

DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2023.06.007

袁浩亮, 张江林, 鲁艳红, 等. 紫云英和秸秆替代部分化肥对双季稻产量、养分含量及土壤综合肥力的影响. 土壤, 2023, 55(6): 1216–1222.

紫云英和秸秆替代部分化肥对双季稻产量、养分含量及土壤综合肥力的影响^①

袁浩亮^{1,2}, 张江林^{2,3}, 鲁艳红^{2,3}, 廖育林^{2,3}, 高雅洁^{2,3}, 孙玉桃^{2,3}, 曹卫东⁴, 聂军^{2,3*}

(1 湖南大学生物学院隆平分院, 长沙 410125; 2 湖南省土壤肥料研究所, 长沙 410125; 3 农业农村部湖南耕地保育科学观测实验站, 长沙 410125; 4 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081)

摘要: 基于连续 4 年田间定位试验, 探讨了紫云英和秸秆替代部分化肥对双季稻产量、土壤综合肥力和植株养分含量的影响。试验设置 6 个等养分投入处理: ①冬闲+氮、磷、钾化肥(CF); ②冬闲+秸秆低量还田+氮、磷、钾化肥(RSL); ③冬闲+秸秆高量还田+氮、磷、钾化肥(RSH); ④紫云英+氮、磷、钾化肥(MV); ⑤紫云英+秸秆低量还田+氮、磷、钾化肥(MV+RSL); ⑥紫云英+秸秆高量还田+氮、磷、钾化肥(MV+RSH)。结果表明: 早稻季, 将有机物料替代比例控制在 20% 以内, 水稻产量保持稳定; 当替代比例达到 39% 及以上时, 水稻产量显著降低。晚稻季, 与 CF 处理相比, 其余各处理提高了土壤有机质和全氮含量, 其中, 以 RSH 处理提升效果最为明显, 分别提高了 11.15% 和 7.64%。与 RSH 处理相比, MV+RSH 处理土壤综合肥力指数提高了 8.5%。与 CF 处理相比, MV 和 RSH 处理显著提高了水稻籽粒磷、钾含量。综上可知, 等养分投入条件下, 利用 2 500 kg/hm² 秸秆替代 20% 化肥在保证水稻稳产的同时可提高土壤肥力; 紫云英与秸秆联合利用能显著改善土壤肥力状况, 但该模式下替代化肥的比例过高在短期内可能有减产的风险。

关键词: 紫云英; 秸秆; 双季稻; 土壤肥力; 植株养分

中图分类号: S158.3 **文献标志码:** A

Effects of Chinese Milk Vetch and Straw Substituting Fertilizers on Double Rice Yields, Nutrients and Soil Integrated Fertilities

YUAN Haoliang^{1,2}, ZHANG Jianglin^{2,3}, LU Yanhong^{2,3}, LIAO Yulin^{2,3}, GAO Yajie^{2,3}, SUN Yutao^{2,3}, CAO Weidong⁴, NIE Jun^{2,3*}
(1 Longping Branch, College of Biology, Hunan University, Changsha 410125, China; 2 Hunan Soil and Fertilizer Institute, Changsha 410125, China; 3 Scientific Observing and Experimental Station of Arable Land Conservation (Hunan), Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Changsha 410125, China; 4 Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: Based on four consecutive years of field experiment including the following 6 treatments: 1) Winter fallow + N, P, K (CF); 2) Winter fallow + low amount of rice straw returning + N, P, K (RSL); 3) Winter fallow + high amount of rice straw returning + N, P, K (RSH); 4) Chinese milk vetch + N, P, K (MV); 5) Chinese milk vetch + low amount of rice straw returning + N, P, K (MV+RSL); 6) Chinese milk vetch + high amount of rice straw returning + N, P, K (MV+RSH), this study comparatively analyzed rice yields, soil integrated fertilities (IFIs) and plant nutrients under the above treatments. In early rice season, rice yield remained stable when the organic substitution ratio was kept within 20% but significantly decreased when the substitution ratio reached 39%. In late rice season, compared with the CF treatment, organic matter returned significantly increased soil organic matter and total nitrogen contents, among which RSH treatment had the most significant effect, increased by 11.15% and 7.64%, respectively. Different proportions of Chinese milk vetch and straw replacing chemical fertilizers improved soil IFIs, IFI of MV+RSH treatment increased by 8.5% compared with RSH treatment, and the treatments including MV or RSH significantly increased rice phosphorus and potassium contents compared with CF treatment. In conclusion, under the equal nutrient inputs,

①基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFD1700200), 现代农业产业技术体系建设专项资金项目(CARS-22-G-11)和国家自然科学基金联合基金项目(U19A2046)资助。

* 通讯作者(niejun197@163.com)

作者简介: 袁浩亮(2000—), 男, 湖南邵阳人, 硕士研究生, 主要从事植物营养与土壤培肥研究。E-mail: yuanhaoliang2000@163.com

using 2 500 kg/hm² rice straw replacing 20% chemical fertilizers could ensure stable rice yield and increase soil fertility. The co-utilization of Chinese milk vetch and rice straw significantly increased soil fertility, however, the over-representation of organic substitution may result in diminished output in a short time.

Key words: Chinese milk vetch; Straw; Double cropping rice; Soil fertility; Plant nutrient

水稻(*Oryza sativa* L.)作为一种重要的粮食作物,在全球 122 个国家广泛种植,是世界上一半人口的主要粮食来源^[1]。提高作物产量、产量的可持续性和土壤质量是发展现代化农业、养活世界不断增长的人口的必要手段^[2]。双季稻种植模式约占我国水稻种植面积的 40%,这种模式的可持续生产确保了粮食安全^[3]。化肥在农业生产中已成为不可或缺的部分,粮食产量和品质的提升均离不开化肥的施用^[4]。然而,过去很长一段时期内,农户过量依赖化肥,在产量提高的同时也引起诸多环境问题。研究人员对黑龙江、吉林、山东和河南的调查数据进行分析发现,化肥过量施用达到了 46.9 kg/hm²^[5]。农业农村部于 2015 年推行《到 2020 年化肥使用量零增长行动方案》^[6],大力推进化肥减量提效。2016 年我国农业化肥用量 5.98×10⁷ t,与 2015 年相比减少 3.80×10⁵ t,这也是我国农业化肥用量自 1974 年以来首次实现负增长;2020 年化肥减量提效工作已取得显著成效,我国氮肥施用量已减至 1.83×10⁷ t,较 2010 年降低 22.1%^[7],但部分省仍存在较大的环境风险^[8]。基于我国基本国情,在减施化肥的基础上保证作物增产、稳产对于满足市场需求、保障粮食安全具有重要意义。

秸秆还田是提高耕地质量的重要举措。2010 年,我国的秸秆资源达 9.01×10⁸ t,相当于单位耕地面积上 6 665.52 kg/hm²,比 1980 年增加 1 601.18 kg/hm²^[9]。柳开楼等^[10]研究发现,合理的秸秆还田能显著促进红壤地区作物的生长和产量提升。秸秆还田配施化肥能显著提高土壤有机质含量,增加土壤固碳速率,扩大土壤碳库^[11],还能提高土壤有效磷和速效钾等养分含量^[12-13],从而提高作物产量。此外,添加秸秆还能提高土壤微生物生物量碳、氮,从而促进土壤养分的转化和释放^[14],显著改善土壤性质。

紫云英(*Astragalus sinicus* L.)是我国南方广泛种

植的稻田绿肥,其翻压还田后能有效地改善土壤生态环境^[15]。Kamran 等^[16]研究认为,种植紫云英并翻压还田能提高土壤有机质含量,进而提高土壤稳定性。紫云英不仅能提高土壤碳汇,还能抑制稻田土壤中氮的硝化作用,减少氮损失^[17]。近年来,有研究人员创新性地提出紫云英与秸秆联合利用这一模式,且连续 11 年的田间定位试验结果表明,紫云英与秸秆联合还田 + 40% 化肥处理可以显著改善稻田肥力,促进植株的养分吸收^[18]。这一模式通过降低土壤碳氮比,改善土壤微生物群落结构^[19],进而提高土壤肥力和作物产量。

目前,关于化肥与绿肥或秸秆结合的不同模式下双季稻产量及土壤肥力状况变化的研究较多,但对于绿肥和秸秆联合还田的影响,尤其是等养分投入条件下土壤肥力变化的研究较少。由此,本研究基于稻-稻-紫云英轮作体系,设置等养分投入对比试验,利用紫云英和秸秆替代部分化肥,研究其对双季稻产量、土壤肥力状况和植株养分的影响,以筛选紫云英和秸秆替代化肥的适宜比例,为紫云英与秸秆联合利用这一创新技术模式下的化肥投入优化提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况及试验设计

田间定位试验位于湖南省长沙市长沙县高桥镇(28°28'49" N, 113°20'50" E),始于 2016 年。该地处于东南亚季风区,属亚热带季风性湿润气候,年均气温 16.8 °C,年均日照时数 1 663 h,年均降水量 1 422 mm。试验地土壤类型为第四纪红土发育而成的红黄泥。试验前耕层土壤理化性质如表 1 所示。供试早稻品种为常规稻“湘早籼 32 号”,晚稻品种为杂交稻“深优 9586”。

表 1 供试土壤初始理化性质
Table 1 Initial soil physiochemical properties before experiment

pH	有机质(g/kg)	全氮(g/kg)	全磷(g/kg)	全钾(g/kg)	水解性氮(mg/kg)	有效磷(mg/kg)	速效钾(mg/kg)
5.21	19.80	1.66	0.50	25.90	171.00	16.70	66.00

试验共设置 6 个处理,总养分投入量保持相等:
①冬闲+氮、磷、钾化肥(CF); ②冬闲+秸秆低量还田+

氮、磷、钾化肥(RSL); ③冬闲+秸秆高量还田+氮、磷、钾化肥(RSH); ④紫云英+氮、磷、钾化肥(MV);

⑤紫云英+秸秆低量还田+氮、磷、钾化肥(MV+RSL);
⑥紫云英+秸秆高量还田+氮、磷、钾化肥(MV+RSH)。采用随机区组设计,3次重复,小区面积 20 m²。小区田埂覆膜隔离,单独排灌。

各处理施肥方案见表 2。秸秆在 CF 和 MV 处理中被移除,其余处理高量或低量还田,高量秸秆还田量(干重)为 5 000 kg/hm²,低量秸秆还田量为 2 500 kg/hm²。包含紫云英的处理,每年 10 月中下旬播种紫云英,播种量为 30 kg/hm²,次年早稻移

栽前 5 ~ 10 d 翻压入田,翻压量(鲜重)为 14 000 kg/hm²。MV+RSL 和 MV+RSH 处理在上一年晚稻收获后将秸秆覆盖于田面上,早稻移栽前与紫云英共同翻压还田。早稻于 4 月中旬移栽,7 月中旬收获,晚稻于 7 月下旬移栽,10 月下旬收获。每个处理中紫云英、秸秆和化肥的氮、磷、钾的总投入量相等。氮、磷、钾化肥分别为尿素、钙镁磷肥和氯化钾,所有施肥处理的氮肥和钾肥分两次施用:50% 做基肥,50% 做分蘖肥;磷肥做基肥一次性施用。

表 2 各处理施肥方案
Table 2 Fertilizer application programs for each treatment

稻别	处理	化肥施肥量(kg/hm ²)			紫云英养分投入量(kg/hm ²)			秸秆养分量(kg/hm ²)			有机物料总替代比例(%)
		N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	
早稻	CF	150.0	75.0	120.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	RSL	135.0	72.8	70.0	0.0	0.0	0.0	15.0	2.3	50.0	19.5
	MV	105.0	70.5	100.0	45.0	4.5	20.0	0.0	0.0	0.0	20.0
	RSH	120.0	70.5	20.0	0.0	0.0	0.0	30.0	4.5	100.0	39.0
	MV+RSL	90.0	68.3	50.0	45.0	4.5	20.0	15.0	2.3	50.0	40.0
	MV+RSH	75.0	66.0	0.0	45.0	4.5	20.0	30.0	4.5	100.0	59.0
晚稻	CF	180.0	75.0	120.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	RSL	165.0	72.8	70.0	0.0	0.0	0.0	15.0	2.3	50.0	18.0
	RSH	150.0	70.5	20.0	0.0	0.0	0.0	30.0	4.5	100.0	36.0
	MV	180.0	75.0	120.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	MV+RSL	165.0	72.8	70.0	0.0	0.0	0.0	15.0	2.3	50.0	18.0
	MV+RSH	150.0	70.5	20.0	0.0	0.0	0.0	30.0	4.5	100.0	36.0

1.2 样品采集与测定方法

1.2.1 植株样品 2019 年早稻和晚稻收获前采集各小区秸秆与籽粒样品,于 105 °C 杀青 15 min,65 °C 烘干 24 h 至恒重后磨碎,用于测定水稻秸秆和籽粒养分含量。植株氮、磷、钾采用 H₂SO₄-H₂O₂ 消煮,全氮用凯氏定氮法测定,全磷用钼锑抗比色法测定,全钾用火焰光度计法测定^[20]。

1.2.2 土壤样品 2019 年早稻和晚稻收获后在各小区通过五点取样法采集耕层土壤样品,放置于阴凉处风干后研磨并过筛,土壤 pH、有机质、全氮、有效磷和速效钾均采用常规分析方法测定^[20]。

1.3 数据处理与统计分析

土壤综合肥力指数:

$$IFI_i = \begin{cases} \frac{x}{x_a} & x \leq x_a \\ 1 + \frac{x - x_a}{x_c - x_a} & x_a < x \leq x_c \\ 2 + \frac{x - x_c}{x_p - x_c} & x_c < x \leq x_p \\ 3 & x > x_p \end{cases} \quad (1)$$

式中: IFI_i 为养分肥力系数; x 为土壤有机质(g/kg)、全氮(g/kg)、有效磷(mg/kg)、速效钾(mg/kg)测定值; x_a 与 x_p 为分级标准下、上限; x_c 介于分级标准上、下限间; 属性值分级标准(x_a、x_p、x_c)主要参考第二次全国土壤普查标准^[21-23](表 3)。

利用修正的内梅罗公式计算土壤综合肥力指数:

$$IFI_i = \sqrt{\frac{(IFI_{i平均})^2 + (IFI_{i最小})^2}{2}} \times \frac{n-1}{n} \quad (2)$$

式中: IFI_{i平均} 与 IFI_{i最小} 分别为土壤各属性分肥力的平均值和最小值; n 为评价指标个数。

表 3 土壤各属性分级标准
Table 3 Classification standard of soil properties

分级	有机质 (g/kg)	全氮 (g/kg)	有效磷 (mg/kg)	速效钾 (mg/kg)
下限 x _a	6	0.5	10	30
拐点 x _c	20	1	20	100
上限 x _p	40	2	40	200

所有数据均使用 Excel 2010 进行整理并计算数据均值和标准误差; 使用 SPSS 20.0 进行统计分析,

通过单因素方差分析(one-way ANOVA)识别不同处理间的差异,用最小显著差异(LSD)法检验不同处理间差异的显著性,并对各观测变量进行 Pearson 相关性分析,在 $P < 0.05$ 水平检验相关系数显著性;采用 Origin 2021 绘图。

2 结果与分析

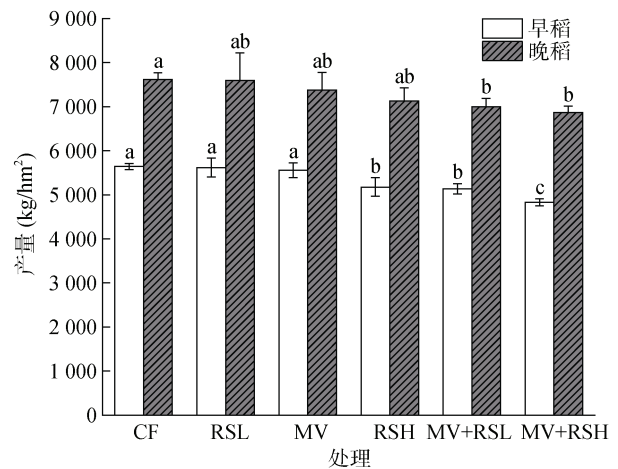
2.1 紫云英和秸秆替代化肥对双季稻产量的影响

紫云英和秸秆替代化肥对双季稻产量的影响如图 1 所示。CF 处理产量最高,早、晚稻分别为 5 640 和 7 613 kg/hm²,其次是 RSL 处理(早、晚稻平均产量分别为 5 617 和 7 596 kg/hm²)和 MV 处理(早、晚稻平均产量分别为 5 553 和 7 370 kg/hm²)。高量秸秆替代化肥显著降低了水稻产量。早稻季,与 RSL 处理相比,RSH 处理的产量降低了 7.90%。晚稻季,与 CF 处理相比,MV+RSL 和 MV+RSH 处理的产量分别降低了 8.09% 和 9.89%。在种植紫云英的条件下,随着秸秆还田替代化肥比例的增加,水稻产量呈下降趋势。早稻季,与 MV 处理相比,MV+RSL 处理的产量降低了 7.49%;与 MV+RSL 处理相比,MV+RSH 处理的产量降低了 6.03%。

2.2 紫云英和秸秆替代化肥对土壤肥力的影响

2.2.1 土壤理化性质 各处理土壤理化性质如表 4 所示。早稻季,除 RSH 处理外,各处理土壤有机质含量随着有机物料替代比例的增加而增加,土壤全氮含量与有机质含量变化呈现相同的趋势。与 CF 处

理相比,MV+RSH 处理的土壤有机质和全氮含量分别提高了 11.66% 和 7.86%。与 RSH 处理相比,MV+RSH 处理的土壤速效钾含量提高了 41.16%。晚稻季,紫云英和秸秆联合利用模式降低了土壤 pH,与 RSH 处理相比,MV+RSL 和 MV+RSH 处理 pH 分别降低了 2.17% 和 2.37%。与 CF 处理相比,RSH 处理的土壤有机质和全氮含量分别提高了 11.15% 和 7.64%。与 RSL 处理相比,RSH 处理提高了土壤有机质含量和全氮含量,但降低了土壤速效钾含量。与 RSH 处理相比,MV+RSH 处理土壤速效钾含量提高了 36.02%。



(图中小写字母不同表示同一稻季不同处理间差异显著 ($P < 0.05$), 下同)

图 1 不同处理下双季稻的产量变化

Fig. 1 Yields of early and late rice under different treatments

表 4 不同处理下土壤理化性质
Table 4 Soil physicochemical properties under different treatments

稻别	处理	pH	有机质(g/kg)	全氮(g/kg)	有效磷(mg/kg)	速效钾(mg/kg)
早稻	CF	5.19 ± 0.02 a	21.35 ± 1.48 a	1.40 ± 0.08 a	17.48 ± 3.58 a	55.05 ± 6.38 b
	RSL	5.16 ± 0.14 a	22.90 ± 2.69 a	1.44 ± 0.09 a	20.10 ± 3.75 a	67.61 ± 13.70 ab
	MV	5.19 ± 0.16 a	23.15 ± 1.80 a	1.48 ± 0.11 a	20.13 ± 5.03 a	58.68 ± 10.51 ab
	RSH	5.24 ± 0.16 a	22.97 ± 3.66 a	1.46 ± 0.23 a	16.47 ± 4.26 a	55.20 ± 2.84 b
	MV+RSL	5.28 ± 0.18 a	23.25 ± 3.33 a	1.48 ± 0.20 a	23.10 ± 10.24 a	51.54 ± 7.97 b
	MV+RSH	5.31 ± 0.21 a	23.84 ± 1.47 a	1.51 ± 0.09 a	19.33 ± 5.48 a	77.92 ± 18.51 a
晚稻	CF	4.99 ± 0.02 a	23.95 ± 1.38 a	1.57 ± 0.08 b	17.80 ± 1.31 a	47.67 ± 5.72 b
	RSL	5.04 ± 0.05 a	25.51 ± 1.88 a	1.64 ± 0.09 ab	16.13 ± 1.52 a	59.08 ± 13.25 ab
	MV	5.03 ± 0.03 a	25.72 ± 3.17 a	1.67 ± 0.19 a	17.50 ± 3.72 a	54.16 ± 6.18 b
	RSH	5.07 ± 0.04 a	26.62 ± 1.74 a	1.69 ± 0.09 a	16.23 ± 0.67 a	58.08 ± 9.34 b
	MV+RSL	4.96 ± 0.06 a	26.15 ± 2.16 a	1.68 ± 0.10 a	15.40 ± 1.40 a	65.81 ± 13.08 ab
	MV+RSH	4.95 ± 0.04 a	26.59 ± 1.59 a	1.68 ± 0.06 a	15.83 ± 1.33 a	79.00 ± 10.99 a

注: 同列不同小写字母表示同一稻季不同处理间差异显著 ($P < 0.05$), 下同。

2.2.2 土壤综合肥力指数 本研究选取土壤有机质、全氮、有效磷和速效钾作为参评指标,对各处理

土壤肥力进行评价(图 2)。紫云英与秸秆联合利用显著提高了土壤综合肥力指数(IFI)。在这一模式中,随

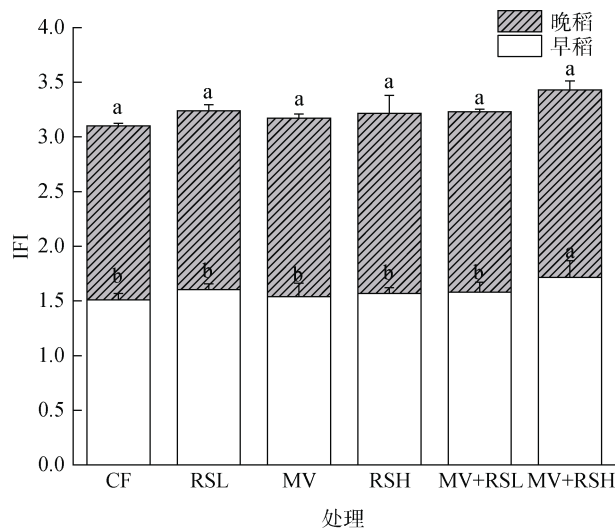


图 2 不同处理下土壤综合肥力指数
Fig. 2 Soil IFIs under different treatments

随着秸秆替代化肥比例的增加, IFI 逐渐增加。早稻季, MV+RSH 处理 IFI 最高(1.71), 与 CF 处理相比提升

了 11.70%。晚稻季, MV+RSH 处理 IFI 最高(1.71), 与 CF 处理相比提升了 7.02%。

2.3 紫云英和秸秆替代化肥对植株养分含量的影响

各处理植株养分含量如表 5 所示。紫云英和秸秆替代化肥的比例不同, 氮、磷、钾素在植株体内的分配差异明显。早稻季, 与 CF 处理相比, MV 处理秸秆氮含量显著提高, RSH、MV+RSL 和 MV+RSH 处理秸秆钾含量显著提高。与 MV 处理相比, MV+RSL 处理籽粒氮含量显著提高; 但与 MV+RSL 处理相比, MV+RSH 处理籽粒氮含量降低了 25.13%。晚稻季, 与 CF 处理相比, MV 处理和 RSH 处理显著提高了籽粒磷、钾含量。与 MV+RSL 处理相比, MV+RSH 处理籽粒氮含量降低了 24.25%。紫云英和秸秆联合利用模式中, 低量秸秆与紫云英配施在早稻季促进了植株对氮素的吸收, 但随着秸秆替代化肥的比例增加, 植株养分含量有降低的趋势。

表 5 不同处理下植株养分含量
Table 5 Nutrient contents in plants under different treatments

稻别	处理	籽粒(g/kg)			秸秆(g/kg)		
		N	P	K	N	P	K
早稻	CF	6.20 ± 0.99 b	2.86 ± 0.64 ab	2.14 ± 0.14 a	2.86 ± 0.85 b	2.05 ± 0.56 b	25.73 ± 4.76 b
	RSL	7.07 ± 0.83 ab	3.31 ± 0.88 ab	2.31 ± 0.29 a	3.29 ± 0.92 ab	2.58 ± 0.87 ab	31.08 ± 2.98 ab
	MV	6.68 ± 0.32 b	3.51 ± 0.40 a	2.14 ± 0.14 a	4.57 ± 0.51 a	3.34 ± 0.23 ab	31.32 ± 2.22 ab
	RSH	6.27 ± 0.44 b	2.52 ± 0.07 b	1.84 ± 0.60 a	3.36 ± 0.82 ab	2.46 ± 0.09 ab	37.16 ± 5.37 a
	MV+RSL	7.88 ± 0.42 a	3.44 ± 0.11 ab	2.31 ± 0.08 a	3.89 ± 0.14 ab	3.59 ± 1.03 a	37.69 ± 5.06 a
	MV+RSH	5.90 ± 0.28 b	3.17 ± 0.32 ab	2.32 ± 0.10 a	3.08 ± 1.15 ab	2.79 ± 0.21 ab	37.70 ± 1.50 a
晚稻	CF	6.35 ± 0.43 a	2.77 ± 0.10 cd	2.10 ± 0.09 cd	3.65 ± 0.49 a	2.64 ± 0.20 a	19.15 ± 1.72 a
	RSL	6.88 ± 1.16 a	3.09 ± 0.16 bc	2.29 ± 0.03 ab	3.37 ± 0.83 a	2.81 ± 0.67 a	23.83 ± 1.93 a
	MV	6.77 ± 0.58 a	3.61 ± 0.37 a	2.41 ± 0.06 a	2.79 ± 0.74 ab	2.36 ± 0.65 a	20.38 ± 2.70 a
	RSH	6.38 ± 0.70 a	3.20 ± 0.05 ab	2.39 ± 0.09 a	2.97 ± 0.74 ab	2.83 ± 0.49 a	21.80 ± 0.55 a
	MV+RSL	6.02 ± 0.43 a	3.06 ± 0.05 bc	2.20 ± 0.09 bc	2.12 ± 0.49 bc	2.45 ± 0.47 a	19.42 ± 4.87 a
	MV+RSH	4.56 ± 0.61 b	2.50 ± 0.20 d	2.05 ± 0.08 d	1.55 ± 0.45 c	2.19 ± 0.07 a	21.43 ± 0.92 a

3 讨论

3.1 紫云英和秸秆替代化肥对双季稻产量和植株养分含量的影响

我国作物秸秆数量及其养分资源量巨大, 充分利用秸秆资源是实现化肥减施增效的重要措施与途径^[24]。研究表明, 秸秆直接还田能提高产量^[25], 在减施化肥的基础上利用秸秆能保证产量稳定^[13,26], 秸秆与紫云英配施的增产效果更为显著^[17]。本研究结果表明, 在早稻季, 与 CF 处理的产量相比, 低量秸秆还田或种植翻压紫云英替代 20% 化肥均没有显著减产。与

CF 处理相比, MV 处理的水稻籽粒和秸秆氮含量显著提高, 单独种植紫云英并翻压还田提高了土壤全氮含量和速效养分含量(表 4), 促进了植株养分的吸收, 从而保证水稻产量的稳定。当化肥替代比例达 39% 及以上时, 水稻产量出现明显下降。究其原因, 一方面, 化学氮肥减施量过高, 紫云英和秸秆的养分释放较为缓慢, 短期内不足以供应作物生长^[27]; 另一方面, 晚稻季 MV+RSL 和 MV+RSH 处理土壤 pH 有降低的趋势, 有机物料投入过多降低了土壤 pH, 抑制双季稻前期分蘖的发生, 导致每穗粒数降低, 进而影响产量^[28]。在南方稻田的酸性环境下, 可以适量施

用石灰等土壤改良剂以更好地维持产量稳定。与 MV 处理相比, MV+RSL 处理显著提高了水稻籽粒氮含量。水稻秸秆的碳氮比较高而紫云英的较低, 两者协同还田能调节土壤和微生物的化学计量平衡^[29], 更有利于地上部营养的吸收和积累。值得注意的是, 在早稻季和晚稻季中, 与 MV+RSL 处理相比, MV+RSH 处理籽粒氮含量均显著降低。秸秆过量还田容易引起微生物与作物竞争有效氮素, 短期内对双季稻的生长造成影响^[30]。因此, 在紫云英和秸秆联合利用模式下, 秸秆的翻压量不宜过高。

3.2 紫云英和秸秆替代化肥对土壤综合肥力的影响

长期大量施用化学氮肥不仅会降低土壤 pH, 还会降低土壤对酸的缓冲能力, 影响土壤肥力。晚稻季, 与 RSH 处理相比, MV+RSL 和 MV+RSH 处理土壤 pH 降低, 在早稻季利用紫云英和秸秆联合还田替代了部分氮肥, 所以并没有观察到这一现象。土壤有机质含量和全氮含量是影响作物产量的关键因素。与 CF 处理相比, 其余各处理土壤有机质含量均有所提高, 这与前人的研究结果相一致^[31]。CF 处理长期没有有机物料投入, 导致易分解有机物被微生物优先利用^[32]。紫云英和秸秆等有机物料添加后, 能改变土壤微生物的群落和数量^[33], 使土壤基础养分得以被利用, 进而提高土壤有机质含量。晚稻季, 与 CF 处理相比, MV 处理显著提高了土壤全氮含量。紫云英的运用提高了土壤中的氮素残留量, 减少了稻田中的氮素损失^[34]。可能原因是紫云英腐解后的氮素养分供应相较于尿素更慢, 也更为稳定^[35]。在早稻季和晚稻季中, 与 RSH 处理相比, MV+RSH 处理均显著提高了土壤速效钾含量, 紫云英的分解补充了一定的钾素养分^[36], 与秸秆的联合利用也抵消了紫云英所消耗的养分。本文根据第二次全国土壤普查标准, 利用修正的内梅罗公式计算土壤综合肥力, 以此对土壤肥力进行评价, 土壤综合肥力指数值越大, 表示土壤肥力越好^[37]。MV+RSH 处理土壤综合肥力指数显著高于其余处理。紫云英腐解速率较快, 而秸秆的腐解速率较慢, 二者的联合利用促进了秸秆的分解及其养分释放^[38], 有利于土壤肥力的提升。

4 结论

在外源养分投入相等的条件下, 紫云英和秸秆等有机物料替代部分化肥能够提高稻田土壤肥力水平, 促进植株对养分的吸收利用。利用 2 500 kg/hm² 秸秆替代 20% 化肥, 在增加土壤有机质、全氮和速效钾含量的同时能保证水稻稳产。紫云英与秸秆联合利用

能显著改善土壤肥力状况, 但该模式在短期内不宜替代过高比例的化肥, 否则可能会有减产的风险。

参考文献:

- [1] Zhao W X, Chou J M, Li J N, et al. Impacts of extreme climate events on future rice yields in global major rice-producing regions[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2022, 19(8): 4437.
- [2] Bailey-Serres J, Parker J E, Ainsworth E A, et al. Genetic strategies for improving crop yields[J]. *Nature*, 2019, 575(7781): 109–118.
- [3] Zhang J L, Nie J, Cao W D, et al. Long-term green manuring to substitute partial chemical fertilizer simultaneously improving crop productivity and soil quality in a double-rice cropping system[J]. *European Journal of Agronomy*, 2023, 142: 126641.
- [4] 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.
- [5] Luan H, Qiu H G. Fertilizer overuse in China: Empirical evidence from farmers in four provinces [J]. *Agricultural Science & Technology*, 2013, 14(1): 193–196.
- [6] 农业部. 农业部关于印发《到 2020 年化肥使用量零增长行动方案》和《到 2020 年农药使用量零增长行动方案》的通知[J]. *中华人民共和国农业部公报*, 2015(3): 19–27.
- [7] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2019.
- [8] 刘钦普. 中国化肥面源污染环境风险时空变化[J]. *农业环境科学学报*, 2017, 36(7): 1247–1253.
- [9] 刘晓永, 李书田. 中国秸秆养分资源及还田的时空分布特征[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(21): 1–19.
- [10] 柳开楼, 胡惠文, 余喜初, 等. 香根草秸秆覆盖和化肥减施对红壤花生生产量的影响[J]. *生态科学*, 2022, 41(2): 220–226.
- [11] 马子钰, 马文林. 秸秆还田对中国农田土壤固碳效应影响的研究[J]. *土壤*, 2023, 55(1): 205–210.
- [12] 田美洁, 郭俊丽, 黎娟, 等. 长期施肥对水稻土剖面氨氧化古菌和细菌丰度及组成的影响[J]. *土壤学报*, 2022, 59(1): 285–296.
- [13] 黄巧义, 黄建凤, 黄旭, 等. 早稻秸秆还田和减钾对晚稻产量和土壤肥力的影响[J]. *环境科学*, 2022, 43(10): 4706–4715.
- [14] 张旭博, 徐明岗, 林昌虎, 等. 施肥对红壤有机碳矿化特征的影响[J]. *贵州农业科学*, 2011, 39(6): 99–102, 106.
- [15] 曹卫东, 黄鸿翔. 关于我国恢复和发展绿肥若干问题的思考[J]. *中国土壤与肥料*, 2009(4): 1–3.
- [16] Kamran M, Huang L, Nie J, et al. Effect of reduced mineral fertilization (NPK) combined with green manure on aggregate stability and soil organic carbon fractions in a fluvo-aquic paddy soil[J]. *Soil and Tillage Research*, 2021, 211: 105005.
- [17] Gao S J, Zhou G P, Rees R M, et al. Green manuring inhibits nitrification in a typical paddy soil by changing the contributions of ammonia-oxidizing Archaea and bacteria[J]. *Applied Soil Ecology*, 2020, 156: 103698.

- [18] 王飞, 王利民, 何春梅, 等. 紫云英与有机物料连续还田在黄泥田水稻稳产提质增效中的作用[J]. 土壤, 2022, 54(3): 455–463.
- [19] 崔月贞, 王吕, 吴玉红, 等. 冬绿肥联合稻秆还田对水稻产量及稻田土壤肥力的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2022, 50(7): 100–108.
- [20] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [21] 全国土壤普查办公室. 中国土种志-第五卷[M]. 北京: 中国农业出版社, 1995.
- [22] 席承藩, 章士炎. 全国土壤普查科研项目成果简介[J]. 土壤学报, 1994, 31(3): 330–335.
- [23] 施建平, 宋歌. 中国土种数据库—基于第二次土壤普查的全国性土壤数据集[J]. 中国科学数据, 2016, 1(2): 1–12.
- [24] 宋大利, 侯胜鹏, 王秀斌, 等. 中国秸秆养分资源数量及替代化肥潜力[J]. 植物营养与肥料学报, 2018, 24(1): 1–21.
- [25] Xiao L G, Zhao R Q, Kuhn N J. Straw mulching is more important than no tillage in yield improvement on the Chinese Loess Plateau[J]. Soil and Tillage Research, 2019, 194: 104314.
- [26] 张世洁, 张刚, 王德建, 等. 秸秆还田配施氮肥对稻田增产及田面水氮动态变化的影响[J]. 土壤学报, 2020, 57(2): 435–445.
- [27] 柳开楼, 韩天富, 李文军, 等. 紫云英不同翻压年限下驱动水稻产量变化的土壤理化因子分析[J]. 中国水稻科学, 2021, 35(3): 291–302.
- [28] 曾勇军, 周庆红, 吕伟生, 等. 土壤酸化对双季早、晚稻产量的影响[J]. 作物学报, 2014, 40(5): 899–907.
- [29] Zhou G P, Gao S J, Chang D N, et al. Using milk vetch (*Astragalus sinicus* L.) to promote rice straw decomposition by regulating enzyme activity and bacterial community[J]. Bioresource Technology, 2021, 319: 124215.
- [30] Yang L J, Zhang L L, Yu C X, et al. Nitrogen fertilizer and straw applications affect uptake of ^{13}C , ^{15}N -Glycine by soil microorganisms in wheat growth stages[J]. PLoS One, 2017, 12(1): e0169016.
- [31] Zhou G P, Gao S J, Lu Y H, et al. Co-incorporation of green manure and rice straw improves rice production, soil chemical, biochemical and microbiological properties in a typical paddy field in Southern China[J]. Soil and Tillage Research, 2020, 197: 104499.
- [32] Li Z Q, Zhang X, Xu J, et al. Green manure incorporation with reductions in chemical fertilizer inputs improves rice yield and soil organic matter accumulation[J]. Journal of Soils and Sediments, 2020, 20(7): 2784–2793.
- [33] Dhillon G S, Gillespie A, Peak D, et al. Spectroscopic investigation of soil organic matter composition for shelterbelt agroforestry systems[J]. Geoderma, 2017, 298: 1–13.
- [34] 谭周进, 李倩, 李建国, 等. 稻草还田量对晚稻土微生物数量及活度的动态影响[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(3): 670–673.
- [35] Liang H, Li S, Zhang L, et al. Long-term green manuring enhances crop N uptake and reduces N losses in rice production system[J]. Soil and Tillage Research, 2022, 220: 105369.
- [36] Li T, Gao J S, Bai L Y, et al. Influence of green manure and rice straw management on soil organic carbon, enzyme activities, and rice yield in red paddy soil[J]. Soil and Tillage Research, 2019, 195: 104428.
- [37] 阚文杰, 吴启堂. 一个定量综合评价土壤肥力的方法初探[J]. 土壤通报, 1994, 25(6): 245–247.
- [38] 宋莉, 韩上, 鲁剑巍, 等. 油菜秸秆、紫云英绿肥及其不同比例配施还田的腐解及养分释放规律研究[J]. 中国土壤与肥料, 2015(3): 100–104.