

DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2022.03.004

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. 土壤, 2022, 54(3): 455–463.

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^①

王飞¹, 王利民¹, 何春梅¹, 刘彩玲¹, 李清华¹, 张辉¹, 游燕玲¹, 黄毅斌¹, 黄建诚²

(1 福建省农业科学院土壤肥料研究所, 福州 350013; 2 闽侯县土壤肥料技术站, 福建闽侯 350100)

摘要: 为明确紫云英与不同有机物料还田在黄泥田改土培肥与水稻化肥减量增效中的作用, 基于连续 11 a 定位试验, 研究了不施肥(T₀, CK)、单施化肥(T₁)、仅翻压紫云英(T₂)、紫云英与水稻秸秆联合还田(T₃)、紫云英与牛粪配施还田(T₄), 以及紫云英与水稻秸秆联合还田+40% 化肥(T₅)处理对水稻产量、籽粒营养品质及稻田肥力的影响。结果表明, 与 CK 相比, 各施肥处理籽粒历年平均产量增幅 11.4%~21.0%, 秸秆平均产量增幅 17.1%~40.2%, 差异均显著; 其中以 T₅ 提升尤为明显, 其籽粒产量与秸秆产量较 T₁ 分别提高 3.4% 和 6.6%; 有效穗是产量差异的重要性状因子。各施肥处理成熟期植株地上部氮、磷、钾吸收量较 CK 分别增幅 14.3%~30.6%、8.9%~32.7%、2.9%~47.2%, 其中氮、磷吸收量以 T₄ 最高, 钾吸收量以 T₅ 最高。与 CK 相比, 第 10 年施肥处理籽粒氨基酸总量增幅 11.5%~20.6%, 必需氨基酸增幅 11.1%~19.8%; 与 T₁ 相比, T₅ 处理的必需氨基酸与氨基酸总量分别提高 5.7% 和 6.5%, 差异显著。水稻分蘖盛期 T₅ 处理土壤微生物生物量碳含量比 T₁ 增加 15.2%, 微生物生物量氮含量增加 42.3%, 差异均显著。在水稻成熟期, 与 T₁ 相比, 翻压紫云英或与有机物料组合处理的土壤有机质含量增幅 9.7%~16.7%, 全氮含量增幅 10.9%~14.8%, 同样以 T₅ 增幅最为明显, T₄、T₅ 处理的速效钾含量也显著高于 T₁。相关分析表明, 水稻产量、籽粒氨基酸含量与土壤有机质、全氮、速效钾含量以及微生物生物量碳氮均呈显著正相关。综上, 翻压紫云英或与有机物料联合还田均不同程度提高了黄泥田土壤养分库容, 促进了植株养分吸收与产量提升, 连续 11 a 紫云英与秸秆或牛粪联合还田可全部替代黄泥田水稻化肥施用, T₅ 处理在提高产量、改善土壤肥力和籽粒氨基酸品质方面作用尤为明显。土壤有机质、全氮、速效钾、微生物生物量碳氮是影响水稻产量和稻米氨基酸品质的重要肥力因子。

关键词: 紫云英; 有机物料; 黄泥田; 籽粒氨基酸; 土壤性质

中图分类号: S142; S141; S156 **文献标志码:** A

Effects of Continuous Return of Milk Vetch (*Astragalus sinicus* L.) and Organic Materials on Stable Yield, Improved Quality and Efficiency in Yellow-mud Paddy Field

WANG Fei¹, WANG Limin¹, HE Chunmei¹, LIU Cailing¹, LI Qinghua¹, ZHANG Hui¹, YOU Yanling¹, HUANG Yibin¹, HUANG Jiancheng²

(1 Soil and Fertilizer Institute, Fujian Academy of Agricultural Sciences, Fuzhou 350013, China; 2 Minhou Station of Soil and Fertilizer Technology, Minhou, Fujian 350100, China)

Abstract: To evaluate the applying effects of milk vetch and different organic materials on soil amelioration and chemical fertilizer decrement, a 11-year fertilization experiment was conducted since 2009 in the red paddy field in Fuzhou City, Fujian Province. Six fertilization treatments were designed, including T₀ (CK, without fertilization), T₁ (chemical fertilizer), T₂ (milk vetch alone), T₃ (milk vetch combining straw), T₄ (milk vetch combining cow dung) and T₅ (milk vetch combining straw plus 40% chemical fertilizer). The effects of different fertilization on soil nutrients, rice yield, nutritional quality and soil fertility were investigated. The results showed that compared with CK, rice grain and straw yields in fertilization were significantly increased by 11.4%–21.0% and 17.1%–40.2% respectively, especially for the T₅, which were significantly increased by 3.4% and 6.6% respectively compared with T₁. Effective panicle was an important character factor responsible for yield variation. In addition, compared with CK at mature stage, fertilization increased N, P and K uptake by 14.3%–30.6%, 8.9%–32.7% and 2.9%–47.2%

^①基金项目: 国家重点研发计划子课题项目(2018YFD02003035*)、福建省自然科学基金项目(2020J011358, 2021J01479)和国家绿肥产业技术体系项目(CARS-22-G-01)资助。

作者简介: 王飞(1976—), 男, 福建福州人, 本科, 副研究员, 主要从事土壤资源评价与持续利用研究。E-mail: fjwangfei@163.com

respectively in rice aboveground plants. The highest absorption of N and P were found in T₄, and the highest absorption of K was in T₅. Total and essential amino acid contents in rice grains under fertilization in the 10th year were increased by 11.5%–20.6% and 11.1%–19.8% respectively, compared with CK. Furthermore, compared with T₁, essential and total amino acid contents in T₅ were significantly increased by 5.7% and 6.5% respectively. Meanwhile, soil fertility was improved by applying different organic matters, especially for T₅, compared with T₁, soil microbial biomass carbon (SMBC) and nitrogen (SMBN) concentrations in T₅ at the peak of tillering stage were significantly increased by 15.2% and 42.3% respectively. Additionally, soil organic matter and total nitrogen contents at mature stage were increased by 9.7%–16.7% and 10.9%–14.8% respectively in organic treatments compared with T₁, and T₅ with the highest increment. In addition, available potassium contents in T₄ and T₅ were significantly higher than that of T₁. Correlation analysis revealed that the contents of soil organic matter, total nitrogen, available potassium, SMBC and SMBN were significantly positively correlated with rice yield, total and essential amino acid contents, respectively. In conclusion, continuous return of milk vetch and organic materials could ameliorate soil properties, increase nutrient uptake and rice yield. For 11 consecutive years, the combination of Chinese milk vetch and straw or cow dung could replace chemical fertilizer application in yellow-mud paddy field, T₅ was the best fertilization in increasing rice yield and amino acid quality of rice grains as well as soil fertility. Soil organic matter, total nitrogen, available potassium, SMBC and SMBN are important fertility factors affecting rice yield and amino acid of rice grains.

Key words: Chinese milk vetch; Organic materials; Yellow-mud paddy field; Amino acid of grain; Soil property

我国是世界水稻(*Oryza sativa* L.)生产第一大国,常年播种面积约 0.3 亿 hm²。在水稻种植过程中,由于长期大量施用化肥而产生的面源污染等负面影响日益突出。而另一方面,我国有机肥源丰富,年产秸秆约 10 亿 t(风干),合计总养分约 2 000 万 t;粪尿类资源实物量约为 46 亿 t(鲜),养分资源量约为 5 000 万 t;绿肥约 1 亿 t(鲜),合计总养分约 97 万 t^[1]。随着国家和社会对提升耕地质量、保障农产品品质和生态环境安全日益关注,利用有机物料替代部分化肥的水稻科学种植技术越来越受重视。研究表明,紫云英、水稻秸秆和畜禽排泄物是水稻生产中替代化肥的常用有机肥源,是提高水稻产量与品质的重要举措^[2-4]。2008—2019 年间开展的 11 个联合定位试验结果($n = 930$)表明,冬种紫云英在不减肥或者减肥 20% 条件下增产效果显著,水稻产量增加幅度分别为 6.53% 和 4.15%^[5]。黄棕壤潜育性水稻土连续种植紫云英并配施化肥,与 100% 化肥相比,化肥减施 20%~40%,水稻不减产,同时氮肥农学效率和氮肥偏生产力提高,增幅分别为 11.64%~149.65% 和 2.66%~149.92%^[6],另外,关于紫云英、有机物料与化肥配施对水稻产量和土壤肥力影响的研究也较多。研究表明,紫云英、稻草和禽粪能有效提高土壤中间团聚体和轻组比例,促进稻田碳、氮的稳定和固定^[7],长期施肥降低了土壤 DOC/SOC,但施用绿肥减缓了 DOC/SOC 下降,说明绿肥不仅有利于土壤有机碳提高,同时有利于土壤有机碳生态功能的稳定^[8]。但是,不同有机物料由于自身碳氮结构与理化性质存在差

异^[9-10],其还田施用对土壤质量影响也不尽相同,并最终影响水稻产量和品质^[11]。此外,受到稻田土壤类型的影响,不同土壤所需的有机物料种类可能也存在差异,需针对区域特定作物、土壤与气候选择适宜的有机物料还田方式。

黄泥田属渗育型水稻土,是福建等南方稻区主要的中低产田类型之一。福建黄泥田面积约占水稻土面积的 30%,该类土壤主要分布于山地丘陵、山前倾斜平原、滨海台地和河谷阶地,存在酸、瘦、黏、旱等障碍因素^[12],当前承担着地力提升与化肥减施增效双重任务。有机物料合理还田能增加黄泥田有机碳固存,提高水稻产量和品质^[13-14]。然而,不同种类有机物料联合还田对黄泥田肥力影响的研究甚少,目前尚不清楚黄泥田绿肥等有机物料联合还田下化肥替代潜力,以及土壤理化性质变化与水稻产量和品质的关系。为此,基于福建黄泥田连续 11 a 的定位试验,研究紫云英与有机物料联合还田对黄泥田水稻产量、养分吸收利用及土壤性质的影响,探讨土壤肥力因子与水稻产量和品质之间的内在联系,旨在为南方中低产田改土培肥、化肥替代及作物品质提升提供理论依据与技术支撑。

1 材料与方 法

1.1 试验设计

试验设在福州市闽侯县白沙镇农业部福建耕地保育科学观测试验站。土壤类型为黄泥田,成土母质为低丘坡积物。试验前耕层土壤理化性状:pH 5.26,

有机质 24.4 g/kg, 碱解氮 171.6 mg/kg, 有效磷 13.5 mg/kg, 速效钾 83.4 mg/kg。试验始于 2009 年, 设置 6 个处理, 分别为不施肥(T₀, CK)、单施化肥(T₁)、仅翻压紫云英(T₂)、紫云英与水稻秸秆联合还田(T₃)、紫云英与牛粪配施还田(T₄), 以及紫云英与水稻秸秆联合还田+40% 化肥(T₅)。每处理重复 3 次, 完全随机区组排列, 小区面积为 15 m²。小区间用水泥田埂隔开, 筑高 20 cm, 埋深 40 cm, 以减少小区间串水串肥和侧渗。氮肥用尿素, 磷肥用过磷酸钙, 钾肥用氯化钾。每茬各施肥处理磷肥全部基施, 氮、钾肥 60% 基施, 40% 在分蘖期追施。常规化肥用量为施氮量(N)135 kg/hm², N:P₂O₅:K₂O=1:0.4:0.7, 每年紫云英翻压量为 18 000~22 500 kg/hm², 牛粪用量为 3 000 kg/hm²(干基), 秸秆全量还田平均 3 750 kg/hm²(干基)。水稻种植密度 20 × 10⁵ 丛/hm²。紫云英均在盛花期(3—4 月份)翻压, 前 2 a 为异地翻压, 后 9 a 为原田种植翻压, 干耕翻压至 20 cm 土层。2009 年紫云英品种为‘弋江籽’, 2010—2016 年为‘闽紫 7 号’, 2017 年为‘信阳籽’, 2018—2019 年为‘闽紫 8 号’。原田种植时多余的紫云英移出, 不足时从外源补充。紫云英鲜草养分多年均值为有机碳 58.7 g/kg、N 4.0 g/kg、P₂O₅ 0.9 g/kg、K₂O 2.7 g/kg, 水分含量 85.9%。牛粪干物质养分多年均值为有机碳 253.4 g/kg、N 13.5 g/kg、P₂O₅ 7.7 g/kg 和 K₂O 8.9 g/kg, 水稻秸秆干物质养分多年均值为有机碳 349.9 g/kg、N 7.9 g/kg、P₂O₅ 3.5 g/kg 和 K₂O 28.9 g/kg。种植的单季稻品种 2009—2011 年为‘宜香优 2292’, 2012—2016 年为‘中浙优 1 号’, 2017—2019 年为‘中浙优 8 号’。插秧时间为每年的 6 月下旬至 7 月上旬, 收割时间为 10 月中旬。各处理每年养分投入情况见表 1。

表 1 紫云英与有机物料还田下各处理养分每年投入量
Table 1 Annual nutrient input from combined return of milk vetch and organic materials in each treatment

处理	化肥(kg/hm ²)			紫云英与有机物料(kg/hm ²)		
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
T ₀	0	0	0	0	0	0
T ₁	135.0	54.0	94.5	0	0	0
T ₂	0	0	0	81.0	18.2	54.7
T ₃	0	0	0	110.6	31.3	163.1
T ₄	0	0	0	121.5	41.3	81.4
T ₅	54.0	21.6	37.8	110.6	31.3	163.1

注: 紫云英翻压量均为 20 250 kg/hm²。

1.2 样品采集与分析

1.2.1 植株样品采集 2017—2019 年水稻收割时,

采集各处理小区的籽粒与秸秆样品, 于 105 °C 杀青 15 min, 65 °C 烘干 24 h 至恒重后磨碎, 用于测定水稻籽粒和秸秆养分含量, 2018 年(第 10 年)同时采集分蘖期水稻植株样品。植株氮磷钾采用 H₂SO₄-H₂O₂ 消煮, 全氮用凯氏法测定, 全磷用钒钼黄比色法测定, 全钾用火焰光度计法测定^[15]; 籽粒氨基酸含量按照 GB 5009.124—2016 检测, 用全自动氨基酸分析仪 LA8080 进行分析。

1.2.2 土壤样品采集 于 2018 年水稻分蘖盛期采集各小区新鲜土样, 置于无菌的自封袋中, 封口后置于冰盒中低温保存运回实验室, 剔除动植物残体和石块, 采用氯仿熏蒸-0.5 mol/L K₂SO₄ 浸提法测定土壤微生物生物量碳、氮, 总有机碳采用分析法测定, 其中, 以未熏蒸土样浸提的氮作为可溶性氮。2017—2019 年水稻收获后, 在各处理小区通过五点采样法采集 0~20 cm 耕层土壤样品, 2019 年(第 11 年)加采环刀样品供土壤容重测定。土样风干后经磨细、过筛, 上述均采用常规分析方法测定土壤理化性质^[15]。

1.3 数据处理

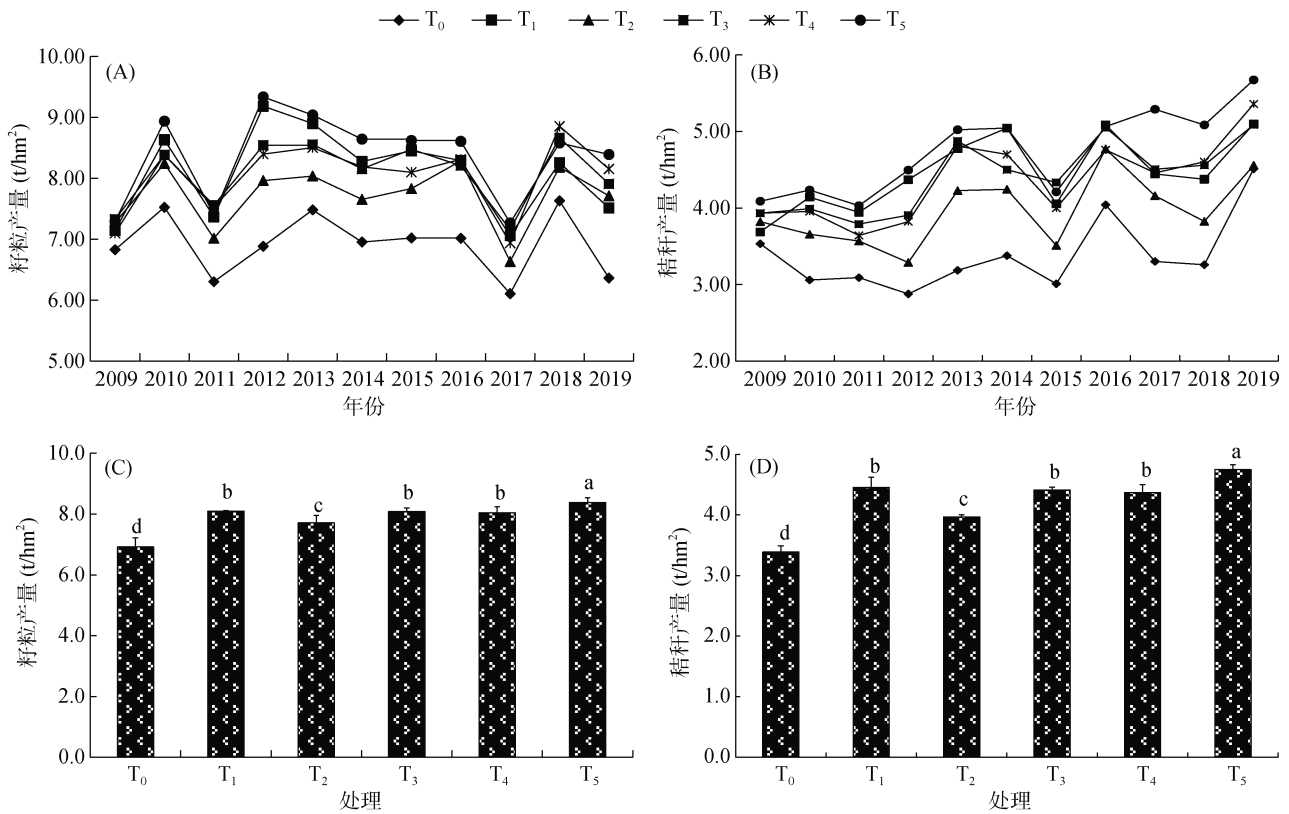
地上部养分吸收量(kg/hm²)=籽粒产量×籽粒养分含量+秸秆产量×秸秆养分含量

土壤养分表观平衡(kg/hm²)=养分投入-养分输出
数据采用 DPS 软件进行方差分析 LSD 多重比较, 并进行相关性分析。

2 结果与分析

2.1 紫云英与有机物料连续还田对水稻产量的影响

连续 11 a 紫云英与有机物料连续还田的水稻产量动态变化(图 1A、1B)可以看出, 不同施肥均明显增加了水稻籽粒和秸秆产量, T₅ 处理增产效果最为明显, 不同年份籽粒产量较 CK 增幅 6.8%~35.6%; T₂ 处理产量增幅最小, 不同年份籽粒产量较 CK 增幅 6.4%~21.2%。从 2009—2019 年平均产量来看, 相比 CK, 不同施肥处理的水稻籽粒增产 11.4%~21.0%, 秸秆增产 17.1%~40.2%, 差异均显著(图 1C、1D), 其中紫云英与秸秆联合还田+40%化肥处理 T₅ 效果尤为明显, 其连续 11 a 的籽粒与秸秆平均产量分别比 T₁ 处理提高 3.4% 和 6.6%, 差异显著。从年际产量增产效果来看, 前 3 年(2009—2011 年)与后 3 年(2017—2019 年)的 T₅ 籽粒产量分别比 T₁ 提高 2.1% 与 6.2%, 显示随着试验进程的进行, T₅ 与 T₁ 的产量差异变幅增幅在进一步扩大, 说明秸秆与紫云英联合还田具有较高的化肥替代率与维持水稻增产潜力。



(图中小写字母不同表示处理间差异显著($P < 0.05$), 下同)

图 1 紫云英与有机物料连续还田下水稻籽粒与秸秆产量动态变化(A, B)以及 2009—2019 年平均产量(C, D)

Fig. 1 Dynamic changes(A, B)and average yields(C, D)of rice grains and straws affected by continuous return of milk vetch and organic materials from 2009 to 2019

另外, 在未施用化肥条件下, 仅翻压紫云英的 T_2 处理籽粒产量与秸秆产量分别相当于 T_1 的 95.2% 与 89.0%, 差异均显著, 而紫云英与秸秆或牛粪联合还田(T_3 和 T_4)的水稻产量与 T_1 处理未有明显的差异, 表明对中低产黄泥田而言, 紫云英+秸秆或紫云英+牛粪模式与水稻习惯施肥产量基本相当。

从 2017—2019 年水稻产量经济性状表现进一步可以看出(表 2), 与 CK 相比, 翻压紫云英绿肥的有效穗数增幅 23.0%~31.2%, 差异均显著; 其中以 T_5 处理增幅最为明显, 其较单施化肥 T_1 处理提高 6.6%, 差异显著。紫云英与有机物料联合还田处理的每穗实粒数较单施化肥 T_1 处理均有不同程度提高, 但未达到显著差异。施肥均不同程度提高了千粒重, 同样以 T_5 处理提升最为明显, 较 CK 提高 3.0%, 差异显著; 但与单施化肥 T_1 处理相比无明显差异。说明有效穗是紫云英与有机物料联合还田与单施化肥处理水稻产量差异的重要性状因子。

2.2 紫云英与有机物料连续还田对水稻植株养分累积吸收的影响

从第 10 年分蘖期各处理水稻植株养分吸收累积

来看, 与 CK 相比, 施肥均显著提高了植株氮素含量(表 3), 各处理增幅 43.1%~64.4%, 其中以 T_5 处理增幅最为明显, 其也显著高于 T_1 处理; 施肥植株磷、钾含量也均有增加的趋势, 其中 T_5 处理的钾素含量较 CK 与 T_1 分别提高 42.9%与 24.6%, 差异均显著。从 2017—2019 年成熟期来看, 不同施肥处理的籽粒氮、磷、钾含量总体高于 CK, 其中 T_1 与 T_4 处理的籽粒氮素含量较 CK 分别提高 12.1% 与 12.8%, 差异显著, 但与 T_1 相比, 紫云英及与有机物料处理的籽粒氮、磷、钾含量呈下降趋势; 施肥处理的秸秆氮、

表 2 紫云英与有机物料连续还田下水稻产量经济性状
Table 2 Economic characters of rice yield affected by continuous return of milk vetch and organic materials

处理	有效穗($10^4/\text{hm}^2$)	每穗实粒数(粒)	千粒重(g)
T_0	$169.8 \pm 3.8 \text{ d}$	$163.3 \pm 6.7 \text{ a}$	$22.85 \pm 0.31 \text{ b}$
T_1	$208.9 \pm 6.7 \text{ c}$	$154.5 \pm 13.9 \text{ a}$	$23.40 \pm 0.27 \text{ a}$
T_2	$215.1 \pm 5.4 \text{ bc}$	$148.9 \pm 38.1 \text{ a}$	$23.52 \pm 0.48 \text{ a}$
T_3	$221.8 \pm 1.5 \text{ ab}$	$183.2 \pm 5.5 \text{ a}$	$23.33 \pm 0.39 \text{ ab}$
T_4	$211.1 \pm 8.9 \text{ c}$	$180.6 \pm 10.6 \text{ a}$	$23.34 \pm 0.17 \text{ ab}$
T_5	$222.7 \pm 7.1 \text{ a}$	$179.9 \pm 15.4 \text{ a}$	$23.53 \pm 0.27 \text{ a}$

注: 表中数据为 2017—2019 年考种平均数据 \pm 标准差。同一列小写字母不同表示处理间差异显著($P < 0.05$)。

表 3 紫云英与有机物料连续还田下水稻籽粒和秸秆养分含量(g/kg)

Table 3 Nutrient contents in rice grains and straws affected by continuous return of milk vetch and organic materials

生育期	植株部位	养分	T ₀	T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	T ₅
分蘖盛期	水稻植株	N	13.28 ± 0.92 c	19.01 ± 1.01 b	19.70 ± 1.57 ab	20.27 ± 1.69 ab	20.82 ± 0.34 ab	21.84 ± 1.65 a
		P	2.56 ± 0.07 a	2.88 ± 0.16 a	2.56 ± 0.49 a	2.67 ± 0.28 a	2.87 ± 0.23 a	2.83 ± 0.17 a
		K	21.44 ± 0.12 c	24.60 ± 0.10 bc	25.84 ± 0.30 b	30.99 ± 0.46 a	22.76 ± 0.09 bc	30.64 ± 0.19 a
成熟期	籽粒	N	9.91 ± 0.86 b	11.11 ± 0.30 a	10.49 ± 0.30 ab	10.36 ± 0.30 b	11.18 ± 0.22 a	10.38 ± 0.75 b
		P	2.78 ± 0.12 bc	3.11 ± 0.16 a	2.68 ± 0.16 c	2.92 ± 0.18 abc	3.02 ± 0.21 ab	2.94 ± 0.14 abc
		K	2.74 ± 0.03 ab	2.91 ± 0.25 a	2.56 ± 0.05 b	2.88 ± 0.13 a	2.78 ± 0.28 ab	2.79 ± 0.07 ab
	秸秆	N	6.31 ± 1.43 a	6.21 ± 0.66 a	5.76 ± 0.54 a	5.22 ± 0.27 a	5.92 ± 0.29 a	6.04 ± 0.57 a
		P	1.21 ± 0.25 ab	1.15 ± 0.25 b	1.20 ± 0.19 ab	1.07 ± 0.15 b	1.42 ± 0.05 a	1.27 ± 0.20 ab
		K	19.15 ± 0.94 abc	17.91 ± 0.78 bcd	17.10 ± 1.98 d	19.21 ± 0.61 ab	17.23 ± 1.39 cd	20.07 ± 1.39 a

注: 分蘖盛期为 2018 年平均数据 ± 标准差; 成熟期为 2017—2019 年平均数据 ± 标准差。表中同行数据小写字母不同表示处理间差异显著($P < 0.05$), 下表同。

磷、钾含量较 CK 呈总体降低趋势, 但除 T₂ 处理秸秆钾含量较 CK 显著降低外, 其余各施肥处理秸秆氮、磷、钾含量与 CK 相比均无显著差异。

表 4 显示, 各施肥处理植株籽粒氮、磷、钾吸收量较 CK 分别增幅 17.2%~32.7%、7.6%~27.9%、4.2%~23.5%, 氮、磷吸收量以 T₄ 处理最高, 钾吸收量以 T₃ 处理最高; 秸秆氮、磷、钾吸收量较 CK 分别增幅 5.9%~41.4%、14.5%~56.5%、17.1%~53.6%, 吸收量均以 T₅ 处理最高, 其与 CK 差异均

显著, 且 T₅ 处理磷、钾吸收量也显著高于 T₁; 从地上部来看, 施肥处理氮、磷、钾吸收量较 CK 分别增幅 14.3%~30.6%、8.9%~32.7%、2.9%~47.2%, 其中氮、磷吸收量以 T₄ 处理吸收量最高, 钾吸收量以 T₅ 处理最高, 各施肥处理氮素吸收量与 CK 差异均显著。

从 2017—2019 年养分表观盈亏来看(表 5), 各施肥处理除 T₂ 处理外氮素均实现平衡或盈余; 但各施肥处理的磷素亏缺 12.27~39.35 kg/hm²; 从钾素表观

表 4 紫云英与有机物料连续还田下水稻成熟期籽粒和秸秆养分吸收量(kg/hm²)

Table 4 Nutrient uptake by rice grains and straws affected by continuous return of milk vetch and organic materials at mature stage

植株部位	养分	T ₀	T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	T ₅
籽粒	N	67.78 ± 7.63 c	85.55 ± 4.19 ab	79.41 ± 2.99 b	82.52 ± 2.76 ab	89.95 ± 4.12 a	83.87 ± 7.89 ab
	P	18.69 ± 1.89 c	23.62 ± 1.59 a	20.11 ± 1.22 bc	22.92 ± 1.53 ab	23.90 ± 2.41 a	23.71 ± 0.74 a
	K	18.23 ± 1.14 c	22.01 ± 2.37 a	18.99 ± 0.60 bc	22.52 ± 0.57 a	21.79 ± 2.63 ab	22.39 ± 0.30 a
秸秆	N	22.69 ± 6.85 b	28.50 ± 4.42 ab	24.03 ± 2.42 b	24.24 ± 0.71 b	28.18 ± 0.36 ab	32.08 ± 5.72 a
	P	4.38 ± 1.28 b	5.32 ± 1.38 b	5.03 ± 0.94 b	5.02 ± 0.92 b	6.71 ± 0.58 a	6.85 ± 1.35 a
	K	70.37 ± 10.98 d	83.05 ± 0.94 bc	72.16 ± 10.53 cd	90.72 ± 7.04 b	82.41 ± 3.91 bc	108.07 ± 15.71 a
地上部分	N	90.47 ± 13.53 c	114.04 ± 6.83 ab	103.44 ± 5.06 b	106.76 ± 3.47 ab	118.13 ± 3.92 a	115.95 ± 9.61 a
	P	23.07 ± 3.03 c	28.94 ± 2.32 a	25.13 ± 1.64 bc	27.93 ± 2.31 ab	30.61 ± 1.99 a	30.56 ± 1.55 a
	K	88.60 ± 12.05 d	105.06 ± 3.30 b	91.15 ± 11.00 cd	113.24 ± 7.30 b	104.20 ± 2.74 bc	130.47 ± 16.00 a

注: 表中数据为 2017—2019 年平均数据 ± 标准差, 下表同。

表 5 紫云英与有机物料连续还田下土壤养分表观盈亏

Table 5 Soil nutrient apparent balance under continuous return of milk vetch and organic materials

处理	养分输入(kg/hm ²)			养分输出(kg/hm ²)			养分表观平衡(kg/hm ²)		
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
T ₀	0	0	0	90.47	52.83	106.32	-90.47	-52.83	-106.32
T ₁	135	54	94.5	114.04	66.27	126.07	20.96	-12.27	-31.57
T ₂	81	18.2	54.7	103.44	57.55	109.38	-22.44	-39.35	-54.68
T ₃	110.6	31.3	163.1	106.76	63.96	135.89	3.84	-32.66	27.21
T ₄	121.5	41.3	81.4	118.13	70.10	125.04	3.37	-28.80	-43.64
T ₅	164.6	52.9	200.9	115.95	69.98	156.56	48.65	-17.08	44.34

盈亏来看, T₃ 与 T₅ 处理的钾素表现呈现盈余, 其余处理均呈现亏缺状态; 表明紫云英与有机物料联合还田, 尤其是结合秸秆还田, 有助于农田生态系统氮、钾养分平衡。

2.3 紫云英与有机物料连续还田对水稻籽粒氨基酸含量的影响

籽粒氨基酸是表征稻米营养品质的重要成分。从第 10 年各处理籽粒氨基酸含量来看, 与 CK 相比, 施肥均显著提高了水稻籽粒中必需氨基酸与氨基酸总量(图 2), 其中, 籽粒氨基酸总量增幅为 11.5% ~ 20.6%, 必需氨基酸增幅 11.1% ~ 19.8%, 均以 T₅ 处理最高。与单施化肥 T₁ 处理相比, T₅ 处理的必需氨基酸与氨基酸总量分别增加 5.7% 和 6.5%, 差异均显著, 而处理 T₁、T₂、T₃、T₄ 处理间未有明显差异。上述说明, 紫云英与水稻秸秆联合还田, 不仅可实现化肥减量 60%, 而且可提高籽粒氨基酸品质。

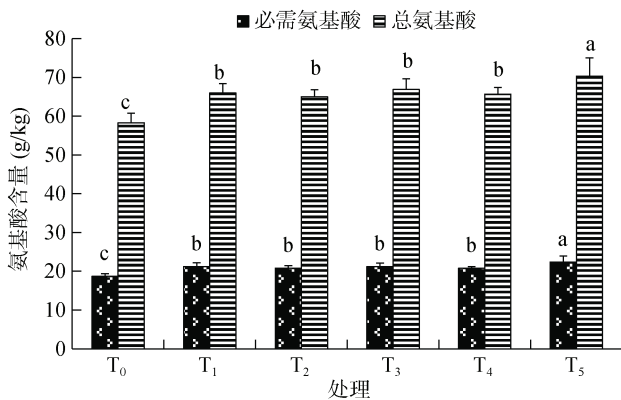


图 2 紫云英与有机物料连续还田下水稻籽粒氨基酸含量 (第 10 年)

Fig. 2 Amino acid contents in rice grains affected by continuous return of milk vetch and organic materials (10th year)

2.4 紫云英与有机物料连续还田对土壤性质的影响

从第 10、11 年不同处理的土壤性质(表 6, 表 7)来看, 与 CK 相比, 施肥均不同程度提高了分蘖盛期

土壤微生物生物量碳、氮含量, 其中微生物生物量碳增幅 6.6% ~ 22.9%, 除 T₁ 外, 紫云英与有机物料组合各处理与 CK 差异均显著, 其中 T₅ 处理提升最为明显; 紫云英与有机物料组合处理的微生物生物量碳、氮含量均高于单施化肥处理 T₁, 其中 T₅ 比 T₁ 二者分别提高 15.2%、42.3%, 差异显著。对可溶性氮而言, T₄ 与 T₅ 处理的土壤可溶性氮有高于单施化肥处理 T₁ 的趋势, 但未达到显著水平。在水稻成熟期, 各处理土壤 pH 无显著差异, 但与 T₁ 相比, 翻压紫云英或紫云英与有机物料联合还田有提高土壤 pH 的趋势。翻压紫云英或与有机物料联合还田的土壤有机质与全氮含量均显著高于 CK 与 T₁, 与 T₁ 相比, 有机质含量增幅 9.7% ~ 16.7%, 全氮含量增幅 10.9% ~ 14.8%, 其中以 T₅ 增幅最为明显, T₁ 处理的土壤有机质及全氮含量与 CK 无明显差异。施肥总体有提高土壤碱解氮、有效磷含量的趋势, 但未达到显著差异水平。施肥同样提高了土壤速效钾含量, 较 CK 增幅 33.1% ~ 139.5%, 其中 T₃、T₄、T₅ 处理与 CK 差异显著, T₄、T₅ 处理的速效钾含量也显著高于 T₁ 处理。此外, 与 T₁ 相比, 紫云英与有机物料还田处理有降低土壤容重的趋势。上述结果说明黄泥田连续翻压紫云英或结合有机物料还田, 耕层养分库容增加, 微生

表 6 紫云英与有机物料连续还田下水稻分蘖期土壤性质
Table 6 Soil properties at tillering stage affected by continuous return of milk vetch and organic materials

处理	微生物生物量碳 (mg/kg)	微生物生物量氮 (mg/kg)	可溶性氮 (mg/kg)
T ₀	555.51 ± 66.97 c	34.15 ± 8.44 b	18.58 ± 3.26 ab
T ₁	592.52 ± 69.61 bc	34.33 ± 12.68 b	18.44 ± 2.75 ab
T ₂	639.49 ± 52.28 ab	39.19 ± 9.44 ab	16.90 ± 2.27 b
T ₃	616.23 ± 50.40 b	45.64 ± 5.16 ab	16.88 ± 0.28 b
T ₄	614.73 ± 85.21 b	42.81 ± 11.62 ab	21.47 ± 5.09 a
T ₅	682.50 ± 62.43 a	48.85 ± 7.06 a	21.37 ± 1.86 a

注: 表中数据为 2018 年平均数据 ± 标准差。同列数据小写字母不同表示处理间差异显著 ($P < 0.05$), 下表同。

表 7 紫云英与有机物料连续还田下水稻成熟期土壤性质变化

Table 7 Soil properties at mature stage affected by continuous return of milk vetch and organic materials

处理	pH	有机质 (g/kg)	全氮 (g/kg)	容重 (g/cm ³)	碱解氮 (mg/kg)	有效磷 (mg/kg)	速效钾 (mg/kg)
T ₀	5.52 ± 0.12 a	21.91 ± 0.93 b	1.22 ± 0.07 b	1.12 ± 0.05 a	209.5 ± 9.5 a	10.34 ± 5.67 a	23.36 ± 3.83 c
T ₁	5.47 ± 0.11 a	22.96 ± 2.22 b	1.28 ± 0.12 b	1.15 ± 0.04 a	206.4 ± 15.9 a	17.54 ± 2.84 a	31.09 ± 9.94 bc
T ₂	5.55 ± 0.13 a	25.19 ± 0.50 a	1.42 ± 0.01 a	1.03 ± 0.12 a	213.6 ± 5.4 a	12.71 ± 6.23 a	39.93 ± 19.98 abc
T ₃	5.58 ± 0.21 a	25.41 ± 0.90 a	1.43 ± 0.05 a	1.06 ± 0.06 a	215.4 ± 14.5 a	12.12 ± 3.18 a	41.04 ± 13.26 ab
T ₄	5.50 ± 0.26 a	25.85 ± 0.72 a	1.47 ± 0.05 a	1.04 ± 0.08 a	217.5 ± 17.0 a	15.00 ± 2.75 a	55.95 ± 8.29 a
T ₅	5.59 ± 0.31 a	26.80 ± 0.89 a	1.47 ± 0.03 a	1.05 ± 0.11 a	220.2 ± 20.6 a	11.49 ± 5.67 a	54.29 ± 11.95 a

注: 容重为 2019 年数据(第 11 年), 其余为 2018 年数据(第 10 年)。

物活性增强,土壤趋于疏松,土壤理化、生化特性得到一定程度改善。

2.5 紫云英与有机物料连续还田下水稻产量、籽粒品质与土壤因子间的关联

由表8可知,水稻籽粒、秸秆产量与水稻分蘖盛期土壤微生物生物量碳、氮均呈显著正相关。在水稻成熟期,水稻产量、籽粒氨基酸含量与土壤有机质、全氮、速效钾含量均呈显著正相关。水稻产量和品质指标与土壤容重间相关性并不明显。上述可知,水稻产量、籽粒氨基酸含量与土壤有机质、全氮、速效钾、微生物生物量碳氮之间密切相关,长期紫云英与有机物料还田有助于土壤理化、生化性质改善,进而促进水稻产量与籽粒氨基酸品质提升。

3 讨论

3.1 紫云英与有机物料联合还田对黄泥田土壤性质的影响

土壤肥力是农田生产力形成的基础。研究表明,湘南红壤地区绿肥联合早稻草全部还田和晚稻留高茬还田措施可提高土壤有机质含量,稳定土壤氮素供应的长期效果显著,是湘南红壤地区水稻高产稳产和可持续发展相对较好的耕作制度^[16]。湘南双季稻区绿肥还田下,与习惯施肥相比,绿肥与化肥氮减量20%~40%能维持土壤磷素与钾素的供给,且化肥氮减量40%仍能获得高产稳产,且氮肥利用率最高,产量稳定性最好^[17]。冬种绿肥可提高土壤微生物生物量碳、微生物生物量氮和微生物商,是提升土壤肥力的高效措施^[18]。黄泥田(渗育型水稻土)为南方丘陵区广泛分布的一类中低产田,以往研究显示,黄泥田化肥配施有机肥或结合秸秆还田处理的土壤固碳速率分别是单独化肥处理的1.59倍、1.32倍^[14]。

本研究结果也进一步证实紫云英与有机物料还田处理均不同程度提高黄泥田土壤微生物生物量碳氮及土壤有机质、全氮含量,改善了土壤理化、生化性质,尤其是紫云英与水稻秸秆联合还田+40%化肥处理的效果最为明显,这可能与紫云英、有机物料联合还田下碳氮适宜配比及良好的生态功能有关。例如,畜禽粪便类有机物料中脂肪酸、蛋白质、多糖等成分含量较高,施入土壤后经过微生物作用,直接影响土壤碳、氮组分及其含量;秸秆类有机物料中木质素、纤维素和半纤维素含量较高,这些成分一般较难矿化,施入土壤后会提高土壤有机质的重组分含量^[6]。紫云英其根瘤具有较强的固氮功能,据测算,种植压青25 000~30 000 kg/hm²紫云英鲜草一般能增加稻田土壤纯氮75~90 kg^[19]。紫云英还田可改变土壤微生物种群结构,有助于形成“激发效应”^[20]。绿肥与有机物料联合还田,可能形成良好的碳氮互济效果,进而促进碳氮循环与良好土壤生态功能的形成。相关研究表明,稻秆(C/N 63:1)与豆科绿肥(C/N 14:1)联合还田,可缓解二者单独应用时氮素固定与碳氮流失问题^[21]。稻草-绿肥联合还田培肥地力效果明显,土壤有机质、全氮含量均比单独翻压绿肥与秸秆还田增加,且联合还田下有效养分提升更为全面^[22]。稻秸全覆盖与种植绿肥协同利用模式1 a后可显著提高土壤脲酶活性,2 a后显著提高土壤过氧化氢酶和蔗糖酶活性,3 a后的土壤过氧化氢酶和蔗糖酶活性增幅均是最大^[23]。与单独利用稻秆与紫云英相比,稻秆与紫云英联合还田通过改变产甲烷菌与产甲烷氧化菌群落结构降低了甲烷排放^[24]。另外,紫云英根系能分泌低分子量的有机酸,螯合酸性土壤中的Al-P和Fe-P中的Al³⁺、Fe³⁺,使难溶性Al-P和Fe-P中的P释放出来供水稻吸收利用^[25]。本研究条件下,

表8 水稻产量及品质与土壤性质之间的相关性
Table 8 Correlation coefficients between rice yield, grain quality and soil properties

生育期	土壤相关因子	籽粒产量	秸秆产量	籽粒氨基酸总量	籽粒必需氨基酸
分蘖盛期	微生物生物量碳	0.53*	0.56*	0.38	0.35
	微生物生物量氮	0.48*	0.48*	0.30	0.21
	可溶性氮	0.17	0.33	0.28	0.26
成熟期	pH	-0.02	-0.24	0.03	0.08
	有机质	0.77**	0.64**	0.54*	0.50*
	全氮	0.79**	0.59**	0.52*	0.48*
	容重	-0.27	-0.01	-0.26	-0.27
	碱解氮	0.31	0.16	-0.16	-0.18
	有效磷	0.33	0.30	0.03	0.01
	速效钾	0.75**	0.69**	0.60**	0.58**

注:籽粒产量与秸秆产量为2018—2019年平均;*,**分别表示相关性达 $P<0.05$ 和 $P<0.01$ 显著水平; $n=18$ 。

紫云英与牛粪联合还田处理(T₄)以及紫云英与秸秆联合还田+40% 化肥处理(T₅),在磷素投入低于或相当于单施化肥处理(T₁)的前提下(表 1),地上部磷素的累积量要高于 T₁处理(表 4),进一步说明紫云英与有机物料联合还田可活化土壤磷素,提高对土壤磷素的吸收利用能力。

3.2 紫云英与有机物料联合还田对水稻产量及籽粒品质的影响

绿肥种植利用是中国传统农业技术的精华,也是绿色生态循环农业发展的关键性举措,为中国粮食稳定和绿色增效发挥着十分重要的作用^[26]。亚热带双季稻种植模式下,适量紫云英还田配施化肥除可减少化肥用量外,也是亚热带双季稻区兼顾提升稻米产量和培肥土壤的有效技术,其中化肥减量 40% 配合 22 500 ~ 30 000 kg/hm² 紫云英的配比综合效果较好^[27]。本研究条件下,黄泥田连续 11 a 监测研究表明,与单施化肥相比,紫云英与牛粪、秸秆联合还田处理(T₃、T₄、T₅)的产量或相当,或显著增产,其中 T₅ 处理在减量 60% 化肥前提下仍实现显著增产 3.4%,显示出紫云英与秸秆联合还田在水稻化肥替代方面的巨大潜力。究其原因,首先这可能是紫云英与有机物料中含有丰富的钾素及中、微量元素,更能为水稻生长提供所需均衡养分。相关研究表明,南方黄泥田水稻增产效果与土壤钾肥投入量、速效钾含量及钾素盈亏量有关^[28];其次,从养分供应速率来看,紫云英与其他有机物料性质存在差异,不同有机物料腐解 1 a 后的残留率表现为绿肥<秸秆<根茬~有机肥^[29],即不同的有机物料腐解速率不同,导致养分释放与供应速率表现差异,紫云英与有机物料联合还田可形成速缓相济的供肥速率,保证养分供应较稳长,保证水稻生育期不脱肥。从中也可看出,对于南方丘陵山区广泛分布的中低产黄泥田而言,紫云英在水稻营养供给方面发挥着重要作用,连续多年紫云英与秸秆或牛粪联合还田,其水稻产量与习惯施肥条件下的产量基本相当,且随着时间延长,该模式与习惯施肥的产量差距正在缩小,本研究条件下第 10 ~ 11 年年籽粒产量甚至高于习惯施肥(图 1A),即紫云英与秸秆或牛粪联合还田可全部替代化肥施用,这为丘陵山区中低产田有机稻生产的肥源选择提供了新的思路。当然,从粮食高产创建与减肥增效带动稻区绿色发展考虑,紫云英与水稻秸秆联合还田+40% 化肥的模式较适合作为黄泥田稻区推荐施肥模式。

水稻籽粒氨基酸含量是表征稻米营养成分的重要指标,与食味品质密切相关,并受施肥措施的影响^[11]。与 T₁ 处理相比, T₅ 可明显提高水稻籽粒氨

基酸和必需氨基酸含量,其中氮、钾元素可能起到了积极作用。一方面,水稻植株体内氮吸收量增加,可促进植株体内合成更多的酶和叶绿素,从而加速光合作用,促进氨基酸合成^[30],本研究条件下, T₅ 处理分蘖盛期的植株氮素含量较 T₁ 提高 14.9%,为后期籽粒氨基酸的合成奠定了基础。另一方面,施钾一定程度上可提高稻米中清蛋白、球蛋白、谷蛋白等营养品质较高的蛋白质组分和蛋白质中赖氨酸、苏氨酸、精氨酸等必需氨基酸含量,从而在一定程度上改善了稻米的营养品质、食味品质和贮藏品质^[31]。本研究下, T₅ 处理的理论供钾水平要明显高于 T₁(表 1),有利于促进籽粒氨基酸含量的提高。值得一提的是,紫云英单独翻压或与有机物料联合还田的处理(T₂、T₃、T₅)籽粒总氮含量(粗蛋白)有低于 T₁ 处理的趋势。相关研究表明,对氮肥而言,一定范围内施氮量越高,稻谷蛋白质含量越高^[32]。本研究条件下, T₂、T₃、T₄ 处理的氮总量投入均低于 T₁, T₅ 虽然总氮投入高于 T₁,但紫云英与秸秆中的有机氮素在单季内并未充分腐解完全,实际供应的氮素速效养分可能也低于 T₁ 处理,从而导致紫云英还田的各处理籽粒蛋白质含量并未增加。由于氨基酸是蛋白质的基本组成单位,本研究条件下 T₅ 处理的氨基酸含量显著高于 T₁,但蛋白质含量并未表现相同趋势,可能是蛋白质合成过程中受到其他因素影响,这有待进一步分析。本研究也进一步显示,水稻产量、籽粒氨基酸含量与黄泥田土壤有机质、全氮及速效钾含量均呈显著正相关。对中低产黄泥田而言,有机质及养分含量普遍缺乏,提高土壤有机质和全氮含量直接或间接扩大了黄泥田养分库容,使养分供应更加均衡,从而促进产量和品质提升。上述说明,土壤有机质、全氮、速效钾、微生物生物量碳氮是影响黄泥田水稻产量、籽粒氨基酸含量的重要肥力因子。

4 结论

紫云英与不同有机物料联合还田可显著提高黄泥田水稻产量,尤其是紫云英与秸秆联合还田+40% 化肥模式,该模式较单施化肥显著提升了水稻产量、籽粒氨基酸总量和必需氨基酸含量。有效穗是不同施肥处理产量差异的重要性状因子。与单施化肥相比,长期不同有机物料联合还田尤其是紫云英与秸秆联合还田+40% 化肥处理明显提高了分蘖期土壤微生物生物量碳氮含量,并增加了成熟期土壤有机质、全氮与速效钾含量。土壤有机质、全氮、速效钾、微生物生物量碳氮是影响水稻产量和稻米氨基酸品质的

重要肥力因子。综上,连续 11 a 紫云英与不同有机物料连续联合还田均不同程度提高了黄泥田土壤有机质与养分,促进了植株养分吸收,进而提升水稻产量和氨基酸品质,紫云英+秸秆或紫云英+牛粪还田模式可全部替代黄泥田水稻化肥施用,紫云英与水稻秸秆联合还田+40% 化肥模式在提升产量与籽粒氨基酸品质以及改善稻田肥力方面作用尤为明显。

参考文献:

- [1] 牛新胜, 巨晓棠. 我国有机肥料资源及利用[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(6): 1462-1479.
- [2] Fang Y, Wang F, Jia X B, et al. Distinct responses of ammonia-oxidizing bacteria and Archaea to green manure combined with reduced chemical fertilizer in a paddy soil[J]. Journal of Soils and Sediments, 2019, 19(4): 1613-1623.
- [3] Islam M, Khatu N, Hafeez M K, et al. The effect of zinc fertilization and cow dung on sterility and quantitative traits of rice[J]. Journal of Aridland Agriculture, 2021, 7: 60-67.
- [4] Maneepitak S, Ullah H, Paothong K, et al. Effect of water and rice straw management practices on yield and water productivity of irrigated lowland rice in the Central Plain of Thailand[J]. Agricultural Water Management, 2019, 211: 89-97.
- [5] 高嵩涓, 周国朋, 曹卫东. 南方稻田紫云英作冬绿肥的增产节肥效应与机制[J]. 植物营养与肥料学报, 2020, 26(12): 2115-2126.
- [6] 刘春增, 常单娜, 李本银, 等. 种植翻压紫云英配施化肥对稻田土壤活性有机碳氮的影响[J]. 土壤学报, 2017, 54(3): 657-669.
- [7] Yu Q G, Ye J, Sun W C, et al. Influences of organic material application on the physically separated soil organic carbon and nitrogen fractions in rice fields[J]. Journal of Soils and Sediments, 2021, 21(2): 1079-1088.
- [8] 夏文建, 秦文婧, 刘佳, 等. 长期绿肥利用下红壤性水稻土有机碳和可溶性有机碳的垂直分布特征[J]. 浙江农业学报, 2020, 32(5): 878-885.
- [9] Azhar M, Zia Ur Rehman M, Ali S, et al. Comparative effectiveness of different biochars and conventional organic materials on growth, photosynthesis and cadmium accumulation in cereals[J]. Chemosphere, 2019, 227: 72-81.
- [10] 张玉树, 丁洪, 王飞, 等. 长期施用不同肥料的土壤有机氮组分变化特征[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(10): 1981-1986.
- [11] 陈帅君, 边嘉宾, 丁得亮, 等. 不同有机肥处理对水稻品质和食味的影响[J]. 中国稻米, 2016, 22(4): 42-45.
- [12] 王飞, 李清华, 林诚, 等. 福建黄泥田肥力质量特征与最小数据集[J]. 中国生态农业学报, 2018, 26(12): 1855-1865.
- [13] 王飞, 林诚, 李清华, 等. 长期不同施肥对南方黄泥田水稻籽粒品质性状与土壤肥力因子的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(2): 283-290.
- [14] 王飞, 李清华, 林诚, 等. 不同施肥模式对南方黄泥田耕层有机碳固存及生产力的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(6): 1447-1454.
- [15] 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.
- [16] 高菊生, 黄晶, 杨志长, 等. 绿肥和稻草联合还田提高土壤有机质含量并稳定氮素供应[J]. 植物营养与肥料学报, 2020, 26(3): 472-480.
- [17] 张璐, 黄晶, 高菊生, 等. 长期绿肥与氮肥减量配施对水稻产量和土壤养分含量的影响[J]. 农业工程学报, 2020, 36(5): 106-112.
- [18] 高嵩涓, 曹卫东, 白金顺, 等. 长期冬种绿肥改变红壤稻田土壤微生物生物量特性[J]. 土壤学报, 2015, 52(4): 902-910.
- [19] 林多胡, 顾荣申. 中国紫云英[M]. 福州: 福建科学技术出版社, 2000.
- [20] Gao S J, Chang D N, Zou C Q, et al. Archaea are the predominant and responsive ammonia oxidizing prokaryotes in a red paddy soil receiving green manures[J]. European Journal of Soil Biology, 2018, 88: 27-35.
- [21] Zhou G P, Cao W D, Bai J S, et al. Co-incorporation of rice straw and leguminous green manure can increase soil available nitrogen (N) and reduce carbon and N losses: An incubation study[J]. Pedosphere, 2020, 30(5): 661-670.
- [22] 周国朋, 谢志坚, 曹卫东, 等. 稻草高茬-紫云英联合还田改善土壤肥力提高作物产量[J]. 农业工程学报, 2017, 33(23): 157-163.
- [23] 刘威, 耿明建, 秦自果, 等. 种植绿肥与稻秸协同还田对单季稻田土壤有机碳库和酶活性的影响[J]. 农业工程学报, 2020, 36(7): 125-133.
- [24] Zhou G P, Gao S J, Xu C X, et al. Co-incorporation of Chinese milk vetch (*Astragalus sinicus* L.) and rice (*Oryza sativa* L.) straw minimizes CH₄ emissions by changing the methanogenic and methanotrophic communities in a paddy soil[J]. European Journal of Soil Science, 2020, 71: 924-939.
- [25] 林新坚, 兰忠明, 张辉, 等. 不同紫云英基因型根系分泌物中有机酸成分分析[J]. 草业学报, 2014, 23(4): 146-152.
- [26] 王强盛, 薄雨心, 余坤龙, 等. 绿肥还田在稻作生态系统的效应分析及研究展望[J]. 土壤, 2021, 53(2): 243-249.
- [27] 陈静蕊, 秦文婧, 王少先, 等. 化肥减量配合紫云英还田对双季稻产量及氮肥利用率的影响[J]. 水土保持学报, 2019, 33(6): 280-287.
- [28] 王飞, 林诚, 李清华, 等. 不同施肥措施提高南方黄泥田供钾能力及钾素平衡的作用[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(3): 669-677.
- [29] 王金洲, 卢昌艾, 张文菊, 等. 中国农田土壤有机物料腐解特征的整合分析[J]. 土壤学报, 2016, 53(1): 16-27.
- [30] 蒋跃林, 张庆国, 张仕定, 等. 大气 CO₂ 含量增加对小麦籽粒营养品质的影响[J]. 中国农业大学学报, 2005, 10(1): 21-25.
- [31] 汤利, 周米平, 马振江, 等. 钾肥对稻米蛋白质组分和氨基酸含量的影响[J]. 吉林农业大学学报, 1994, 16(S1): 121-123, 142.
- [32] 王康君, 葛立立, 范苗苗, 等. 稻米蛋白质含量及其影响因素的研究进展[J]. 作物杂志, 2011(6): 1-6.