后不再施肥,仍出现TN的峰值,这是因为暴雨和灌水量引发的土壤侵蚀也会产生大量含氮营养物^[26-27]。与高焕芝等^[28]的研究结果一致,研究区域内营养物,尤其是氮素流失的高峰期与稻田退水量的高峰期基本重合,原因是3次施肥中都含有氮肥,而磷肥仅在基肥中含有,所以TP的输出

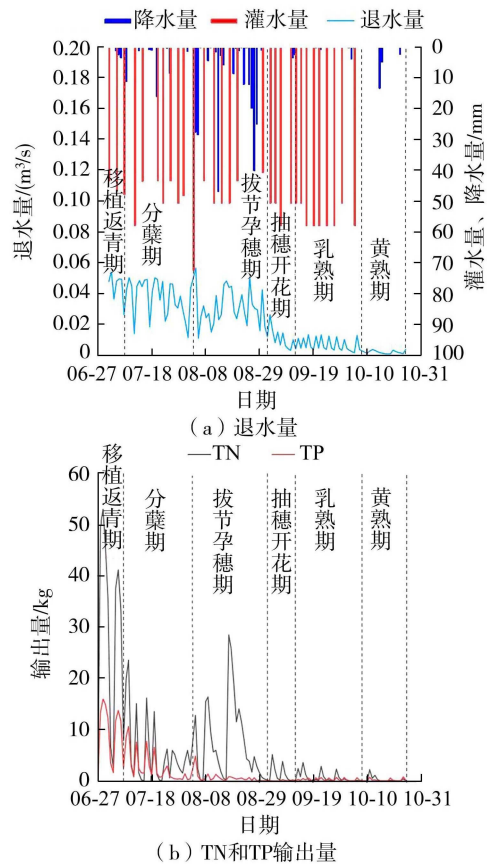


图3 灌区出口处 TN、TP 输出量和退水量
Fig. 3 TN and TP outputs and drainage flow at outlet of irrigation area

量在中后期不再出现较高的峰值。针对水稻生育期前期氮、磷营养物高强度流失的特点,可采取控制灌溉、施肥管理和控制排水等措施,实现对稻田面源污染的有效控制。

3.2 控制措施削减效果

各方案对TN和TP的削减效果如表5所示。方案1在移植返青期、分蘖期和拔节孕穗期对氮、磷污染物削减率较高,在后续时期削减率明显降低,对TN和TP全生育期的削减率分别为42.08%和

54.25%。方案2在移植返青期、拔节孕穗期和抽穗开花期对氮、磷污染物有较高的削减率,在分蘖期对TN没有削减效果,对TN和TP全生育期的削减率相对较低,分别为23.01%和36.74%。方案3在移植返青期对氮、磷污染物削减效果最好,分别可达85.45%和89.51%,在后续时期对氮、磷污染物削减率明显降低。方案4在整个生育期内对氮、磷污染物的削减率较为平稳,对TN和TP全生育期的削减率分别为49.57%和48.40%。方案5与2相比明显提高了水稻生育期前半段对氮、磷污染物的削减效果,方案5有更高的总削减率,对TN和TP全生育期的削减率分别为56.27%和62.98%;方案6与7对氮、磷污染物有着相似的削减率变化趋势,方案7有更高的总削减率,可分别削减89.28%的TN和93.36%的TP。方案8对氮、磷污染物也有良好的削减效果,对TN和TP全生育期的削减率分别可达82.57%和90.79%。方案9对氮、磷污染物的削减效果最优,除抽穗开花期和乳熟期外均保持着较强的削减效果,对TN和TP全生育期的削减率分别为95.89%和97.84%。

由表5可知,单项措施中方案4对TN的削减效果最优,其次为方案1、方案3、方案2;方案1对TP的削减效果最优,其次为方案3、方案4、方案2。控制灌溉和生态工程有较为显著的削减效果,前者明显降低了灌水输入,减少了稻田退水的产生;后者则利用植被缓冲带对降雨的缓冲作用和对稻田径流中泥沙、营养物的拦截作用,减少进入河道中的氮、磷污染物。综合措施比单项措施削减效果更显著,方案9对TN的削减效果最优,其次为方案7、方案8、方案5、方案6;方案9对TP的削减效果最优,其次为方案7、方案8、方案6、方案5。方案8相比方案6削减率明显提升,这是由于控制灌溉减少了退水的产生(图4),使各蓄水体可以容纳更多的退水。方案7相比方案6削减效果显著提升,控制排

表5 各方案对TN和TP的削减效果

Table 5 TN and TP reduction effects of different schemes

方案	TN 削减率/%							TP 削减率/%						
	移植返青期	分蘖期	拔节孕穗期	抽穗开花期	乳熟期	黄熟期	全生育期	移植返青期	分蘖期	拔节孕穗期	抽穗开花期	乳熟期	黄熟期	全生育期
1	27.90	34.69	72.78	0.00	0.00	0.00	42.08	52.68	60.24	53.68	0.00	0.00	9.04	54.25
2	25.32	0.00	76.75	96.26	0.00	0.00	23.01	24.82	51.50	51.75	59.40	45.78	30.59	36.74
3	85.45	0.00	38.16	0.00	0.00	0.00	35.91	89.51	7.68	18.37	0.00	0.00	68.70	53.37
4	49.58	49.99	49.54	49.15	25.38	0.00	49.57	48.71	48.28	47.23	23.54	47.36	31.01	48.40
5	33.73	66.20	90.26	79.77	0.00	0.00	56.27	45.20	85.86	84.55	0.00	0.00	67.23	62.98
6	88.83	0.00	57.86	0.00	0.00	33.98	51.45	91.92	44.01	61.80	0.00	17.02	82.72	71.97
7	95.09	37.80	81.66	52.78	0.00	61.59	89.28	96.66	77.00	83.90	0.00	64.50	90.37	93.36
8	92.02	55.03	89.16	47.04	0.00	0.00	82.57	95.40	85.63	85.91	0.00	0.00	82.07	90.79
9	98.07	90.01	97.28	84.44	0.00	68.85	95.89	98.90	96.74	96.54	0.00	64.59	94.05	97.84

水措施可以增加退水的水力停留时间,与生态工程措施有着良好的协同效果。方案9可以削减90%以上的氮、磷污染物,吴永红等^[29-30]的研究结果也证实综合“减源-拦截-修复”的工程实践对氮、磷污染物有着相近的削减效果。

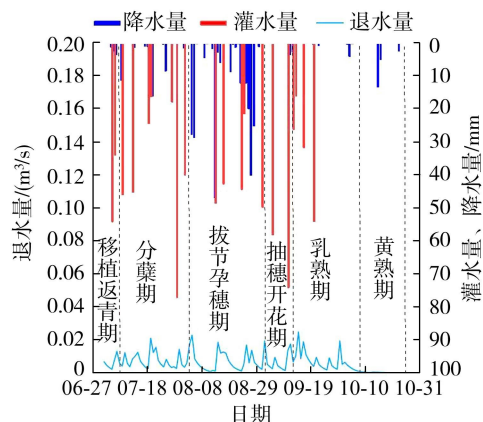


图4 方案8灌区出口处的退水量

Fig. 4 Drainage flow at outlet under controlled irrigation

3.3 控制断面水质达标率

各方案控制断面TN和TP质量浓度变化见图5。单项措施对断面水质达标率的提升效果有限,最高仅能提升11.57%。方案1、2和3反而会导致分蘖期和拔节孕穗期的水质变差,其中控制灌溉降低了退水量,而污染物减少的幅度小于退水量的减少幅度,且研究时段为枯水年,较低的降水量导致污染物质量浓度进一步上升;施肥管理提前了施肥时间,且增大了孽肥的施用量,导致分蘖期出现更多脉冲式TN质量浓度峰值;由于设定的控制排水策略,蓄水体达到排水阈值后在分蘖期和拔节孕穗期的部分时段内退水量高于正常情况。

综合措施有更明显的水质提升效果,可以显著降低TN和TP的质量浓度峰值,其中“源头-过程-末端”组合措施,即方案7和方案9可使水质达标率提升24.79%~29.75%,实现TN和TP质量浓度的100%达标(表6)。方案7更符合当地农民的灌水

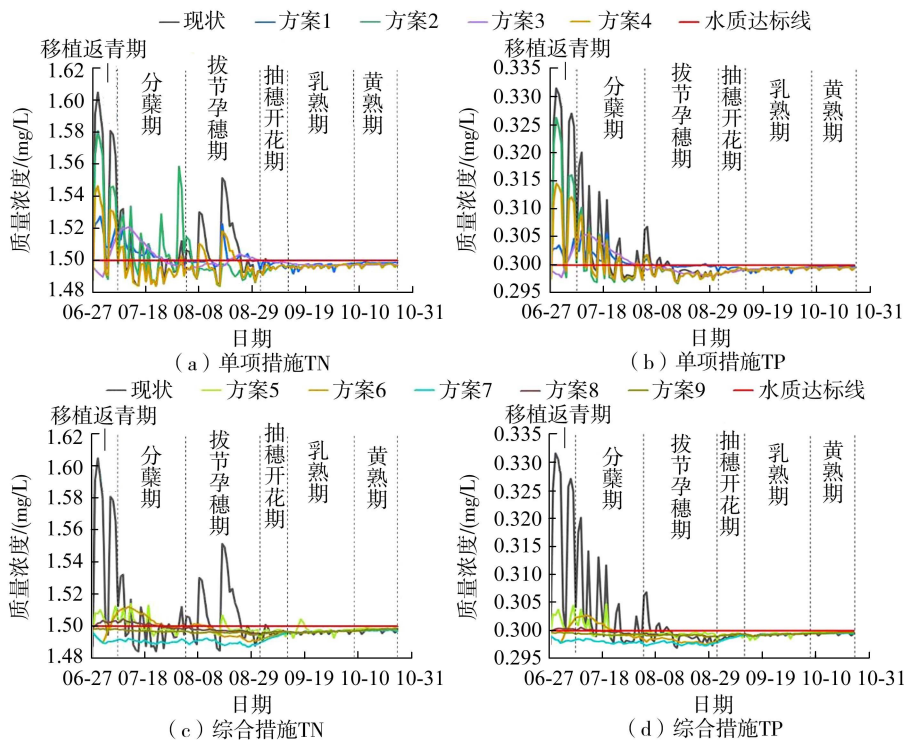


图5 各方案控制断面 TN 和 TP 质量浓度变化

Fig. 5 Variations of mass concentration of TN and TP at different control sections under different schemes

表6 不同方案的水质达标率

Table 6 Water quality compliance rate under different schemes

方案	达标率/%		方案	达标率/%	
	TN 质量浓度	TP 质量浓度		TN 质量浓度	TP 质量浓度
基准	70.24	75.21	5	81.82	88.43
1	61.98	62.81	6	74.38	85.12
2	78.51	83.47	7	100	100
3	71.07	75.21	8	77.69	85.95
4	81.82	81.82	9	100	100

习惯,可行性更高;方案9则可以节约大量的水资源,实现水资源的高效利用,可在现代化节水型生态灌区推广应用。方案5、6和8的水质达标率提升效果不明显,这是因为未采用生态工程,无法抵消控制灌溉和控制排水对水质的副作用。生态工程可在暴雨期起拦截作用,同时利用沟塘湿地内沉积物-水生植物-微生物系统,通过复杂的物理、化学和生物过程降解水中的氮、磷污染物^[31],保障控制断面水质稳定达标。仅依靠源头减量和末端治理难以实现水资源保护目标,须结合过程控制措施系统性治理面源污染。控制排水措施中坑塘湿地适宜体积的确定是方案7和方案9实施的关键,可参考王沛芳等^[32]估算调蓄湿地体积的方法,并考虑将拦蓄的退水净化后回用于农田,进一步构建农田灌溉水循环利用系统。

4 结论

a. 灌区退水和氮、磷污染物均呈脉冲式排放;

水稻生育期前半段即移植返青期、分蘖期和拔节孕穗期是稻田排水的高峰期,施肥后发生降雨、灌水的1~3d是氮、磷污染物流失的高峰期,退水量与降雨和灌水频次、强度呈正相关关系。

b. SWAT模型在研究区对径流量和水质的模拟具有良好的适用性;单项措施中控制灌溉、控制排水和生态工程在污染物排放较多的移植返青期、分蘖期和拔节孕穗期对氮、磷污染物削减效果较好;综合措施在水稻全生育期内对氮、磷污染物削减效果显著提升,方案9组合了控制灌溉、施肥管理、控制排水和生态工程措施,对氮、磷污染物全生育期的削减率超过90%。

c. 单项措施对断面水质达标率提升有限,施肥管理导致分蘖期出现更多脉冲式TN质量浓度峰值;综合措施使水质达标率提升达29.75%,其中方案7和方案9,即施肥管理、控制排水、生态工程组合和控制灌溉、施肥管理、控制排水、生态工程组合可以实现TN和TP质量浓度稳定达标,方案9可节约大量水资源,可在现代化生态灌区推广应用。

参考文献:

[1] ZUO Depeng, HAN Yuna, GAO Xiaoxi, et al. Identification of priority management areas for non-point source pollution based on critical source areas in an agricultural watershed of Northeast China [J]. Environmental Research, 2022, 214:113892.

- [2] 王楠,郝贝贝,张思毅,等. 1991—2021 年广东省农业面源污染源特征分析[J]. 农业工程学报, 2023, 39(9): 190-200. (WANG Nan,HAO Beibei,ZHANG Siyi, et al. Agricultural non-point source pollution in Guangdong Province of China from 1991 to 2021[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2023, 39(9): 190-200. (in Chinese))
- [3] WANG Yongsheng, CUI Xiao, ZOU Lilin, et al. Differentiated discharge patterns, causes and prevention measures of rural non-point source pollution in the four economic regions of mainland China[J]. Journal of Rural Studies, 2023, 98: 114-122.
- [4] CONTRERAS E, AGUILAR C, POLO M J. Accounting for the annual variability when assessing non-point source pollution potential in Mediterranean regulated watersheds [J]. Science of the Total Environment, 2023, 902: 167261.
- [5] 黄国鲜, 聂玉玺, 张清寰, 等. 流域农业面源污染迁移过程与模型研究进展[J]. 环境工程技术学报, 2023, 13(4): 1364-1372. (HUANG Guoxian, NIE Yuxi, ZHANG Qinghuan, et al. Research progress of agricultural non-point source pollution migration process and model in basins [J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2023, 13(4): 1364-1372. (in Chinese))
- [6] 夏永秋, 赵娣, 严星, 等. 我国农业面源污染过程模拟的困境与展望[J]. 农业环境科学学报, 2022, 41(11): 2327-2337. (XIA Yongqiu, ZHAO Di, YAN Xing, et al. Dilemma and prospect of modelling in agricultural non-point source pollution in China [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2022, 41(11): 2327-2337. (in Chinese))
- [7] 梁新强, 杨皎, 何霜, 等. 关于长江三角洲地区推进稻田退水零直排工程建设的建议[J]. 中国科学院院刊, 2021, 36(7): 814-822. (LIANG Xinqiang, YANG Jiao, HE Shuang, et al. Promoting construction of zero-direct discharge engineering for agricultural wastewater from paddy fields in Yangtze River Delta Region[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2021, 36(7): 814-822. (in Chinese))
- [8] TAGUAS E V, BINGNER R L, MOMM H G, et al. Modelling scenarios of soil properties and managements in olive groves at the micro-catchment scale with the AnnAGNPS model to quantify organic carbon [J]. CATENA, 2021, 203: 105333.
- [9] UNIYAL B, KOSATICA E, KOELLNER T. Spatial and temporal variability of climate change impacts on ecosystem services in small agricultural catchments using the soil and water assessment tool (SWAT) [J]. Science of the Total Environment, 2023, 875: 162520.
- [10] 陈丽娜, 韩龙喜, 谈俊益, 等. 基于多断面水质达标的河网区点面源污染负荷优化分配模型[J]. 水资源保护, 2021, 37(6): 128-134. (CHEN Lina, HAN Longxi, TAN Junyi, et al. Optimal allocation model of point and non-point pollution loads in river network based on water quality standard of multiple control sections [J]. Water Resources Protection, 2021, 37(6): 128-134. (in Chinese))
- [11] 朱瑶, 梁志伟, 李伟, 等. 流域水环境污染模型及其应用研究综述[J]. 应用生态学报, 2013, 24(10): 3012-3018. (ZHU Yao, LIANG Zhiwei, LI Wei, et al. Watershed water environment pollution models and their applications: a review[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2013, 24(10): 3012-3018. (in Chinese))
- [12] 杨善莲, 郑梦蕾, 刘纯宇, 等. 农业面源污染模型研究进展[J]. 环境监测管理与技术, 2020, 32(3): 8-13. (YANG Shanlian, ZHENG Menglei, LIU Chunyu, et al. Research progress on agricultural non-point source pollution model[J]. The Administration and Technique of Environmental Monitoring, 2020, 32(3): 8-13. (in Chinese))
- [13] 赵中华. 基于 AnnAGNPS 模型的桃江流域农业非点源污染研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2012.
- [14] WU Miao, SHI Peng, CHEN Ang, et al. Impacts of DEM resolution and area threshold value uncertainty on the drainage network derived using SWAT [J]. Water SA, 2017, 43(3): 450-462.
- [15] YASARER L M W, SINNATHAMBY S, STURM B S M. Impacts of biofuel-based land-use change on water quality and sustainability in a Kansas watershed[J]. Agricultural Water Management, 2016, 175: 4-14.
- [16] 张婷, 高雅, 李建柱, 等. 流域非点源氮磷污染负荷分布模拟[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2021, 49(1): 42-49. (ZHANG Ting, GAO Ya, LI Jianzhu, et al. Distribution simulation of non-point source nitrogen and phosphorus pollution load in watershed [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2021, 49(1): 42-49. (in Chinese))
- [17] 李颖, 王康, 周祖昊. 基于 SWAT 模型的东北水稻灌区水文及面源污染过程模拟[J]. 农业工程学报, 2014, 30(7): 42-53. (LI Ying, WANG Kang, ZHOU Zuhao. Simulation of drainage and agricultural non-point source pollutions transport processes in paddy irrigation district in North-East China using SWAT [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30(7): 42-53. (in Chinese))
- [18] 徐华山, 徐宗学, 刘品. 漳卫南运河流域非点源污染负荷估算及最佳管理措施优选[J]. 环境科学, 2013, 34(3): 882-891. (XU Huashan, XU Zongxue, LIU Pin. Estimation of nonpoint source pollutant loads and optimization of the best management practices (BMPs) in

- the Zhangweinan River Basin[J]. Environmental Science, 2013,34(3):882-891. (in Chinese))
- [19] HIMANSHU S K, PANDEY A, YADAV B, et al. Evaluation of best management practices for sediment and nutrient loss control using SWAT model [J]. Soil and Tillage Research,2019,192:42-58.
- [20] MEKONNEN B A, MAZUREK K A, PUTZ G. Modeling of nutrient export and effects of management practices in a cold-climate prairie watershed: Assiniboine River Watershed, Canada [J]. Agricultural Water Management, 2017,180:235-251.
- [21] 马放,姜晓峰,王立,等. 基于 SWAT 模型的阿什河流域非点源污染控制措施 [J]. 中国环境科学, 2016, 36 (2):610-618. (MA Fang, JIANG Xiaofeng, WANG Li, et al. Non-point source pollution control of Ashihe Basin based on SWAT model[J]. China Environmental Science, 2016,36(2):610-618. (in Chinese))
- [22] 王玉宝,白雅文,刘荣,等. 湟水流域绿水管理模拟与水-沙-质协同调控效果评价[J]. 农业机械学报, 2023, 54(11):347-358. (WANG Yubao, BAI Yawen, LIU Rong, et al. Simulation of green water management and effect evaluation of water-sediment-quality coordination regulation in Huangshui Basin [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54 (11):347-358. (in Chinese))
- [23] 高学睿,董斌,秦大庸,等. 用 DrainMOD 模型模拟稻田排水与氮素流失[J]. 农业工程学报, 2011, 27(6):52-58. (GAO Xuerui, DONG Bin, QIN Dayong, et al. Simulation of drainage process and nitrogen loss in paddy field using DrainMOD [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2011, 27(6):52-58. (in Chinese))
- [24] 陈会,王康,周祖昊. 基于排水过程分析的水稻灌区农田面源污染模拟[J]. 农业工程学报, 2012, 28(6):112-119. (CHEN Hui, WANG Kang, ZHOU Zuhao. Simulation of agricultural non-point source pollution from paddy rice irrigation district based on analyses of drainage processes [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(6):112-119. (in Chinese))
- [25] WANG Y G, ZHANG W S, ENGEL B A, et al. A fast mobile early warning system for water quality emergency risk in ungauged river basins [J]. Environmental Modelling & Software, 2015, 73:76-89.
- [26] CHEN Lina, ZHANG Wenshuo, TAN Junyi, et al. Nitrogen and phosphorus pollutants removal from rice field drainage with ecological agriculture ditch: a field case [J]. Phyton-International Journal of Experimental Botany, 2022, 91 (12):2827-2841.
- [27] CHEN Kai, LIU Qimeng, PENG Weihua, et al. Source apportionment of river water pollution in a typical agricultural city of Anhui Province, eastern China using multivariate statistical techniques with APCS-MLR [J]. Water Science and Engineering, 2023, 16(2):165-174.
- [28] 高焕芝,彭世彰,茆智,等. 不同灌排模式稻田排水水中氮磷流失规律 [J]. 节水灌溉, 2009 (9):1-3. (GAO Huanzhi, PENG Shizhang, MAO Zhi, et al. N and P losses in surface drainage from paddy field under different irrigation and drainage modes [J]. Water Saving Irrigation, 2009(9):1-3. (in Chinese))
- [29] 吴永红,胡正义,杨林章. 农业面源污染控制工程的“减源-拦截-修复”(3R)理论与实践 [J]. 农业工程学报, 2011, 27(5):1-6. (WU Yonghong, HU Zhengyi, YANG Linzhang. Strategies for controlling agricultural non-point source pollution: reduce-retain-restoration (3R) theory and its practice [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2011, 27 (5):1-6. (in Chinese))
- [30] 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):1309-132. (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))
- [31] NSENGA KUMWIMBA M, MENG F G, ISEYEMI O, et al. Removal of non-point source pollutants from domestic sewage and agricultural runoff by vegetated drainage ditches (VDDs): design, mechanism, management strategies, and future directions [J]. Science of the Total Environment, 2018, 639:742-759.
- [32] 王沛芳,钱进,胡斌,等. 农田灌溉水循环利用系统构建方法 [J]. 河海大学学报(自然科学版), 2022, 50(4):7-12. (WANG Peifang, QIAN Jin, HU Bin, et al. Construction method of irrigation water recycling system of farmland [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2022, 50(4):7-12. (in Chinese))

(收稿日期:2024-05-07 编辑:施业)