

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 L L, Ouyang W, Bai Y, 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.

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

刘连华¹, 欧阳威^{2*}, 白 艳², 郝芳华³ (1.中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所,北京 100081; 2.北京师范大学环境学院,北京 100875; 3.北京师范大学水科学研究院,北京 100875)

摘要: 为全面评估稻作流域田-沟-塘系统优化条件下氮素面源污染的减排潜力,利用流域水文模型对典型稻作流域开展田面水位、沟渠和水塘多环节的情景优化模拟.结果表明,不同环节优化对氮素面源污染流失的截留效果不同,且不同水文年的截留效果存在一定差异.在田面水位优化环节,提高排水水位后的稻田总氮流失量比常规水位管理可减少 7.9%~93.9%,枯水年的氮截留效果优于丰水年.在沟渠优化环节,提高沟渠植草密度后的流域氮流失削减率从 0.8%提高到 26.7%,丰水年的氮截留效果优于枯水年.在水塘优化环节,提高汇水面积后的流域氮流失削减率从 10.5%提高到 18.1%,枯水年的氮截留效果优于丰水年.在田-沟-塘系统多环节优化下,田面水位优化对流域氮流失的截留效果优于水塘优化和沟渠优化.稻作流域田-沟-塘系统多环节优化可以有效控制流域氮素面源污染流失,促进水稻生产的可持续发展.

关键词: 稻作流域; 面源污染; 沟渠; 水塘; 氮削减

中图分类号: X52 文献标识码: A 文章编号: 1000-6923(2025)05-2693-07

Evaluation on the reduction potential of diffuse nitrogen pollution in paddy field watersheds based on field-ditch-pond system optimization. LIU Lian-hua¹, OUYANG Wei^{2*}, BAI Yan², HAO Fang-hua³ (1.Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China; 2.School of Environment, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 3.College of Water Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875, China). *China Environmental Science*, 2025,45(5): 2693-2699

Abstract: To comprehensively evaluate the reduction potential of diffuse nitrogen pollution under the field-ditch-pond system optimization, a watershed hydrological model was used to simulate the multi-scenario optimization of field ponding water level, ditch, and pond in a typical paddy field watershed. Results showed that different optimizations had different interception effects on diffuse nitrogen pollution, and that interception effects were different over distinct hydrological years. Under the optimization of field ponding water level, the total nitrogen loss from paddy fields after optimizing the drainage water level was reduced by 7.9% to 93.9% compared to conventional water level management, with the nitrogen interception effect being better in dry years than in wet years. Under ditch optimization, the reduction rate of nitrogen loss in the watershed increased from 0.8% to 26.7% after increasing the grass planting density of ditches, with the nitrogen interception effect being better in wet years than in dry years. Under pond optimization, the reduction rate of nitrogen loss in the watershed increased from 10.5% to 18.1% after increasing the catchment area of the pond, with the nitrogen interception effect being better in dry years than in wet years. Under the multi-optimization of the field-ditch-pond system, the interception effect of field ponding water level optimization on watershed nitrogen loss was better than that of pond optimization and ditch optimization. In summary, the multi-optimization of the field-ditch-pond system can effectively control the diffuse nitrogen pollution in paddy field watersheds and could promote the sustainable development of rice production.

Key words: paddy field watershed; diffuse pollution; ditch; pond; nitrogen reduction

我国水稻产量和种植面积分别占全球的 32%和 19%,消耗了全国 65%的农业用水和 20%~25%的化肥^[1-3].过量水肥投入导致稻田水肥利用率低、面源污染流失严重,引发了流域水体富营养化等一系列问题^[4-5].稻田氮素径流流失已成为我国农业面源污染重要来源之一^[6],特别是南方稻区降雨和施肥时期叠加,使面源污染流失严重^[7].南方稻作流域稻田周围分布着沟渠和水塘,形成了田-沟-塘系统这种农业生态

景观^[8].随着对氮素面源污染防控的深入理解,从源头控制、过程消减到末端净化的多环节减排措施逐渐受到重视^[9-10].充分发挥稻作流域田-沟-塘系统的作用,从稻田、沟渠和水塘多个环节进行优化管理,对流

收稿日期: 2024-09-06

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(U21A2039);中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(BSRF202309)

* 责任作者, 教授, wei@bnu.edu.cn

域氮素面源污染防治具有重要意义。

针对稻作流域田-沟-塘系统,国内外学者开展了多环节优化的面源污染减排潜力研究^[11-12]。研究多集中于稻田控制灌溉-明沟控水-水塘湿地组合对水肥利用率和氮磷流失负荷的影响^[13-14]、稻田施肥优化-植草沟渠-好氧塘组合对水质及植物生长的影响^[15]。对于稻田排水水位-沟渠植草密度-水塘汇水面积的多环节优化下稻作流域面源污染流失的系统研究较为缺乏,且目前多环节优化研究多集中于田间或区域尺度的点位监测。在不同水文、农田管理等条件下,所获得的污染截留效果差异较大,这对合理评估稻作流域面源污染减排潜力提出了挑战。

田间试验或区域监测是在特定观测尺度开展研究,难以反映长时间流域水文和元素循环特征,因此流域模型被应用于农业面源污染负荷模拟^[16]。其中,分布式水文模型 SWAT 被广泛用于评估农业流域面源污染流失以及预测不同管理措施对水环境的影响^[17-18]。针对稻作流域的模拟,学者对 SWAT 模型中稻田算法进行优化改良,增设稻田灌排管理水位设置,模拟稻田实际的水文循环过程,模拟稻田水位优化下的灌溉效率和节水潜力^[19-22]。利用 SWAT 模型中植草水道和坑塘模块可以模拟沟塘系统对氮磷流失的截留效果^[23-25]。值得注意的是,田面水位、沟渠和水塘优化对面源污染流失的截留效果与水文条件,特别是降雨条件密切相关。然而,目前针对不同水文条件下,流域尺度田-沟-塘系统多环节优化下氮素面源污染流失减排效果的研究相对薄弱。

基于以上背景,本文利用改进的 SWAT 模型开展流域面源污染模拟,探究不同水文条件下田面水位、沟渠和水塘优化下氮素面源污染流失特征,评估田-沟-塘系统多环节优化对氮素流失的截留效果。研究结果可为稻作流域面源污染防治提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

选择位于长江流域稻作区的沱水流域(113°39'~113°47'E,31°19'~31°30'N)开展模型模拟。流域总面积 121.4km²,河道总长 52.5km。流域属于亚热带季风气候,多年平均气温 16.6℃,平均降雨量 1068mm。流域土地利用类型包括稻田、旱地、林地、水域和建筑用地。流域内稻田周围分布着自然沟渠

和水塘,水域面积占流域总面积的 7.9%(图 1)。

水稻种植模式为单季稻,5 月下旬泡田整地,基肥施用后插秧,在分蘖期及孕穗期追施氮肥(3 次氮肥施用比例为 4:3:3),9 月中下旬收获。除了分蘖后期和收获前晒田外,其他时期田面保持约 20~50mm 左右的水层。其他管理措施同常规农民操作。

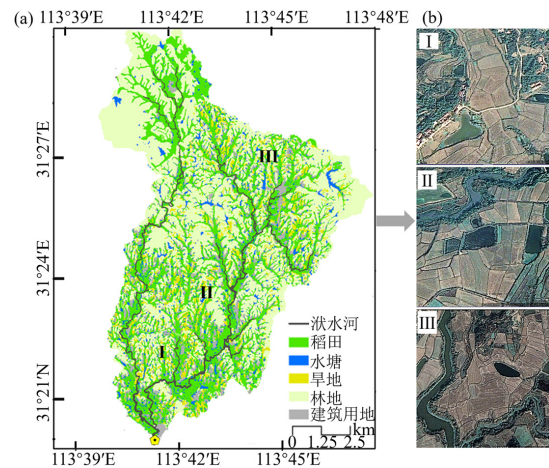


图 1 沱水流域土地利用分布(a)及流域内典型田沟塘系统(b)

Fig.1 Land-use types of Fushui watershed (a) and typical field-ditch-pond system in the watershed (b)

1.2 流域氮素面源污染流失模拟

1.2.1 SWAT 模型建立及率定 为更好的模拟稻作流域水文过程,采用 Ouyang 等^[21]根据稻田水文循环及污染物流失特点改进的 SWAT 模型进行模型建立。原模型中壶穴模块的构型设定、蒸散发过程、产汇流过程、侵蚀过程的部分代码被改良,增设能反映稻田灌排管理的水位控制模块。稻田灌排操作是以日尺度水位控制为基础,设置 3 条水位线:灌溉水位,当低于此水位线时触发灌溉操作;适宜水位,当达到此水位停止灌溉操作;排水水位,当超过此水位线时将触发排水过程。通过水位线设置,可以模拟实际灌溉、持水及排水过程。本研究模型中三条水位线的设置是基于长江流域典型单季稻的田间水位控制实验的结果^[3]。

模型构建所需数字高程模型采用地理空间数据云 30m 分辨率的 DEM;土壤类型数据来源于中国科学院南京土壤所 1:1000000 土壤类型数据;土地利用分布数据经人工解译获得;土壤属性数据来自中国科学院南京土壤研究所的中国土壤数据库;气象数据从当地气象站获得;流域管理数据调研获得。

利用稻田土壤水含量监测数据及流域出口水

质监测数据对模型进行率定验证.稻田土壤水的率定验证结果表明,改进的模型能够准确的模拟稻田长期淹水条件下土壤水趋于饱和的特征^[3].流域出口的总氮和硝态氮的率定期和验证期的 R^2 均在 0.6 以上,Ens 均在 0.5 以上,这说明改进的 SWAT 模型能较好的模拟稻作流域的水文和氮素污染流失特征.

1.2.2 模型情景设置 针对稻作流域田-沟-塘系

统的特征,设置单环节情景(田面水位情景,沟渠情景,水塘情景)和田-沟-塘系统情景.单环节情景包括:4 种田面水位情景(F0、F1、F2、F3)、4 种沟渠情景(D0、D1、D2、ND)、5 种水塘情景(P0、P1、P2、P3、NP).田-沟-塘系统情景包括:现状情景 BL、最优情景 OP、对照情景 CK.每种情景的关键参数设置见表 1 和表 2.

表 1 不同情景的关键参数设置

Table 1 Main parameters setting for different scenarios

情景	情景代码	参数设置	参数取值	数据来源
田面水位情景	F0	现状情景	0~80	随生育期变动,各生育期参数设置见表 2
	F1	优化水位情景	0~120	
	F2		0~150	
	F3		0~180	
沟渠情景	D0	现状情景	0.1	未维护沟渠 ^[26]
	D1	沟渠优化情景	0.24	中等植被覆盖沟渠 ^[25]
	D2		0.35	茂密植被覆盖沟渠 ^[27]
	ND	无沟渠情景	/	无沟渠
水塘情景	P0	现状情景	0.22~0.52	当前现状
	P1	水塘优化情景	0.37~0.67	当前现状 +15%
	P2		0.53~0.82	当前现状+30%
	P3		0.73~1.00	当前现状+50%
	NP	无水塘情景	0	无水塘
田-沟-塘系统情景	BL	现状情景	F0+D0+P0	
	OP	最优情景	F3+D2+P3	
	CK	对照情景	F0+ND+NP	

表 2 田面水位情景下不同生育期水位设置(mm)

Table 2 Water level setting at various rice growing stages for field water level scenarios(mm)

生育期	灌溉水位	适宜水位	排水水位			
			F0	F1	F2	F3
泡田期	20	40	80	80	80	80
返青期	10	30	50	60	70	80
分蘖前期	20	40	60	70	80	95
分蘖后期	0	0	0	0	0	0
拔节孕穗	20	60	80	120	150	180
抽穗扬花	20	60	80	100	120	150
灌浆期	20	60	80	120	150	180
黄熟前期	10	30	60	100	140	180
黄熟后期	0	0	0	0	0	0

1.3 数据处理

水文条件对稻作流域氮素面源污染流失具有重要影响.因此,根据水稻生长季降雨特征,将近 56 年来研究期(1964~2019)化分为丰水年、平水年和枯水年 3 种情景.丰、平和枯水年,水稻季平均降雨量

分别为 905.7、574.2 和 331.9mm,且不同水文年降雨量之间存在显著差异($P<0.05$).分别以 F0、ND、NP、CK 情景为对照,对各优化情景的氮流失削减率进行计算,以评估田-沟-塘系统优化对氮素流失的截留效率.

2 结果与分析

2.1 田面水位优化对稻田氮流失的影响

与现状情景(F0)相比,提高稻田排水水位可以有效降低氮流失量,随着排水水位的提高,氮流失削减率增加;而且不同水文年条件下,氮流失削减效果不同(图 2).具体表现为,枯水年条件下,提高排水水位的削减率大于丰水年($P<0.05$).丰水年总氮削减率为 7.9%~53.0%,枯水年削减率为 24.5%~93.9%.此外,提高排水水位对不同形态氮的削减率相差不大,总氮、有机态氮和无机态氮削减率分别为 7.9%~93.9%、6.0%~94.9%和 17.3%~92.0%.

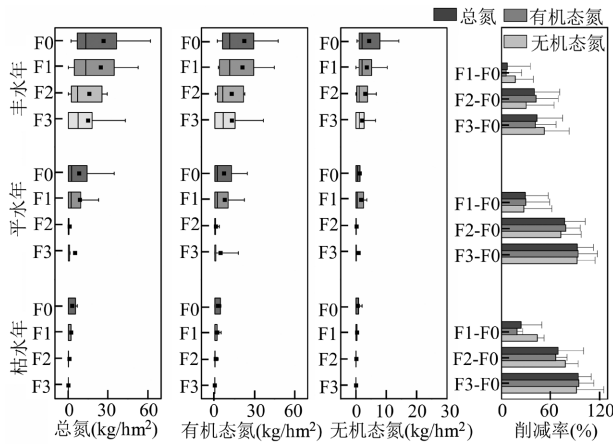


图2 田面水位优化下水稻季氮素流失及相应的削减率
Fig.2 Diffuse nitrogen losses from paddy fields during rice season and the reduction rate under different field ponding water level optimizations

F0:现状情景; F1:优化水位情景 1; F2:优化水位情景 2; F3:优化水位情景 3

2.2 沟渠优化对流域氮流失的影响

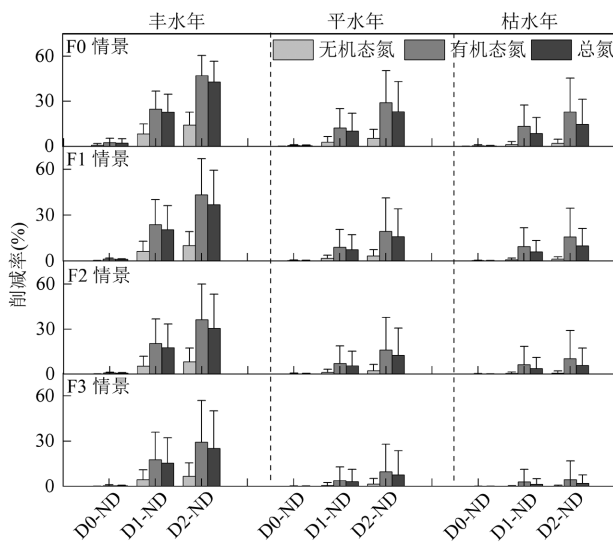


图3 沟渠优化下流域氮流失的削减率

Fig.3 Reduction rates of watershed nitrogen losses under ditch optimization conditions

D0:现状情景; D1:沟渠优化情景 1; D2:沟渠优化情景 2; ND:无沟渠情景

不同沟渠优化情景下流域出口氮流失负荷削减率如图 3 所示.随着植草密度的增大,沟渠对流域氮流失负荷的削减率逐渐增强,并且有机态氮为沟渠截留的主要形式.D0 情景下,沟渠对总氮、有机态氮和无机态氮流失的削减率分别为 0.8%、1.0%和 0.2%;D1 情景下,削减率分别增加到 12.9%、15.6%和 3.6%;D2 情景下,削减率分别增加到 26.7%、33.1%和 6.6%.不同水文条件下沟渠对氮的削减效果不同,

表现为丰水年的效果大于枯水年($P < 0.05$).D2 情景下,在丰水年,沟渠对总氮、有机态氮和无机态氮流失的削减率分别为 42.6%、42.1%和 14.2%;在枯水年,相应的削减率降低为 14.5%、22.8%和 1.9%.

不同田面水位情景下,植草沟渠对氮流失负荷的削减率不同,随着田面排水水位的提高,植草沟渠的截留效果降低.D1 情景下,当田面水位为 F0 情景时,植草沟渠对总氮、有机态氮和无机态氮流失的削减率分别为 12.9%、15.8%和 3.6%;而当田面水位为 F3 情景时,相应的削减率分别降低为 5.8%、7.2%和 1.5%.D2 情景下,当田面水位为 F0 情景时,植草沟渠对总氮、有机态氮和无机态氮流失的削减率分别为 26.7%、33.1%和 6.8%;而当田面水位为 F3 情景时,相应的削减率分别降低为 10.9%、13.5%和 2.6%.

2.3 水塘优化对流域氮流失的影响

不同水塘优化情景下流域出口氮流失负荷削减率如图 4 所示.随着水塘汇流面积的增加,流域出口氮流失负荷的削减率逐渐增强,并且有机态氮为水塘截留的主要形式.与 NP 情景相比,P0 情景下水塘对总氮、有机态氮和无机态氮流失的削减率分别为 10.5%、9.5%和 8.5%.汇流面积增加时,水塘对总氮、有机态氮和无机态氮流失的削减率分别提高到 13.1%~18.1%、12.4%~18.1%和 9.9%~12.6%.不同水文年下水塘对氮的削减率不同,表现为枯水年的效果大于丰水年($P < 0.05$),这与沟渠对氮削减效果的趋势相反.P3 情景下,在枯水年,水塘对总氮、有机态氮和无机态氮流失的削减率分别为 26.2%、23.7%和 25.2%;而在丰水年,相应的削减率分别降低为 18.8%、21.8%和 4.9%.

不同田面水位情景下,水塘对氮流失负荷的削减率不同,表现为随着田面排水水位的提高,水塘对氮流失的截留效果降低,这与沟渠对氮削减效果的趋势一致.P1 情景下,田面水位为 F0 情景时,水塘对总氮、有机态氮和无机态氮流失的削减率分别为 13.1%、12.4%和 9.9%;田面水位为 F3 情景时,削减率分别降低为 10.5%、8.4%和 10.5%.同样地,P3 情景下,当田面水位为 F0 情景时,水塘对总氮、有机态氮和无机态氮流失的削减率分别为 18.1%、18.2%和 12.6%;而当田面水位为 F3 情景时,相应的削减率分别降低为 13.9%、11.8%和 11.4%.

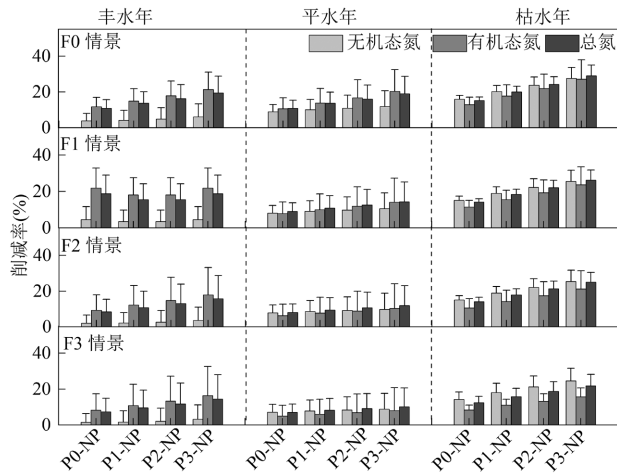


图4 水塘优化下流域氮流失的削减率

Fig.4 Reduction rates of watershed nitrogen losses under pond optimization conditions

P0:现状情景; P1:水塘优化情景 1; P2:水塘优化情景 2; P3:水塘优化情景 3; NP:无水塘情景

2.4 田-沟-塘系统优化对流域氮流失的影响

为深入理解田-沟-塘系统多环节优化对流域氮流失的影响,分析了 BL 和 OP 情景下流域氮流失削减率(图 5)。与无沟渠和水塘系统的对照情景(CK)相比, 现状情景(BL)下流域总氮、有机态氮和无机态氮流失的削减率分别为 11.2%、10.7%和 8.7%;田-沟-塘系统多环节优化后(OP 情景)相应的削减率分别提高到 50.4%、58.2%和 14.3%。

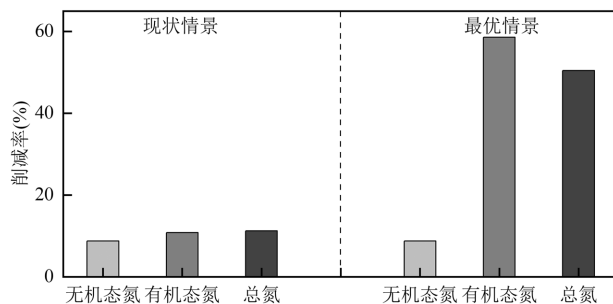


图5 田-沟-塘系统多环节优化下流域氮流失的削减效果

Fig.5 Reduction of watershed nitrogen losses under field-ditch-pond optimization conditions

多环节最优情景下,流域氮流失截留效果表现为田面水位优化>水塘优化>沟渠优化(图 6)。具体截留效果表现为:流域陆面年均氮流失量为 207.6t/a,其中 51.0%氮流失来自稻田。在田面水位优化、沟渠优化和水塘优化环节,流域总氮流失量分别减少 79.3、11.5 和 13.8t/a,最终 103.0t/a 总氮汇入附近水体。

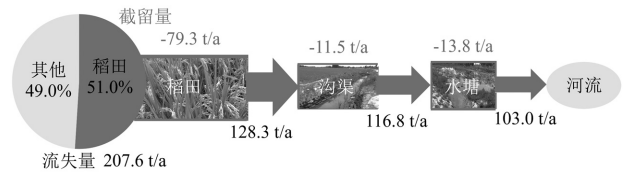


图6 田-沟-塘系统多环节最优情景下流域总氮迁移

Fig.6 Migration of watershed diffuse nitrogen under the optimal field-ditch-pond scenario

灰色数字(负值)为各环节总氮截留量;黑色加粗数字为各环节总氮流失量

3 讨论

3.1 稻作流域田-沟-塘优化对流域氮流失的影响

在田面水位优化环节,提高稻田排水水位可以提高稻田水容量,从而减少径流发生量和氮磷流失量^[28]。与常规田面水位管理相比,将排水水位提高到最优高度(F3 情景),稻田总氮流失量减少 7.9%以上,最高可减少 93.9%。田面水位优化在枯水年的阻控效果优于丰水年。这是因为枯水年降雨频率和降雨量较低,径流发生频率和径流量较低,特别是在特干旱年份没有降雨径流,因此在枯水年提高排水水位可有效降低或消除氮素径流流失;而丰水年降雨量大和降雨频率高,使田面水位处于较高水平,稻田水容量较低,即便提高排水水位,丰水年氮流失量仍较大。因此田面水位优化在丰水年的氮截留效果远低于枯水年。另外,有机态氮主要以土壤侵蚀的方式流失,无机态氮主要溶解于水中并随降雨径流流失^[29-30]。提高稻田排水水位,不但减少了径流量,而且减少了降雨造成的土壤侵蚀,因此各种形态的氮流失都能被有效截留。

在沟渠优化环节,提高植草密度可有效提高沟渠对面源污染流失的削减率^[31]。本研究结果表明,植草密度提高后,沟渠对流域氮流失的削减率从 0.8% 提高到 26.7%。在水塘优化环节,提高汇水面积后,水塘对氮流失的削减率从 10.5% 提高到 18.1%。以上结果表明如果维护改善好流域内沟塘系统,面源污染将会得到有效控制^[28,32]。随着田面排水水位的提高,沟塘系统对氮磷的截留效果降低。这是因为,沟塘系统对氮的截留效果与农田排水水中氮浓度和负荷有关。流入沟塘的浓度越大,流失负荷量越大,沟塘截留效果越高^[33-34]。提高排水水位可以减少稻田径流量和氮磷流失量,因此导致沟塘截留效果降低。有机态氮是沟塘截留的主要形式,这是因为沟塘能有效降

低径流水中土壤颗粒的沉淀^[26,35-37]。不同水文年下,沟渠和水塘对氮流失的截留效果不同。沟渠截留效果随着氮流失量的增加而增加^[38],因此在丰水年氮流失量较大的情况下,沟渠的截留效果高于枯水年。水塘的截留效果除了与氮流失负荷有关外,还与水力停留时间和水塘的水容量有关^[35,39]。枯水年降雨量和降雨频率较低,稻田排水汇入水塘后有更多水力停留时间,并且水塘水容量较高,水塘水外排频率和外排量较低;而丰水年降雨量较多,水塘即要容纳稻田排水又要容纳自然降雨,使水塘水容量较小,水力停留时间变短,水塘水外排频率增加。因此,在丰水年,水塘对氮流失的截留效果低于枯水年。

3.2 稻作流域田-沟-塘系统优化对水稻生产可持续发展的意义

本研究稻田田面水位优化情景中排水水位的设置,是根据田间试验得出的不影响水稻正常生长的水位。因此,田-沟-塘系统优化可以在保证水稻产量的同时,显著提高稻田水容量,并有效减少流域氮磷流失负荷。在田面水优化环节,提高排水水位可以有效截留降雨,减少稻田水外排,减少稻田氮流失^[14,28]。通过提高稻田排水水位,截留的降雨和氮元素被储存在田面水中用于水稻吸收,从而降低灌溉需水量,提高肥料利用率。在沟渠阻控和水塘净化环节,沟渠和水塘能够有效截留稻田排水中的氮元素,且蓄积在沟塘系统中的水分和养分可通过循环灌溉被重新利用^[40]。综上所述,充分利用田-沟-塘系统,建立基于源头减排(提高稻田排水水位)、过程阻控(提高沟渠植草密度)和末端净化(提高水塘汇水面积)相结合的多环节面源污染流失控制技术,可有效提高稻作流域水资源利用率,降低流域面源污染流失,促进水稻生产的可持续发展。在我国南方稻作流域,稻田周边常常分布着沟渠和水塘,可以对原有土质沟渠或破损需要重建的水泥排水沟渠进行改造和升级,种植挺水植物和沉水植物,连通稻田内部沟塘,让更多的稻田排水先经过沟塘系统截留净化后,再排入河流或湖泊。值得注意的是,要加强沟塘的日常维护,定期对沟塘内植被进行养护管理或刈割,及时进行清淤处理,避免造成二次污染。此外,应注意在丰水年,田面水位控制时间不宜过长,避免水稻受淹造成减产;暴雨天气导致水塘蓄水量过大时,需及时排洪,降低溢塘的风险。

3.3 稻作流域氮素面源污染模拟的不确定性

本研究利用改进的SWAT模型模拟了典型稻作流域田-沟-塘系统不同环节优化下氮素面源污染流失的减排潜力。由于模型结构、模型输入数据以及农业措施参数等设置的概化性,可能导致模拟结果存在一定的不确定性。此外,通过田间试验及文献调研获得的田面水位、沟渠和水塘相关参数的数值可能并不能完全代表流域内全部管理现状,由此造成的模拟误差在所难免。针对以上不确定性,本研究利用稻田土壤含水量及流域出口水质监测数据,不断调整模型参数以达到模拟值与实测值的近似。最终,模型率定期和验证期模拟均满足评价标准,表明模型在稻作流域具备较好的适用性。在今后研究中,可细化流域空间参数设置的准确性和差异性,进一步提高模型模拟的精度和准确度。

4 结论

4.1 提高田面排水水位可以从源头有效降低稻田氮流失量。与常规水位管理相比,排水水位优化后,稻田总氮流失量可减少 7.9%~93.9%。排水水位优化在枯水年的氮截留效果优于丰水年。

4.2 提高沟渠植草密度后,流域氮流失削减率从 0.8%提高到 26.7%。提高水塘汇水面积后,流域氮流失削减率从 10.5%提高到 18.1%。沟渠优化在丰水年的氮截留效果优于枯水年,而水塘优化在枯水年的氮截留效果优于丰水年。

4.3 田-沟-塘系统多环节优化下,流域氮流失截留效果表现为:田面水位优化>水塘优化>沟渠优化。最优情景下,田面水位优化、沟渠优化和水塘优化环节流域总氮流失量可分别减少 79.3、11.5 和 13.8t/a。稻作流域田-沟-塘系统多环节优化可以有效降低流域面源污染流失,促进水稻生产的可持续发展。

参考文献:

- [1] Zhou F, Bo Y, Ciais P, et al. Deceleration of China's human water use and its key drivers [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2020,117:7702-7711.
- [2] Zhuang Y, Zhang L, Li S, et al. Effects and potential of water-saving irrigation for rice production in China [J]. *Agricultural Water Management*, 2019,217:374-382.
- [3] Liu L, Ouyang W, Liu H., et al. Drainage optimization of paddy field watershed for diffuse phosphorus pollution control and sustainable agricultural development [J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2021,308:107238.
- [4] Liu L, Ouyang W, Wang Y, et al. Paddy water managements for diffuse nitrogen and phosphorus pollution control in China: A comprehensive

- review and emerging prospects [J]. *Agricultural Water Management*, 2023,277:108102.
- [5] Li S, Zhuang Y, Liu H, et al. Enhancing rice production sustainability and resilience via reactivating small water bodies for irrigation and drainage [J]. *Nature Communication*, 2023,14:3794.
- [6] Fu J, Jian Y, Wu L, et al. Nationwide estimates of nitrogen and phosphorus losses via runoff from rice paddies using data-constrained model simulations [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021,279:123642.
- [7] Shang Y, Yin Y, Ying H, et al. Updated loss factors and high-resolution spatial variations for reactive nitrogen losses from Chinese rice paddies [J]. *Journal of Environmental Management*, 2024,358:120752.
- [8] 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.
- [9] 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 W M, Wang Y, Ming J. 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.
- [10] 杨林章,施卫明,薛利红,等. 农村面源污染治理的“4R”理论与实践——总体思路与“4R”治理技术 [J]. *农业环境科学学报*, 2013,32(1):1-8.
- Yang L Z, Shi W M, Xue L H, et al. Reduce-Retain-Reuse-Restore technology for the controlling the agricultural non-point source pollution in countryside in China: General countermeasures and technologies [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013,32(1):1-8.
- [11] 石敦杰. 氮磷肥减量与生态沟渠拦截对农田氮磷面源污染防控效果研究 [D]. 长沙:湖南农业大学, 2018.
- Shi D J. Effects of the reduction of nitrogen and phosphorus application and ecological ditch interception on nitrogen and phosphorus non-point source pollution in farmland [D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2018.
- [12] Min J, Shi W. Nitrogen discharge pathways in vegetable production as non-point sources of pollution and measures to control it [J]. *Science of the Total Environment*, 2017,613-614:123-130.
- [13] 彭世彰,熊玉江,罗玉峰,等. 稻田与沟塘湿地协同原位削减排水中氮磷的效果 [J]. *水利学报*, 2013,39(6):657-663.
- Peng S Z, Xiong Y J, Luo Y F, et al. The effect of paddy eco-ditch and wetland system on nitrogen and phosphorus pollutants reduction in drainage [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2013,39(6):657-663.
- [14] Xiong Y, Peng S, Luo Y, et al. A paddy eco-ditch and wetland system to reduce non-point source pollution from rice-based production system while maintaining water use efficiency [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2015,22(6):4406-4417.
- [15] 王春雪,李敏,陈建军,等. 不同牛粪化肥配施比例下水稻田-沟-塘系统的水质及植物特征 [J]. *生态与农村环境学报*, 2019,35(4):506-514.
- Wang C X, Li M, Chen J J, et al. Water quality and plant characteristics of paddy-ditch-pond with different ratio of dairy manure to fertilizer in the paddy fields [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2019,35(4):506-514.
- [16] 阮炳南,吴磊,郭嘉薇,等. 考虑环境成本综合效益的泾河流域最佳管理措施评价与筛选 [J]. *中国环境科学*, 2024,44(1):319-328.
- Ruan B, Wu L, Guo J W, et al. Assessment and selection of the best management practices for the Jinghe River Basin considering the comprehensive benefits of environmental costs [J]. *China Environmental Science*, 2024,44(1):319-328.
- [17] 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 F, Jiang X F, Wang L, et al. Non-point source pollution control of Ashihe Basin based on SWAT Model [J]. *China Environmental Science*, 2016,36(2):610-618.
- [18] Saharia A M, Sarma A K. Future climate change impact evaluation on hydrologic processes in the Bharalu and Basistha basins using SWAT model [J]. *Natural Hazards*, 2018,92(3):1463-1488.
- [19] Xie X H, Cui Y L. Development and test of SWAT for modeling hydrological processes in irrigation districts with paddy rice [J]. *Journal of Hydrology*, 2011,396(1/2):61-71.
- [20] Wu D, Cui Y, Xie X, et al. Improvement and testing of SWAT for multi-source irrigation systems with paddy rice [J]. *Journal of Hydrology*, 2019,568:1031-1041.
- [21] Ouyang W, Wei P, Gao X, et al. Optimization of SWAT-Paddy for modeling hydrology and diffuse pollution of large rice paddy fields [J]. *Environmental Modelling and Software*, 2020,130:104736.
- [22] Wu D, Cui Y, Luo Y. Irrigation efficiency and water-saving potential considering reuse of return flow [J]. *Agricultural Water Management*, 2019,221:519-527.
- [23] Dakhalla A O, Parajuli P B. Evaluation of the best management practices at the watershed scale to attenuate peak streamflow under climate change scenarios [J]. *Water Resources Management*, 2016,30(3):963-982.
- [24] Bosch N S. The influence of impoundments on riverine nutrient transport: An evaluation using the Soil and Water Assessment Tool [J]. *Journal of Hydrology*, 2008,355(1-4):131-147.
- [25] Leh M D K, Sharpley A N, Singh G, et al. Assessing the impact of the MRBI program in a data limited Arkansas watershed using the SWAT model [J]. *Agricultural Water Management*, 2018,202:202-219.
- [26] Gathagu J N, Sang J K, Maina C W. Modelling the impacts of structural conservation measures on sediment and water yield in Thika-Chania Catchment, Kenya. *International Soil and Water Conservation Research*, 2018,6:165-174.
- [27] Liu G, Chen L, Wei G, et al. New framework for optimizing best management practices at multiple scales. *Journal of Hydrology*, 2019,578:124133.
- [28] Hitomi T, Iwamoto Y, Miura A, et al. Water-saving irrigation of paddy field to reduce nutrient runoff [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2010,22:885-891.
- [29] Ouyang W, Xu X, Hao Z, et al. Effects of soil moisture content on upland nitrogen loss [J]. *Journal of Hydrology*, 2017,546:71-80.
- [30] Zhou W, Guo Z, Chen J, et al. Direct seeding for rice production increased soil erosion and phosphorus runoff losses in subtropical China [J]. *Science of the Total Environment*, 2019,695:133845.
- [31] 秦沂樟,白静,赵健,等. 长江流域农田生态排水沟渠氮削减效应研究 [J]. *农业环境科学学报*, 2024,43(2):389-400.
- Qin Y Z, Bai J, Zhao J, et al. Nitrogen removal effect of agricultural ecological drainage ditches in the Yangtze River Basin, China [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2024,43(2):389-400.
- [32] 吴迪,崔远来. 塘堰调控对未来气候变化下典型灌区氮负荷排放的影响 [J]. *灌溉排水学报*, 2017,36(2):20-24.
- Wu D, Cui Y L. Impact of the ponds regulation for the nitrogen discharge of irrigation area under the future climate change [J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2017,36(2):20-24.
- [33] Soana E, Balestrini R, Vincenzi F, et al. Mitigation of nitrogen pollution in vegetated ditches fed by nitrate-rich spring waters [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2017,243:74-82.
- [34] Uusheimo S, Tulonen T, Aalto S L, et al. Mitigating agricultural nitrogen load with constructed ponds in northern latitudes: A field study on sedimental denitrification rates [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2018,261:71-79.
- [35] Yan W, Yin C, Tang H. Nutrient retention by multipond systems: Mechanisms for the control of nonpoint source pollution [J]. *Journal of Environmental Quality*, 1998,27:1009-1017.
- [36] 姜翠玲,范晓秋,章亦兵. 农田沟渠挺水植物对 N、P 的吸收及二次污染防治 [J]. *中国环境科学*, 2004,24(6):702-706.
- Jiang C L, Fan X Q, Zhang Y B. Absorption and prevention of secondary pollution of N and P by emergent plants in farmland ditch [J]. *China Environmental Science*, 2004,24(6):702-706.
- [37] 张燕,祝惠,阎百兴,等. 排水沟渠炉渣与底泥对水中氮、磷截留效应 [J]. *中国环境科学*, 2013,33(6):1005-1010.
- Zhang Y, Zhu H, Yan B X, et al. Interception effect of ditch slag and sediments on nitrogen and phosphorus in water [J]. *China Environmental Science*, 2013,33(6):1005-1010.
- [38] Chen L, Liu F, Wang Y. Nitrogen removal in an ecological ditch receiving agricultural drainage in subtropical central China [J]. *Ecological Engineering*, 2015,82:487-492.
- [39] Zhang W, Li H, Kendall A D, et al. Nitrogen transport and retention in a headwater catchment with dense distributions of lowland ponds [J]. *Science of the Total Environment*, 2019,683:37-48.
- [40] Hama T, Nakamura K, Kawashima S, et al. Effects of cyclic irrigation on water and nitrogen mass balances in a paddy field [J]. *Ecological Engineering*, 2011,37:1563-1566.

作者简介: 刘连华(1991-),女,山东临沂人,副研究员,博士,主要从事流域水环境过程与污染物迁移转化研究.发表论 18 篇. liulianhua@caas.cn.