

长期粪肥还田条件下稻米品质及氮肥利用率

孙国峰, 王鑫, 盛婧, 张丽萍, 王子臣, 周炜

引用本文:

孙国峰, 王鑫, 盛婧, 等. 长期粪肥还田条件下稻米品质及氮肥利用率[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(11): 2521–2527.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-1023>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

沼液与有机肥配施条件下氮损失风险的研究

周炜, 孙国峰, 王鑫, 童红玉, 盛婧

农业环境科学学报. 2019, 38(8): 1743–1750 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-1614>

沼液在稻田的精确施用及其环境效应研究

杨润, 孙钦平, 赵海燕, 邹国元, 刘本生, 李恋卿

农业环境科学学报. 2017, 36(8): 1566–1572 <https://doi.org/10.11654/jaes.2016-1617>

渭北旱地麦田配施有机肥减量施氮的作用效果

张昊青, 于昕阳, 翟丙年, 金忠宇, 马臣, 王朝辉

农业环境科学学报. 2017, 36(1): 124–133 <https://doi.org/10.11654/jaes.2016-0827>

不同深施肥方式对稻田氨挥发及水稻产量的影响

周平遥, 张震, 王华, 肖智华, 徐华勤, 汪久翔

农业环境科学学报. 2020, 39(11): 2683–2691 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0441>

化肥减施下粪水替代对设施白菜氮利用与土壤氮盈余的影响

程娟, 付莉, 翟中葳, 肖能武, 杨柳, 刘福元, 杜会英, 杜连柱, 张克强

农业环境科学学报. 2021, 40(11): 2551–2558 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-1033>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

孙国峰, 王鑫, 盛婧, 等. 长期粪肥还田条件下稻米品质及氮肥利用率[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(11): 2521–2527.

SUN G F, WANG X, SHENG J, et al. Rice quality and nitrogen use efficiency under long-term application of pig manure or biogas slurry [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2021, 40(11): 2521–2527.



开放科学 OSID

长期粪肥还田条件下稻米品质及氮肥利用率

孙国峰, 王鑫, 盛婧*, 张丽萍, 王子臣, 周炜

(江苏省农业科学院农业资源与环境研究所, 农业农村部种养结合重点实验室, 南京 210014)

摘要:为明确等氮量粪肥替代化肥对水稻产量、稻米品质与氮肥利用率的长期累积效应,本文基于长期定位田间试验,于第8~9 a采用2种粪肥(猪粪、沼液)和2个氮替代比例(50%、100%)处理,对水稻产量、稻米品质及氮素吸收与利用进行研究。结果表明:等氮量猪粪、沼液和化肥处理水稻产量差异不显著。与化肥相比,等氮量猪粪、沼液处理提高了整精米率和稻米食味值,有助于改善稻米食味品质,其主要原因是降低了稻米蛋白质含量。等氮量猪粪处理降低了稻米垩白粒率和垩白度,有利于改善稻米外观品质;沼液处理对稻米外观品质影响较小。水稻氮肥吸收利用率(NUE)整体呈现等氮量沼液>化肥>猪粪处理的规律,并与氮肥生理利用率、稻米胶稠度呈显著负相关。其中,沼液处理年均NUE为41.9%~44.0%,高于化肥处理(40.7%),主要原因是增加了稻草氮含量。但与化肥相比,50%沼液、100%沼液和50%猪粪处理NUE差异均不显著,而100%猪粪处理显著降低了NUE。等氮量猪粪、沼液替代化肥有助于改善稻米食味品质;等量沼液、半量猪粪氮替代对水稻产量及NUE影响较小,而全量猪粪氮替代会显著降低水稻NUE。

关键词:猪粪;沼液;水稻;产量;稻米品质;氮肥利用率

中图分类号:S511 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2021)11-2521-07 doi:10.11654/jaes.2021-1023

Rice quality and nitrogen use efficiency under long-term application of pig manure or biogas slurry

SUN Guofeng, WANG Xin, SHENG Jing*, ZHANG Liping, WANG Zichen, ZHOU Wei

(Institute of Agricultural Resources and Environments, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Key Laboratory for Crop and Animal Integrated Farming, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Nanjing 210014, China)

Abstract: This study determined the long-term cumulative effects of equal-nitrogen manure replacement using a chemical fertilizer (CF) on rice yield, rice quality, and nitrogen use efficiency (NUE). Based on a long-term field experiment, two types of manure [pig manure (PM) and biogas slurry (BS)] and two nitrogen replacement ratios (50% and 100%) were selected to study the rice yield, rice quality, and nitrogen absorption and utilization in the eighth and ninth years. The results showed that there was no significant difference in the rice yield among the equal-nitrogen PM, BS, and CF treatment. Compared with the CF treatment, the PM and BS treatments increased the head rice rate and taste value of rice, which were helpful to improve the eating quality of rice, mainly because the protein content of rice was reduced. The PM treatment reduced the chalky kernel rate and chalkiness degree of rice, which were beneficial to improve the appearance quality of rice. The appearance quality of rice was unaffected by the BS treatment. The NUE of rice showed the rule of BS>CF>PM treatment, and there were significant negative correlations between the NUE and nitrogen physiological efficiency, and NUE and rice gel consistency. The average annual NUE of the BS treatment was 41.9%~44.0%, which exceeded the average annual NUE of the CF treatment (40.7%), mainly

收稿日期:2021-09-06 录用日期:2021-09-14

作者简介:孙国峰(1982—),男,江苏泗洪人,博士,副研究员,主要从事绿色种养循环农业研究。E-mail:sgf515@163.com

*通信作者:盛婧 E-mail:nkysj@hotmail.com

基金项目:江苏省农业科技自主创新资金项目(CX(20)2014);国家重点研发计划项目(2018YFD0800105)

Project supported: Jiangsu Agricultural Science and Technology Innovation Fund (CX(20)2014); The National Key Research and Development Program of China (2018YFD0800105)

due to the increase in the nitrogen content of rice straw. However, compared with the CF treatment, the NUE of the 50% BS, 100% BS, and 50% PM treatment were not significantly different, whereas the 100% PM treatment significantly reduced the NUE. Overall, under the conditions of this experiment, the PM and BS treatments could improve the eating quality of rice. The 50% PM, 50% BS, and 100% BS treatments had little effect on the rice yield and NUE, whereas the 100% PM could significantly reduce the NUE of rice.

Keywords: pig manure; biogas slurry; rice; grain yield; rice quality; nitrogen use efficiency

当前我国畜禽粪污年产生量约38亿t,综合利用率约为60%左右,已成为农业面源污染的重要来源。《第二次全国污染源普查公报》显示,2017年畜禽养殖业主要污染物化学需氧量、总氮、总磷排放量分别达1 000.53万、59.63万、11.97万t,分别占农业源排放总量的93.8%、42.1%和56.5%。因此,将“粪污”变“粪肥”,实行粪肥科学还田,适量替代化肥,对减少农业面源污染、助力农业绿色低碳发展具有十分重要的意义。国内外关于有机肥还田的报道较多^[1]。前人研究指出,有机无机肥合理配施有利于提高水稻产量、改善稻米品质、提高土壤肥力和氮肥利用率^[1-3],但有机肥高比例替代化肥会减少水稻分蘖,降低氮素吸收利用能力^[4-5]。稻田沼液利用也有报道,主要集中在水稻生长、产量及品质^[6-12]、氮肥利用率^[6-7],以及温室气体排放、氨挥发与重金属污染等环境效应^[13-15]。已有研究表明,合理施用沼液有利于增加水稻产量^[6-9],提升稻米品质^[6-7];也有报道指出全量沼液替代化肥会显著降低水稻产量^[10],对稻米品质影响较小^[11-12]。另外,等氮量沼液处理水稻氮肥利用率差异较大,在13%~35%,且与化肥处理比较结果不一致^[9-11,13]。目前,长期施用猪粪沼液条件下水稻产量、稻米品质及氮肥利用率尚未见报道。本研究基于长期定位试验,研究连续施用猪粪沼液对水稻产量、稻米品质及氮肥利用率的影响,进一步明确猪粪沼液替代化肥后稻米品质、氮吸收与利用的长期累积效应,为稻麦两熟区粪肥还田提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验始于2010年11月,在江苏省农业科学院六合基地(32°29'N,118°36'E)进行。该区属北亚热带季风湿润气候区,年均温度15.3℃,年均降雨量970 mm,年日照时数2 200 h,年均无霜期215 d,该区以水稻-小麦轮作模式为主。

试验田为黄褐土,试验前耕层土壤容重1.38 g·cm⁻³,有机质含量12.1 g·kg⁻¹,全氮含量0.91 g·kg⁻¹,全磷含量0.55 g·kg⁻¹,有效磷含量5.39 mg·kg⁻¹,速效钾

含量105.6 mg·kg⁻¹。

1.2 试验设计

采用随机区组设计,以不施肥(CK)为对照,设置等氮量化肥(CF)、50%沼液(50%BS,分2次施用,其中水稻季基肥施用15%沼液、穗肥施用35%沼液,小麦季基肥、穗肥各施用25%沼液)、100%沼液(100%BS,其中水稻季按 $m_{\text{基肥}}:m_{\text{分蘖肥}}:m_{\text{穗肥}}=4:2:4$ 分3次施用,小麦季根据土壤墒情在播种后至返青期分2~4次施用)、50%猪粪(50%PM,其中50%猪粪作基肥1次性施用)、100%猪粪(100%PM,猪粪按 $m_{\text{基肥}}:m_{\text{穗肥}}=6:4$ 分2次施用),共6个处理,每个处理3次重复,每个小区面积20 m²。选用宁麦21、南粳9108为供试材料。施肥量以化肥处理为参照,稻季施纯氮300 kg·hm⁻²,磷(P₂O₅)、钾(K₂O)均为150 kg·hm⁻²,麦季施纯氮225 kg·hm⁻²,磷(P₂O₅)、钾(K₂O)均为112.5 kg·hm⁻²。根据测定的猪粪、沼液养分含量,按氮含量计算水稻季、小麦季的猪粪、沼液施用量,磷钾肥不足时分别用过磷酸钙(12%)和硫酸钾(50%)补齐。稻季氮肥按 $m_{\text{基肥}}:m_{\text{分蘖肥}}:m_{\text{穗肥}}=4:2:4$ 施用,磷肥于耕作前作基肥一次撒施,钾肥作基肥和穗肥分两次施用,每次用量50%;麦季氮肥按 $m_{\text{基肥}}:m_{\text{穗肥}}=6:4$ 施用,磷钾肥于耕作前作基肥一次撒施。其他田间管理措施按当地一般高产农田管理方式进行。

1.3 样品采集与分析

在2018年和2019年水稻收获期,各小区采用实收3 m²测定稻谷、稻草的实际产生量;同时每小区取3穴植株,65℃烘干后粉碎,用H₂O₂-H₂SO₄消煮,凯氏定氮法测定稻草和稻谷的全氮含量。

实收测产的稻谷于室温保存3个月后进行稻米品质测定。按照农业行业标准《米质测定方法》(NY/T 83—2017)测定稻米的糙米率、精米率、整精米率、垩白粒率、垩白度、胶稠度、直链淀粉含量、蛋白质含量等品质指标;采用日本佐竹公司生产的STA1B型米饭食味计(SATAKE Co., Ltd, 日本)测定稻米食味值,每个样品重复3次。

1.4 数据分析

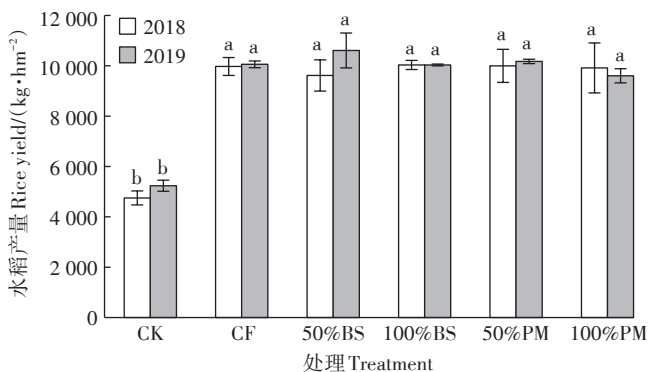
采用Excel 2016和SPSS 17.0软件进行数据处理

及做图,处理间多重比较用LSD法。

2 结果与分析

2.1 水稻产量

各处理水稻产量见图1。与不施肥处理相比,各施肥处理均显著提高了水稻产量,平均增产95.4%~102.5% ($P<0.05$)。与化肥处理相比,50%沼液、100%沼液和50%猪粪处理平均增产0.17%~0.96%,而



不同小写字母表示同一年份处理间差异显著 ($P<0.05$)。下同
Different lowercase letters indicate significant differences among different treatments at $P<0.05$ level in the same year. The same below

图1 长期施用猪粪沼液对水稻产量的影响

Figure 1 Effects of long-term application of pig manure or biogas slurry on rice yield

100%猪粪处理降低了水稻产量,降幅为0.59%~4.54%,但均未达到显著水平。

2.2 稻米品质

各处理稻米品质见表1。对于稻米加工品质,与化肥处理相比,猪粪、沼液处理糙米率、精米率略有降低;但50%沼液、100%沼液和50%猪粪处理均增加了整精米率,平均提高了6.0~8.5个百分点,而100%猪粪处理整精米率存在年际差异,变幅在-2.5~7.8个百分点之间,两年平均提高2.6个百分点,但均未达到显著水平。因此,等氮量猪粪、沼液替代化肥有利于提高整精米率。

对于稻米外观品质,与化肥处理相比,猪粪处理整体降低了稻米垩白粒率、垩白度,两年平均分别降低了0.8~1.0、0.02~0.23个百分点,而沼液处理存在年际差异,但均未达到显著水平。其中,2018年50%猪粪处理稻米垩白度显著低于100%沼液处理 ($P<0.05$)。猪粪替代化肥有利于改善稻米外观品质,而沼液替代化肥对稻米品质影响较小。

各处理稻米食味值见图2。2019年稻米食味值整体呈现猪粪处理>沼液处理>化肥处理的规律,分析可能是由于猪粪、沼液处理降低了稻米蛋白质含量。2018年猪粪、沼液处理较化肥处理也降低了稻米蛋白质含量,其中100%猪粪与化肥处理差异达到

表1 长期施用猪粪沼液对稻米品质的影响

Table 1 Effects of long-term application of pig manure or biogas slurry on rice quality

年份 Year	处理 Treatment	糙米率 Brown rice/%	精米率 Milled rice/%	整精米率 Head rice/%	垩白粒率 Chalky kernel/%	垩白度 Chalkiness/%	胶稠度Gel consistency/mm	直链淀粉含量 Amylase content/%	蛋白质含量 Protein content/%
2018	CF	85.7±0.5a	76.6±0.5a	52.8±2.0a	3.3±1.3a	0.43±0.19ab	76.3±0.3a	9.83±0.12a	8.57±0.23a
	50%BS	85.3±0.2a	76.0±0.1a	57.4±1.5a	3.7±0.3a	0.60±0.06ab	76.7±0.7a	10.00±0.12a	8.01±0.21ab
	100%BS	85.0±0.3a	75.8±0.2a	56.5±2.9a	5.3±1.2a	1.20±0.36a	77.3±0.7a	9.97±0.15a	7.92±0.21ab
	50%PM	85.1±0.9a	75.7±1.1a	55.2±1.6a	1.3±0.3a	0.17±0.03b	77.0±0.6a	10.00±0.06a	8.08±0.13ab
	100%PM	84.6±0.1a	75.1±0.4a	50.3±1.8a	3.0±1.2a	0.43±0.18ab	75.7±0.3a	10.03±0.07a	7.48±0.06b
2019	CF	85.0±0.3a	75.2±0.2a	53.1±1.8a	5.0±2.1a	0.70±0.30a	78.0±1.2a	9.50±0.23a	8.60±0.16a
	50%BS	84.9±0.2a	74.8±0.7a	65.6±2.3a	3.3±1.2a	0.43±0.09a	79.3±0.7a	9.37±0.27a	7.56±0.30a
	100%BS	84.5±0.3a	74.5±0.4a	61.7±4.4a	3.3±0.7a	0.27±0.03a	80.7±0.7a	9.07±0.12a	7.58±0.36a
	50%PM	83.7±0.2a	74.2±0.8a	62.7±2.9a	5.0±1.5a	0.50±0.15a	77.3±1.9a	9.43±0.38a	7.75±0.46a
	100%PM	84.1±0.5a	75.3±0.8a	60.9±4.1a	3.7±0.7a	0.67±0.15a	77.3±0.7a	9.47±0.09a	7.85±0.43a
均值 Average	CF	85.4	75.9	53.0	4.2	0.57	77.2	9.67	8.59
	50%BS	85.1	75.4	61.5	3.5	0.52	78.0	9.69	7.79
	100%BS	84.8	75.2	59.1	4.3	0.74	79.0	9.52	7.75
	50%PM	84.4	74.9	59.0	3.2	0.34	77.2	9.72	7.92
	100%PM	84.4	75.2	55.6	3.4	0.55	76.5	9.75	7.67

注:同列不同小写字母表示同一年份不同处理间差异显著 ($P<0.05$)。下同。

Notes: Different lowercase letters in a column indicate significant differences among different treatments at $P<0.05$ level in the same year, respectively. The same below.

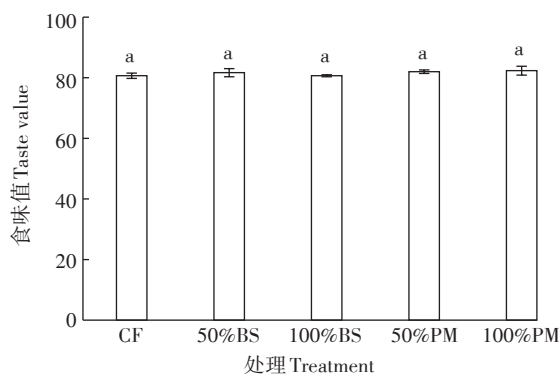


图2 长期施用猪粪沼液对稻米食味值的影响

Figure 2 Effects of long-term application of pig manure or biogas slurry on taste value of rice

显著水平 ($P<0.05$), 而其他处理差异不显著。另外, 与化肥相比, 猪粪处理降低了稻米胶稠度, 而沼液处理却增加了稻米胶稠度, 但各处理差异均不显著。因而, 猪粪、沼液替代化肥有助于改善稻米食味品质。

2.3 氮肥吸收与利用

2.3.1 氮收获指数

氮收获指数=籽粒吸氮量/植株总吸氮量, 不同处理氮收获指数见图3。水稻氮收获指数整体呈现不施肥>猪粪>化肥>沼液处理的规律。具体来看, 与不施肥相比, 2019年50%猪粪、50%沼液、100%沼液和化肥处理均显著降低了水稻氮收获指数 ($P<0.05$), 分别降低了7.69%、16.4%、14.7%和10.9%, 其中50%猪粪处理水稻氮收获指数显著高于50%沼液 ($P<0.05$), 100%猪粪较50%沼液、100%沼液处理均显著提高了水稻氮收获指数 ($P<0.05$)。2018年各处理间水稻氮收获指数均未达到显著水平。可见, 猪粪处理提高了氮素在稻谷中的比例, 而沼液处理影响不显著。

2.3.2 氮肥利用率

2018和2019年水稻氮肥吸收利用率(NUE)见表2, 整体呈现100%沼液>50%沼液>化肥>50%猪粪>100%猪粪处理的规律, 与化肥处理相比, 沼液处理平均提高了1.2~3.3个百分点, 猪粪处理平均降低了1.7~9.8个百分点。分析其原因, 主要与水稻地上部吸氮量有关, 其中稻草氮含量为主要限制因素, 如沼液处理平均提高了6.64%~9.51%、猪粪处理平均降低了7.78%~15.3%。而水稻氮肥生理利用率的变化规律恰好与之相反, 整体呈现100%猪粪>50%猪粪>化肥>50%沼液>100%沼液处理的规律, 其中猪粪处理平均提高了5.35%~24.8%、沼液处理平均降低了1.29%~7.44%。具体来看, 与化肥相比, 2018年100%

沼液处理显著提高了水稻氮肥吸收利用率 ($P<0.05$); 而2018年和2019年100%猪粪处理均显著降低了水稻氮肥吸收利用率 ($P<0.05$)。50%沼液、50%猪粪和化肥处理水稻氮肥利用率的各项指标(氮肥农学利用率、氮肥吸收利用率、氮肥生理利用率、氮肥偏生产力)差异均不显著。可见, 半量猪粪和沼液氮替代化肥对水稻氮肥利用率影响不显著, 而全量沼液氮替代化肥有提高水稻氮肥吸收利用率的趋势, 全量猪粪氮替代化肥显著降低了水稻氮肥吸收利用率。

2.4 水稻产量、主要稻米品质及氮肥利用率的相关性分析

通过相关性分析发现(表3), 稻米胶稠度与直链淀粉含量、氮肥生理利用率均呈显著负相关 ($P<0.05$), 而与氮肥吸收利用率呈显著正相关 ($P<0.05$)。稻米食味值与直链淀粉含量、氮肥生理利用率呈正相关, 而与蛋白质含量、胶稠度、氮肥农学利用率、氮肥吸收利用率呈负相关, 但均未达到显著水平。

3 讨论

3.1 稻米品质

稻米食味值是反映稻米食味品质的综合指标, 主要受稻米蛋白质、直链淀粉含量的影响^[16]。其中, 稻米蛋白质含量易受氮肥施用量、施肥时期及氮素形态的影响, 而直链淀粉含量主要受作物品种遗传特性影响^[16-17]。由于氮肥过量施用, 我国稻米蛋白质含量普遍升高, 导致食味品质变差^[17]。本研究也发现稻米食味值与蛋白质含量呈负相关, 这与前人研究结果一致^[18]。猪粪、沼液处理提高了稻米食味值, 改善了稻米食味品质, 分析主要原因是猪粪、沼液处理降低了稻米蛋白质含量^[17, 19]。周江明^[2]的研究指出, 不同品

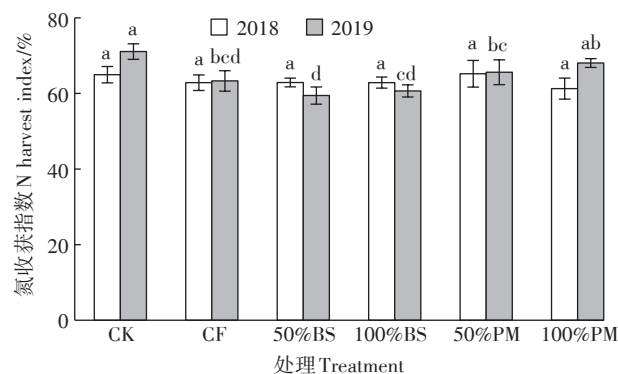


图3 长期施用猪粪沼液对水稻氮收获指数的影响

Figure 3 Effects of long-term application of pig manure or biogas slurry on rice N harvest index

种水稻蛋白质含量受有机无机肥配施的响应也不一致。唐微等^[6]和王桂良等^[7]的研究指出,施用沼液会增加稻米蛋白质含量,改善稻米营养品质。也有研究表明,施用沼液对稻米品质影响较小^[11-12]。这可能与水稻品种、施氮量、氮肥运筹以及试验环境等因素有关。另外,胶稠度是反映淀粉胶体的流体特性(柔软性)的指标,一般胶稠度>60 mm的粳米蒸煮冷却后米饭较为柔软、温润且光滑,较受消费者偏爱^[16]。本研究中,沼液替代化肥提高了稻米胶稠度,有利于改善米饭口感。此外,猪粪处理降低了稻米垩白粒率、垩

白度,有利于改善稻米外观品质,这与前人研究结果一致^[20]。

3.2 水稻产量与氮肥利用率

作物产量是衡量粪肥还田可行性的重要指标之一。本研究中,等氮量猪粪、沼液与化肥处理水稻产量差异不显著,其中100%猪粪处理水稻产量略有降低,主要原因是有机肥高比例替代化肥会减少水稻分蘖,降低氮素吸收利用能力,进而降低水稻产量^[5]。已有研究表明,适量施用沼液有利于增加水稻产量^[6],其中沼液替代化肥比例为50%~75%时水稻增产

表2 长期施用猪粪沼液对水稻氮肥利用率的影响

Table 2 Effects of long-term application of pig manure or biogas slurry on rice nitrogen use efficiency

年份 Year	处理 Treatment	地上部吸氮量 Aboveground N uptake/ (kg·hm ⁻²)	氮肥农学利用率 N agronomy efficiency/ (kg·kg ⁻¹)	氮肥吸收利用率 N use efficiency/%	氮肥生理利用率 N physiological efficiency/ (kg·kg ⁻¹)	氮肥偏生产力 N partial factor productivity/ (kg·kg ⁻¹)
2018	CF	184.6±5.3b	17.4±1.2a	39.2±1.8b	44.5±4.0a	33.2±1.2a
	50%BS	189.9±13.0ab	16.2±2.1a	40.9±4.3ab	39.9±6.1a	32.1±2.1a
	100%BS	200.0±4.7a	17.6±0.6a	44.3±1.6a	39.8±2.2a	33.4±0.6a
	50%PM	182.1±3.9b	17.5±2.2a	38.3±1.3b	45.5±4.4a	33.3±2.2a
	100%PM	168.3±3.1c	17.2±3.3a	33.7±1.0c	51.2±6.5a	33.0±3.3a
2019	CF	190.2±2.9a	16.1±0.4a	42.2±1.0a	38.1±1.2b	33.5±0.4a
	50%BS	192.2±6.0a	17.9±2.3a	42.9±2.0a	41.6±3.7b	35.4±2.3a
	100%BS	194.3±3.2a	16.0±0.1a	43.6±1.1a	36.7±0.9b	33.4±0.1a
	50%PM	182.7±5.9a	16.5±0.3a	39.7±2.0a	41.5±2.4b	33.9±0.3a
	100%PM	147.9±5.8b	14.5±0.9a	28.1±1.9b	51.8±4.0a	32.0±0.9a
均值 Average	CF	187.4	16.7	40.7	41.3	33.4
	50%BS	191.0	17.1	41.9	40.8	33.7
	100%BS	197.1	16.8	44.0	38.2	33.4
	50%PM	182.4	17.0	39.0	43.5	33.6
	100%PM	158.1	15.9	30.9	51.5	32.5

注:氮肥农学利用率=(施肥区产量-不施肥区产量)/施氮量;氮肥吸收利用率=(施肥区地上部分吸氮量-不施肥区地上部吸氮量)/施氮量×100%;氮肥生理利用率=(施肥区产量-不施肥区产量)/(施肥区地上部吸氮量-不施肥区地上部吸氮量);氮肥偏生产力=施肥区产量/施氮量。

Note: Nitrogen agronomy efficiency=[grain yield in the fertilizer plot (Y_N)-grain yield in the no-fertilizer plot (Y_0)]/amount of N fertilizer applied (F_N). Nitrogen use efficiency=[total aboveground plant N accumulation in the fertilizer plot (T_N)-total aboveground plant N accumulation in the no-fertilizer plot (T_0)]/ F_N . Nitrogen physiological efficiency=(Y_N-Y_0)/(T_N-T_0). Nitrogen partial factor productivity= Y_N / F_N .

表3 水稻产量、主要稻米品质及氮肥利用率的相关性分析

Table 3 Correlation analysis of rice yield, main rice quality and nitrogen use efficiency

指标 Index	水稻产量 Rice yield	整精米率 Head rice	胶稠度 Gel consistency	直链淀粉含量 Amylase content	蛋白质含量 Protein content	食味值 Taste value	氮肥农学利用率 N agronomy efficiency	氮肥吸收利用率 N use efficiency
整精米率 Head rice	0.488							
胶稠度 Gel consistency	0.572	0.630						
直链淀粉含量 Amylase content	-0.377	-0.271	-0.912*					
蛋白质含量 Protein content	0.243	-0.685	-0.212	-0.001				
食味值 Taste value	-0.399	0.167	-0.624	0.813	-0.568			
氮肥农学利用率 N agronomy efficiency	1.000**	0.488	0.572	-0.377	0.243	-0.399		
氮肥吸收利用率 N use efficiency	0.831	0.428	0.881*	-0.819	0.210	-0.768	0.831	
氮肥生理利用率 N physiological efficiency	-0.825	-0.419	-0.882*	0.826	-0.213	0.775	-0.825	-1.000**

效果较佳^[7,9],并且沼液分次施用的水稻产量显著高于一次性施用^[9]。但也有研究指出,等氮量沼液处理显著降低了水稻产量^[10],这可能与盆栽模拟与田间试验条件差异较大有关。

氮肥利用率是粪肥科学还田的重要参数。适量有机肥替代化肥能够提高水稻氮肥利用率^[1],而等氮量沼液与化肥的水稻氮肥利用率比较结果不一致^[9-11,13]。本研究结果表明,50%猪粪和100%猪粪处理水稻氮肥吸收利用率均有降低的趋势,在28.1%~39.7%,其中100%猪粪处理水稻氮肥吸收利用率显著低于化肥处理($P<0.05$),这与有机肥高比例替代化肥减少水稻分蘖,降低氮素吸收利用能力有关^[4-5]。另外,50%沼液和100%沼液处理水稻氮肥吸收利用率较化肥处理均有增加趋势,但差异不显著,这与黄红英等^[9]研究结果一致。分析主要原因是沼液处理增加了稻草氮含量,平均提高了6.64%~9.51%。黄继川等^[8]的研究也指出,施用沼液能够有效提高水稻秸秆氮含量,促进水稻氮素累积。也有学者认为,等氮量施用沼液会降低水稻氮素吸收利用率^[10,13],可能与沼液中有有机氮影响作物对氮的吸收利用有关^[11]。此外,本研究长期施用沼液处理水稻氮肥吸收利用率为40.9%~44.3%,显著高于已有报道的13%~35%^[9-11,13],这可能主要与试验周期、水稻吸氮量的差异有关。本研究仅为粪肥还田第8~9 a的累积效应,仍需继续监测多年猪粪沼液还田的长期效应,为粪肥还田提供更为科学的依据。

4 结论

(1)等氮量猪粪、沼液替代化肥提高了整精米率、稻米食味值,有助于改善稻米食味品质,其主要原因是降低了稻米蛋白质含量。同时,猪粪替代化肥降低了稻米垩白粒率、垩白度,有利于改善稻米外观品质;沼液替代化肥对稻米外观品质影响较小。

(2)水稻氮肥吸收利用率整体呈现等氮量沼液>化肥>猪粪处理的规律,并与水稻氮肥生理利用率、稻米胶稠度显著负相关。其中,沼液较化肥处理提高了水稻氮肥吸收利用率,其主要原因是增加了稻草氮含量。但等量沼液、半量猪粪氮替代化肥对水稻产量及氮肥利用率影响较小,而全量猪粪氮替代化肥会显著降低水稻氮肥吸收利用率。

参考文献:

[1] DING W C, XU X P, HE P, et al. Improving yield and nitrogen use effi-

ciency through alternative fertilization options for rice in China: A meta-analysis[J]. *Field Crops Research*, 2018, 227: 11-18.

[2] 周江明. 有机-无机肥配施对水稻产量、品质及氮素吸收的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2012, 18(1): 234-240. ZHOU J M. Effect of combined application of organic and mineral fertilizers on yield, quality and nitrogen uptake of rice[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2012, 18(1): 234-240.

[3] 刘益仁, 李想, 郁洁, 等. 有机无机肥配施提高麦-稻轮作系统中水稻氮肥利用率的机制[J]. 应用生态学报, 2012, 23(1): 81-86. LIU Y R, LI X, YU J, et al. Mechanisms for the increased fertilizer nitrogen use efficiency of rice in wheat-rice rotation system under combined application of inorganic and organic fertilizers[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2012, 23(1): 81-86.

[4] 刘红江, 蒋华伟, 孙国峰, 等. 有机-无机肥不同配施比例对水稻氮素吸收利用率的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2017(5): 61-66. LIU H J, JIANG H W, SUN G F, et al. Effect of different organic-inorganic fertilizers combination ratio on nitrogen use efficiency of rice[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2017(5): 61-66.

[5] 钱银飞, 邵彩虹, 邱才飞, 等. 猪粪与化肥配施对双季稻产量及氮素吸收利用的影响[J]. 江西农业学报, 2019, 31(8): 27-34. QIAN Y F, SHAO C H, QIU C F, et al. Effects of combined application of pig manure and chemical fertilizer on yield and nitrogen uptake and utilization of double cropping rice[J]. *Acta Agriculturae Jiangxi*, 2019, 31(8): 27-34.

[6] 唐薇, 伍钧, 孙百晔, 等. 沼液不同使用量对水稻产量及稻米品质的影响[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(12): 2268-2273. TANG W, WU J, SUN B Y, et al. Effects of application amounts of biogas slurry on yield and quality of rice[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(12): 2268-2273.

[7] 王桂良, 寇祥明, 张家宏, 等. 沼液替代化肥氮对水稻生长发育及稻米品质的影响[J]. 生态学杂志, 2018, 37(9): 2672-2679. WANG G L, KOU X M, ZHANG J H, et al. Effect of chemical fertilizer nitrogen substitution by biogas slurry on the growth and quality of rice[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2018, 37(9): 2672-2679.

[8] 黄继川, 彭智平, 徐培智, 等. 稻田消解对水稻生产、土壤肥力及环境安全的影响[J]. 广东农业科学, 2016, 43(10): 69-76. HUANG J C, PENG Z P, XU P Z, et al. Effects of paddy field disposal of biogas slurry on rice production, soil fertility and environmental safety[J]. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2016, 43(10): 69-76.

[9] 黄红英, 曹金留, 常志州, 等. 猪粪沼液施用对稻、麦产量和氮磷吸收的影响[J]. 土壤, 2013, 45(3): 412-418. HUANG H Y, CAO J L, CHANG Z Z, et al. Effects of digested pig slurry application on yields, nitrogen and phosphorous uptakes by rice and wheat[J]. *Soils*, 2013, 45(3): 412-418.

[10] 王文博, 陈长青, 仇忠启, 等. 不同沼液施灌量对水稻生长及土壤氮磷平衡的影响[J]. 作物杂志, 2014(3): 85-91. WANG W B, CHEN C Q, QIU Z Q, et al. Effects of application amounts of biogas slurry on rice growth and the balance of nitrogen, phosphorus in soil system[J]. *Crops*, 2014(3): 85-91.

[11] MORENO-GARCÍA B, GUILLÉN M, QUÍLEZ D. Response of paddy rice to fertilisation with pig slurry in northeast Spain: Strategies to op-

- timise nitrogen use efficiency[J]. *Field Crops Research*, 2017, 208:44–54.
- [12] 杨晓磊, 贾晴晴, 王存, 等. 猪粪尿全量还田对水稻种植化肥减量增效的影响[J]. 现代农业科技, 2021(12):9–11. YANG X L, JIA Q Q, WANG C, et al. Effect of pig manure and urine returning to the field on fertilizer reduction and efficiency improvement in rice planting[J]. *Modern Agricultural Science and Technology*, 2021(12):9–11.
- [13] 杨润, 孙钦平, 赵海燕, 等. 沼液在稻田的精确施用及其环境效应研究[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(8):1566–1572. YANG R, SUN Q P, ZHAO H Y, et al. Precision application of biogas slurry and its environmental effects in paddy fields[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(8):1566–1572.
- [14] 孙国峰, 郑建初, 陈留根, 等. 猪粪沼液施用对稻田 CH_4 和 N_2O 排放及温室效应的影响[J]. 中国农业大学学报, 2012, 17(5):124–131. SUN G F, ZHENG J C, CHEN L G, et al. Effects of pig manure and biogas slurry application on CH_4 and N_2O emissions and their greenhouse effects on paddy field[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2012, 17(5):124–131.
- [15] 汤逸帆, 汪玲玉, 吴旦, 等. 农田施用沼液的重金属污染评价及承载力估算——以江苏滨海稻麦轮作田为例[J]. 中国环境科学, 2019, 39(4):1687–1695. TANG Y F, WANG L Y, WU D, et al. Assessment of heavy metal pollution and bearing capacity estimation of continuous biogas slurry application on cropland: A case study of the coastal rice-wheat rotated farmland in Jiangsu, China[J]. *China Environmental Science*, 2019, 39(4):1687–1695.
- [16] 吴家青, 熊若愚, 解嘉鑫, 等. 稻米食味品质形成及其响应氮素调控作用的研究进展[J]. 中国稻米, 2021, 27(2):28–37. WU J Q, XIONG R Y, XIE J X, et al. Research advances on rice eating grain quality formation and its response to nitrogen application[J]. *China Rice*, 2021, 27(2):28–37.
- [17] WAKAMATSU K, SASAKI O, UEZONO I, et al. Effect of the amount of nitrogen application on occurrence of white-back kernels during ripening of rice (*Oryza sativa*) under high-temperature conditions[J]. *Japanese Journal of Crop Science*, 2008, 77(4):424–433.
- [18] 路凯, 赵庆勇, 周丽慧, 等. 稻米蛋白质含量与食味品质的关系及其影响因素研究进展[J]. 江苏农业学报, 2020, 36(5):1305–1311. LU K, ZHAO Q Y, ZHOU L H, et al. Research progress on the relationship between rice protein content and eating quality and the influence factors[J]. *Jiangsu Journal of Agricultural Sciences*, 2020, 36(5):1305–1311.
- [19] LIU Q, MA H, LIN X, et al. Effects of different types of fertilizers application on rice grain quality[J]. *Chilean Journal of Agricultural Research*, 2019, 79(2):202–209.
- [20] 吴春艳, 陈义, 许育新, 等. 长期定位试验中施肥对稻米品质的影响[J]. 浙江农业学报, 2008, 20(4):256–260. WU C Y, CHEN Y, XU Y X, et al. Effect of fertilization on rice grain quality in a long-term fertilizer experiment[J]. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 2008, 20(4):256–260.