

熟化垫料部分替代化肥对水稻-多花黑麦草轮作生产力、土壤肥力和重金属含量的影响^①

张文洁^{1,2}, 许能祥², 丁成龙², 李青丰^{1*}

(1 内蒙古农业大学草原与资源环境学院, 呼和浩特 010011; 2 江苏省农业科学院畜牧研究所/农业农村部种养结合重点实验室, 南京 210014)

摘要: 探讨熟化垫料部分替代化肥对长江中下游地区水稻-多花黑麦草轮作系统生产力、土壤肥力和重金属含量的影响, 为长江中下游地区有机肥合理施用及其风险评估提供科学依据。采用连续 2 年的大田小区试验, 以猪发酵床熟化垫料不同比例替代化肥: 不施肥对照(CK)、单施化肥(T1)、熟化垫料替代 25% 化肥氮(T2)、熟化垫料替代 50% 化肥氮(T3)、熟化垫料替代 75% 化肥氮(T4)、单施熟化垫料(T5), 分析在相等施氮量条件下熟化垫料替代化肥对水稻-多花黑麦草轮作系统作物地上生物量、氮素利用率、土壤理化性质以及重金属含量的影响。研究结果表明, 与对照相比, 各施肥处理均能不同程度地提高水稻籽粒、水稻秸秆、多花黑麦草产量及地上部周年总产量。在不同比例熟化垫料替代处理中, 随着熟化垫料替代比例的增加, 作物产量表现为降低的趋势。相对于 T1 处理, T2 处理的水稻-多花黑麦草轮作系统地上部周年生物量连续两年分别提高 5.88% 和 6.40%, T3 处理差异不显著, T4 和 T5 处理显著降低。随着熟化垫料施用比例的增加, 水稻-多花黑麦草轮作系统作物年总产量呈先增加后降低趋势, 其中 T4 和 T5 处理的周年地上部总产量第 2 年比第 1 年分别增加 11.49% 和 20.34%。施肥显著影响轮作系统作物的氮素吸收量、利用率和偏生产力。相比于 T1 处理, T2 处理第 1 年和第 2 年轮作系统地上部氮素吸收量分别增加 9.387% 和 7.59%, 氮素利用率分别提高 14.66% 和 10.14%, 偏生产力分别提高 7.58% 和 5.94%; T3 处理与 T1 处理差异不显著; 但 T4 和 T5 处理 3 个指标均显著降低。相比于 T1 处理, 耕层 0~20 cm 土壤 pH、有机质、速效钾和有效磷含量随着熟化垫料替代比例的增加表现为升高的趋势。相比于 T1 处理, T3、T4 和 T5 处理的土壤有机质含量, 分别增加 33.98%、46.23% 和 47.09%, 有效磷含量分别增加 49.11%、67.15% 和 73.87%, 速效钾含量分别增加 23.36%、36.77% 和 55.24%(2 年均值)。熟化垫料施用造成了土壤 Cu 和 Zn 的富集, 但对土壤 Cd 含量影响不显著, 同一施肥处理土壤中的 Cu、Zn 和 Cd 含量, 第 1 轮作年低于第 2 轮作年, 但含量均在土壤环境质量农用地土壤污染风险管理标准(GB15618—2018)范围内。2 年 4 季定位试验表明, 熟化垫料替代 25%~50% 化肥为长江中下游地区水稻-多花黑麦草轮作生产值得推荐的化肥减量增效模式。

关键词: 水稻-多花黑麦草轮作; 熟化垫料; 产量; 氮素利用率; 土壤肥力; 重金属

中图分类号: S511.06 文献标志码: A

Effects of Different Proportions of Fermentation Bed Paddings Replacing Chemical Fertilizer on Crop Productivity, Soil Fertility and Heavy Metals Under Italian Ryegrass–Rice Rotation

ZHANG Wenjie^{1,2}, XU Nengxiang², DING Chenglong², LI Qingfeng^{1*}

(1 College of Grassland, Resources and Environment, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010011, China; 2 Institute of Animal Science, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences/Key Laboratory of Crop and Animal Integrated Farming, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Nanjing 210014, China)

Abstract: The effects of fermentation bed paddings partially replacing chemical fertilizer on crop aboveground biomass, N efficiency, soil fertility and heavy metals contents on Italian ryegrass–rice rotation were studied to explore the suitable replacement ratio of organic fertilizer and chemical fertilizer under rice-ryegrass rotation, and to construct the safe application technology of organic fertilizer, which can provide technical support for high-yield and high-efficiency crop production under grain-grass rotation system in southern agricultural areas. Under the condition of equal nitrogen application, a field experiment

①基金项目: 江苏省自主创新项目(CX(21)2017)和江苏现代农业产业技术体系建设专项(JATS(2022)440)资助。

* 通讯作者(qifeng153@yahoo.com.cn)

作者简介: 张文洁(1986—), 女, 山东菏泽人, 博士, 助理研究员, 主要研究方向为牧草栽培与调制加工。E-mail: jiexiu1228@163.com

was carried out in two years, in which 6 fertilization treatments were setup: CK, no fertilizer treatment; inorganic fertilizer treatment (T1), fermentation bed paddings replacing 25%, 50%, 75% chemical N (T2, T3, T4), and fermentation bed paddings (T5). The effects of different treatments on the aboveground biomass, nitrogen use efficiency, soil physiochemical properties and heavy metal contents were determined. The results showed that compared with CK, all fertilization treatments improved rice grain yield and straw yield, Italian ryegrass yield and annual aboveground yield. In the treatments with different proportions of organic fertilizer, with the increase of proportion of organic nitrogen substitution, crop yield showed a decreasing trend. The experimental data for two consecutive years showed that compared with T1, T2 increased the annual aboveground yield of by 5.88% and 6.40%, but there was no significant difference between T3 and T1, and significantly decreased in the T4 and T5 treatments. The total annual crop yield of Italian ryegrass–rice rotation showed a trend of first increasing and then decreasing with the increase of the application ratio of fermentation bed paddings, the annual shoot yield of T4 and T5 increased by 11.49% and 20.34% respectively in the second year compared with the first year. Nitrogen uptake and use efficiency of rice and ryegrass were significantly increased by applying appropriate proportion of organic fertilizer. Nitrogen uptake of rice grain and straw as well as ryegrass were the highest in T2, while there was no significant difference between T3 and T1, but T4 and T5 significantly decreased. Compared with T1, T2 increased the aboveground nitrogen uptake by 9.387% and 7.59%, and increased nitrogen use efficiency by 14.66% and 10.14%, increased partial productivity by 7.58% and 5.94% in the first and second year respectively. Soil pH and the contents of organic matter, available potassium and phosphorus increased with the increase of the proportion of organic fertilizer, while the content of available nitrogen increased first and then decreased. According to the two-year average value, compared with T1, T3, T4 and T5 increased the SOM contents by 33.98%, 46.23% and 47.09%, and increased available phosphorus contents by 49.11%, 67.15% and 73.87%, and increased available K contents by 23.36%, 36.77% and 55.24% respectively. The application of organic fertilizer resulted in the enrichment of Cu and Zn in soil, but had no significant effect on Cd content in soil. The contents of Cu, Zn and Cd in the same fertilization treatment were lower in the first crop year than in the second crop year, but the contents were all within the soil pollution risk control standard (GB15618—2018). In conclusion, 25%–50% of the fermentation bed paddings and inorganic fertilizers applied is suitable for Italian ryegrass–rice rotation in the Yangtze River.

Key words: Italian ryegrass–rice rotation; Fermentation bed paddings; Yield; N efficiency; Soil fertility; Heavy metals

水稻-多花黑麦草轮作系统是我国长江以南地区典型的粮-草轮作系统^[1]。水稻-多花黑麦草轮作系统能够充分利用有限的水、肥、气、热等资源，进行高产优质粮食作物和饲料作物生产，同时对提高土壤肥力具有积极的作用^[2]。长江中下游地区是我国南方水稻主产区之一，水稻栽培面积1 517.1万hm²，占全国水稻栽培面积的50.4%，对我国粮食生产具有决定性的影响^[3]。近年来，由于化肥施用水平偏高，导致稻田土壤有机质降低、养分非均衡化、次生盐渍化等一系列问题，严重制约水稻生产的可持续性^[4]。长江流域也是畜禽产品主产区，然而随着家畜集约化规模养殖的快速发展，其面临的粗饲料自给率低、种养分离、粪污治理等问题日益突出^[5]。因此，将畜禽粪污有机肥作为作物生产必不可少的要素加以利用，进行粮-草轮作模式下有机肥科学施用方法的研究，一举解决养殖场粪污治理难题和家畜粗饲料周年供应难题，使种植业和养殖业真正有机结合，对构建绿色循环农业具有重要意义。

综合作物养分管理的要求，有机肥替代化肥不仅能够保证作物的高产稳产，还能有效改善土壤质量。叶盛嘉等^[6]研究发现，小麦和玉米常规施氮量分别减少60%和40%，并各配施3 000 kg/hm²有机肥能够维持小麦-玉米轮作系统较高的生产力。李硕等^[7]研究表明，在华北平原农牧生产区，有机肥替代50%化肥氮条件下，甜高粱-黑麦草和高丹草-黑麦草轮作系统氮肥偏生产力高。有机肥替代75%化肥氮可以提高壤土冬小麦-夏玉米轮作体系作物产量和氮效率，增加年经济效益，同时有效减少土壤硝态氮的残留量^[8]。刘增兵等^[9]研究发现，有机肥长期高比例替代化肥能有效提升土壤的有机质和养分含量。猪粪含有丰富的养分，是一种优质的有机肥资源。前人研究结果表明，有机肥替代化肥能够提高作物产量，促进氮素吸收，提高土壤肥力等^[10]，但也增加了土壤和作物中重金属的含量^[11-12]。李本银等^[13]研究表明，猪粪直接还田量影响表层土壤Cu、Zn和As等重金属含量及有效性。余垚等^[14]研究发现，猪粪可降低Cd污染土壤中Cd的迁移能力和生物有效性。

目前针对有机肥替代化肥的研究主要侧重单一粮食作物^[15-16]或粮-粮轮作^[17-19], 对粮-草轮作方式下有机肥替代施用的增产效果和对土壤理化性质的影响缺乏系统研究。本研究以长江中下游地区水稻-多花黑麦草轮作体系为研究对象, 采用大田试验, 系统研究不同猪发酵床熟化垫料有机肥替代比例对水稻-多花黑麦草轮作系统作物生产力、土壤肥力及重金属含量的影响, 探讨有机肥与化肥在水稻-多花黑麦草轮作体系中的适宜替代比例, 构建有机肥安全施用技术, 为南方农区粮-草轮作体系下作物高产、高效生产提供技术支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

大田试验在江苏省南京市溧水区白马镇江苏省农业科学院溧水植物科学基地(118.88°E, 32.03°N)开展。该基地位于长江中下游地区, 属亚热带季风气候, 四季分明, 年降水量1 000 mm, 年平均气温15.3 °C, ≥10 °C 的年积温4 800 °C, 无霜期234 d。

1.2 试验设计

试验共设6个处理: ①不施肥(CK); ②单施化肥(T1); ③熟化垫料替代25% 化肥氮(T2); ④熟化垫料替代50% 化肥氮(T3); ⑤熟化垫料替代75% 化肥氮(T4); ⑥单施熟化垫料(T5)。水稻施纯N 225 kg/hm², P₂O₅ 150 kg/hm², K₂O 150 kg/hm²; 多花黑麦草施纯N 225 kg/hm², P₂O₅ 45 kg/hm², K₂O 45 kg/hm²。氮肥用尿素(含纯N 46%), 磷肥用过磷酸钙(P₂O₅ 12%), 钾肥用氯化钾(K₂O 60%), 猪发酵床熟化垫料养分含量按平均值N 1.99%、P₂O₅ 1.80%、K₂O 1.28%计算。各处理以等氮量为基准, P、K部分不足用化肥补充。有机肥、磷肥、钾肥和50% 尿素作基肥一次性施入, 剩余50% 尿素作为追肥, 水稻在抽穗期追施, 多花黑麦草在第1次刈割后追施。小区面积24 m²(4 m × 6 m)。试验地四周设置2.0 m的保护行, 小区中间筑0.5 m宽的田埂, 并覆塑料地膜防止互相窜肥, 小区能独立进水排水。试验于2018年水稻种植正式开始, 采用水稻-多花黑麦草轮作种植方式。

水稻品种为南粳9108, 由江苏省农业科学院粮食研究所提供, 水稻于每年的5月中上旬育秧, 6月中上旬插秧, 10月中下旬收获; 每小区20行, 每行20株, 1穴1株, 株行距为20 cm × 30 cm。多花黑麦草品种为四倍体“TETILA”, 由百绿公司提供, 多花黑麦草于每年的10月中下旬水稻收获后播种, 4月中旬第1次刈割, 5月下旬第2次刈割; 采用条播,

行距30 cm, 播量3 g/m²。各处理其他管理措施一致。试验土壤为马肝土, 土壤0~20 cm耕层基础理化性质及重金属含量为: pH 6.75, 有机质11.51 g/kg, 全氮0.95 g/kg, 有效磷9.45 mg/kg, 速效钾99.51 mg/kg, 全Cu 27.93 mg/kg, 全Zn 73.80 mg/kg, 全Cd 0.09 mg/kg。前茬作物为甘薯。猪熟化垫料由江苏省农业科学院六合动物科学基地猪场提供, 以猪粪、木屑、稻壳及菌糠为主的熟化垫料, 养分及重金属平均值为: pH 6.97, 有机质44.53 g/kg, 全氮19.91 g/kg, 有效磷18.05 g/kg, 速效钾12.82 g/kg, 全Cu 5.61 g/kg, 全Zn 6.43 g/kg, 全Cd 1.21 mg/kg, 全As 1.95 mg/kg, 全Cr 0.77 g/kg。

1.3 样品采集与测定

水稻分小区单打、单收, 风干后脱粒, 粒粒和秸秆分别称重, 然后以采样面积折算生物量。另外每小区取代表性的植株10株, 称取地上部鲜重; 将秸秆和籽粒分离后, 分别在105 °C下杀青30 min, 65 °C条件下烘至恒重, 称重后粉碎过100目筛用于全氮含量测定。多花黑麦草每小区随机选取10行刈割, 留茬高度为5 cm, 测定鲜草产量; 同时取500 g样品置于105 °C的烘箱中杀青30 min后, 在65 °C条件下烘至恒重, 测定样品干物质含量, 然后计算干物质产量, 最后以采样面积折算生物量。同时取5株代表性植株, 烘干粉碎后过100目筛用于全氮含量的测定。植物中全氮含量采用浓H₂SO₄-H₂O₂消煮-凯氏定氮法测定。

多花黑麦草收获后, 每小区按9点取样法采集0~20 cm土层土壤样品, 混匀后根据四分法取土壤样品1 kg左右, 室内风干后, 磨细过1 mm和0.25 mm筛供土壤理化性质和重金属含量测定。土壤理化性质参照鲁如坤^[20]的《土壤农业化学分析方法》, 其中pH采用电位计法(水土质量比2.5:1)测定; 土壤有机质采用重铬酸钾容量法测定; 土壤全氮采用凯氏定氮法测定; 土壤碱解氮采用碱解扩散法测定; 土壤有效磷采用氟化铵-盐酸溶液浸提, 钼锑抗比色法测定; 土壤速效钾采用乙酸铵浸提-火焰光度计测定。土壤全量Cu、Zn、Cd含量按照农业部执行行业标准NY/T 1613—2008^[21]方法测定。

1.4 数据计算

植物氮素吸收和利用率相关计算公式^[22]如下:

$$\text{氮素累积吸收量} = \text{茎产量} \times \text{氮素含量} + \text{叶产量} \times \text{氮素含量} + \text{穗产量} \times \text{氮素含量} \quad (1)$$

$$\text{氮素表观利用率} (\%) = ((\text{施氮区植株总吸收氮量} - \text{不施氮区植株累积氮素吸收量}) / \text{施氮量}) \times 100 \quad (2)$$

$$\text{氮素偏生产力} = \frac{\text{施氮区产量}}{\text{施氮量}} \quad (3)$$

1.5 数据统计与分析

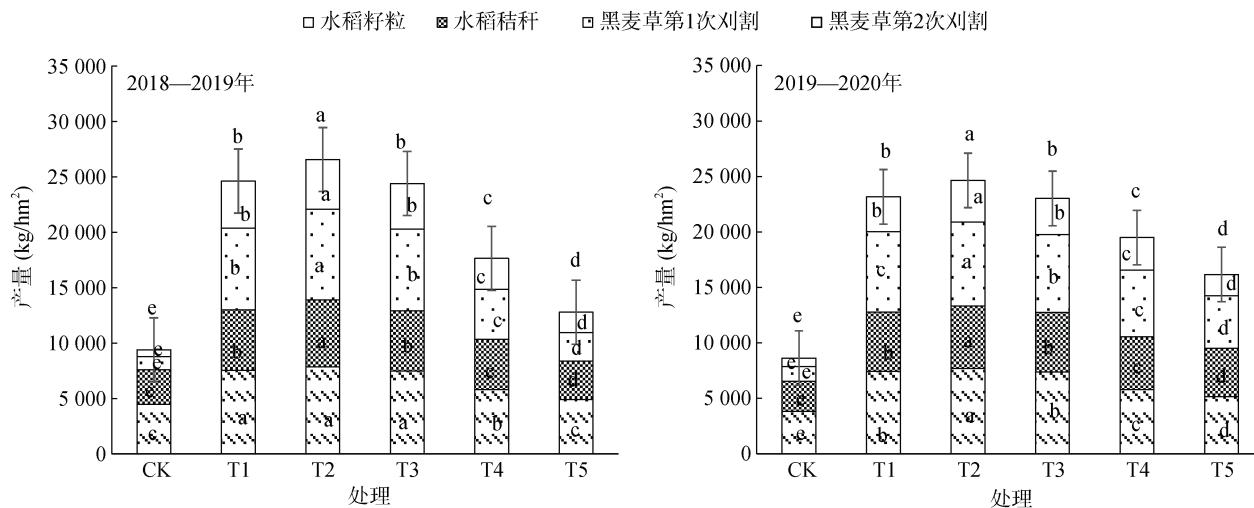
利用 Excel 2010 进行试验基础数据处理和作图,用 SPSS 16.0 对试验数据进行方差分析和显著性检验,处理间差异检验采用邓肯(Duncan)多重比较方法,显著性水平为 0.05。

2 结果与分析

2.1 熟化垫料替代化肥对水稻-多花黑麦草轮作体系作物地上部生物产量的影响

由图 1 可知,2 个轮作年份下水稻籽粒、秸秆产量、多花黑麦草及地上部生物量均以 CK 和 T5 处理最低,表明不施肥或单施熟化垫料显著影响了作物的生产力($P<0.05$)。T2 处理获得了最高的水稻-多

花黑麦草轮作系统地上部生物产量。其中,2018—2019 年水稻-多花黑麦草轮作体系中,T2 处理下水稻籽粒产量、秸秆产量、多花黑麦草产量和周年地上部生物量相对于 T1 处理分别提高 4.11%、11.13%、4.59% 和 5.88%;2019—2020 年,相对于 T1 处理,T2 处理下的水稻籽粒产量、稻草产量、多花黑麦草产量和周年地上生物量分别提高 3.84%、4.63%、9.14% 和 6.40%。T1 和 T3 处理下水稻、多花黑麦草产量及周年地上部生物量无显著差异,表明熟化垫料替代 50% 的化肥氮依然能够维持相对较高的水稻-多花黑麦草轮作系统生产力。T4 和 T5 处理的周年地上部总产量 2019—2020 年比 2018—2019 年分别增加 11.49% 和 20.34%,说明随着施用年限的延长,高量施用熟化垫料能够增加水稻-多花黑麦草轮作系统作物总产量。



(柱内不同小写字母表示不同处理间水稻或多花黑麦草产量差异达 $P<0.05$ 显著水平, 柱上不同小写字母表示轮作系统总产量差异达 $P<0.05$ 显著水平)

图 1 不同施肥处理对水稻-多花黑麦草轮作系统作物地上生物产量的影响

Fig. 1 Effects of different fertilization treatments on aboveground biological yields under Italian ryegrass - rice rotation

2.2 熟化垫料替代化肥对水稻-多花黑麦草轮作体系作物氮素吸收利用的影响

由表 1 可以看出,相对于 CK 处理,施肥显著提高了水稻-多花黑麦草轮作系统作物地上部分的氮素吸收量($P<0.05$);而相对于 T1 处理,有机肥配施处理也显著影响水稻和多花黑麦草的氮素吸收量。在 2018—2019 轮作年中,相对于 T1 处理,T2 处理下水稻秸秆和籽粒的氮素吸收量分别增加 43.34% 和 7.26%,T3 处理差异不显著,但 T4 和 T5 处理显著降低($P<0.05$);多花黑麦草第 1 次刈割时氮素吸收量 T2 处理最高,T1 和 T3 处理差异不显著;第 2 次刈割时 T1、T2 和 T3 处理间氮素吸收量差异不显著,但显著高于其他处理($P<0.05$);施肥处理下的轮作系

统作物周年地上氮素吸收量为 150.86 ~ 360.63 kg/hm²,其中相对于 T1 处理,T2 处理增加 9.87%,T3 处理差异不显著,T4 和 T5 处理分别降低 34.15% 和 53.59%。在 2019—2020 轮作年中,T2 处理的水稻秸秆和籽粒的氮素吸收量分别比 T1 处理增加 6.38% 和 6.42%,T3 处理的秸秆氮素吸收量与 T1 处理间差异不显著,T4 和 T5 处理则显著降低($P<0.05$);对于第 1 次刈割的多花黑麦草,T2 处理氮素吸收量比 T1 处理增加 13.26%,T3 处理与 T1 处理间差异不显著,但 T4 和 T5 处理显著降低($P<0.05$);施肥处理下的轮作系统作物周年地上氮素吸收量在 192.84 ~ 352.15 kg/hm²,相对于 T1 处理,T2 和 T3 处理差异不显著,T4 和 T5 处理分别降低 25.82% 和 41.08%。

表 1 不同施肥处理对水稻-多花黑麦草轮作系统作物地上部氮吸收量(kg/hm²)的影响
Table 1 Effects of different fertilization treatments on N uptake under Italian ryegrass-rice rotation at harvest stage

年份	处理	水稻		多花黑麦草		周年
		秸秆	籽粒	第 1 次刈割	第 2 次刈割	
2018—2019	CK	16.69 ± 0.48 d	47.51 ± 3.21 e	11.35 ± 0.46 e	6.72 ± 0.03 d	82.27 ± 3.11 e
	T1	47.53 ± 0.45 b	109.79 ± 3.20 ab	99.82 ± 2.67 b	67.89 ± 0.29 a	325.03 ± 2.71 b
	T2	68.13 ± 0.82 a	117.76 ± 0.91 a	104.85 ± 1.25 a	69.89 ± 1.57 a	360.63 ± 0.86 a
	T3	44.78 ± 1.60 b	98.19 ± 2.12 b	97.75 ± 3.02 b	66.56 ± 0.55 a	307.28 ± 1.78 b
	T4	29.54 ± 0.89 c	80.22 ± 5.26 c	62.75 ± 2.67 c	41.52 ± 0.47 b	214.03 ± 3.45 c
	T5	26.15 ± 0.76 c	60.52 ± 2.36 d	38.63 ± 2.04 d	25.56 ± 1.15 c	150.86 ± 1.98 d
2019—2020	CK	15.20 ± 0.19 e	44.75 ± 0.52 f	11.04 ± 0.79 d	9.51 ± 0.14 d	65.50 ± 1.65 e
	T1	62.19 ± 0.20 b	108.31 ± 2.13 b	88.24 ± 3.58 b	68.57 ± 1.50 a	327.31 ± 2.16 ab
	T2	66.16 ± 0.23 a	115.26 ± 1.70 a	99.94 ± 4.85 a	70.79 ± 0.89 a	352.15 ± 3.21 a
	T3	63.82 ± 0.34 b	97.93 ± 0.92 c	87.31 ± 0.22 b	56.09 ± 0.47 b	305.15 ± 0.51 b
	T4	49.64 ± 0.80 c	87.90 ± 0.60 d	52.70 ± 2.25 c	52.53 ± 0.09 b	242.77 ± 1.13 c
	T5	39.44 ± 0.25 d	68.51 ± 0.49 e	50.81 ± 1.09 c	34.08 ± 0.81 c	192.84 ± 1.01 d

注：表中同列数据小写字母不同表示同一年份不同处理间差异显著($P<0.05$)，下同。

不同施肥处理显著($P<0.05$)影响水稻-多花黑麦草轮作系统的氮素表观利用率和氮素偏生产力(表 2)。在 2018—2019 轮作年中，相对于 T1 处理，T2 处理水稻、多花黑麦草和周年地上部作物氮素表观利用率显著提高($P<0.05$)，增量分别为 31.50%、4.64% 和 14.66%；T3 处理差异不显著；T4 和 T5 处理则显著降低($P<0.05$)。水稻氮素偏生产力 T1、T2 和 T3 处理间差异不显著，T4 处理与 T1 和 T3 处理间差异不显著，但显著高于 T5 处理($P<0.05$)；相对于 T1 处理，T2 处理多花黑麦草和轮作系统作物地上部分周年氮素偏生产力分别显著提高 8.84% 和 7.58%($P<0.05$)，T3 处理差异不显著。在 2019—2020 轮作年中，水稻、多花黑麦草氮素表观利用率和偏生产力呈现一致的

规律性：T2>T1>T3>T4>T5。相对于 T1 处理，T2 处理周年地上部分作物氮素表观利用率和偏生产力分别提高 10.14% 和 5.94%，T3 处理差异不显著，但 T4 和 T5 处理均显著降低($P<0.05$)。

2.3 熟化垫料替代化肥对水稻-多花黑麦草轮作体系土壤肥力的影响

表 3 是两个轮作年多花黑麦草收获时土壤养分含量变化情况，从表可以看出：不同施肥处理对土壤 pH、有机质、碱解氮、速效钾和有效磷含量影响差异显著($P<0.05$)。土壤 pH 随熟化垫料配施比例的增加而提高，但第 1 个轮作年差异不显著，第 2 个轮作年 T4 和 T5 处理显著高于 T1 和 T2 处理($P<0.05$)。土壤有机质随着熟化垫料配施比例的增加显著增加，相

表 2 不同施肥处理对水稻-多花黑麦草轮作系统氮素利用率的影响
Table 2 Effects of different fertilization treatments on N efficiency under Italian ryegrass-rice rotation

年份	处理	氮素表观利用率(%)			氮素偏生产力(kg/kg)		
		水稻	多花黑麦草	周年	水稻	多花黑麦草	周年
2018—2019	CK	—	—	—	—	—	—
	T1	41.24 ± 1.64 b	66.54 ± 1.05 b	53.95 ± 0.44 b	44.14 ± 0.90 ab	51.68 ± 0.90 b	47.91 ± 0.87 b
	T2	54.23 ± 0.91 a	69.63 ± 1.25 a	61.86 ± 0.37 a	46.84 ± 0.23 a	56.25 ± 0.23 a	51.54 ± 0.21 a
	T3	39.06 ± 0.65 b	64.14 ± 1.59 b	50.00 ± 0.82 b	44.05 ± 0.67 ab	51.00 ± 0.67 b	47.53 ± 0.57 b
	T4	20.61 ± 2.72 c	38.31 ± 1.40 c	29.28 ± 0.58 c	40.06 ± 0.07 b	32.46 ± 0.07 c	36.26 ± 0.18 c
	T5	10.50 ± 0.80 d	20.50 ± 0.39 d	15.24 ± 0.15 d	35.26 ± 0.84 c	19.59 ± 0.43 d	27.42 ± 0.71 d
2019—2020	CK	—	—	—	—	—	—
	T1	54.45 ± 0.80 ab	61.66 ± 0.93 ab	54.45 ± 0.80 ab	43.73 ± 0.29 a	46.16 ± 0.29 b	44.94 ± 0.17 b
	T2	59.97 ± 0.64 a	67.84 ± 2.55 a	59.97 ± 0.64 a	44.83 ± 0.42 a	50.38 ± 0.43 a	47.61 ± 0.31 a
	T3	49.53 ± 0.90 b	55.70 ± 0.64 b	49.53 ± 0.90 b	43.67 ± 0.40 a	45.73 ± 0.40 b	44.70 ± 0.45 b
	T4	35.67 ± 0.05 c	38.73 ± 0.96 c	35.67 ± 0.05 c	41.10 ± 0.01 ab	39.75 ± 0.01 c	40.43 ± 0.23 c
	T5	24.57 ± 0.16 d	29.70 ± 0.84 d	24.57 ± 0.16 d	39.18 ± 0.02 b	29.67 ± 0.02 d	34.43 ± 0.13 d

表3 不同施肥处理对水稻-多花黑麦草轮作系统土壤肥力的影响
Table 3 Effects of different fertilization treatments on soil fertility under Italian ryegrass-rice rotation

年份	处理	pH	有机质(g/kg)	碱解氮(mg/kg)	速效钾(mg/kg)	有效磷(mg/kg)
2018—2019	CK	6.42 ± 0.06 a	9.01 ± 0.02 d	109.63 ± 2.12 b	100.64 ± 1.97 e	11.70 ± 0.48 d
	T1	6.64 ± 0.28 a	12.10 ± 0.32 c	125.45 ± 4.28 a	122.54 ± 0.53 d	16.58 ± 0.29 c
	T2	6.66 ± 0.06 a	14.35 ± 0.16 b	136.74 ± 13.8 a	131.01 ± 1.53 d	17.11 ± 0.46 c
	T3	6.68 ± 0.01 a	15.63 ± 0.68 ab	132.77 ± 14.8 a	147.21 ± 4.78 c	25.15 ± 0.61 b
	T4	6.88 ± 0.01 a	16.55 ± 0.47 a	132.45 ± 7.58 a	167.96 ± 2.12 b	27.18 ± 0.15 ab
	T5	6.86 ± 0.01 a	17.47 ± 0.54 a	132.18 ± 3.48 a	183.19 ± 3.58 a	29.01 ± 0.72 a
2019—2020	CK	6.51 ± 0.01 b	13.02 ± 0.13 e	118.70 ± 1.55 d	105.44 ± 0.86 d	7.66 ± 0.22 d
	T1	6.57 ± 0.03 b	14.44 ± 0.22 d	135.13 ± 1.24 c	124.20 ± 1.90 c	18.43 ± 0.13 c
	T2	6.61 ± 0.05 b	16.52 ± 0.07 c	134.38 ± 0.50 c	123.88 ± 0.15 c	21.85 ± 0.62 bc
	T3	6.77 ± 0.05 ab	20.04 ± 0.20 b	155.51 ± 2.05 b	157.21 ± 1.07 b	27.00 ± 0.21 b
	T4	7.20 ± 0.01 a	22.48 ± 0.05 a	167.63 ± 1.28 a	169.50 ± 0.06 b	31.40 ± 1.17 a
	T5	7.19 ± 0.04 a	22.19 ± 0.79 a	153.22 ± 2.47 b	199.94 ± 5.01 a	31.84 ± 0.09 a

比于 T1 处理, T2、T3、T4 和 T5 处理的有机质含量, 第 1 个轮作年分别增加 18.60%、29.17%、36.78% 和 40.50%, 第 2 个轮作年分别增加 14.40%、38.78%、55.68% 和 53.67%, 两年平均分别增加 16.50%、33.98%、46.23% 和 47.09%。熟化垫料配施处理下的碱解氮先增加后减低, 第 1 个轮作年 T1 处理与有机肥配施处理差异不显著; 第 2 个轮作年相对于 T1 处理, T3、T4 和 T5 处理碱解氮含量显著增加($P<0.05$), 增幅分别为 15.08%、24.74% 和 13.39%。土壤速效钾和有效磷含量均随着熟化垫料配施比例的增加而显著增加($P<0.05$)。第 1 轮作年和第 2 轮作年, 相比于 T1 处理, T3、T4 和 T5 处理土壤有效磷含量均显著增加, 增加量分别为 51.69%、46.50%、63.93%、70.37% 和 74.97%、72.76%, 两年平均分别增加 49.11%、67.15% 和 73.87%; 对于土壤速效钾含量, 与 T1 处理相比, T3、T4、T5 处理两个轮作年内均显著增加, 增加量分别为 20.13%、26.58%、37.07%、36.47% 和 49.49%、60.98%, 两年平均分别增加 23.36%、36.77% 和 55.24%。同一熟化垫料配施处理下第 2 轮作年的 pH、有机质、速效养分含量均高于第 1 轮作年, 说明有机肥配施对土壤肥力的提升具有长效性。

2.4 熟化垫料替代化肥对水稻-多花黑麦草轮作系统作物收获后土壤重金属含量的影响

如表 4 所示, 相对 CK 处理, 施用化肥对土壤中 Cu、Zn 和 Cd 含量没有显著影响, 但熟化垫料配施显著影响土壤中 Cu 和 Zn 的含量($P<0.05$), 对 Cd 含量影响不显著。同一施肥处理土壤中的 Cu、Zn 和 Cd 含量, 第 1 轮作年低于第 2 轮作年。对于土壤 Cu 含量, 两个轮作年 T3、T4 和 T5 处理均显著高于 T1

处理($P<0.05$), 第 1 轮作年分别增加 10.66%、17.21%、23.16%, 第 2 轮作年分别增加 20.59%、33.03% 和 32.34%, 2 年平均增加 15.63%、25.12% 和 27.75%。熟化垫料施用显著提高土壤中 Zn 含量($P<0.05$), 相比于 T1 处理, 第 1 轮作年 T2、T3、T4 和 T5 处理分别增加 26.14%、30.79%、32.12% 和 40.31%, 第 2 轮作年分别增加 13.19%、25.17%、32.97% 和 43.04%, 2 年平均增加 19.67%、27.98%、32.55% 和 41.68%。

表4 不同施肥处理对水稻-多花黑麦草轮作系统土壤重金属全量的影响(mg/kg)
Table 4 Effects of different fertilization treatments on soil heavy metal contents under Italian ryegrass-rice rotation

年份	处理	Cu	Zn	Cd
2018—2019	CK	27.82 ± 0.52 b	64.76 ± 1.42 c	0.093 ± 0.13 a
	T1	26.55 ± 1.02 b	64.95 ± 3.72 c	0.092 ± 0.14 a
	T2	28.75 ± 0.13 ab	81.93 ± 0.83 b	0.093 ± 0.16 a
	T3	29.38 ± 0.54 a	85.42 ± 0.04 b	0.095 ± 0.12 a
	T4	31.12 ± 0.55 a	85.81 ± 0.85 b	0.100 ± 0.12 a
	T5	32.70 ± 0.06 a	91.13 ± 2.16 a	0.098 ± 0.11 a
2019—2020	CK	27.14 ± 0.74 c	65.51 ± 0.64 d	0.102 ± 0.04 a
	T1	27.64 ± 0.04 c	66.19 ± 0.94 d	0.107 ± 0.04 a
	T2	30.85 ± 0.64 b	74.92 ± 1.94 c	0.104 ± 0.04 a
	T3	33.33 ± 0.44 ab	82.85 ± 0.54 bc	0.104 ± 0.04 a
	T4	36.77 ± 0.84 a	88.01 ± 0.84 b	0.103 ± 0.04 a
	T5	36.58 ± 1.64 a	94.68 ± 0.64 a	0.108 ± 0.04 a

3 讨论

3.1 熟化垫料替代化肥对水稻-多花黑麦草轮作系统作物生产力的影响

在本研究中, 熟化垫料 25%~50% 替代比例显著增加了水稻籽粒、秸秆、多花黑麦草及作物周年

干物质总产量,熟化垫料 75% 替代和单施熟化垫料导致作物减产,这与张霞等^[23]的研究结果相似。适当比例的有机肥替代处理能够调节作物关键生育期营养物质的代谢和循环,影响植物干物质和产量的形成^[24-25]。但有机肥矿化速率小、养分释放慢,随着有机肥配施比例的增加不能及时满足作物生长的需要。王秀芹等^[26]研究表明水稻的吸氮高峰在拔节期至抽穗期,在该时期如遇养分供应不足,会抑制水稻的生长,影响产量的形成。本研究中 75% 熟化垫料替代和单施熟化垫料处理下水稻-多花黑麦草轮作系统作物产量 2019—2020 轮作年比 2018—2019 轮作年高,这与任宁等^[17]的研究结论一致,反映了有机肥对作物的长期效应。

向秀媛等^[27]研究表现,有机肥替代化肥能够更好地协调营养分的释放,满足植物的养分需求,提高氮素的利用率。张翰林等^[18]研究表明,有机肥替代 20% 化肥处理的稻季和麦季氮肥利用率均最高。王林林^[28]研究发现,有机肥替代化肥通过优化小麦冠层氮素分配来促进光合作用,进而提高氮素利用率。本研究发现,25% ~ 50% 熟化垫料替代处理能够提高水稻和多花黑麦草的氮肥利用效率,同时,与单施化肥相比,熟化垫料替代 25% 化肥处理显著提高了水稻-多花黑麦草轮作系统的氮素吸收量;熟化垫料替代 50% 化肥处理下水稻籽粒、秸秆和多花黑麦草中的氮素吸收量与单施化肥相当,表明 25% ~ 50% 的熟化垫料替代比例能够提高秸秆和多花黑麦草粗蛋白产量,在保证作物高产、稳产的同时,提供了优质的粗饲料资源,有利于农区畜牧业可持续发展。

3.2 熟化垫料替代化肥对水稻-多花黑麦草轮作系统土壤肥力及重金属含量的影响

前人研究表明,有机肥能够显著改善土壤肥力状况^[29-30]。高飞等^[31]研究发现,有机肥替代化肥有效提高了小麦-玉米轮作土壤的有机质含量。本试验中,与单施化肥相比,熟化垫料替代处理显著提高了 0 ~ 20 cm 耕层土壤有机质和速效养分的含量,且随着有机肥替代比例的提高,土壤有机质、有效磷和速效钾含量增加,这与甘泉峰等^[32]的研究结果一致。这是因为有机肥补充了土壤中的磷和钾含量,有机肥的施入促进了耕层外源有机质转化为土壤有机质^[25, 32]。然而叶盛嘉等^[6]研究表明,有机肥替代处理对土壤有机质含量影响不显著。这可能与试验土壤本底值、当地气候条件及肥料成分和肥料施用量有关^[33]。另外本研究发现,熟化垫料替代处理能够提高轮作土壤的 pH,且随着种植时间的延长, pH 提高效果显著,这说明高量有机肥替代化肥可有效缓解耕层土壤的酸

化^[34]。主要原因可能是有机肥中的有机官能团促进了对 H⁺ 和 Al³⁺ 的吸附作用^[35],同时有机肥矿化过程释放了碱性物质,从而使土壤 pH 升高^[36]。

近年来,随着家畜集约化规模养殖的快速发展,畜禽粪污资源化利用方式和对环境的潜在风险成为研究关注的热点。姚冬辉等^[37]研究表明,连续 2 年施用商品有机肥可增加土壤中 Zn、Cu 和 Cd 等重金属的含量;李大明等^[38]研究发现,长期施用猪粪显著提高了土壤 Cu 和 Zn 的含量。本研究 2 年的定位试验结果表明,土壤中 Cu 和 Zn 的含量均随着猪发酵床熟化垫料有机肥用量的增加表现为递增的趋势,而对土壤 Cd 含量的影响差异不显著,但均符合土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准 (GB15618—2018)^[39]。其原因一方面可能与有机肥中重金属的输入量和施用年限有关^[37-38];另一方面可能与轮作试验中的多花黑麦草有关,多花黑麦草生长速度快,生物量大,对重金属具有较强的耐性和排异性,且对重金属特别是 Cd 有富集作用^[40]。前期对熟化垫料对水稻-多花黑麦草轮作系统地上部分重金属含量的影响研究^[41]表明,连续 2 年施用熟化垫料提高了水稻-多花黑麦草轮作系统地上部分重金属含量,但均未超过国家标准(GB2762—2022)^[42]中食品污染物限量的限值。因此有机肥施用会增加土壤中重金属元素的积累,但是草-稻轮作系统中高生物产量的牧草对土壤重金属有一定的修复作用,有机无机配施耦合草-稻轮作模式是长江中下游地区较适宜的高产栽培模式。

4 结论

在长江中下游地区的气候和土壤条件下,针对水稻-多花黑麦草轮作种植模式,在施氮量相同的情况下,相比常规单施化肥,熟化垫料替代 25% ~ 50% 化肥处理有提高水稻、多花黑麦草和周年地上部生物量的潜力,提升了作物氮素吸收量、氮肥利用效率和偏生产力,提高了土壤有机质、速效氮磷钾含量,土壤重金属含量在安全范围内。因此,熟化垫料替代 25% ~ 50% 化肥施肥方式是长江中下游地区水稻-多花黑麦草轮作生产值得推荐的化肥减量增效模式。

参考文献:

- [1] Yang Z Y, Xin G R, Yuan J G, et al. Ecological fertilization: An example for paddy rice performed as a crop rotation system in southern China//Elsworth L R, Paley W O. Fertilizers: Properties, applications and effects[M]. New York: Nova Science Publishers Inc., 2008, 1–28.
- [2] 何宏斌, 张钰薇, 程俊康, 等. “多花黑麦草→水稻” 轮作系统根茬养分释放规律[J]. 草业科学, 2019, 36(7): 1852–1860.

- [3] 徐春春. 长江中下游地区水稻生产化肥施用、环境效应与减施对策研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2022.
- [4] Zhang Y, Dore A J, Ma L, et al. Agricultural ammonia emissions inventory and spatial distribution in the North China Plain[J]. Environmental Pollution, 2010, 158(2): 490–501.
- [5] 徐燕, 李佩真. 种养结合助力江苏畜禽粪污资源化利用[J]. 中国畜牧业, 2021(19): 34–37.
- [6] 叶盛嘉, 郑晨萌, 张影, 等. 氮肥减量配施有机肥对豫中地区冬小麦-夏玉米轮作生产力和土壤性质的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2022, 30(6): 900–912.
- [7] 李硕, 李晓欣, 赵善丽, 等. 华北平原有机肥替代化肥条件下“粮-饲”轮作系统氮素表观平衡研究[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(3): 609–620.
- [8] 吕凤莲, 侯苗苗, 张弘弢, 等. 填土冬小麦-夏玉米轮作体系有机肥替代化肥比例研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2018, 24(1): 22–32.
- [9] 刘增兵, 束爱萍, 刘光荣, 等. 有机肥替代化肥对双季稻产量和土壤养分的影响[J]. 江西农业学报, 2018, 30(11): 35–39.
- [10] 孙向平, 李国学, 肖爱平, 等. 施用猪粪堆肥对玉米产量及土壤理化性质的影响分析[J]. 中国麻业科学, 2013, 35(5): 258–264.
- [11] 谢国雄, 王京文, 张丹, 等. 商品有机肥对作物产量及土壤与农产品中重金属积累的影响[J]. 中国农学通报, 2016, 32(29): 97–104.
- [12] 黄新灿, 章明奎. 长期施用猪粪源有机肥对蔬菜-土壤系统重金属积累的影响[J]. 农学学报, 2016, 6(4): 30–35.
- [13] 李本银, 黄绍敏, 张玉亭, 等. 长期施用有机肥对土壤和糙米铜、锌、铁、锰和镉积累的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(1): 129–135.
- [14] 余垚, 张敏, 万亚男, 等. 猪粪对生菜和菠菜吸收和累积镉的影响[J]. 环境科学与技术, 2015, 38(7): 71–76.
- [15] 许丹阳, 李虹颖, 孙义祥, 等. 不同比例有机无机肥配施对水稻产量与氮素利用率的影响[J]. 中国农学通报, 2022, 38(31): 1–5.
- [16] 胡新元, 柳永强, 谢奎忠, 等. 旱区有机肥替代氮肥对多年连作土壤理化性质和马铃薯品质的影响[J]. 作物杂志, 2023(4): 159–164.
- [17] 任宁, 黄玉芳, 侯占领, 等. 有机和无机肥配施对豫中小麦-玉米轮作体系产量及效益的影响[J]. 河南农业大学学报, 2019, 53(5): 683–688.
- [18] 张翰林, 郭惠宝, 杨业凤, 等. 化肥有机肥配施对稻麦轮作系统作物产量和土壤肥力的影响[J]. 上海农业学报, 2022, 38(3): 48–53.
- [19] 孔德杰, 李娜, 任成杰, 等. 不同施肥水平对长期麦豆轮作体系土壤氮素及产量的影响[J]. 西北农业学报, 2022, 31(6): 729–740.
- [20] 鲁如坤. 土壤农业化学分析法[M]. 北京: 中国农业出版社, 1999.
- [21] 中华人民共和国农业部. 土壤质量 重金属测定 王水回流消解原子吸收法: NY/T 1613—2008[S]. 北京: 中国农业出版社, 2008.
- [22] 张霞, 李健, 秦枫, 等. 熟化垫料等氮量替代化肥对小麦产量、土壤养分及当季氮肥利用率的影响[J]. 江苏农业学报, 2019, 35(5): 1082–1086.
- [23] 张霞, 李健, 潘孝青, 等. 不同熟化垫料替代比例对稻麦轮作下作物产量、土壤肥力及重金属的影响[J]. 江苏农业学报, 2021, 37(5): 1175–1182.
- [24] Manna M C, Swarup A, Wanjari R H, et al. Long-term effect of fertilizer and manure application on soil organic carbon storage, soil quality and yield sustainability under sub-humid and semi-arid tropical India[J]. Field Crops Research, 2005, 93(2/3): 264–280.
- [25] Zhang H, Xu M, Zhang F. Long-term effects of manure application on grain yield under different cropping systems and ecological conditions in China[J]. The Journal of Agricultural Science, 2009, 147(1): 31–42.
- [26] 王秀芹, 张洪程, 黄银忠, 等. 施氮量对不同类型水稻品种吸氮特性及氮肥利用率的影响[J]. 上海交通大学学报(农业科学版), 2003, 21(4): 325–330.
- [27] 向秀媛, 刘强, 荣湘民, 等. 有机肥和无机肥配施对双季稻产量及氮肥利用率的影响[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2014, 40(1): 72–77.
- [28] 王林林. 氮肥和有机肥对旱地小麦水氮利用的调控[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2018.
- [29] 戚兴超. 有机无机肥配施对设施番茄生长和土壤生态环境因子的影响及其机制[D]. 泰安: 山东农业大学, 2020.
- [30] 侯红乾, 刘秀梅, 刘光荣, 等. 有机无机肥配施比例对红壤稻田水稻产量和土壤肥力的影响[J]. 中国农业科学, 2011, 44(3): 516–523.
- [31] 高飞, 汪志鹏, 赵贺, 等. 低地力条件下有机肥部分替代化肥对作物产量和土壤性状的影响[J]. 江苏农业学报, 2020, 36(1): 83–91.
- [32] 甘泉峰, 黄婷, 李媛, 等. 有机无机肥配施对滨海脱盐土栽培菊芋及其养分吸收的影响[J]. 土壤, 2023, 55(2): 262–271.
- [33] 任凤玲, 张旭博, 孙楠, 等. 施用有机肥对中国农田土壤微生物量影响的整合分析[J]. 中国农业科学, 2018, 51(1): 119–128.
- [34] 陈贵, 张红梅, 沈亚强, 等. 猪粪与牛粪有机肥对水稻产量、养分利用和土壤肥力的影响[J]. 土壤, 2018, 50(1): 59–65.
- [35] 曾希柏. 红壤酸化及其防治[J]. 土壤通报, 2000, 31(3): 111–113.
- [36] Hue N V. Alleviating soil acidity with crop residues[J]. Soil Science, 2011, 176(10): 543–549.
- [37] 姚冬辉, 魏宗强, 颜晓, 等. 商品有机肥替代部分化肥对双季水稻产量及重金属含量的影响[J]. 江西农业大学学报, 2020, 42(5): 863–871.
- [38] 李大明, 柳开楼, 黄庆海, 等. 长期施用猪粪红壤稻田土壤 Cu、Zn 累积规律[J]. 生态学报, 2015, 35(3): 709–716.
- [39] 生态环境部, 国家市场监督管理总局. 土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准: GB 15618—2018[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.
- [40] 徐卫红, 王宏信, 王正银, 等. 重金属富集植物黑麦草对锌、镉复合污染的响应[J]. 中国农学通报, 2006, 22(6): 365–368.
- [41] 张文洁. 有机-无机肥配施对水稻/黑麦草轮作系统中作物生长和品质的影响[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2021.
- [42] 中华人民共和国国家卫生健康委员会, 国家市场监督管理总局. 食品安全国家标准 食品中污染物限量: GB 2762—2022[S]. 北京: 中国标准出版社, 2022.