

纪洪亭, 周炜, 郭智, 等. 猪粪有机肥替代化学氮肥对水稻农学效应、安全效应及经济效益影响的综合评价[J]. 江苏农业学报, 2021, 37(6): 1451-1459.

doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2021.06.012

猪粪有机肥替代化学氮肥对水稻农学效应、安全效应及经济效益影响的综合评价

纪洪亭¹, 周炜², 郭智², 刘红江², 陈留根², 郑建初², 吴田乡³

(1. 江苏丘陵地区南京农业科学研究所, 江苏 南京 210046; 2. 江苏省农业科学院农业资源与环境研究所, 江苏 南京 210014; 3. 江苏省耕地质量与农业环境保护站, 江苏 南京 210036)

摘要: 通过两年田间小区定位试验综合评估猪粪有机肥替代化学氮肥的农学效应、安全效应和经济效益, 为猪粪有机肥替代化肥在水稻生产中的合理应用提供参考。结果表明, 与常规施氮(CF100)相比, 猪粪有机肥替代50%化学氮肥氮(CF50+PM50)处理对氮、磷径流流失质量浓度, 氮、磷径流流失总量, 氮、磷径流流失率的影响均不显著, 且水稻产量未显著下降。猪粪有机肥氮替代100%化学氮肥氮(PM100)处理氮径流流失质量浓度、氮径流流失总量、氮径流流失率影响不显著, 而显著增加磷径流流失质量浓度、磷径流流失总量、磷径流流失率, 且两年水稻产量平均下降4.23%。与CF100处理相比, CF50+PM50、PM100处理提高了灌浆初期和灌浆后期剑叶叶绿素含量, 而对灌浆初期和灌浆后期剑叶净光合速率影响不显著。CF50+PM50、PM100处理连续两年后提高了稻米中铜、锌健康风险指数, 但两者累计健康风险指数均小于1, 对人体健康没有危害。与CF100处理相比, CF50+PM50、PM100处理明显增加了肥料投入成本和人工成本, 导致总投入成本增加, 净收益显著下降。综上, 猪粪有机肥氮替代50%化学氮肥氮可减少化学氮肥施用量, 稳定水稻生产, 避免了有机肥过量使用导致的养分径流流失, 提高稻米铜、锌微量元素含量, 但未增加水稻生产净经济效益。

关键词: 猪粪有机肥; 稻田; 农学效应; 经济效益; 健康风险评估

中图分类号: S141 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2021)06-1451-09

Comprehensive evaluation for the influence of substituting fertilizer by pig manure on agronomic effect, safety effect and economic benefit of rice

Ji Hong-ting¹, Zhou Wei², Guo Zhi², Liu Hong-jiang², Chen Liu-gen², Zheng Jian-chu², Wu Tian-xiang³

(1. Nanjing Institute of Agricultural Sciences in Jiangsu Hilly Area, Nanjing 210046, China; 2. Institute of Agricultural Resources and Environment, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China; 3. Jiangsu Cultivated Land Quality and Agricultural Environmental Protection Station, Nanjing 210036, China)

Abstract: Two-year field plot experiments were conducted to estimate the effects of substituting fertilizer by pig manure on agronomic effect, safety effect and economic benefit of rice, aiming to provide a reference for the application of substituting fertilizer by pig manure in rice production. Results showed that compared with conventional nitrogen fertilizer application (CF100), the treatment of 50% conventional nitrogen fertilizer with 50% pig manure (CF50+PM50) had no significant effect on the mass concentration of nitrogen and phosphorus in the runoff, the quantity of nitrogen and phosphorus in the runoff, and the loss rate of nitrogen and phosphorus in the runoff, and rice yield did not de-

收稿日期: 2021-05-24

基金项目: 江苏省重点研发计划(现代农业)项目(BE2020319-12)

作者简介: 纪洪亭(1987-), 男, 山东青州人, 博士, 助理研究员, 主要从事作物生理生态研究。(E-mail) jihongting2010@126.com

通讯作者: 吴田乡, (E-mail) 504572972@qq.com

crease significantly. The treatment of 100% pig manure (PM100) had no significant effect on the mass concentration of nitrogen in the runoff, the quantity of nitrogen in the runoff, and the loss rate of nitrogen in the runoff, but the mass concentration of phosphorus in the runoff, the quantity of phosphorus in the runoff, and the loss rate of phosphorus in the runoff were significantly increased. In addition, the grain yield of rice under PM100 treatment decreased on average by 4.23% in two years. Compared with CF100 treatment, CF50+PM50 and PM100 treatments increased the chlorophyll content of flag leaves at early and late filling stages, but had no significant effect on the net photosynthetic rate of flag leaves at early and late filling stages. The CF50+PM50 and PM100 treatments for consecutive two years increased the health risk index of copper and zinc, but the cumulative health risk index of copper and zinc was lower than one, indicating that they were not harmful to human health. Compared with CF100 treatment, the CF50+PM50 and PM100 treatments significantly increased fertilizer input cost and labor cost, resulting in an increase in the total input cost and a significant decrease in the net income. Overall, CF50+PM50 treatment can reduce chemical nitrogen input, stabilize rice production, decrease the loss of nutrients in runoff due to excessive organic fertilizer, and enhance copper and zinc contents of grains, but it does not increase net economic benefits.

Key words: organic fertilizer from pig manure; paddy field; agronomic effect; economic benefit; health risk assessment

中国是世界上主要的产稻国,水稻种植面积和总产量分别占全世界的 18.5% 和 28.1%^[1]。中国也是世界第一大化肥消费国,氮肥用量占全球氮肥用量的 30%^[2],而中国稻田中氮肥的利用率只有 30% 左右^[3]。大量氮肥的投入以及稻田相对较低的氮素利用率,降低水稻经济效益的同时,也对环境造成污染,甚至降低生物多样性^[4]。

有机肥替代化学氮肥是稳定水稻生产、减少氮肥损失的一个重要的肥料管理措施^[1]。前人有关有机肥替代化学氮肥对水稻生产影响的研究主要集中在水稻产量、品质、养分吸收、土壤肥力等方面^[5-7]。鉴于粮食生产面临的压力,大多数研究者主要关注有机肥替代化肥后的产量效应,忽视了有机肥替代后的环境效应^[4]。农田产生径流时,氮、磷的流失是水网面源污染的重要来源之一,径流水含有的高浓度氮、磷是造成水体污染的主要原因^[8],合理施用有机肥可减少稻田径流氮、磷流失,而过量有机肥的施用会增加稻田径流氮、磷流失^[9]。

有机肥中含有的部分重金属是水稻生长所需的营养元素,但其在土壤中过度积累会对环境造成污染,甚至损害人类健康^[10],适量有机肥和无机肥配施既可有效控制农田生态系统重金属污染,也可在一定程度上缓解作物微量元素如铜和锌的亏缺^[11-12]。关于有机肥和无机肥配施对土壤和作物重金属积累的影响研究较多,而多数研究未对有机肥和无机肥配施条件下水稻重金属微量元素含量超标引起的健康风险进行评估。罗连光等^[13]研究了有机肥替代化肥对

杂交稻植株内重金属元素的影响。谢沂希等^[14]分析了双孢菇菌渣还田处理后稻田土壤中 Cu、Cd、Pb、Zn 含量的变化,并对其造成的污染进行评价。夏文建等^[15]分析了长期施用化肥和有机肥对稻田土壤重金属累积及有效态分布特征。周伟等^[16]评估了成都平原地区稻麦主产区不同比例的猪粪替代化肥对水稻和小麦籽粒含有重金属的风险。由于种植区域、有机肥类型、水稻品种的不同,导致重金属风险评估结果有所差别^[16]。目前,有关有机肥和无机肥配施对稻麦两熟农田生态系统稻米重金属微量元素风险评估的研究较少,因此有必要对有机肥替代化学氮肥时稻米重金属微量元素超标的风险进行评估。对种植户而言,经济效益是决定他们是否采用技术措施的核心指标^[4]。在实施有机肥替代无机肥时,由于存在有机肥的价格相对较高,有机肥施用不便、耗时耗力以及有机肥的肥效低等问题^[17],因此有机肥替代化肥的净经济效益有待评估。

综上所述,尽管前人关于猪粪有机肥替代化学氮肥的产量效应、稻田氮磷径流流失、稻谷重金属安全性及经济效益方面均有涉及,但有关综合评价猪粪有机肥替代化学氮肥的产量效应、环境效应及经济效益的研究较少。因此,本研究通过研究猪粪有机肥替代化学氮肥对水稻产量、氮肥偏生产力,光合特性,稻田氮、磷流失,稻谷重金属微量元素安全性及经济效益的影响,综合评估运用猪粪有机肥替代化学氮肥后的农学效应及安全效应、经济效益,为猪粪有机肥在水稻生产上的合理施用提供参考。

1 材料与方 法

1.1 试验材料及试验点概况

试验于 2014–2015 年在江苏省溧水区白马试验基地(31°36'N, 119°11'E)进行。试验田土壤属黄棕壤,土

表 1 试验期间水稻移栽、收获与各次施肥日期

Table 1 The date of transplanting, harvest and fertilization

年份	水稻移栽和收获日期(月-日)		施肥日期(月-日)			
	移栽	收获	基肥	分蘖肥	促花肥	保花肥
2013	06-20	10-16	06-19	06-28	07-23	07-30
2014	06-16	10-15	06-15	06-24	07-24	08-02
2015	06-19	10-15	06-18	07-01	07-27	08-05

1.2 试验设计

以常规化学氮肥处理(CF100)为对照,设置 2 个有机肥替代处理:有机肥氮替代 50%化学氮肥氮(CF50+PM50)与有机肥氮全部替代化学氮肥氮(PM100),各处理均设 3 次重复,共 9 个小区。每个小区面积为 30 m²(长×宽=7.5 m×4.0 m),试验小区与径流池设置详见郭智等^[8]的方法。CF100 处理的氮肥(N)、磷肥(P₂O₅)、钾肥(K₂O)施用量分别为 270 kg/hm², 67.5 kg/hm² 和 135 kg/hm²,氮肥施用按基肥:穗肥=6:4,磷肥全作基肥,钾肥施用按基肥:促花肥=5:5。氮肥用尿素(含氮量 46%),磷肥用复合肥(含氮量、含磷量、含钾量分别为 15%、15%、15%),钾肥用氯化钾(含钾量 60%);CF50+PM50 处理有机肥全作基肥,氮肥(有机肥 N+尿素 N)施用按基肥:穗肥=6:4,PM100 处理有机肥按基肥:分蘖肥:穗肥=2:1:1 分 3 次施用。不同处理的肥料施用量见表 2。猪粪有机肥(含水量为 23.8%)由江苏省农业科学院六合动物科学基地生产,养分含量(干基)分别为,总氮为 1.34%、总磷为 1.21%、总钾为 1.96%,总锌为 235.00 mg/kg、总铜为 722.00 mg/kg。

1.3 测试指标与方法

1.3.1 水稻产量和氮肥偏生产力测定 人工收获水稻,测定小区实际产量。根据水稻产量及稻田总施氮量计算氮肥偏生产力(氮肥偏生产力=水稻产量/总施氮量)^[18]。

1.3.2 光合速率及叶绿素含量测定 于水稻灌浆初期(抽穗后 15 d)和灌浆后期(抽穗后 35 d),运用 LI-6400XT 光合仪于当日上午 9 时至 11 时测定水

壤基础肥力如下:pH 6.21,有机质 16.62 g/kg,全氮 0.87 g/kg,全磷 0.24 g/kg,速效氮 35.16 mg/kg,速效磷 11.84 mg/kg,速效钾 89.23 mg/kg。试验品种为南粳 9108,栽插行距为 30 cm,株距为 13 cm,每穴 2~3 株,试验期间水稻移栽、收获与施肥时间见表 1。

稻剑叶光合速率,每处理测定至少 4 张叶片。同时,取不同处理的水稻旗叶,每个处理采集 10 片以上,冷藏保存至实验室运用浸提法测定叶绿素含量。叶绿素含量具体计算方法参考郭智等^[19]的方法。

表 2 不同处理肥料施用量

Table 2 The amount of fertilizer application under different treatments

处理	施用量(kg/hm ²)			
	有机肥	复合肥	尿素	氯化钾
CF100	0	450.0	440.2	112.5
CF50+PM50	10 074.6	0	293.5	0
PM100	20 149.3	0	0	0

CF100:常规化学氮肥;CF50+PM50:有机肥氮替代 50%化学氮肥氮;PM100:有机肥氮全部替代化学氮肥氮。

1.3.3 糙米中铜(Cu)、锌(Zn)含量及健康风险评价 将糙米磨成粉状,并用 HNO₃-H₂O₂ 微波消解,用电感耦合等离子体质谱仪(iCAP-Q, Thermo Scientific, 美国)测定溶液中 Cu 和 Zn 含量。

健康风险评价是指定量评价各类物质对人体健康的影响^[20-21]。本研究采用健康风险评价法评价糙米中重金属微量元素 Cu、Zn 的健康风险^[16,22]。其评价公式如下:

$$ADI_i = \frac{C_i \times IR \times EF \times ED}{BW \times AT}$$

$$ED = EA - AA$$

$$HQ_i = \frac{ADI_i}{RfD_i}$$

$$HI_a = \sum_1^n HQ_i^a$$

式中:ADI_i为单位体质量 i 重金属微量元素的日均摄入量,mg/(kg·d);C_i为糙米中重金属元素 i

的实测含量,mg/kg;IR为日均稻米摄入量,kg/d;EF为摄入频率,d/a;ED为摄入年限;EA为预期年限(成人以平均预期寿命为准,幼儿以6岁为准)^[23];AA为调查对象的平均年龄;BW为平均体质量,kg;AT为总平均摄入时间,d;RfD_i为日均*i*重金属元素参考剂量,依据US EPA 2010环境标准,Cu、Zn分别为0.04 mg/(kg·d)、0.30 mg/(kg·d)^[20]。HQ_i为

*i*重金属元素的高危值,HI_a为*a*食物高危指数,即*a*食物中*n*种重金属元素的高危值之和,可分为3个等级。若HI_a≤1,说明该食物中的重金属含量对人体健康不具有显著威胁;若1<HI_a≤10,说明此食物中的重金属含量会对人体健康产生一定的重金属威胁;若HI_a>10,说明食物中的重金属能够对人体产生慢性毒性作用^[16,22-23]。其他相关参数详见表3。

表3 健康风险评价参数取值

Table 3 Parameters values in health risk assessment

类别	性别	IR (kg/d)	EF (d/a)	EA (a)	AA (a)	BW (kg)	AT (d)
成年	男	2.5×10 ⁻¹	365	81.2	46.2	72.0	12 775
	女	1.9×10 ⁻¹	350	85.6	48.4	58.7	13 578
幼儿	男	1.2×10 ⁻¹	300	6.0	3.6	20.7	876
	女	8.5×10 ⁻²	300	6.0	3.6	19.5	876

IR:日均稻米摄入量;EF:摄入频率;EA:预期年限;AA:调查对象的平均年龄;BW:平均体质量;AT:总平均摄入时间。IR、EF和AA参照周伟等^[16]和朱谦让等^[24]的数据。EA引用南京市卫生健康委员会2019年发布的《2018年南京市户籍居民病、伤死亡原因简析》数据。BW参考江苏省体育局发布的《2017年江苏省国民体质监测报告》。

1.3.4 氮、磷径流损失测定 参考郭智等^[25]的方法采集和分析稻田径流水样,具体方法如下:降雨时测量并记录降雨量和稻田排水量,并采集样品。分别于采集样品前记录径流水的深度,以便得出径流水总量,然后搅拌使得径流池中径流水的氮、磷浓度均匀,各径流池中采集300 ml径流水,采用荷兰SKALAR公司生产的San⁺⁺型流动分析仪测定水样的总氮质量浓度、总磷质量浓度^[25],进而计算地表径流氮、磷流失量,氮、磷养分径流流失率,养分径流偏流失率,计算公式如下:

(1)地表径流氮、磷流失量计算公式如下:

$$Q = \sum_{i=1}^n C_i \times V_i \times 10^{-3}$$

式中,*Q*为不同处理条件下稻田地表径流氮或磷流失总量(kg/hm²);*C_i*为第*i*次径流过程中径流水氮或磷质量浓度(mg/L);*V_i*为第*i*次径流过程中径流水体积(m³/hm²)。

(2)氮、磷养分径流流失率。在计算农田养分径流流失率时,本研究中只计算稻田肥料氮、磷投入量,未考虑降雨、田间灌溉用水和种子含有的氮、磷。氮、磷养分径流流失率(*P_i*)计算公式如下:

$$P_i = \frac{Q}{Q_n} \times 100\%$$

式中,*P_i*为各处理稻田中氮、磷养分地表径流流失率,*Q*为各处理稻田中氮、磷养分地表径流流失量(kg/hm²),*Q_n*为各处理稻田中氮、磷养分投入量

(kg/hm²)。

(3)氮、磷养分径流偏流失率计算公式如下:

$$P_n = \frac{Q}{Y} \times 1000$$

式中,*P_n*为各处理稻田中氮、磷养分径流偏流失率(mg/kg);*Q*为各处理稻田中氮、磷养分地表径流流失量(kg/hm²);*Y*为各处理的水稻产量(kg/hm²)。

1.4 统计分析

采用SPSS 20.0对本研究数据进行方差分析,采用Excel和Origin软件进行作图。

2 结果与分析

2.1 猪粪有机肥替代化学氮肥对水稻产量和氮肥偏生产力的影响

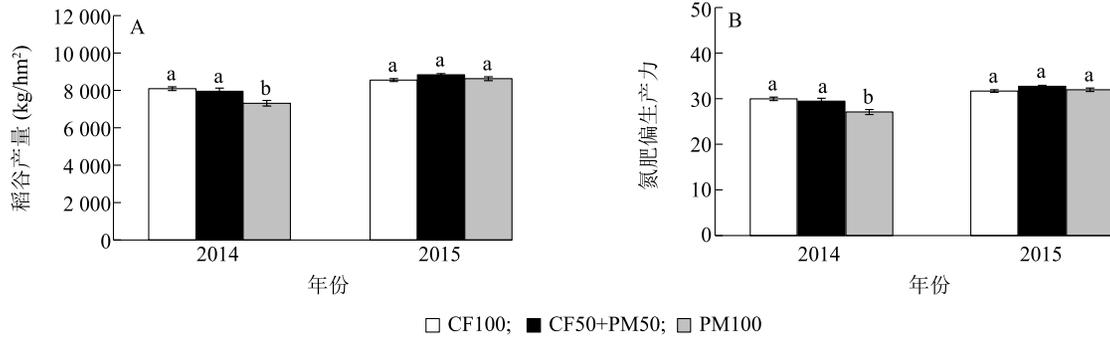
由图1A可知,CF50+PM50处理的水稻产量与CF100对照的差异不显著;在2014年,PM100处理的水稻产量较CF100对照和CF50+PM50处理显著降低。由图1B可知,2014年PM100处理的水稻氮肥偏生产力较CF100对照显著降低。CF50+PM50处理的水稻氮肥偏生产力与CF100对照差异不显著。

2.2 猪粪有机肥替代化学氮肥对水稻灌浆期剑叶光合速率及叶绿素含量的影响

由图2可知,2015年,CF50+PM50和PM100处理的灌浆初期和灌浆后期剑叶净光合速率与CF100对照的无显著差异。2014年,PM100处理灌浆初期

剑叶净光合速率比 CF100 对照显著降低,CF50+PM50、PM100 处理灌浆后期剑叶净光合速率与 CF100 对照差异不显著。与 CF100 对照相比,CF50+PM50 和 PM100 处理均提高了灌浆初期和灌

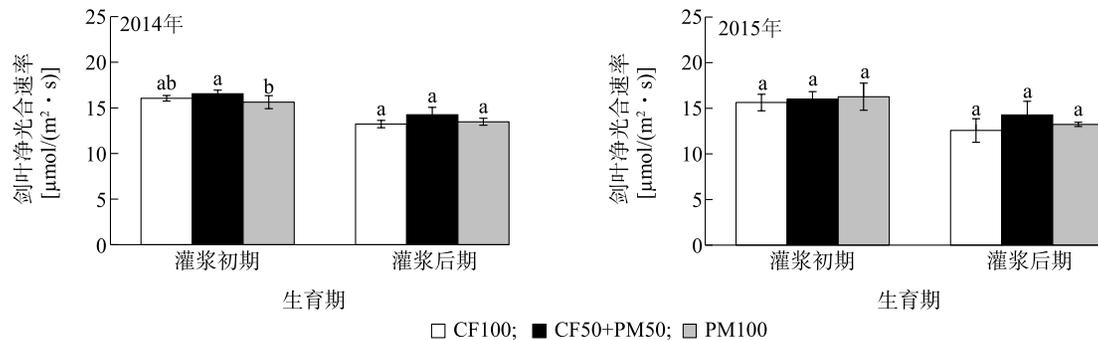
浆后期水稻剑叶叶绿素 a 含量、叶绿素 b 含量和叶绿素 a+b 含量,且 CF50+PM50 处理的水稻剑叶叶绿素含量的增幅均高于 PM100 处理(图 3)。



CF100、CF50+PM50、PM100 见表 2。不同小写字母表示同一年份处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

图 1 猪粪有机肥替代化学氮肥对稻谷产量和氮肥偏生产力的影响

Fig.1 Effects of substituting fertilizer by pig manure on rice grain yield and partial productivity of nitrogen fertilizer



CF100、CF50+PM50、PM100 见表 2。

图 2 猪粪有机肥替代化学氮肥对水稻灌浆期剑叶光合速率的影响

Fig.2 Effects of substituting fertilizer by pig manure on photosynthetic rate of flag leaf in rice at grain filling stage

2.3 猪粪有机肥替代化学氮肥对稻田养分径流损失的影响

由图 4 可知,与 CF100 对照相比,CF50+PM50 处理对氮、磷径流流失质量浓度,氮、磷径流流失总量,氮、磷径流流失率的影响均不显著,PM100 处理对氮径流流失质量浓度、氮径流流失总量、氮径流流失率影响不显著,而显著增加磷径流流失质量浓度、磷径流流失总量和磷径流流失率。与 CF100 对照相比,CF50+PM50 处理对氮径流偏流失率的影响不显著,而显著增加磷径流偏流失率。PM100 处理较 CF100 对照均显著提高了氮径流偏流失率和磷径流偏流失率。

2.4 猪粪有机肥替代化学氮肥对稻米中重金属微量元素健康风险指数的影响

虽然重金属微量元素铜和锌是植物和人体所必

需的元素,但过多的摄入将危害人体健康,因此有必要对猪粪有机肥替代化学氮肥条件下稻米中铜、锌带来的健康风险进行评价。由图 5 可知,随着猪粪有机肥替代比例的增加,稻米中铜、锌健康风险指数呈增加趋势,但铜、锌健康风险指数及两者累计健康风险指数均小于 1,表明连续两年猪粪有机肥替代 50% 和 100% 氮肥处理的稻米中铜、锌微量元素对人体健康没有危害,猪粪有机肥施用较常规施肥可在一定程度上满足人体对铜、锌微量元素需求。对不同人群来说,猪粪有机肥施用条件下铜、锌健康风险指数表现为幼儿男显著高于幼儿女、成人男、成人女,表明幼儿男更易受猪粪有机肥施用下铜、锌重金属微量元素的影响。

2.5 猪粪有机肥替代化学氮肥的经济效益分析

由表 4 可知,不同处理下肥料和用工成本的差

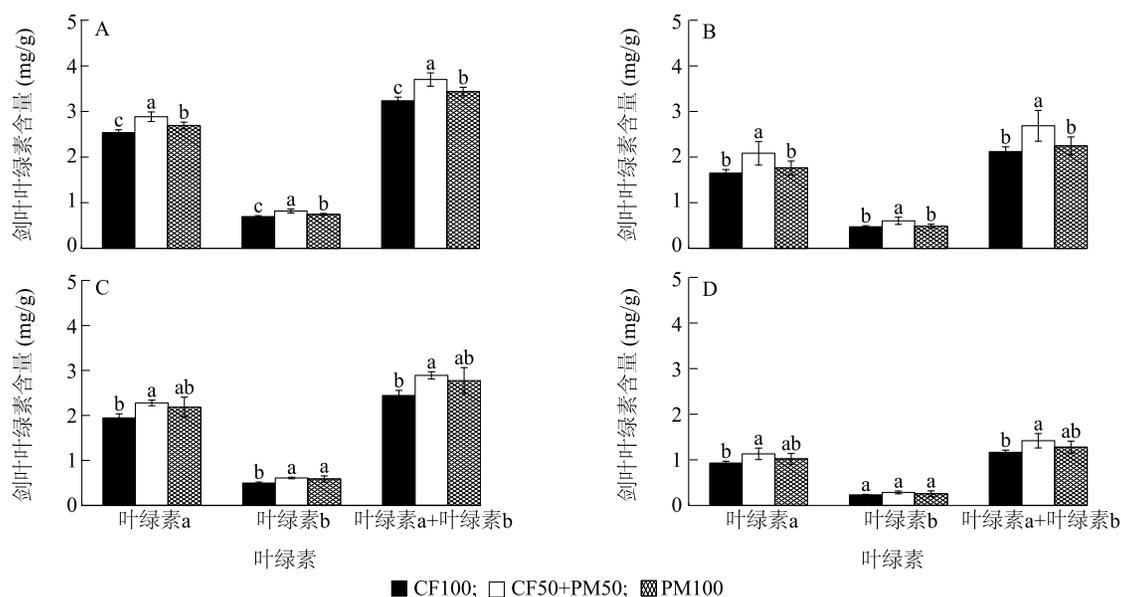
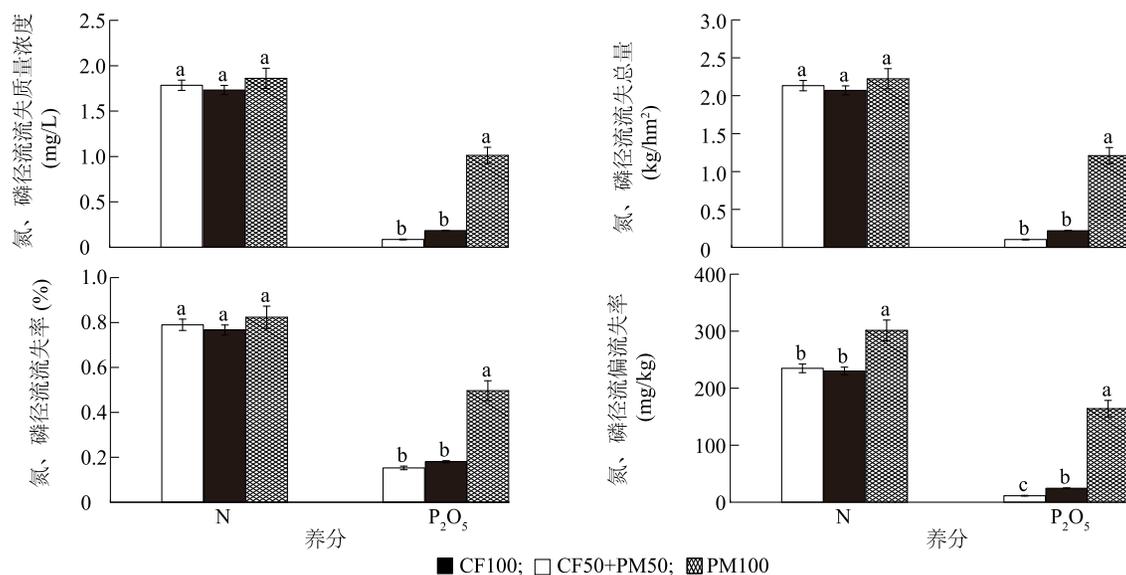


图 A 和图 B 分别是 2014 年灌浆初期和灌浆后期剑叶叶绿素含量,图 C 和图 D 分别是 2015 年灌浆初期和灌浆后期剑叶叶绿素含量。CF100、CF50+PM50、PM100 见表 2。不同小写字母表示处理间差异显著($P < 0.05$)。

图 3 猪粪有机肥替代化学氮肥对灌浆期水稻剑叶叶绿素含量的影响

Fig.3 Effects of substituting fertilizer by pig manure on chlorophyll content of flag leaf in rice at grain filling stage



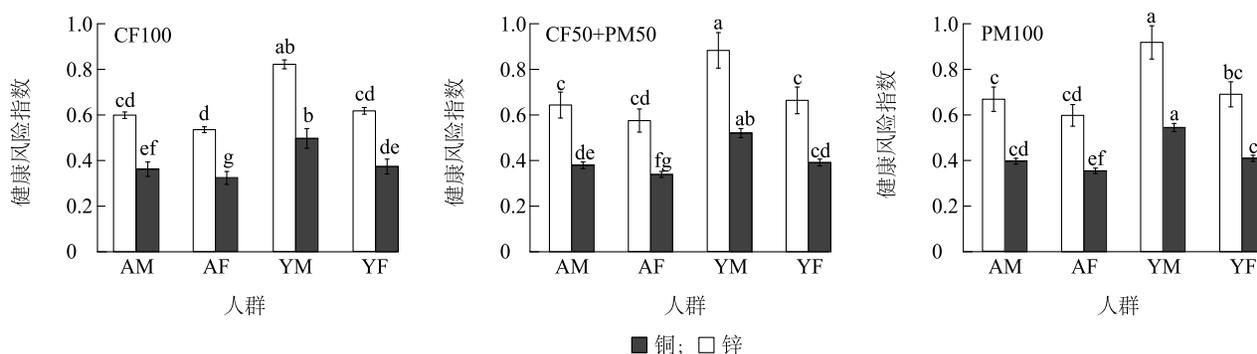
CF100、CF50+PM50、PM100 见表 2。不同小写字母表示处理间差异显著($P < 0.05$)。

图 4 猪粪有机肥替代化学氮肥对稻田氮、磷径流流失的影响

Fig.4 Effects of substituting fertilizer by pig manure on runoff losses of nitrogen and phosphorus

异是导致稻田投入差异的主要因素。与 CF100 对照相比,CF50+PM50 和 PM100 处理 1 hm² 肥料投入成本分别增加 4 908 元和 10 942 元,1 hm² 人工成本分别增加 1 200 元和 2 400 元,导致 1 hm² 总投入成本分别增加 6 108 元和 13 342 元,肥料投入成本占总投入成本的比例分别为 39% 和 52%。经济效益分析中,稻谷价格参照当年国家稻谷(粳稻)收购指导

价,未考虑各处理对米质影响而对稻谷价格的影响,也未考虑土地租金。从表 4 可知,随着猪粪有机肥替代比例的提高,净收益急剧下降。CF100 对照 1 hm² 净收益达 9 967 元,净收益/总投入为 0.81,而 CF50+PM50 和 PM100 处理的 1 hm² 净收益分别下降至 3 910 元和 -5 464 元,净收益/总投入分别为 0.21 和 -0.21(表 4)。



CF100、CF50+PM50、PM100 见表 2。AM:成人男;AF:成人女;YM:幼儿男;YF:幼儿女。

图 5 猪粪有机肥替代化学氮肥下稻米中铜、锌健康风险评价

Fig.5 Effects of substituting fertilizer by pig manure on health risk assessment of copper and zinc

表 4 猪粪有机肥替代化学氮肥下水稻生产的经济效益分析

Table 4 Economic analysis under treatments of substituting fertilizer by pig manure for rice production

处理	肥料 (元, 1 hm ²)	人工费 (元, 1 hm ²)	总投入 (元, 1 hm ²)	肥料占总投入 比例 (%)	净收益 (元, 1 hm ²)	净收益/总投入
CF100	2 296	4 800	12 331	19	9 967	0.81
CF50+PM50	7 204	6 000	18 439	39	3 910	0.21
PM100	13 238	7 200	25 673	52	-5 464	-0.21

CF100、CF50+PM50、PM100 见表 2。

3 讨论

3.1 猪粪有机肥替代化学氮肥的产量效应

猪粪有机肥替代部分化学氮肥是在稳产的同时实现化学氮肥减量的一个有效技术^[4]。本研究结果表明,猪粪有机肥氮 50%替代化学氮肥氮与单施化学氮肥相比两年产量无显著差异。猪粪有机肥养分释放速度慢,肥效迟缓,猪粪有机肥氮 100%替代化学氮肥氮不能满足水稻生育前期对氮的需求,从而导致水稻减产^[26-27]。本研究中,2014 年猪粪有机肥氮 100%替代化学氮肥氮导致水稻产量显著降低,而 2015 年猪粪有机肥氮 100%替代化学氮肥氮水稻产量与只施用化学氮肥处理无显著差异。这可能是由于连续两年施用猪粪有机肥增强了土壤供氮能力,提高了土壤微生物群落,丰富了细菌的多样性,提高了土壤生产力^[4]。

3.2 猪粪有机肥替代化学氮肥的环境效应

本研究发现,猪粪有机肥氮 50%和 100%替代化学氮肥氮的条件下,稻田氮径流流失质量浓度、氮径流流失量和氮径流流失率均无显著差异,这与郭智等^[8]的研究结果基本一致。刘红江等^[26]研究认为,猪粪有机肥替代化学氮肥可以减少稻田氮素流

失,随着有机肥替代比例的增加,稻田氮素流失不断减少。马凡凡等^[9]研究认为,当有机肥氮替代比例逐渐增加时,总氮流失量和流失率不断减少,替代比例为 50%和 100%时,降低稻田氮素径流损失的效果明显。本研究结果与前人研究结果存在差异,这可能与肥料种类、肥料用量、施肥时期和施肥方式等有关^[26]。猪粪有机肥氮替代 50%化学氮肥氮对磷径流流失质量浓度、径流流失量和径流流失率影响不显著,而全部用猪粪有机肥替代化学氮肥明显增加了磷径流流失质量浓度、径流流失量和径流流失率。其原因可能是本研究猪粪有机肥中总磷含量为 1.21%,在等氮替代条件下,猪粪有机肥氮全部替代化学氮肥氮条件下稻田磷素投入量为 243.81 kg/hm²,较单独施用化肥稻田磷素投入量显著增加 176.31 kg/hm²,同时猪粪有机肥的施用导致土壤有效磷含量急剧增加,从而导致磷径流流失量和流失率显著增加^[8,26]。因此,在将有机肥用于水稻生产时,合理控制总磷投入量对减少稻田磷径流流失至关重要。

3.3 猪粪有机肥替代化学氮肥的稻米中重金属微量元素安全性评价

有机肥是植物微量营养元素的主要来源之一,

但过量施用有机肥会导致土壤重金属的过量积累,从而提高籽粒重金属含量,进而对人体健康产生危害^[10]。本研究施用的猪粪有机肥总锌、总铜含量分别为235 mg/kg和722 mg/kg,猪粪有机肥的施用是否导致稻米中铜和锌重金属污染不得而知,有必要对其安全性进行评估。本研究结果表明,随着猪粪有机肥替代比例的增加,稻米中铜、锌健康风险指数尽管呈增加趋势,但铜、锌健康风险指数及两者累计健康风险指数均小于1,表明连续两年50%~100%猪粪有机肥氮替代化学氮肥氮处理的稻米中铜、锌含量对人体健康没有危害,猪粪有机肥的施用较化学氮肥可在一定程度上满足人体对铜、锌营养元素的需求。由于不同猪粪有机肥中重金属含量不同,并且不同水稻品种富集重金属的效果存在差异,导致水稻对重金属的吸收不同,因此在对不同地区施用猪粪有机肥后造成的影响进行评估时,应视具体情况通过长期试验来评估^[16]。

3.4 猪粪有机肥替代化学氮肥的经济效益

经济效益是评价有机肥替代化肥的重要指标之一^[4]。本研究结果表明,猪粪有机肥氮50%和100%替代化学氮肥氮处理每1 hm²总投入成本明显增加,这主要是由于肥料投入成本和人工成本增加导致。总投入成本的增加降低了净收益,猪粪有机肥氮50%和100%替代化学氮肥氮的净收益每1 hm²分别下降至3 909元和-5 464元,净收益/总投入分别为0.21和-0.21。

有机肥在农业生产中的使用现状并不乐观,有数据显示,施用有机肥的农户比例只占15%~35%^[17,28-29],有机肥使用成本相对较高、费时费力、经济效益不高等问题可能是导致农户采用有机无机配施技术意愿下降的一个原因^[17,30-31]。为提高农民应用有机肥替代技术的积极性,促进有机肥替代在水稻生产上的应用,保障农民水稻生产的经济效益,首先要注重宣传有机肥使用技术,建议采用适当的比例进行替代^[32]。二是政府应协同有关机构解决有机肥替代过程中存在的,包括有机肥相对较高的价格、农家肥施用耗时耗力、有机肥肥效相对较低等问题^[17]。三是政府应适当加强政策扶持,完善现有的补贴政策,如根据当地农业发展现状、农民收入水平、应用有机肥替代化肥的水稻种植面积提供补贴^[4,17]。

参考文献:

- [1] YANG G Y,JI H T,LIU H J,et al. Assessment of productivity, nutrient uptake and economic benefits of rice under different nitrogen management strategies [J]. Peer J, 2020. DOI 10.7717/peerj.9596.
- [2] HUANG M,ZOU Y B. Reducing environmental risk of nitrogen by popularizing mechanically dense transplanting for rice production in China [J]. Journal of Integrative Agriculture, 2020, 19(9): 2362-2366.
- [3] 于飞,施卫明. 近10年中国大陆主要粮食作物氮肥利用率分析[J]. 土壤学报,2015,52(6):1311-1324.
- [4] 李永华,武雪萍,何刚,等. 我国麦田有机肥替代化学氮肥的产量及经济环境效应[J]. 中国农业科学,2020,53(23):4879-4890.
- [5] 孟琳,张小莉,蒋小芳,等. 有机肥料氮替代部分化肥氮对稻谷产量的影响及替代率[J]. 中国农业科学,2009,42(2):532-542.
- [6] 吕真真,吴向东,侯红乾,等. 有机-无机肥配施比例对双季稻田土壤质量的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2017,23(4):904-913.
- [7] 石鑫蕊,任彬彬,江琳琳,等. 有机肥替代部分化肥对水稻光合速率、氮素利用率和产量的影响[J]. 应用生态学报,2021,32(1):154-162.
- [8] 郭智,周炜,陈留根,等. 施用猪粪有机肥对稻麦两熟农田稻季养分径流流失的影响[J]. 水土保持学报,2013,27(6):21-25,61.
- [9] 马凡凡,邢素林,甘曼琴,等. 有机肥替代化肥对水稻产量、土壤肥力及农田氮磷流失的影响[J]. 作物杂志,2019(5):89-96.
- [10] 吴荣,刘善江,孙昊,等. 长期化肥配施不同有机肥对土壤和玉米中重金属累积的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2020,26(11):2010-2019.
- [11] 孔文杰,倪吾钟. 有机无机肥配合施用对土壤-水稻系统重金属平衡和稻米重金属含量的影响[J]. 中国水稻科学,2006,20(5):517-523.
- [12] 鲁洪娟,孔文杰,张晓玲,等. 有机无机肥配施对稻-油系统中重金属污染风险和产品质量的影响[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版),2009,35(1):111-118.
- [13] 罗连光,崔新卫,杨勇,等. 有机无机肥配施对超级杂交稻产量构成及植株重金属含量的影响[J]. 生态与农村环境学报,2012,28(1):67-71.
- [14] 谢沂希,谢尚春,刘慧,等. 双孢蘑菇菌渣还田下水稻土Cu、Cd、Pb、Zn相关性分析及污染评价[J]. 农业资源与环境学报,2018,35(6):518-526.
- [15] 夏文建,张丽芳,刘增兵,等. 长期施用化肥和有机肥对稻田土壤重金属及其有效性的影响[J]. 环境科学,2021,42(5):2469-2479.
- [16] 周伟,邓良基,贾凡凡,等. 菌渣猪粪还田下麦稻重金属富集

- 特征及风险评价[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(2): 230-240.
- [17] 朱利群, 王珏, 王春杰, 等. 有机肥和化肥配施技术农户采纳意愿影响因素分析——基于苏、浙、皖三省农户调查[J]. 长江流域资源与环境, 2018, 27(3): 671-679.
- [18] YANG L, ZHOU X, LIAO Y L, et al. Co-incorporation of rice straw and green manure benefits rice yield and nutrient uptake[J]. *Crop Science*, 2019(59): 1-11.
- [19] 郭智, 刘红江, 张岳芳, 等. 氮磷减施对水稻剑叶光合特征、产量及氮素利用率的影响[J]. 西南农业学报, 2017, 30(10): 2263-2269.
- [20] 沈体忠, 朱明祥, 肖杰. 天门市土壤-水稻系统重金属迁移积累特征及其健康风险评估[J]. 土壤通报, 2014, 45(1): 221-226.
- [21] 吴洋, 杨军, 周小勇, 等. 都安县玉米籽粒重金属累积特征与健康风险评价[J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(11): 2048-2054.
- [22] RIVERA M B, GIRÁLDEZ M I, FERNÁNDEZ-CALIANI J C. Assessing the environmental availability of heavy metals in geogenically contaminated soils of the Sierra de Aracena Natural Park (SW Spain). Is there a health risk? [J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 560/561: 254-265.
- [23] 张海锋, 李晓玲, 罗玉红, 等. 宜昌近郊污水灌溉区水芹重金属污染状况及健康风险评价[J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(8): 1470-1477.
- [24] 朱谦让, 戴月, 谢玮, 等. 江苏省居民膳食结构与营养素摄入状况评价[J]. 江苏预防医学, 2017, 28(3): 259-265.
- [25] 郭智, 刘红江, 陈留根, 等. 太湖流域典型桃园土壤氮素径流流失特征[J]. 水土保持学报, 2017, 31(4): 1-5.
- [26] 刘红江, 陈虞雯, 孙国峰, 等. 有机肥-无机肥不同配施比例对水稻产量和农田养分流失的影响[J]. 生态学杂志, 2017, 36(2): 405-412.
- [27] TIMSINA J. Can organic sources of nutrients increase crop yields to meet global food demand? [J]. *Agronomy*, 2018, 8: 214.
- [28] 高瑛, 王娜, 李向菲, 等. 农户生态友好型农田土壤管理技术采纳决策分析——以山东省为例[J]. 农业经济问题, 2017, 38(1): 38-47, 110-111.
- [29] 钟太洋, 黄贤金, 王柏源. 非农业就业对农户施用有机肥的影响[J]. 中国土地科学, 2011, 25(11): 67-73.
- [30] 苏天明, 何江萍, 曾成城, 等. 甘蔗滤泥生物有机肥对茄子的施用效果[J]. 南方农业学报, 2019, 50(1): 53-58.
- [31] 张宇, 樊小雪, 徐刚, 等. 不同氮肥与有机肥配施对蒜产量及品质的影响[J]. 江苏农业科学, 2019, 47(5): 114-117.
- [32] 黄炎忠, 罗小锋, 刘迪, 等. 农户有机肥替代化肥技术采纳的影响因素——对高意愿低行为的现象解释[J]. 长江流域资源与环境, 2019, 28(3): 632-641.

(责任编辑:陈海霞)