

配方施肥对水稻生产和经济、环境效益的影响

韩雪梅, 杨林章, 俞映惊, 徐红艳, 朱秀红, 杨根, 程浩

引用本文:

韩雪梅, 杨林章, 俞映惊, 等. 配方施肥对水稻生产和经济、环境效益的影响[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(12): 2614–2622.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0465>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

小麦秸秆还田条件下钾肥减量对水稻产量及养分利用的影响

朱远芄, 史燕捷, 管浩, 叶新新, 郅红建, 华胜, 王宜坤

农业环境科学学报. 2020, 39(11): 2596–2605 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0289>

洱海流域不同施肥模式对稻田氮磷径流流失的影响

姜海斌, 沈仕洲, 谷艳茹, 于双, 邹洪涛, ArifHusain, 张磊, 张克强

农业环境科学学报. 2021, 40(6): 1305–1313 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-1292>

应用生命周期法评价我国测土配方施肥项目减排效果

张卫红, 李玉娥, 秦晓波, 万运帆, 刘硕, 高清竹

农业环境科学学报. 2015(7): 1422–1428 <https://doi.org/10.11654/jaes.2015.07.027>

不同施肥方式下洱海流域水稻-大蒜轮作体系氮磷径流损失研究

姚金玲, 张克强, 郭海刚, 王凤, 张贵龙, 任天志

农业环境科学学报. 2017, 36(11): 2287–2296 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-0537>

种植方式对稻田氨挥发及氮磷流失风险的影响

杨振宇, 罗功文, 赵杭, 胡旺, 王艺哲, 张含丰, 张玉平

农业环境科学学报. 2021, 40(7): 1529–1537 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-1481>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

韩雪梅, 杨林章, 俞映惊, 等. 配方施肥对水稻生产和经济、环境效益的影响[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(12): 2614–2622.

HAN X M, YANG L Z, YU Y L, et al. Effects of formulated fertilizer pattern on rice production, economic and environmental benefits[J].

Journal of Agro-Environment Science, 2021, 40(12): 2614–2622.



开放科学 OSID

配方施肥对水稻生产和经济、环境效益的影响

韩雪梅¹, 杨林章², 俞映惊^{2*}, 徐红艳³, 朱秀红⁴, 杨根², 程浩⁵

(1. 苏州市吴中区农业环境与土壤肥料站, 江苏 苏州 215104; 2. 江苏省农业科学院农业资源与环境研究所, 农业部长江下游平原农业环境重点实验室, 南京 210014; 3. 苏州市吴中区越溪街道经济服务中心, 江苏 苏州 215104; 4. 苏州市吴中区农技植保推广站, 江苏 苏州 215104; 5. 南京万德斯环保科技股份有限公司, 南京 211122)

摘要: 苏州市吴中区是农业面源污染防治的重点区域, 推行配方施肥模式是该区实现种植业肥料减量的主要手段。但是, 测土配方施肥模式的制定以作物产量的提升和保障为侧重, 缺少对经济、环保等多方综合性需求的回应。针对该区已沿用4 a的水稻配方施肥模式, 本研究设置包含配方施肥模式和常规施肥模式的缺素试验, 测定水稻养分利用、农田氮磷排放、农户经费收支等指标, 分析配方施肥模式的经济、环境效益。研究结果显示, 现有配方施肥模式在减少养分投入的条件下仍能够保障水稻产量, 且提高磷钾肥利用效率6.35~28.59个百分点, 降低氮流失量36%, 减少用于肥料购置的经济投入35%, 增加农户净利润2 558元·hm⁻², 实现生产、经济和环境多方效益的兼顾。基于养分利用效率, 现有配方施肥模式仍有进一步减少肥料投入的余地。为保障土壤生产力的可持续性, 建议增加一定比例的有机肥投入, 且以4~5 a为周期, 对配方肥养分配比和配方施肥模式进行调整, 构筑生产中的动态物质平衡, 为农业绿色发展提供技术支撑。

关键词: 配方施肥; 水稻; 利用效率; 氮磷流失; 生产收支

中图分类号: X53 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-2043(2021)12-2614-09 doi:10.11654/jaes.2021-0465

Effects of formulated fertilizer pattern on rice production, economic and environmental benefits

HAN Xuemei¹, YANG Linzhang², YU Yingliang^{2*}, XU Hongyan³, ZHU Xiuhong⁴, YANG Bei², CHENG Hao⁵

(1. Wuzhong District Agricultural Environment and Soil Fertilizer Station, Suzhou 215104, China; 2. Key Laboratory of Agricultural Environment of the Lower Reaches of the Yangtze River, Institute of Agricultural Resources and Environment, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China; 3. Wuzhong District Yuexi Street Economic Service Center, Suzhou 215104, China; 4. Wuzhong District Agricultural Technical Advice Station, Suzhou 215104, China; 5. Nanjing Wondux Environmental Protection Technology Co., Ltd, Nanjing 211122, China)

Abstract: The Wuzhong District in Suzhou City is a key region that requires the control of agricultural non-point source pollution. The formulated fertilizer pattern established from soil testing is the main pathway to reduce the fertilizer input required for planting in this region. The aim of the formulated fertilizer pattern was to improve or maintain a high yield, as opposed to being informed by a comprehensive consideration of including agricultural production, economic profit, and environmental protection. Based on the present formulated fertilizer pattern used in rice cultivation over the last 4 years, a field experiment was carried out using the formulated fertilizer and implementing traditional fertilizer patterns for the different nutrient elements that were lacking in the soil. Economic and environmental

收稿日期: 2021-04-20 录用日期: 2021-06-15

作者简介: 韩雪梅(1974—), 女, 本科, 农艺师, 从事种植业施肥优化和面源污染治理相关工作。E-mail: 836837495@qq.com

*通信作者: 俞映惊 E-mail: yu.colleen@gmail.com

基金项目: 水体污染控制与治理科技重大专项(2017ZX07401002); 江苏省农业科技自主创新资金项目(CX(19)3095)

Project supported: The National Water Pollution Control and Technological Major Project of the Ministry of Science and Technology of China (2017ZX07401002); The Jiangsu Provincial Foundation for Agriculture Science and Technology Innovation, China(CX(19)3095)

benefits analysis was undertaken on the nutrient use efficiencies of rice, nitrogen and phosphorus loss from field, and the cost of production. The results showed that the formulated fertilizer pattern was able to maintain rice yield with a lower nutrient input compared to the traditional fertilizer pattern. This meant that the cost of fertilizer was 35% lower, increasing profits by 2 558 yuan·hm⁻². Higher (6.35~28.59 percentage points) phosphorous and potassium use efficiencies and lower (36%) nitrogen runoff loss was also observed in the formulated fertilizer pattern. Based on the nutrient use efficiencies, there was still space to further reduce fertilizer input; organic fertilizers should be used to replace a portion of the chemical fertilizer usage. The formulated fertilizer pattern was updated every 4~5 years to maintain mass balance during agricultural production. A properly formulated fertilizer pattern would be conducive to an environmentally friendly agricultural practice.

Keywords: formulated fertilization; rice; use efficiency; nitrogen and phosphorus loss; planting profit

测土配方施肥是联合国开发计划署推行的一种作物科学施肥管理技术,其在国际领域的推广应用可追溯至上世纪中叶。我国对测土配方施肥的初探始于1992年,2005年我国明确了“提高农业综合生产能力”的目标,构建“测、配、产、供、施”多环节链性联动体系,由政府提供技术和经费上的双向支持^[1-2],推动测土配方施肥技术在广大种植区的应用。受社会发展的影响,如今单纯性增产、保产已不再是种植业唯一的需求,兼顾生产、经济、环保等多方向的综合性需求应运而生。但是,测土配方施肥方案的制定依然沿用初期的老方式、老办法,对综合性需求中除生产以外其他需求的响应存在不足。

具体来说,现阶段综合性需求以保产、稳产为前提,经济上需优化提升投产比,环保上需降低种植区农业面源污染排放,生产可持续性上需维持、提升土壤地力。首先,现有配方施肥对作物生产的需求回应较好,其对水稻生物量、籽粒产量的正向影响已得到广泛证实^[3-5]。其次,配方施肥对经济需求的回应主要体现为养分增效。肥料利用率的提升是诸多研究展现施肥方案有效性的重要指标^[4,6-7],然而对投产比(单位质量大米产出的肥料投入)的变化缺少关注。此外,配方施肥对环保和生产可持续需求未作出明确回应。作为肥料优化运筹的技术手段之一,配方施肥理论上可大幅度避免土壤中速效态氮磷的大量盈余,在种植区域内部减少可流失的物质源,以此降低氮磷流失风险^[8-11],然而专门针对测土配方施肥方案实施对氮磷流失影响的研究并未见报道。少数研究关注到测土配方施肥有提升土壤有机质及速效态氮磷钾含量的作用^[12],但是多数测土配方施肥相关研究对土壤前后地力变化的关注度不够,而这恰恰是支撑种植业生产的关键,也是对已有配方进行调整的依据。综上所述,因地制宜地将生产以外的经济、环保等因子纳入考虑,及时对当前配方施肥模式

进行调整,成为当前种植业生产对测土配方施肥提出的新要求。

江苏省苏州市吴中区紧邻太湖,境内河道湖泊众多,水网密布。该区域农耕历史悠久,自古就是“鱼米之乡”。种植系统的肥料施用是该区域农业面源污染的主要来源之一。水稻作为该区典型粮食作物,种植面积达2 000 hm²以上,稻田系统的肥料施用、养分利用效率等直接关系到周边流域水体的水质情况^[13]。在维持稻米产出的同时,控制稻田氮磷流失,是寻找农业生产和环境保护两者平衡的关键。该区域积极推进“两减六治三提升”专项行动,而测土配方施肥就是落地“治理太湖水环境”工作的主要途径之一。2015—2016年吴中区农业生产部门开展稻田田间试验和土壤地力情况摸底,明确土壤现有养分含量、水稻产量目标、水稻生长肥料需求等参数,以“大配方、小调整”^[14]为原则,应用县域测土配方施肥专家系统,制定肥料配方方案,并经专家组论证微调,最终确定主推氮、磷、钾比例为16%:12%:17%的配方肥(由华昌化工股份有限公司生产)作为基肥,搭配尿素为穗肥,作为该区域水稻种植的配方施肥模式。该模式自2017年稻季起开展全区推广,覆盖吴中区主要农村合作社和种植类工商资本企业,已连续执行4个种植季。与常规施肥模式相比,当前配方施肥模式的养分利用效率如何?是否降低稻田系统的面源污染负荷?在经济投产上是否具有优势?连续使用后土壤地力现况如何?这些问题都有待验证。

对此,本研究选取连续实施配方施肥模式4个种植季的稻田区域,设置配方施肥模式和常规施肥模式条件下的缺素处理,探讨配方施肥模式对水稻养分利用、农田氮磷排放、农户经济收益的影响,分析配方施肥模式的经济效益、环境效益和生产可持续性,基于当前地力现况提出配方施肥模式调整建议,为农业绿色发展工作的推进提供支持。

1 材料与方法

1.1 供试土壤及作物

1.1.1 供试土壤

本研究开展于吴中区临湖镇湖桥村(31°8'12" N, 120°30'28" E), 位于长江三角洲太湖流域, 属亚热带湿润季风气候, 年均温 15.7 °C, 平均降水 1 100 mm。该区域水稻土多由湖底沉积物发育而成, 耕作层深度 18 cm, 经过百年水稻耕作, 近 5 a 以水稻-绿肥为主要轮作模式。试验开展前耕作层土壤基本理化性质: 有机质 14.9 g·kg⁻¹, 全氮 1.79 g·kg⁻¹, 全磷 0.44 g·kg⁻¹, 碱解氮 839 mg·kg⁻¹, 有效磷 14.2 mg·kg⁻¹, 速效钾 54.7 mg·kg⁻¹, 阳离子交换量 15.7 cmol·kg⁻¹, 容重 1.23 g·cm⁻³, pH 7.88。

1.1.2 供试作物

本研究供试水稻品种为南粳46号。该品种为江苏省农业科学院粮食作物研究所选育而成的晚粳, 具有株型紧凑、分蘖力中等偏强等特点, 是供试区域乃至太湖流域的主要水稻栽种植种之一。

1.2 试验设计及田间管理

试验设置常规施肥(CF)和配方施肥(SF)2种模式, 每种模式分别包含缺氮(PK)、缺磷(NK)、缺钾(NP)和不缺素(NPK)处理, 另设1个不施用任何肥料的空白处理, 共计9个处理。每种处理设3个重复, 小区面积 64 m²(8 m×8 m)。其中, 缺素处理氮磷钾养分投入分别施用尿素、过磷酸钙和氯化钾; 常规施肥的不缺素处理使用氮、磷、钾比例为 15%:15%:15%, 常规复合肥作为基肥, 配方施肥的不缺素处理使用氮、磷、钾比例为 16%:12%:17%的配方复合肥为基肥; 蘖肥和穗肥期施用尿素完成氮补充。2种施肥模式的养分投入量以当地实际种植的氮磷钾投入情况为

指导, 即常规施肥模式施用常规复合肥 525 kg·hm⁻² 和尿素 450 kg·hm⁻², 配方施肥模式施用配方复合肥 350 kg·hm⁻² 和尿素 375 kg·hm⁻²。具体肥料养分投入量如表1所示。

稻季试验开展于2020年, 基肥、蘖肥和穗肥施用时间分别为6月8日、7月1日和7月29日; 6月9日移栽水稻幼苗至试验区内, 间距为 18 cm×30 cm, 11月10日收获。

1.3 样品采集及指标测定

1.3.1 植株样品采集及指标测定

收获时, 统计各小区平均分蘖数, 以此为标准, 采集每个小区典型植株样品(仅地上部分)4穴。植株样品穗和茎叶部分分开, 于 105 °C 烘箱内杀青 30 min, 在 80 °C 温度下分别烘至恒质量, 称量、记数, 用于生物量核算。此后, 植株样品穗和茎叶分别磨碎, 过 20 目筛, 测定其中氮(凯式法, Foss Scino KT260, 中国)、磷(钼锑抗比色法, SHIMADZU UV-1800, 日本)、钾(火焰光度计法, 上海光谱, 中国)含量。各处理理论产量通过籽粒考种计算而来。

1.3.2 土壤样品采集及指标测定

2020年稻季种植前采集5个试验区域耕作层(0~18 cm)土壤样品, 作为初始土壤, 用于土壤基本理化性质分析(详见 1.1.1), 水稻收获后采集常规施肥和配方施肥2种模式下的不缺素处理土壤, 检测土壤全氮(同植株 1.3.1)、全磷(同植株 1.3.1)和有机质(重铬酸钾氧化-比色法)含量。

1.3.3 径流液的采集及氮磷损失的测定

水稻生长期发生较大规模降雨且引起排水, 则视为1次径流。产流 2 h 后, 于各小区排水口采集对应处理的径流液, 由降雨量、田面水高度变化的差值确定径流深, 用于单次径流量的估算。试验期间共采集

表1 试验处理及其氮磷钾肥投入量(kg·hm⁻²)

Table 1 Treatments and their nitrogen, phosphorus and potassium input(kg·hm⁻²)

模式 Pattern	处理 Treatment	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
空白	CK	0	0	0
常规施肥	CF-PK		基肥 79	基肥 79
	CF-NK	基肥 79; 蘖肥 103.5; 穗肥 103.5		基肥 79
	CF-NP	基肥 79; 蘖肥 103.5; 穗肥 103.5	基肥 79	
	CF-NPK	基肥 79; 蘖肥 103.5; 穗肥 103.5	基肥 79	基肥 79
配方施肥	SF-PK		基肥 63	基肥 89
	SF-NK	基肥 84; 蘖肥 86; 穗肥 86		基肥 89
	SF-NP	基肥 84; 蘖肥 86; 穗肥 86	基肥 63	
	SF-NPK	基肥 84; 蘖肥 86; 穗肥 86	基肥 63	基肥 89

到5次降水径流液(6月13日、6月29日、8月4日、9月16日和9月17日),并未发生烤田排水。

1.4 数据处理及统计分析

1.4.1 作物氮磷钾养分吸收量的计算

各小区每穴植株茎叶和穗分别称质量,记录干物质质量和对应氮磷钾含量,用于作物氮磷钾吸收量的计算:

$$\text{作物氮/磷/钾吸收量}(\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2})=[\text{植株茎叶干物质质量}(\text{g}\cdot\text{穴}^{-1})\times\text{植株茎叶氮/磷/钾含量}(\text{mg}\cdot\text{g}^{-1})+\text{植株穗干物质质量}(\text{g}\cdot\text{穴}^{-1})\times\text{植株穗氮/磷/钾含量}(\text{mg}\cdot\text{g}^{-1})]\times 1.8\times 10^5\text{穴}\cdot\text{hm}^{-2}\times 10^{-6} \quad (1)$$

1.4.2 作物氮磷钾肥利用效率的计算

(1) 氮磷钾表观利用效率

$$\text{作物氮表观利用效率}=[\text{NPK处理作物氮吸收量}(\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2})-\text{PK处理作物氮吸收量}(\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2})]\div\text{氮肥施用量}(\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2})\times 100\% \quad (2)$$

$$\text{作物磷表观利用效率}=[\text{NPK处理作物磷吸收量}(\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2})-\text{NK处理作物磷吸收量}(\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2})]\div\text{磷肥施用量}(\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2})\times 100\% \quad (3)$$

$$\text{作物钾表观利用效率}=[\text{NPK处理作物钾吸收量}(\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2})-\text{NP处理作物钾吸收量}(\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2})]\div\text{钾肥施用量}(\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2})\times 100\% \quad (4)$$

(2) 氮磷钾农学利用效率

$$\text{作物氮农学利用效率}(\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1})=[\text{NPK处理作物产量}(\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2})-\text{PK处理作物产量}(\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2})]\div\text{氮肥施用量}(\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}) \quad (5)$$

$$\text{作物磷农学利用效率}(\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1})=[\text{NPK处理作物产量}(\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2})-\text{NK处理作物产量}(\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2})]\div\text{磷肥施用量}(\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}) \quad (6)$$

$$\text{作物钾农学利用效率}(\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1})=[\text{NPK处理作物产量}(\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2})-\text{NP处理作物产量}(\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2})]\div\text{钾肥施用量}(\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}) \quad (7)$$

(3) 偏生产力

$$\text{NPK处理作物偏生产力}(\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1})=\text{NPK处理作物产量}(\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2})\div\text{氮磷钾肥施用总量}(\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}) \quad (8)$$

1.4.3 稻季氮磷径流流失量的计算

记录单次降水前、降水后田面水深和降水量数据,计算径流深。使用流动分析仪(Skalar,荷兰)检测径流液中氮、磷含量。通过单次径流氮磷损失量的累计获得整个稻季径流氮/磷损失量。

$$\text{径流深}(\text{mm})=\text{降水前田面水深}(\text{mm})+\text{降水量}(\text{mm})-\text{降水后田面水深}(\text{mm}) \quad (9)$$

$$\text{稻季径流氮/磷损失量}(\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2})=\sum_{k=1}^5\text{第}k\text{次径流深}(\text{mm})\times\text{第}k\text{次径流液中氮/磷含量}(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}) \quad (10)$$

1.4.4 生产经济收支的情况

本研究的经济测算以吴中区临湖镇苏州市湖嘉生态农业有限公司规模化生产实际投入为依据。生产支出包括物料投入和人工水电投入,物料包括肥料和种苗,人工水电包含农机使用、灌溉用水电和田间管理相关人工。由于该公司以大米为产出进行售卖,因此,支出上还包含稻米烘干和出米包装两个后期加工环节,收入上则以成品米售卖获益为计。此处计算不包括土地租赁费用。

1.4.5 数据处理

研究采用SPSS 19.0中Duncan法对作物产量、产量结构、径流氮磷流失量等数据进行差异显著性分析($P<0.05$),采用T检验对作物氮吸收量、氮肥利用效率等数据进行差异显著性分析($P<0.05$);采用Excel软件对数据进行制图。

2 结果与分析

2.1 水稻生产及养分利用情况

2.1.1 产量及产量结构

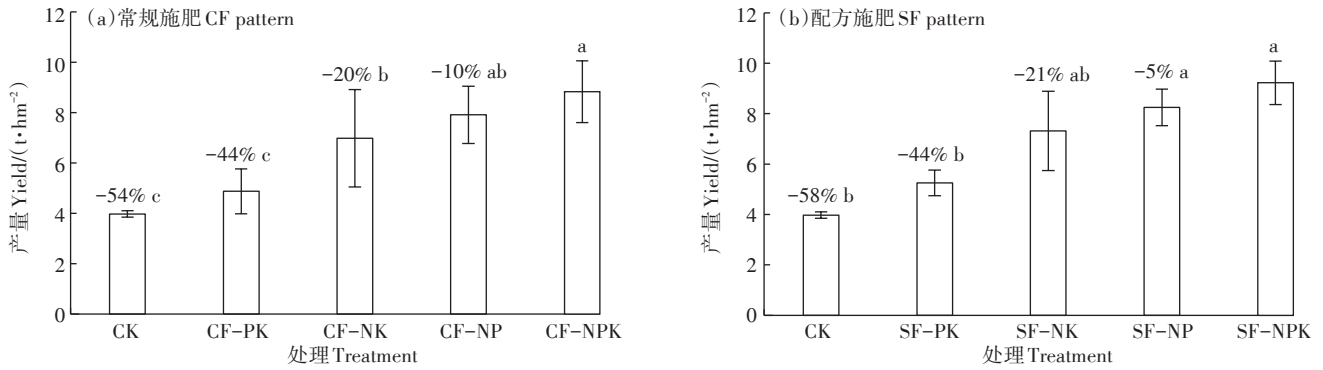
两种肥料模式下,NPK处理的产量差异并不显著,说明配方施肥模式未对水稻产量产生不利影响,而养分缺素投入处理的水稻产量均出现一定程度的下降(5%~44%,图1)。这其中,氮和磷的缺失对产量的影响达到显著水平。此外,PK处理的产量已接近CK处理,可见当前地力状况下,氮肥投入对水稻种植产出起决定性作用。

水稻单位面积的穗数及穗粒数是受投入缺素影响最为明显的指标,也是直接影响水稻产量的关键。配方施肥模式较常规施肥模式在养分投入缺素时,相对穗粒数更多、结实率也更高(表2),因此,配方施肥模式NK和NP处理的理论产量高于常规施肥模式下的该处理。在缺氮条件下,配方施肥模式无显著优势,暗示着氮素是保障产出的关键。

2.1.2 养分吸收情况及利用效率

常规施肥模式下,磷、钾元素的缺失降低了8%~13%的水稻氮吸收,而配方施肥模式条件下水稻氮吸收对钾的缺失无明显响应(图2a)。氮的缺失降低了水稻磷吸收16%~52%(图2b),降低了钾吸收4%~63%(图2c)。此外,两种施肥模式下水稻对养分的利用仅在钾元素上存在显著差异,即配方施肥显著提高了水稻对钾的吸收量(图2c)。

表观利用效率数据显示,配方施肥模式较常规施肥模式分别提高了水稻对磷、钾肥利用效率6.35个和



分别以CF-NPK和SF-NPK处理为参比,柱子上所标数字为较CF-NPK和SF-NPK处理的数值变化比例,负值表示减少,正值表示增加。不同小写字母代表处理间差异显著($P<0.05$)

CF-NPK and SF-NPK treatments are set as the reference value. The data shows above columns comes from the respective comparison to CF-NPK or SF-NPK treatment. Different lowercase letters indicate significant differences among treatments ($P<0.05$)

图1 两种肥料施用模式下的水稻产量

Figure 1 Yields of rice in two fertilizer patterns

表2 水稻产量结构

Table 2 The yield structure of rice

模式 Pattern	处理 Treatment	穗数 Spike number/($10^4 \cdot \text{hm}^{-2}$)	穗粒数 Grain number per spike	结实率 Setting rate/%	千粒质量 Thousand kernel weight/g	理论产量 Yield/($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$)
空白	CK	174.0±16.4b	95.2±7.7c	93.0±1.4a	28.9±1.0a	4.5±0.1b
常规施肥	CF-PK	180.0±14.9b	103.2±11.4bc	89.7±3.4ab	30.4±1.3a	5.1±0.9b
	CF-NK	276.0±8.7a	116.1±7.8b	84.3±3.9b	28.1±1.0a	7.6±1.9ab
	CF-NP	300.0±11.2a	120.7±14.2ab	91.2±1.0a	23.5±0.9b	7.8±1.1ab
	CF-NPK	294.0±23.3a	137.8±16.1a	90.1±2.5a	24.4±0.9b	8.9±1.2a
	CF-NPK	294.0±23.3a	137.8±16.1a	90.1±2.5a	24.4±0.9b	8.9±1.2a
配方施肥	SF-PK	192.0±25.1b	101.0±14.3bc	87.5±3.3ab	28.5±1.5a	4.8±0.5b
	SF-NK	288.0±25.3a	127.9±13.8a	96.1±3.7a	23.9±0.6b	8.5±1.6a
	SF-NP	282.0±19.8a	140.8±7.2a	90.8±3.1a	24.0±2.0b	8.7±0.7a
	SF-NPK	296.0±14.0a	137.8±5.6a	92.0±3.0a	24.3±1.1b	9.0±0.9a

注:对2017年夏的初始土壤及2020年底配方施肥模式下收获后土壤重的氮、磷、有机质含量分别进行统计分析,标注“*”表示统计学差异显著($P<0.05$)。

Note: “*” indicates significant differences ($P<0.05$) of soil total N, total P and organic matter contents among treatment.

28.59个百分点(表3)。这说明,配方施肥模式下的磷钾肥转化利用效率更高。此外,农学利用效率数据显示,配方施肥模式较常规施肥模式显著提高了氮肥对水稻产量贡献,即每公斤氮肥投入可多生产2.81 kg水稻。从总体养分投入(偏生产力)角度上看,单位质量的肥料投入在配方施肥模式下能够输出更多的水稻产量。对肥料利用率的综合提升,体现了配方施肥模式中氮磷钾养分的投入量和配比更符合水稻生长的需求,能够支撑水稻生长的养分吸收,这也一定程度解释了配方施肥模式在减少养分投入条件下保障水稻产出的原因。

2.2 氮磷径流流失情况

在径流深一致的情况下,配方施肥模式显著降低了稻季36%径流途径的氮流失量,对径流途径的磷

流失影响不显著(图3)。从氮肥投入占比上看,配方施肥模式径流途径氮损失约为4%,而常规施肥模式为6%。将CK处理的氮流失量作为土壤本底进行扣除(减去CK处理对应数值),得出配方施肥模式的因肥料引发的氮流失量仅为常规施肥模式的一半。

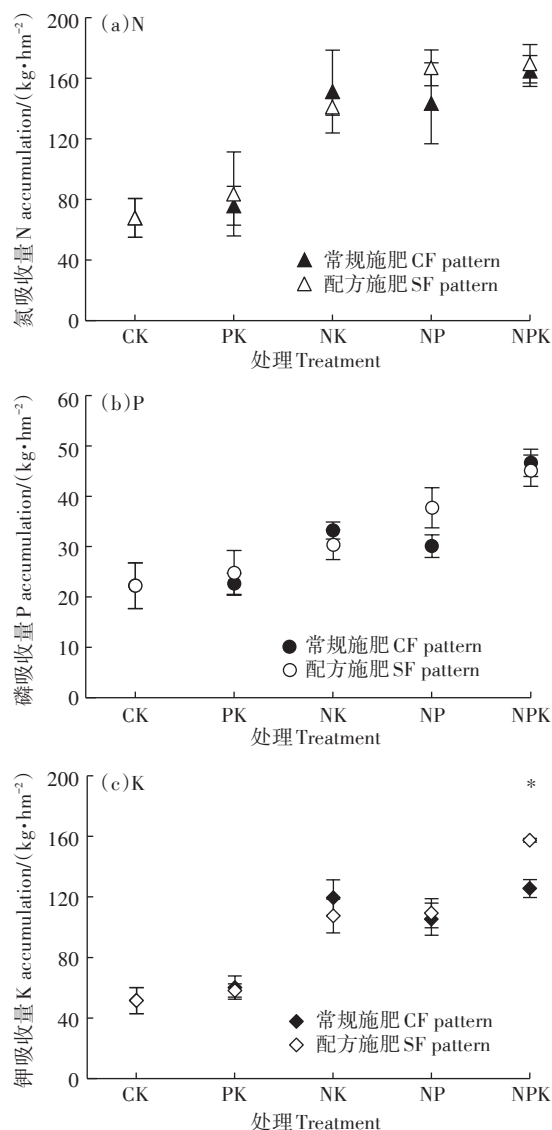
2.3 水稻生产经济收支情况

配方施肥模式较常规施肥模式显著降低了35%的肥料经济投入,且增加了4%左右的产出(表4)。因此,在其他支出都相同的情况下,可为农户增加2558元·hm⁻²的净利润。

3 讨论

3.1 配方施肥模式的经济、环境效益分析

测土配方施肥以养分补偿学说为原则,通过调整



*表示两个施肥模式各个处理间统计学差异显著 ($P < 0.05$)
* indicates significant differences ($P < 0.05$) of rice nutrient accumulations between treatments from CF and SF patterns

图2 两种肥料施用模式下的水稻养分吸收

Figure 2 Nutrient accumulations of rice in two fertilizer patterns

投入的肥料物质及投入量,协调土壤、肥料、作物三者的物质关系。社会的高速发展潜移默化地影响着生产者和管理者心中生产、经济 and 环境的权重,测土配方施肥的工作侧重也随之发生转移。推广之初,提高作物单产、保障粮食供给是测土配方施肥的主要目标。随着种植规模化、产业化的推进,促进节本增效、获取最优经济收益逐渐取代了对高产的一味追求。“十三五”期间,农业绿色发展对农业生产提出了环境友好和发展可持续的新要求,削减肥料流失量、培肥土壤也纳入了种植生产的目标之中。因此,对配方施肥模式的评判离不开对其经济和环境效益的综合考量。

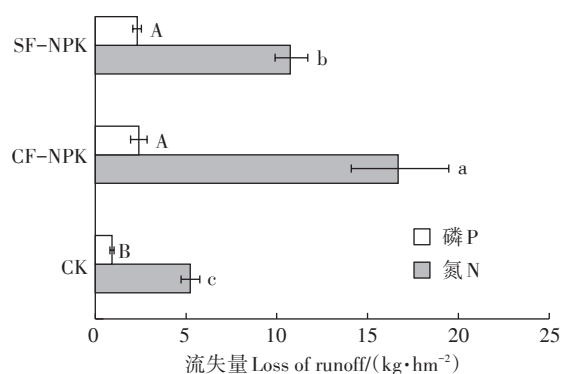
表3 肥料利用效率

Table 3 Fertilizer use efficiency

项目 Item	养分 Nutrience	CF-NPK	SF-NPK
表观利用效率/%	氮	31.11	33.59
	磷	17.03	23.38*
	钾	25.63	54.22*
农学利用效率/($\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	氮	13.47	16.28*
	磷	16.67	18.59
	钾	14.37	10.96
偏生产力/($\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	氮+磷+钾	20.07	22.06*

注:*表示两种施肥模式统计学差异显著 ($P < 0.05$)。

Note: * indicates significant differences ($P < 0.05$) of fertilizer use efficiencies between treatments from CF and SF patterns.



小写字母表示氮流失量的分析结果,大写字母表示磷流失量的分析结果,字母相同表示统计学差异不显著
The different lowercase and capital letters in a column indicate significant differences among treatments at amount of N and P loss from runoff, respectively. The same letter means no significant difference

图3 稻季径流氮磷流失量

Figure 3 Nitrogen and phosphorus loss from runoff in rice season

本研究中配方施肥模式较常规施肥模式降低每吨大米生产所需的肥料投入 38% (图 4a), 减少每吨大米生产产生的氮磷流失量 35% (图 4b)。由此可见,在现地力条件下,配方施肥模式较常规施肥模式能够更好地兼顾生产、经济和环境的多方效益。

本研究所在的吴中区通过自主招标配方肥生产、实行配方肥购买和售卖补贴,将农户获取配方肥的单价降低至常规复合肥的 65%。同时,配方施肥模式在追肥期的肥料施入量较常规施肥模式减少了 17%,进一步降低了用于肥料购买的投入成本,极大提高了农户对配方施肥模式的选择意愿。对经济不发达地区而言,政府能够用于补贴配方肥购买销售的资金并不宽裕,便捷的配方肥购置途径和基层技术培训对于让农户选择推荐的施肥模式显得尤为重要^[15-16]。而配方施肥模式本身能否通过提升作物产出提高农户净收益,才是推广、落实测土配方工作的关键^[3-5]。值得

表4 两种肥料施用模式的水稻生产收支(元·hm⁻²)
Table 4 Income and expenditure of rice planting in two fertilizer patterns(yuan·hm⁻²)

收支 Revenue and expenditure	分类 Classification	明细 Detail	CF-NPK	SF-NPK
支出	物料投入	肥料	1 418	
		15复合肥		
		配方肥		906
		尿素	60	50
		种苗	1 800	
	人工水电投入	翻耕、收获用农机	3 750	
		灌溉用水电	450	
		除草等人工管理	4 000	
	后期加工	稻米烘干	442	461
		出米包装	1 502	1 568
收入	售卖获利		48 062	50 184
净利润			34 641	37 199

注:以试验所在区域农户生产的实际支出为计算依据,15复合肥2 700元·t⁻¹,配方肥1 725元·t⁻¹(原价2 025元·t⁻¹,政府补贴300元·t⁻¹),尿素2 000元·t⁻¹,稻米烘干50元·t⁻¹,出米包装为250元·t⁻¹,脱壳出米比例为0.68,南粳46大米售价为8元·kg⁻¹。
Note: Based on the actual production expenditure in this region, price of 15-compound fertilizer is 2 700 yuan·t⁻¹; price of formulated fertilizer is 1 725 yuan·t⁻¹; price of urea is 2 000 yuan·t⁻¹. The costs for drying and packing rice are 50 yuan·t⁻¹ and 250 yuan·t⁻¹. 68% of rice is available after husking. The price for Nanjing 46 rice is 8 yuan·kg⁻¹.

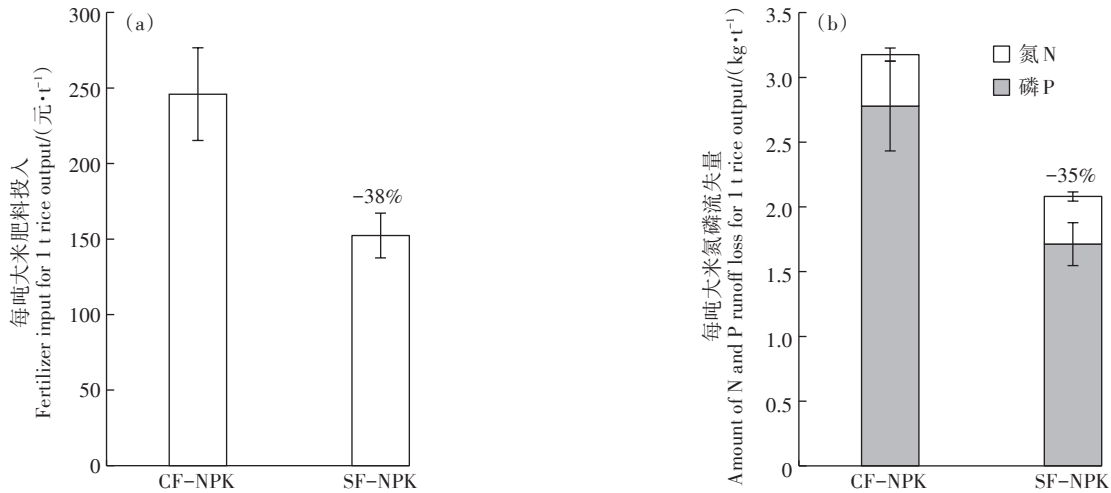


图4 单位质量大米产出的肥料投入量及氮磷流失量
Figure 4 Fertilizer input or nutrient loss for unit rice output

注意的是,本研究中整个水稻生产的资金投入在13 000元·hm⁻²左右,而肥料投入为1 000~1 500元·hm⁻²(表4),仅占物料投入的35%~45%,总投入的7%~11%,和前人研究中肥料化肥在农业生产中的成本占比数据相差较远^[17]。如此低的占比,一定程度削弱了农户对肥料投入量的关注,使农户比起精准控量减少投入,更愿意选择过量投施确保作物生长养分需求。事实上,过量或不恰当的肥料施用不仅不能提高作物产量,反而会带来一定程度的减产^[18],增加土壤中未被作物吸收利用的肥料源氮磷存量,提升氮磷流失风险^[19]。本研究结果显示,氮肥是影响水稻产量最主要

的元素,同样的结果在油菜系统的测土配方施肥中也得到了验证^[20]。因此,氮相较于磷对于产量和污染风险的调控更为重要。本研究中两种施肥模式的径流氮损失比例在4%~6%范围内(图3),与种植业氮肥平均径流损失系数5%左右的前期研究结论相符,说明配方模式能够更好呼应水稻对氮素的需求。径流发生时土壤环境中的矿质态氮留存量较低,实现稻田氮排放的有效削减^[10-11]。随着各地政府对农业面源污染治理的重视,减少肥料施用量成为实现种植业源头削减的主要抓手,测土配方“按需、按量、按时”施肥的原则^[21],为“减什么”“减多少”“怎么减”给出了答

案^[8,10],而测土配方工作的落实也是推动农业面源污染治理的重要工作组成^[9]。

3.2 配方施肥模式的生产可持续性分析及改进建议

现有配方施肥模式已沿用4 a,有关施肥配方调整周期的研究此前并未见报道。就本研究而言,对比2017年使用配方模式前的土壤养分指标数据,土壤全氮、全磷未出现显著变化,但土壤有机质含量下降显著(表5)。这说明,现有配方施肥模式可满足水稻生长需求,但是,即使实行秸秆还田,也未能弥补土壤有机物质耗损缺口。此外,本研究配方施肥模式下水稻地上部分氮、磷吸收量分别为169 kg·hm⁻²和45 kg·hm⁻²(图2),仅占氮磷投入量的66%和72%,可见在养分投入配比不变的情况下,配方施肥模式的养分投入量依然存在削减的余地。因此,在肥料品种上,建议适当增加一定比例的有机肥,以30%~70%占比为宜^[22];在肥料养分投入上,建议削减蘖肥、穗肥的尿素投入量,将一定比例的配方肥由基肥期移至穗肥期,并在基肥期使用尿素进行氮补充,在保证磷钾投入量的同时,减少氮投入总量。考虑到多环节的推行需要一定操作周期^[1,15],太过频繁地调整缺乏可行性,因此,建议以4~5 a为周期,进行配方施肥模式的调整。

表5 实施配方施肥模式前后土壤氮、磷、有机质含量的变化(g·kg⁻¹)

Table 5 Changes of soil nitrogen, phosphorus and organic matter after using special formulated fertilizer patterns(g·kg⁻¹)

时期 Period	全氮 Total N	全磷 Total P	有机质 Organic matter
2017年	1.68±0.07	0.56±0.04	20.97±2.74
2020年	1.75±0.16	0.44±0.02	13.30±1.82*

注:*表示配方施肥模式下收获后土壤氮、磷、有机质含量之间统计学差异显著($P<0.05$)。

Note: * indicate significant differences ($P<0.05$) of soil total N, total P and organic matter contents among treatments.

4 结论

(1)与常规施肥模式相比,配方施肥模式更好支撑了水稻生长的养分需求,显著提高了肥料的综合利用率,单位质量的肥料投入在配方施肥模式下具有更高的水稻产量输出,达到了保产目标,并显著降低了肥料的经济投入,提升了农户的净利润。

(2)氮元素较磷、钾而言是当前地力状况下对水稻生长起决定性作用的营养元素。配方施肥模式可显著降低径流途径的氮流失量,实现生产、经济和环境多方效益的兼顾。

(3)现阶段的配方施肥模式中养分投入量依然存在削减的余地。建议增加一定比例有机肥投入,适当削减氮投入总量;以4~5 a为周期,对配方施肥模式中的养分配比和投入量进行论证和调整。

(4)我国测土配方施肥的实施推广已长达15 a,现有研究机构对其关注度并不高,发量也呈现减少状况。如何通过调节肥料投入,达到作物、土壤甚至是生态圈的平衡,对于推进农业绿色发展至关重要。因此,测土配方施肥在任何一个时候都绝非老生常谈,而是一项不断需要调整、修正、完善的工作。

参考文献:

- [1] 李昌健, 栗铁申. 测土配方施肥技术问答[M]. 北京: 中国农业出版社, 2005. LI C J, LI T S. Questions and answers for formula fertilizer by soil testing technology[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2005.
- [2] 杨超. 中央财政将安排转移支付资金7亿元支持测土配方施肥[EB/OL]. http://www.cnr.cn/allnews/201205/t20120520_509656811.html, 2012-05-20. YANG C. The central government will provide 0.7 billion transfer payments to support formula fertilization by soil testing [EB/OL]. http://www.cnr.cn/allnews/201205/t20120520_509656811.html, 2012-05-20.
- [3] 罗小娟, 冯淑怡, 石晓平, 等. 太湖流域农户环境友好型技术采纳行为及其环境和经济效应评价——以测土配方施肥技术为例[J]. 自然资源学报, 2013, 28(11): 1891-1902. LUO X J, FENG S Y, SHI X P, et al. Farm households' adoption behavior of environment friendly technology and the evaluation of their environmental and economic effects in Taihu basin: Taking formula fertilization by soil testing technology as an example[J]. *Journal of Natural Resources*, 2013, 28(11): 1891-1902.
- [4] 郭红, 赵呈明, 李玲, 等. 测土配方施肥对水稻产量和肥料利用率的影响[J]. 大麦与谷类科学, 2020, 37(6): 35-38. GUO H, ZHAO C M, LI L, et al. Effects of the soil testing and formulated fertilization strategy on rice yield and fertilizer utilization rates[J]. *Barley and Cereal Sciences*, 2020, 37(6): 35-38.
- [5] 沈晓艳, 黄贤金, 钟太洋. 中国测土配方施肥技术应用的环境与经济效益评估[J]. 农林经济管理学报, 2017, 16(2): 177-183. SHEN X Y, HUANG X J, ZHONG T Y. Environmental and economic evaluation of formula fertilization with soil testing technology in China[J]. *Journal of Agro-Forestry Economics and Management*, 2017, 16(2): 177-183.
- [6] 邵赛男, 夏晓燕, 蒋玉根, 等. 基于测土配方施肥的化肥减量增效技术应用探讨[J]. 浙江农业科学, 2021, 62(3): 477-480. SHAO S N, XIA X Y, JIANG Y G, et al. Study of fertilizer reduction and efficiency enhancement technology[J]. *Journal of Zhejiang Agricultural Sciences*, 2021, 62(3): 477-480.
- [7] 钱卫飞, 徐巡军, 钱卫东, 等. 不同土壤类型水稻测土配方施肥对肥料利用率的影响[J]. 江苏农业科学, 2013, 41(1): 83-85. QIAN W F, XU X J, QIAN W D, et al. Effects of formulated fertilizer model on its use efficiency in rice system[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2013, 41

- (1):83-85.
- [8] 陈阿江. 农业面源污染研究策略[J]. 南京工业大学学报, 2018, 17(6):12-22. CHEN A J. Study on strategies of agricultural non-point source pollution[J]. *Journal of Nanjing University of Technology*, 2018, 17(6):12-22.
- [9] 朱玫. 太湖流域农业面源污染治理亟待再次提速[J]. 环境经济, 2010(3):20-25. ZHU M. Quicken the pace of agricultural non-point source pollution controlling in Tai Lake region[J]. *Environmental Economy*, 2010(3):20-25.
- [10] 张锋, 胡浩. 农户化肥投入行为与面源污染问题研究[J]. 江西农业学报, 2012, 24(1):183-186, 206. ZHANG F, HU H. Study on farmer's chemical fertilizer input behavior and non-point source pollution[J]. *Acta Agriculturae Jiangxi*, 2012, 24(1):183-186, 206.
- [11] 张卫红, 李玉娥, 秦晓波, 等. 应用生命周期法评价我国测土配方施肥项目减排效果[J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(7):1422-1428. ZHANG W H, LI Y E, QIN X B, et al. Evaluation of greenhouse gas emission reduction by balanced fertilization in China using life cycle assessment[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, 34(7):1422-1428.
- [12] 丁兴民, 王蕾, 徐振, 等. 青岛市农田土壤养分状况及变化特征分析[J]. 青岛农业大学学报, 2021, 38(1):34-39, 46. DING X M, WANG L, XU Z, et al. Current status of farmland soil nutrient and its change characteristics in Qingdao City[J]. *Journal of Qingdao Agricultural University*, 2021, 38(1):34-39, 46.
- [13] 陈成龙, 高明, 倪九派, 等. 三峡库区小流域不同土地利用类型对氮素流失影响[J]. 环境科学, 2016, 37(5):1707-1716. CHEN C L, GAO M, NI J P, et al. Nitrogen losses under the action of different land use types of small catchment in three gorges region[J]. *Environmental Science*, 2016, 37(5):1707-1716.
- [14] 农业部. 农业部解读三大主粮科学施肥区域大配方与施肥建议[J]. 中国农业信息, 2013(10):3-6. Ministry of Agriculture. Interpretation of big formulations and fertilization suggestions in three main grain scientific fertilization regions from the Ministry of Agriculture[J]. *China Agricultural Information*, 2013(10):3-6.
- [15] 李子琳, 李婕, 郭熙, 等. 经济欠发达地区测土配方施肥技术推广的影响因素分析[J]. 江苏农业学报, 2018, 34(6):1287-1293. LI Z L, LI J, GUO X, et al. Analysis on the factors influencing the application of soil testing and fertilizer recommendation in underdeveloped areas[J]. *Jiangsu Journal of Agricultural Sciences*, 2018, 34(6):1287-1293.
- [16] 葛继红, 周曙东, 朱红根, 等. 农户采用环境友好型技术行为研究——以配方施肥技术为例[J]. 农业技术经济, 2010(9):57-63. GE J H, ZHOU S D, ZHU H G, et al. farmer's adoption behavior of environment-friendly technology: A case study of formula fertilization[J]. *Journal of Agrotechnical Economics*, 2010(9):57-63.
- [17] 张郁松, 李琳. 测土配方施肥技术应用现状及前景探析[J]. 农业科技通讯, 2020(1):34-35. ZHANG Y S, LI L. Status and prospect analysis of soil testing and fertilizer recommendation technology[J]. *Bulletin of Agricultural Science and Technology*, 2020(1):34-35.
- [18] QIAO J, YANG L Z, YAN T M, et al. Nitrogen fertilizer reduction in rice production for two consecutive years in the Taihu Lake area[J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2012, 146(1):103-112.
- [19] ZHU Z L, CHEN D L. Nitrogen fertilizer use in China: Contributions to food production, impacts on the environment and best management strategies[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2002, 63(2/3):117-127.
- [20] 刘成, 刘明迪, 冯中朝, 等. 测土配方施肥对油菜生产的影响——基于1722份田间试验材料的经济学分析[J]. 自然资源学报, 2018, 33(8):1340-1350. LIU C, LIU M D, FENG Z C, et al. Effect of soil testing and formula fertilization on rape production: Economic analysis of 1722 field test materials[J]. *Journal of Natural Resources*, 2018, 33(8):1340-1350.
- [21] 范立慧, 徐珊珊, 侯朋福, 等. 不同地下基肥运筹比例对水稻产量及氮肥吸收利用的影响[J]. 中国农业科学, 2016, 49(10):1872-1884. FAN L H, XU S S, HOU P F, et al. Effect of different ratios of basal to tiller nitrogen on rice yield and nitrogen utilization under different soil fertility[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2016, 49(10):1872-1884.
- [22] 侯红乾, 冀建华, 刘秀梅, 等. 不同比例有机肥替代化肥对水稻产量和氮素利用率的影响[J]. 土壤, 2020, 52(4):110-117. HOU H Q, JI J H, LIU X M, et al. Effect of long-term combined application of organic and inorganic fertilizers on rice yield, nitrogen uptake and utilization in red soil area of China[J]. *Soils*, 2020, 52(4):110-117.