

绿肥与增效材料联合应用提升四川丘陵区稻田 土壤保水保肥能力的机理

全紫曼¹, 漆燕^{1*}, 梁琴¹, 敬昱霖¹, 莫坤¹, 高嵩涓², 曹卫东^{3*}

(1 南充市农业科学院, 四川南充 637000; 2 南京农业大学资源与环境科学学院, 江苏南京 210095; 3 中国农业科学院
农业资源与农业区划研究所 / 北方干旱半干旱耕地高效利用全国重点实验室, 北京 100081)

摘要:【目的】研究绿肥与增效材料联合应用对四川丘陵区土壤质量及水稻生长的影响, 为本区域绿肥与增效材料合理应用提供理论依据。【方法】田间定位试验设冬闲 (WF) 和冬种紫云英 (GM) 两种植植制度, 不施增效材料 (CK) 和施用田菁炭 (Z1)、膨润土 (Z2)、脲酶抑制剂 (Z3) 3 种增效材料处理, 分析了冬闲及绿肥制度下配施不同增效材料对水稻产量、养分吸收, 以及土壤物理 (容重、孔隙度、团聚体)、化学 (土壤 pH 及养分)、生物学 (微生物生物量、酶活性) 性状的影响, 并通过土壤质量指数 (SQI) 对土壤质量进行了综合评价。【结果】与 GM-CK 处理相比, 2023 年 GM-Z2 处理稻谷产量显著增加 7.8%, GM-Z3 处理 2023、2024 年稻谷产量分别显著增加 9.7%、13.0%。与 WF-Z2 处理相比, GM-Z2 处理在 2023、2024 年间稻谷产量分别显著增加 18.3%、17.6%; 与 WF-Z3 处理相比, GM-Z3 处理在 2023、2024 年间稻谷产量分别显著增加 14.6%、17.7%。所有处理中, GM-Z3 处理的稻谷产量最高。与 GM-CK 和 WF-Z3 相比, GM-Z3 地上部植株氮、磷、钾养分积累量均显著提高。相比 GM-CK、WF-Z1 处理, GM-Z1 处理土壤容重显著降低, 土壤有机碳、全氮、微生物量碳含量及孔隙度、蔗糖酶活性显著提升; 相比 GM-CK 和 WF-Z2 处理, GM-Z2 处理土壤有效磷含量显著提升。两种植植制度下, Z1 处理的土壤容重显著降低, 团聚体粒径分布明显改善, 孔隙度及有效磷、速效钾含量显著提高; Z3 处理的土壤团聚体粒径分布明显改善, 土壤全氮、速效钾含量显著提高。运用最小数据集权重对土壤质量进行综合评价表明, 与 GM-CK、WF-Z1 相比, GM-Z1 的 SQI 分别显著提升 14.5%、28.9%; 与 GM-CK 和 WF-Z3 相比, GM-Z3 的 SQI 分别显著提升 5.9%、11.8%; 所有处理中, GM-Z1 处理的 SQI 最高, 达 0.581。【结论】在四川丘陵区紫色土水稻种植系统中, 冬种紫云英可显著提升土壤的综合肥力, 与增效材料联合应用可进一步强化紫云英对产量和土壤的改良效果。冬种紫云英配施脲酶抑制剂主要通过减缓氨挥发与氮素流失来提高土壤全氮含量; 冬种紫云英配施田菁炭提高微生物活性, 促进有机碳转化与养分循环, 同时增强土壤团聚体稳定性, 提升土壤保水保肥能力, 进而减少紫云英腐解过程中氮素的淋溶损失。

关键词: 稻田; 紫云英; 田菁炭; 膨润土; 脲酶抑制剂; 微生物量; 土壤质量指数

Mechanism of combined application of green manure and synergistic materials on the capacity of nutrient and water retention of paddy fields in the hilly areas of Sichuan

QUAN Zi-man¹, QI Yan^{1*}, LIANG Qin¹, JING Yu-lin¹, MO Kun¹, GAO Song-juan², CAO Wei-dong^{3*}

(1 Nanchong Academy of Agricultural Sciences, Nanchong, Sichuan 637000, China; 2 College of Resources and Environmental
Sciences, Nanjing Agricultural University, Nanjing, Jiangsu 210095, China; 3 Institute of Agricultural Resources and
Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences / State Key Laboratory of Efficient Utilization of
Arable Land in China, Beijing 100081, China)

收稿日期: 2025-09-01 接受日期: 2026-06-23

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2021YFD1700200); 南充市农业科学院青年基金项目 (QJYB2411); 现代农业产业技术体系建设专项资金 (绿肥, CARS22); 国家现代农业产业技术体系四川创新团队 (SCCXTD-2024-12)。

联系方式: 全紫曼 E-mail: 1220206422@qq.com

* 通信作者 漆燕 E-mail: 526834668@qq.com; 曹卫东 E-mail: caoweidong@caas.cn

Abstract: [Objectives] To investigate the effects of green manure combined with synergistic materials on soil quality and rice growth in the hilly regions of Sichuan, aiming to provide technical and theoretical support for the rational utilization of green manure and the application of synergistic materials in paddy fields within this region. **[Methods]** The long-term field experiment included two planting systems: winter fallow (WF) and winter planting milk vetch (GM), as well as four combinations of synergistic materials involving without synergistic materials application (CK), *Sesbania* biochar (Z1), bentonite (Z2), and urease inhibitor (Z3). The effects of different synergistic materials on rice yield and nutrient uptake under two cropping systems were analyzed. Additionally, physical properties (bulk density, porosity, aggregates), chemical properties (pH and nutrients), and biological properties (microbial biomass carbon and nitrogen, enzyme activity) were analyzed. The soil quality was fully evaluated by calculating the soil quality index (SQI). **[Results]** Compared with GM-CK, the yield of rice under the GM-Z2 treatment was significantly increased by 7.8% in 2023, while that under the GM-Z3 treatment was significantly increased by 9.7% and 13.0% in 2023 and 2024, respectively. Compared with WF-Z2, the yield of rice under the GM-Z2 treatment was significantly increased by 18.3% and 17.6% in 2023 and 2024, respectively. Compared with WF-Z3, the yield of rice under the GM-Z3 treatment was significantly increased by 14.6% and 17.7% in 2023 and 2024, respectively. The GM-Z3 treatment had the best effect on improving grain yield. Compared with GM-CK and WF-Z3 treatments, GM-Z3 significantly increased the nitrogen, phosphorus, and potassium uptake in the above-ground parts of rice plants. Compared with GM-CK and WF-Z1 treatments, the GM-Z1 treatment significantly reduced soil bulk density while increasing soil organic carbon content, total nitrogen content, microbial biomass carbon content, porosity, and sucrase activity. Compared with GM-CK and WF-Z2 treatments, the GM-Z2 treatment significantly increased soil available phosphorus content. Under both cropping systems, the Z1 treatment significantly reduced soil bulk density and significantly increased soil aggregate size distribution, soil porosity, available phosphorus content, and available potassium content. In contrast, the Z3 treatment significantly increased soil aggregate size distribution, soil total nitrogen content, and available potassium content. A comprehensive evaluation of soil quality using the minimum data set method indicated that compared with GM-CK and WF-Z1, the soil quality index under the GM-Z1 treatment was significantly increased by 14.5% and 28.9%, respectively. Compared with GM-CK and WF-Z3, the soil quality index under the GM-Z3 treatment was significantly increased by 5.9% and 11.8%, respectively. The GM-Z1 treatment had the best effect on improving soil quality, and the soil quality index was 0.581. **[Conclusions]** In the purple soil paddy rice cropping system of the hilly region of Sichuan, winter cultivation of *Astragalus sinicus* (Chinese milk vetch) significantly enhances integrated soil fertility. The co-application of synergistic amendments further optimizes its effects on yield improvement and soil amelioration. Specifically, the combined use of *A. sinicus* with a urease inhibitor primarily elevates soil total nitrogen content by mitigating ammonia volatilization and nitrogen loss. The integration of milk vetch with *Sesbania* biochar stimulates microbial activity, thereby facilitating organic carbon transformation and nutrient cycling. Concurrently, it reinforces soil aggregate stability and improves water and nutrient retention capacity, effectively minimizing nitrogen leaching losses during the decomposition of milk vetch.

Keywords: paddy fields; milk vetch; *Sesbania* biochar; bentonite; urease inhibitor; microbial quotient; soil quality index

四川是我国西部重要的粮食主产区, 水稻生产对于保障国家粮食安全意义重大。然而, 全省中低产田占比较大, 粮食稳产增产面临较大压力^[1]。长期以来, 为追求高产而过量施用化肥, 致使稻田土壤退化, 氮 (N) 素利用率与产量效应持续下降。紫云

英 (*Astragalus sinicus* L.) 是我国南方稻区的主推冬季绿肥作物, 单季生物固氮量可达 $N\ 32.8\ kg/hm^2$, 翻压还田后能有效补充后茬水稻的氮素需求^[2]。研究表明, 我国南方稻区紫云英-水稻轮作模式下, 减施 40% 氮肥可实现水稻稳产, 减施 20% 氮肥可提升产

量 4.15%^[3]，且紫云英种植区较传统冬闲田土壤有机质年均增加 0.40 g/kg^[4]。此外，种植翻压紫云英在降低土壤容重、增强土壤团聚体稳定性及改善土壤微生态环境等方面也具有显著效果^[5-8]。然而，紫云英翻压还田后腐解速率较快，易造成养分损失^[9]。因此，如何提升紫云英养分利用效率，已成为当前绿肥高效还田技术研究的核心问题。

生物炭通过其多孔结构能显著改善土壤物理性质，增强保水保肥能力和通气性、减少养分流失，同时能够促进有益微生物生长，从而优化根际环境，提高作物产量^[10-11]。膨润土凭借其独特的强吸水膨胀性和高阳离子交换能力，在改善土壤物理结构、增强持水保肥能力、提升养分利用率及土壤有机质含量方面效果显著^[12-13]。脲酶抑制剂能通过暂时抑制土壤脲酶活性，延缓尿素水解速度，减少氨挥发和氮淋溶损失，使更多氮素被作物吸收利用，在维持或减少氮肥用量的同时提升作物产量^[14-15]。最新研究表明，绿肥与生物炭协同施用能够增加土壤有机碳矿化、溶解性有机碳浓度和微生物衍生化合物含量^[16]，并可显著增加土壤真菌多样性，降低病原菌丰度^[17]。生物炭基肥与紫云英联合应用，有利于提高氮素利用率，促进水稻养分吸收，减少稻田氮肥用量^[18-19]。紫云英与膨润土、脲酶抑制剂协同提升水稻产量及土壤有机碳含量方面的效果也有论证^[20]。但这些研究多聚焦于土壤碳氮含量、水稻产量等单一指标，缺乏针对绿肥与增效材料配施对四川丘陵区稻田土壤质量影响的综合评价研究，尤其是紫云英与不同增效材料联合应用对土壤物理-化学-生物性质的多维调控机制尚未阐明。

土壤肥力水平是土壤养分、酶活性和微生物数量等各因素共同作用的结果，单因素分析存在极大

的局限性和不可靠性，因此越来越多的研究引入能够综合评价土壤质量的指标。其中，最小数据集能从大量候选参数中选取出最大限度代表整体信息的关键数据集，从而提高数据分析的效率和准确性，是目前较为常见的土壤质量评价方法^[21]。本研究在冬种紫云英基础上，添加膨润土、脲酶抑制剂、田菁炭 3 种增效材料，基于耕层土壤物理-化学-生物性质，构建最小数据集系统评价不同配施方案在改善土壤质量方面的综合效应，系统分析不同配施方案对四川丘陵区水稻产量的影响，以期为本区域稻田制定科学的绿肥与增效材料联合应用增产培肥策略提供依据，为紫色土耕地保育与水稻绿色生产提供理论依据和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地位于四川省南充市顺庆区李家镇崇仙境村 (N 31°5'45"、E 106°8'1")，属中亚热带湿润季风气候，海拔 292.8 m，年平均温度 17℃，全年降雨量 1284 mm，年日照 1360 h。田间试验始于 2022 年，土壤类型为紫色水稻土，试验前土壤基本理化性质为：pH 8.05，有机碳 8.00 g/kg，全氮 0.94 g/kg，有效磷 4.39 mg/kg，速效钾 70.3 mg/kg。

1.2 试验设计

田间设冬闲和冬种紫云英两个种植模式，每个模式下，水稻季设 4 个增效材料处理，具体处理所用材料及用量见表 1。小区面积 15 m²，每个处理 3 次重复，各小区随机区组排列。每年于 9 月下旬播种紫云英，播种量 37.5 kg/hm²，绿肥季不施肥，次年紫云英盛花期原位翻压，翻压前在小区施加增效

表 1 试验处理及增效材料用量

Table 1 Experimental treatment and application volumes of synergistic materials

种植模式 Cropping pattern	处理编号 Treatment code	增效材料 Synergistic material	增效材料施用量 (kg/hm ²) Application volumes of synergistic materials
冬闲 (WF) Winter fallow	WF-CK		
	WF-Z1	田菁炭 <i>Sesbania</i> biochar (Z1)	1500
	WF-Z2	膨润土 Bentonite (Z2)	1500
	WF-Z3	脲酶抑制剂 Urease inhibitor (Z3)	3
紫云英 (GM) Milk vetch	GM-CK		
	GM-Z1	田菁炭 <i>Sesbania</i> biochar (Z1)	1500
	GM-Z2	膨润土 Bentonite (Z2)	1500
	GM-Z3	脲酶抑制剂 Urease inhibitor (Z3)	3

材料, 种类及用量见表 1。随后覆水移栽水稻。水稻行距 0.33 m, 株距 0.2 m, 单株栽插, 基本苗 15 万株/hm², 紫云英翻压后 20 天左右移栽。各小区等量供应氮、磷、钾肥, N 为 150 kg/hm² (尿素 N 46%)、P₂O₅ 为 75 kg/hm² (过磷酸钙 P₂O₅ 12%)、K₂O 为 75 kg/hm² (氯化钾 K₂O 60%)。磷钾肥全部作底肥, 氮肥分 3 次施入 (底肥: 分蘖肥: 穗肥=6: 3: 1), 插秧前 1 天施底肥, 水稻移栽后 5~7 天时施分蘖肥, 主茎幼穗长 1.0~2.0 cm 时施穗肥。供试水稻品种为‘花优 357’, 紫云英品种为‘弋江种’。脲酶抑制剂购置于河南神雨生物科技有限公司; 膨润土购置于湖南省湘潭县杨嘉桥镇天捷建筑材料工厂, 其 pH 5.49, 全氮含量 0.021%; 田菁炭 (自制) 采用田菁地上部秸秆在 550℃ 至 680℃ 下炭化 20~25 min 制得, 其 pH 8.96, 全碳含量 65.9%, 全氮含量 0.46%。

1.3 样品采集与分析

于 2023 和 2024 年水稻收获期, 测定稻谷及秸秆产量, 各小区单打单收、晒干后称重测产。2024 年 8 月水稻收获期采集植株样品, 每小区随机取 3 丛水稻, 105℃ 杀青 30 min, 65℃ 烘干至恒重, 籽粒、秸秆分别粉碎后测定氮、磷、钾含量。全氮含量采用凯氏定氮法测定, 全磷含量采用硫酸-过氧化氢消煮-钼锑抗比色法测定, 全钾含量采用火焰光度计法测定^[22]。

于 2024 年 8 月水稻收获期, 采集 0—20 cm 土层土壤样品。多点采样混合均匀后用四分法保留样品, 一部分土壤自然风干, 用于测定土壤 pH、土壤团聚体及养分性状; 另一部分存放于 4℃ 冰箱用于测定土壤微生物量碳、氮, 以及土壤磷酸酶、脲酶、蔗糖酶活性。土壤团聚体组成采用湿筛法测定^[23]。每个小区随机选择 3 个点位, 采用环刀法测定 0—20 cm 土层土壤容重及孔隙度, 土壤 pH 值 (水土比 5: 1) 采用 pH 计测定, 土壤全氮采用半微量凯氏定氮法测定, 有效磷采用 Olsen 法测定, 速效钾采用 NH₄OAC 浸提—火焰光度法测定, 土壤有机碳采用重铬酸钾—浓硫酸外加热法测定, 微生物量碳 (MBC)、微生物量氮 (MBN) 含量采用氯仿熏蒸法测定^[22]。土壤脲酶、蔗糖酶、磷酸酶活性分别采用靛酚蓝比色法、3, 5-二硝基水杨酸比色法、磷酸苯二钠比色法进行测定^[24]。

1.4 数据分析

试验数据用 Excel 2003 软件进行统计分析, 采用双因素方差 (ANOVA) 分析种植制度、增效材料及

二者交互作用对稻田土壤质量和水稻生长的影响, 并通过最小显著性差异 (LSD) 法进行多重比较。采用主成分分析确定最小数据集, 所有数据分析采用 DPS V9.50 完成, 用 Origin 2021 作图。

微生物熵 (microbial quotient) 可表征单位土壤中微生物生物量的相对水平, 体现微生物对土壤养分的利用能力。其值越高, 表明土壤养分固持与积累能力越强。计算公式如下^[25]:

$$\text{微生物熵} = \frac{\text{MBC}}{\text{SOC}} \times 100\% \quad (1)$$

式中, MBC 为土壤微生物量碳含量; SOC 为土壤有机碳含量。

团聚体平均质量直径 (mean weight diameter, MWD) 代表了土壤中团聚体的稳定性, 其计算公式如下^[26]:

$$\text{MWD (mm)} = \sum_{i=1}^n (\bar{X}_i \times W_i) \quad (2)$$

式中, $\bar{X}_i$ 为第 i 粒级团聚体平均直径; W_i 为第 i 粒级团聚体组分的比例 (%)。

通过计算土壤质量指数 (soil quality index, SQI) 对紫云英配施不同增效材料后的土壤质量进行评估。采用主成分分析对土壤容重、孔隙度等 13 个指标进行降维, 按特征值、因子载荷分组, 计算 Norm 值并结合 Pearson 相关系数筛选, 最终确定信息量充足、独立性强的指标进入最小数据集^[27]。根据方程 (3) 计算土壤质量指数 (SQI), SQI 值越高, 表明土壤质量越好。

$$\text{SQI} = \sum_{i=1}^n \lambda_i S_i \quad (3)$$

式中, S_i 表示介于 0~1 的土壤指标得分, 计算公式见 (4); n 为指标数量; λ_i 代表指标权重值。

$$S_i = a / [1 + (x/x_o)^b] \quad (4)$$

式中, a 为最大得分值 1; x 为土壤实际测量值, x_o 为相应指标的平均值; “越多越好”类型指标 b 等于 -2.5, “越少越好”类型指标 b 等于 2.5。

2 结果与分析

2.1 绿肥与增效材料联合应用对水稻产量及养分吸收的影响

2.1.1 水稻产量 两年水稻产量结果 (表 2) 显示, 冬种紫云英显著影响水稻产量, 施用增效材料对水稻产量无显著影响, 二者对 2023 年稻谷产量及 2024

表 2 紫云英与增效材料联合应用对水稻产量的影响

Table 2 Effects of combining Chinese milk vetch with synergistic materials on rice yield

处理 Treatment	2023		2024	
	稻谷产量 Grain yield (kg/hm ²)	秸秆产量 Straw yield (kg/hm ²)	稻谷产量 Grain yield (kg/hm ²)	秸秆产量 Straw yield (kg/hm ²)
WF-CK	8032±378 Aa	6041±263 Aa	6523±208 Aa	5901±251 Aa
WF-Z1	8665±311 Aa	6241±710 Aa	7292±446 Aa	6299±344 Aa
WF-Z2	7719±253 Ba	6426±199 Ba	6550±152 Ba	5810±276 Aa
WF-Z3	7904±272 Ba	6551±386 Aa	6689±290 Ba	5974±109 Ba
GM-CK	8468±212 Ab	7125±304 Aa	6967±396 Ab	6486±170 Ab
GM-Z1	8951±58.0 Aab	7313±105 Aa	7107±251 Aab	6392±201 Ab
GM-Z2	9129±36.0 Aa	7247±164 Aa	7507±164 Aab	7106±577 Aab
GM-Z3	9293±254 Aa	7614±191 Aa	7874±188 Aa	7939±152 Aa
方差分析 Analysis of variance				
G	**	*	**	**
S	NS	NS	NS	NS
G×S	*	NS	NS	*

注：CK表示不施增效材料，Z1、Z2、Z3分别代表增效材料田菁炭、膨润土、脲酶抑制剂。WF、GM分别表示冬闲、冬种紫云英绿肥。数值为平均值±标准差 (n=3)，同列数据后不同大写字母表示同一种增效材料下冬闲与绿肥处理间差异显著，不同小写字母表示同一种种植模式下增效材料处理间差异显著 (P<0.05)。方差分析中，G、S分别代表种植制度和增效材料效应，*、**分别表示其效应达到0.05、0.01显著水平，NS表示不显著。

Note: CK indicates no application of synergistic material, Z1, Z2, and Z3 indicate *Sesbania* biochar, bentonite, and urease inhibitor, respectively. WF, and GM indicate winter fallow, and planting green manure, respectively. Data are presented as the mean ± standard deviation (n=3), different capital letters after data in the same column indicate significant difference between WF and GM under the same synergistic material, while different lowercase letters indicate significant difference among synergistic material treatments under the same planting pattern (P<0.05). In ANOVA, G and S represent the cropping pattern and synergistic material, respectively; *, ** indicate the effect at the 0.05 and 0.01 significance levels respectively, NS indicates no significant effect.

年秸秆产量具有显著交互作用影响。冬种紫云英下，与 GM-CK 相比，2023 年 GM-Z2、GM-Z3 稻谷产量分别显著增产 7.8%、9.7%，2024 年 GM-Z3 稻谷、秸秆产量分别显著增加 13.0%、22.4%。施同种增效材料各处理对比显示，GM-Z2 较 WF-Z2 处理 2023、2024 年稻谷产量显著增加 18.3%、17.6%，2023 年秸秆产量显著增加 12.8%；GM-Z3 较 WF-Z3 处理 2023、2024 年稻谷分别显著增加 14.6%、17.7%，2024 年秸秆产量显著增加 32.9%。综上，与冬种紫云英不施增效材料及冬闲施膨润土处理相比，冬种紫云英并配施膨润土处理增产效果更佳；与冬种紫云英不施增效材料及冬闲施脲酶抑制剂处理相比，冬种紫云英并配施脲酶抑制剂处理增产效果更佳；所有处理中，紫云英与脲酶抑制剂配施的增产效果最佳。

2.1.2 水稻养分吸收 冬种紫云英并配施增效材料较单施增效材料或单种紫云英更有利于促进水稻地上部养分吸收 (图 1)。种植模式可显著影响水稻地上部氮吸收量，增效材料无显著影响，二者交互有显

著影响。冬种紫云英下，GM-Z3 的稻谷和地上部氮吸收量较 GM-CK 分别显著提高 14.7%、21.2%。施同种材料各处理对比显示，GM-Z2 较 WF-Z2 及 GM-Z3 较 WF-Z3 稻谷、秸秆、地上部氮吸收量分别显著提高 29.6%、59.1%、44.1% 及 32.6%、62.7%、44.2%。

种植模式可显著影响水稻地上部磷吸收量，增效材料无显著影响，二者交互有显著影响。冬闲下，WF-Z1 的秸秆磷吸收量较 WF-CK 显著提高 39.8%。冬种紫云英下，GM-Z3 的稻谷、秸秆及地上部磷吸收量较 GM-CK 分别显著提高 22.3%、35.9%、26.3%。施同种增效材料各处理对比显示，GM-Z2 较 WF-Z2 及 GM-Z3 较 WF-Z3 稻谷、秸秆、地上部磷吸收量分别显著提高 12.2%、86.9%、29.6% 及 23.6%、111.4%、42.2%。

种植模式、增效材料可显著影响水稻地上部钾吸收量，二者交互有显著影响。冬闲下，WF-Z1 的稻谷钾吸收量较 WF-CK 显著提高 24.3%。冬种紫云英下，GM-Z3 的稻谷、秸秆及地上部钾吸收量较

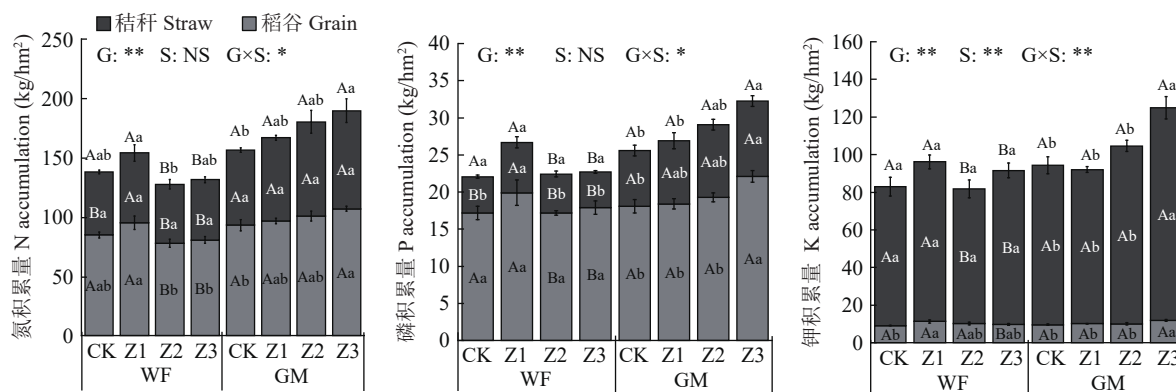


图1 不同处理下水稻地上部养分积累量

Fig. 1 Nutrient accumulation in aboveground parts of rice under different treatments

注: CK 表示不施增效材料, Z1、Z2、Z3 分别代表增效材料田菁炭、膨润土、脲酶抑制剂。WF、GM 分别表示冬闲、冬种紫云英绿肥。方柱内或方柱上不同大写字母表示同一种增效材料下冬闲与绿肥处理间差异显著, 不同小写字母表示同一种种植模式下增效材料处理间差异显著 ($P < 0.05$)。方差分析中, G、S 分别代表种植制度和增效材料效应, *、** 分别表示其效应达到 0.05、0.01 显著水平, NS 表示不显著。Note: CK indicates no application of the synergistic material, Z1, Z2, and Z3 indicate *Sesbania* biochar, bentonite, and urease inhibitor, respectively. WF and GM indicate winter fallow and planting green manure, respectively. Different capital letters within or on the bars indicate significant difference between winter fallow and green manure treatments under the same synergistic material, while different lowercase letters indicate significant difference among treatments with different synergistic materials under the same planting pattern ($P < 0.05$). In ANOVA, G and S represent the cropping pattern and the synergistic material effect, respectively; *, and ** indicate the effect at the 0.05 and 0.01 significance levels, respectively, NS indicates no significant effect.

GM-CK 分别显著提高 24.2%、33.4%、32.4%。施同种增效材料各处理对比显示, GM-Z2 较 WF-Z2 秸秆、地上部钾吸收量分别显著提高 32.2%、27.9%, GM-Z3 较 WF-Z3 稻谷、秸秆、地上部钾吸收量分别显著提高 21.8%、38.3%、36.5%。

综上, 与冬闲施膨润土处理相比, 冬种紫云英并配施膨润土处理可显著提高地上部养分积累; 与冬种紫云英不施增效材料及冬闲施脲酶抑制剂处理相比, 冬种紫云英并配施脲酶抑制剂可显著提高地上部养分积累。

2.2 绿肥与增效材料联合应用对土壤物理性状的影响

2.2.1 土壤容重、孔隙度和团聚体平均重量直径

种植模式、增效材料可显著影响土壤容重和孔隙度, 二者交互无显著影响 (图 2)。冬闲下, 与 WF-CK 比, WF-Z1 的容重显著降低 0.07 g/cm^3 , 孔隙度显著增加 2.71%。冬种紫云英下, 与 GM-CK 比, GM-Z1 的容重显著降低 0.10 g/cm^3 , 孔隙度显著增加 3.80%。施同种增效材料各处理对比显示, GM-Z1 较 WF-Z1 容重分别显著降低 0.07 g/cm^3 , 孔隙度显著增加 2.70%; GM-Z3 较 WF-Z3 容重显著降低 0.06 g/cm^3 , 孔隙度显著增加 2.01%。综上, 两种种植制度下, 施田菁炭均有利于降低土壤容重, 增加土壤孔隙度; 且冬种紫云英并配施田菁炭较冬闲施田菁炭处理对

土壤容重及土壤孔隙度的改善效果更佳。

团聚体平均重量直径 (MWD) 是反映土壤团聚体组成稳定性的指标, 其值越大, 表明团聚体越稳定, 土壤抗侵蚀强度越大 (图 2)。增效材料可显著影响 MWD, 种植模式及二者交互无显著影响。冬闲下, WF-Z3 的 MWD 较 WF-CK 显著增加 34.1%。冬种紫云英下, GM-Z1、GM-Z3 的 MWD 较 GM-CK 分别显著增加 25.0%、23.2%。综上, 冬种紫云英制度下, 施田菁炭能显著提高土壤团聚体组成稳定性; 两种种植制度下, 施脲酶抑制剂均能显著提高土壤团聚体组成稳定性。

2.2.2 土壤团聚体组成

增效材料可显著影响土壤团聚体粒径分布, 种植模式仅对 $0.25 \sim 1 \text{ mm}$ 粒径团聚体分布具有显著影响, 二者交互对团聚体粒径分布无显著影响 (表 3)。冬闲下, 与 WF-CK 比, WF-Z1 处理 $3 \sim 5 \text{ mm}$ 粒径团聚体显著增加 53.8%, $<0.25 \text{ mm}$ 粒径团聚体显著降低 24.8%; WF-Z3 处理 >5 、 $3 \sim 5 \text{ mm}$ 粒径团聚体分别显著增加 38.9%、55.9%, $<0.25 \text{ mm}$ 粒径团聚体显著降低 39.1%。冬种紫云英下, 与 GM-CK 比, GM-Z1 处理 $>5 \text{ mm}$ 粒径团聚体显著增加 33.8%, $<0.25 \text{ mm}$ 粒径团聚体显著降低 28.8%; GM-Z3 处理 >5 、 $0.25 \sim 1 \text{ mm}$ 粒径团聚体分别显著增加 34.6%、35.7%, $<0.25 \text{ mm}$ 粒径团聚体显著降低 43.2%。综上, 两种种植制度下, 施田菁炭、

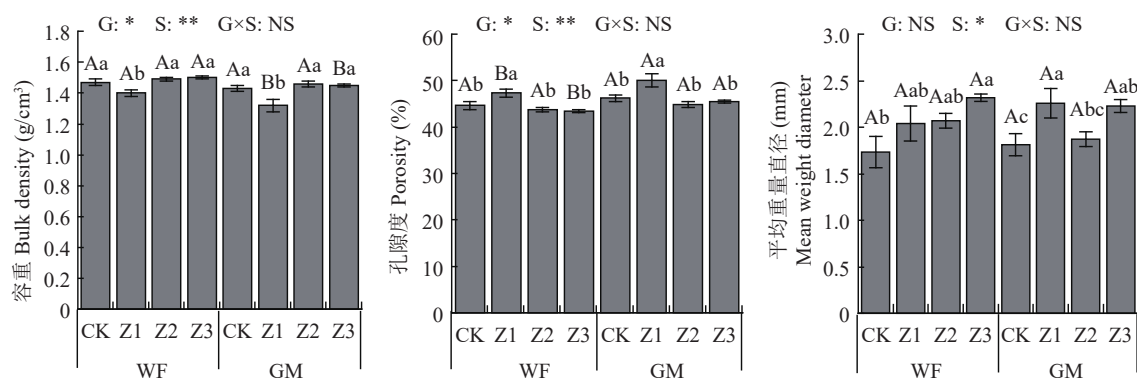


图 2 不同处理耕层土壤容重、孔隙度和平均重量直径 (MWD)

Fig. 2 Soil bulk density, porosity and mean weight diameter (MWD) in plough layer under different treatments

注: CK 表示不施增效材料, Z1、Z2、Z3 代表增效材料田菁炭、膨润土、脲酶抑制剂。WF、GM 分别表示冬闲、冬种紫云英绿肥。柱上不同大写字母表示同一种增效材料下冬闲与绿肥处理间差异显著, 小写字母表示同一种植模式下增效材料处理间差异显著 ($P<0.05$)。ANOVA 分析中, G、S 分别代表种植制度和增效材料效应, *, **表示其效应达到 0.05、0.01 显著水平, NS 表示不显著。

Note: CK indicates no application of the synergistic material, Z1, Z2, and Z3 indicate *Sesbania* biochar, bentonite, and urease inhibitor, respectively. WF and GM indicate winter fallow and planting green manure, respectively. Data are presented as the mean±standard deviation ($n = 3$). Different capital letters indicate significant differences between WF and GM under the same synergistic material, while lowercase letters indicate significant differences among synergistic material treatments under the same planting pattern ($P<0.05$). In ANOVA, G and S represent the cropping pattern and the synergistic material effect, respectively; *, and ** indicate the effect at the 0.05 and 0.01 significance levels, respectively. NS indicates no significant effect.

表 3 紫云英与增效材料联合应用下土壤团聚体的粒径分布

Table 3 Particle size distribution of soil aggregates as affected by green manure and synergistic materials

处理 Treatment	土壤团聚体组成 Soil aggregate composition (%)				
	>5 mm	3~5 mm	1~3 mm	0.25~1 mm	<0.25 mm
WF-CK	23.8±3.3 Ab	4.83±0.38 Bb	7.57±0.27 Aa	18.7±0.8 Ba	45.1±3.5 Aa
WF-Z1	27.7±3.2 Aab	7.43±0.83 Aa	8.73±0.96 Aa	22.2±1.0 Aa	33.9±4.8 Ab
WF-Z2	28.5±1.4 Aab	6.53±0.49 Aab	9.53±1.18 Aa	21.0±0.5 Aa	34.4±1.5 Aab
WF-Z3	33.1±1.5 Aa	7.53±1.13 Aa	9.40±0.61 Aa	22.6±2.3 Aa	27.5±2.4 Ab
GM-CK	23.0±2.6 Ab	7.40±0.31 Aab	7.93±0.52 Aab	23.0±0.6 Ab	38.7±2.7 Aa
GM-Z1	30.8±3.0 Aa	9.17±0.64 Aa	8.17±0.38 Aa	24.4±1.8 Aab	27.5±1.8 Abc
GM-Z2	25.7±1.3A ab	5.63±0.54 Ab	6.93±0.13 Ab	26.5±3.3 Aab	35.2±4.5 Aab
GM-Z3	31.0±1.1 Aa	7.53±0.69 Aa	8.37±0.19 Aa	31.2±2.2 Aa	22.0±2.7 Ac
方差分析 Analysis of variance					
G	NS	NS	NS	**	NS
S	*	*	NS	*	**
G×S	NS	NS	NS	NS	NS

注: CK表示不施增效材料, Z1、Z2、Z3分别代表增效材料田菁炭、膨润土、脲酶抑制剂。WF、GM分别表示冬闲、冬种紫云英绿肥。数值为平均值±标准差 ($n=3$), 同列数据后不同大写字母表示同一种增效材料下冬闲与绿肥处理间差异显著, 不同小写字母表示同一种植模式下增效材料处理间差异显著 ($P<0.05$)。方差分析中, G、S分别代表种植制度和增效材料效应, *, **分别表示其效应达到0.05、0.01显著水平, NS表示不显著。

Note: CK indicates no application of the synergistic material, Z1, Z2, and Z3 indicate *Sesbania* biochar, bentonite, and urease inhibitor, respectively. WF and GM indicate winter fallow and planting green manure, respectively. Data are presented as the mean±standard deviation ($n = 3$). Different capital letters after data in the same column indicate significant difference between WF and GM under the same synergistic material, while different lowercase letters indicate significant difference among synergistic material treatments under the same planting pattern ($P<0.05$). In ANOVA, G and S represent the cropping pattern and the synergistic material effect, respectively; *, and ** indicate the effect at the 0.05 and 0.01 significance levels, respectively, NS indicates no significant effect.

脲酶抑制剂均能显著提高土壤大团聚体占比, 减少土壤小团聚体占比。

2.3 绿肥与增效材料联合应用对土壤 pH 及养分含量的影响

种植模式对土壤有机碳、全氮、有效磷含量具有显著影响, 增效材料对土壤有机碳、全氮、有效磷、速效钾含量具有显著影响, 二者交互对土壤有效磷含量具有显著影响 (表 4)。冬闲下, 与 WF-CK 相比, WF-Z1 的土壤有效磷、速效钾含量分别显著增加 22.5%、12.4%; WF-Z3 的有机碳、全氮、有效磷、速效钾含量分别显著增加 19.1%、14.5%、17.6%、12.7%。冬种紫云英下, 与 GM-CK 比, GM-Z1 的土壤有机碳、全氮、有效磷、速效钾含量分别显著增加 14.5%、13.4%、33.6%、14.4%, GM-Z2 的土壤有效磷、速效钾含量分别显著增加 38.5%、9.7%, GM-Z3 的土壤全氮、速效钾含量均显著增加 12.9%。施同种增效材料各处理对比显示, GM-Z1 的土壤有机碳、全氮含量较 WF-Z1 分别显著增加 11.5%、13.9%; GM-Z2 土壤全氮、有效磷较 WF-Z2 分别显著增加

13.6%、52.4%。综上, 两种种植制度下, 施田菁炭处理的土壤有效磷、速效钾含量均显著提升, 施脲酶抑制剂处理土壤全氮、速效钾含量均显著提升; 冬种紫云英配施田菁炭处理较冬种紫云英不施增效材料及冬闲施田菁炭处理比, 土壤有机碳、全氮含量均显著提升; 冬种紫云英配施膨润土处理较冬种紫云英不施增效材料及冬闲施膨润土处理比, 土壤有效磷含量均显著提升。

2.4 绿肥与增效材料联合应用对土壤微生物生物量及酶活性的影响

2.4.1 土壤微生物生物量 种植模式对土壤微生物碳、氮含量及微生物熵具有显著影响, 增效材料对土壤微生物氮含量及微生物熵具有显著影响, 二者交互对土壤微生物碳含量具有显著影响 (图 3)。冬闲下, 与 WF-CK 相比, WF-Z2 的土壤 MBN 含量显著降低 26.5%, 微生物熵显著增加 28.0%。冬种紫云英下, 与 GM-CK 相比, GM-Z1 的土壤 MBC 含量显著增加 31.1%, GM-Z3 的土壤 MBN 含量显著增加 19.9%。施同种增效材料各处理对比显示, 与 WF-

表 4 不同紫云英与增效材料协同处理下的稻田 pH 和养分含量

Table 4 The pH and nutrient content of paddy field as affected by green manure and synergistic materials

处理 Treatment	pH	有机碳 Organic C (g/kg)	全氮 Total N (g/kg)	有效磷 Available P (mg/kg)	速效钾 Available K (mg/kg)
WF-CK	8.15±0.02 Aa	8.08±0.23 Abc	0.92±0.01 Ab	4.37±0.27 Ab	64.3±2.9 Ab
WF-Z1	8.12±0.12 Aa	8.86±0.20 Bab	0.94±0.01 Bab	5.35±0.20 Aa	72.3±1.8 Aa
WF-Z2	8.14±0.11 Aa	7.55±0.15 Ac	0.88±0.01 Bb	4.33±0.18 Bb	69.5±3.2 Aab
WF-Z3	8.08±0.06 Aa	9.62±0.56 Aa	1.05±0.07 Aa	5.13±0.27 Aa	72.5±1.5 Aa
GM-CK	8.03±0.10 Aa	8.63±0.30 Ab	0.94±0.03 Ab	4.77±0.43 Ab	63.5±0.9 Ab
GM-Z1	7.99±0.06 Aa	9.88±0.21 Aa	1.07±0.05 Aa	6.37±0.58 Aa	72.7±2.9 Aa
GM-Z2	8.04±0.10 Aa	8.67±0.56 Ab	1.00±0.02 Aab	6.60±0.36 Aa	69.7±0.3 Aa
GM-Z3	8.02±0.05 Aa	9.55±0.17 Aab	1.06±0.04 Aa	4.83±0.26 Ab	71.7±1.8 Aa
方差分析 Analysis of variance					
G	NS	*	*	**	NS
S	NS	**	*	**	**
G×S	NS	NS	NS	*	NS

注: CK表示不施增效材料, Z1、Z2、Z3分别代表增效材料田菁炭、膨润土、脲酶抑制剂。WF、GM分别表示冬闲、冬种紫云英绿肥。数值为平均值±标准差 (n=3), 同列数据后不同大写字母表示同一种增效材料下冬闲与绿肥处理间差异显著, 不同小写字母表示同一种种植模式下增效材料处理间差异显著 (P<0.05)。双方差分析中, G、S分别代表种植制度和增效材料效应, *、**分别表示其效应达到0.05、0.01显著水平, NS表示不显著。

Note: CK indicates no application of synergistic material, Z1, Z2, and Z3 indicate *Sesbania* biochar, bentonite, and urease inhibitor, respectively. WF, and GM indicate winter fallow, and planting green manure, respectively. Data are presented as the mean ± standard deviation (n=3), different capital letters after data in the same column indicate significant difference between WF and GM under the same synergistic material, while different lowercase letters indicate significant difference among synergistic material treatments under the same planting pattern (P<0.05). In ANOVA, G and S represent the cropping pattern and synergistic material, respectively; *, and ** indicate the effect at the 0.05 and 0.01 significance levels, respectively, NS indicates no significant effect.

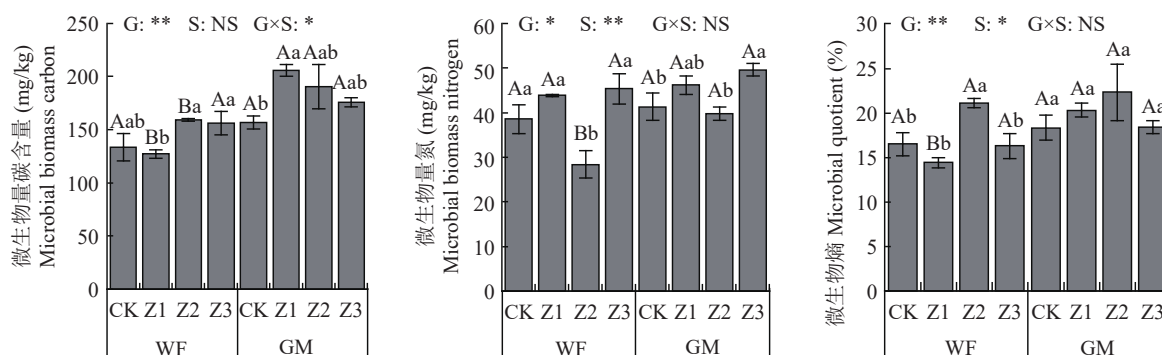


图3 紫云英与增效材料协同对稻田土壤微生物生物量的影响

Fig. 3 Microbial biomass as affected by green manure and synergistic materials

注: CK 表示不施增效材料, Z1、Z2、Z3 分别代表增效材料田菁炭、膨润土、脲酶抑制剂。WF、GM 分别表示冬闲、冬种紫云英绿肥。柱上不同大写字母表示同一种增效材料下冬闲与绿肥处理间差异显著, 不同小写字母表示同一种种植模式下增效材料处理间差异显著 ($P<0.05$)。ANOVA 分析中, G、S 分别代表种植制度和增效材料效应, *、** 分别表示其效应达到 0.05、0.01 显著水平, NS 表示不显著。Note: CK indicates no application of synergistic material, Z1, Z2, and Z3 indicate *Sesbania* biochar, bentonite, and urease inhibitor, respectively. WF, and GM indicate winter fallow, and planting green manure, respectively. Different capital letters above the bars indicate significant difference between WF and GM under the same synergistic material, while different lowercase letters indicate significant difference among synergistic material treatments under the same planting pattern ($P<0.05$). In ANOVA, G and S represent the cropping pattern and synergistic material, respectively; *, and ** indicate the effect at the 0.05 and 0.01 significance levels, respectively, NS indicates no significant effect.

Z1 相比, GM-Z1 的土壤 MBC 含量及微生物熵分别显著增加 62.0%、41.2%; 与 WF-Z2 相比, GM-Z2 的土壤 MBC、MBN 含量分别显著增加 19.7%、40.1%。由此可见, 与冬种紫云英不施增效材料、冬闲施田菁炭处理相比, 冬种紫云英并配施田菁炭处理能显著提升土壤 MBC 含量。

2.4.2 土壤酶活性 种植模式对土壤蔗糖酶活性具有显著影响, 种植模式与增效材料二者交互对土壤蔗糖酶活性具有显著影响 (表 5)。冬种紫云英下, 与 GM-CK 相比, GM-Z1 的蔗糖酶活性显著增加 4.6 mg/(g·d)。施同种增效材料各处理对比显示, GM-Z1 较 WF-Z1、GM-Z2 较 WF-Z2 及 GM-Z3 较 WF-Z3 土壤蔗糖酶活性分别显著提升 16.2、10.2、6.6 mg/(g·d)。在两种种植制度下, 所有处理的脲酶、磷酸酶活性均无显著差异。综上, 与冬种紫云英不施增效材料或冬闲施田菁炭处理相比, 冬种紫云英并配施田菁炭均能显著提升土壤蔗糖酶活性。

2.5 绿肥与增效材料联合应用对土壤质量的影响

将 13 个土壤指标标准化后进行主成分分析 (表 6), 筛选出 4 个主成分, 其累计贡献率为 72.8%。对各主成分中载荷绝对值大于 0.5 的指标进行分组后, 第 1 主成分有有机碳、全氮、微生物量氮、平均重量直径; 第 2 主成分有微生物量碳、蔗糖酶、有效磷; 第 3 主成分有容重; 第 4 主成分有 pH、速效钾。

通过相关性分析和各指标 Norm 值确定有机碳、蔗糖酶、容重、pH、速效钾 5 个指标最终进入 MDS,

计算土壤质量指数 (SQI, 图 4)。种植模式、增效材料对土壤质量均具有显著影响, 二者交互作用显著。同一对照或增效材料下, 冬种紫云英的 SQI 均显著高于冬闲。冬闲下, 与 WF-CK 比, WF-Z3 的 SQI 显著提升了 11.3%。冬种紫云英下, 与 GM-CK 相比, GM-Z1、GM-Z3 的 SQI 显著提升了 14.5%、5.9%。施同种材料各处理对比显示, GM-Z1 较 WF-Z1、GM-Z2 较 WF-Z2 及 GM-Z3 较 WF-Z3 的 SQI 分别显著增加 28.9%、18.9%、11.8%。所有处理中, GM-Z1 的 SQI 最高, 达 0.581, 且较 GM-Z2、GM-Z3 分别显著提高 9.9%、7.5%。

综上, 紫云英与田菁炭配施改善土壤综合质量的效果最佳, 其次是紫云英配施脲酶抑制剂。

3 讨论

3.1 绿肥与增效材料联合应用促进水稻生长

种植利用绿肥及添加生物炭、脲酶抑制剂、膨润土等增效材料均已被证实为改善土壤理化性质及提升作物生产力的有效策略^[9-15]。前期研究表明, 在长江中游酸性稻田中, 田菁炭与紫云英协同还田较单种紫云英模式可使水稻显著增产 12.7%^[20]; 且绿肥翻压配施生物炭能显著提升“非粮化”复耕区酸性土壤的营养含量、微生物活性及土壤酶活性, 进而提高水稻产量^[28]。本研究中, 在碱性紫色土稻田中紫云英与田菁炭协同还田较单种紫云英处理水稻产量未呈现显著增产效应, 该差异可能与试验区土壤初始

表 5 紫云英与增效材料协同处理下稻田土壤酶活性

Table 5 Soil enzyme activities as affected by green manure and synergistic materials

处理 Treatment	蔗糖酶活性 Sucrase activity [mg/(g·d)]	脲酶活性 Urease activity [mg/(g·d)]	磷酸酶活性 Phosphatase activity [mg/(g·d)]
WF-CK	14.9±0.6 Bab	0.78±0.01 Aa	0.79±0.02 Aa
WF-Z1	12.9±1.6 Bb	0.76±0.03 Aa	0.72±0.03 Aa
WF-Z2	16.5±0.7 Ba	0.75±0.01 Aa	0.70±0.04 Aa
WF-Z3	17.3±0.3 Ba	0.70±0.04 Aa	0.71±0.03 Aa
GM-CK	24.5±1.1 Ab	0.77±0.07 Aa	0.72±0.03 Aa
GM-Z1	29.1±1.0 Aa	0.76±0.07 Aa	0.74±0.03 Aa
GM-Z2	26.7±0.6 Aab	0.80±0.02 Aa	0.73±0.04 Aa
GM-Z3	24.0±2.2 Ab	0.76±0.02 Aa	0.71±0.01 Aa
方差分析 Analysis of variance			
G	**	NS	NS
S	NS	NS	NS
G×S	**	NS	NS

注: CK表示不施增效材料, Z1、Z2、Z3分别代表增效材料田菁炭、膨润土、脲酶抑制剂。WF、GM分别表示冬闲、冬种紫云英绿肥。数值为平均值±标准差 ($n=3$), 同列数据后不同大写字母表示同一种增效材料下冬闲与绿肥处理间差异显著, 不同小写字母表示同一种植模式下增效材料处理间差异显著 ($P<0.05$)。方差分析中, G、S分别代表种植制度和增效材料效应, *, **分别表示其效应达到0.05、0.01显著水平, NS表示不显著。

Note: CK indicates no application of synergistic material, Z1, Z2, and Z3 indicate *Sesbania* biochar, bentonite, and urease inhibitor, respectively. WF, and GM indicate winter fallow, and planting green manure, respectively. Data are presented as the mean ± standard deviation ($n=3$), different capital letters after data in the same column indicate significant difference between WF and GM under the same synergistic material, while different lowercase letters indicate significant difference among synergistic material treatments under the same planting pattern ($P<0.05$). In ANOVA, G and S represent the cropping pattern and synergistic material, respectively; *, and ** indicate the effect at the 0.05 and 0.01 significance levels, respectively, NS indicates no significant effect.

表 6 各指标载荷矩阵和 Norm 值

Table 6 Load matrix and Norm values for each indicator

项目 Item	PC1	PC2	PC3	PC4	Norm值 Norm value
pH	-0.474	-0.184	0.225	0.582	1.277
土壤有机碳 Soil organic carbon	0.876	0.237	-0.177	-0.018	1.931
全氮 Total N	0.842	0.338	-0.078	-0.118	1.886
有效磷 Available P	0.162	0.660	-0.290	0.265	1.099
速效钾 Available K	0.303	0.122	-0.246	0.701	1.090
微生物碳 Microbial biomass carbon	0.164	0.879	-0.017	-0.045	1.290
微生物氮 Microbial biomass nitrogen	0.724	0.114	-0.241	0.198	1.615
平均重量直径 Mean weight diameter	0.682	0.022	0.072	0.240	1.499
容重 Bulk density	-0.163	-0.192	0.940	-0.001	1.241
孔隙度 Porosity	0.167	0.195	-0.939	0.009	1.244
磷酸酶 Phosphatase activity	-0.155	-0.319	-0.432	-0.519	0.974
脲酶 Urease activity	-0.053	0.118	-0.013	-0.725	0.851
蔗糖酶 Sucrase activity	0.234	0.853	-0.177	-0.202	1.342
特征值 Eigenvalue	4.553	2.016	1.573	1.318	
方差贡献率 Variance contribution rate (%)	35.020	15.510	12.100	10.140	
累计方差贡献率 Cumulative variance contribution (%)	35.020	50.530	62.620	72.770	

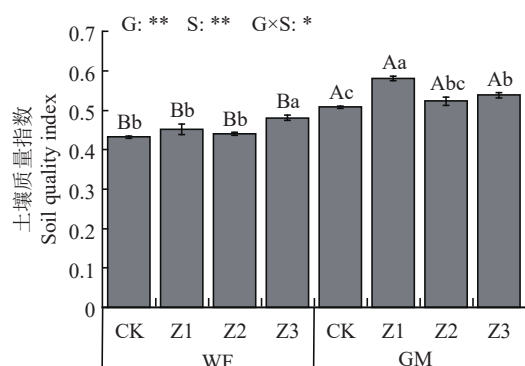


图4 紫云英与增效材料协同对稻田土壤质量指数的影响

Fig. 4 Effects of combining Chinese milk vetch with synergistic materials on soil quality index

注: CK 表示不施增效材料, Z1、Z2、Z3 分别代表增效材料田菁炭、膨润土、脲酶抑制剂。WF、GM 分别表示冬闲、冬种紫云英绿肥。柱上不同大写字母表示同一种增效材料下冬闲与绿肥处理间差异显著, 不同小写字母表示同一种种植模式下增效材料处理间差异显著 ($P < 0.05$)。ANOVA 分析中, G、S 分别代表种植制度和增效材料效应, *、** 分别表示其效应达到 0.05、0.01 显著水平。
Note: CK indicates no application of synergistic material, Z1, Z2, and Z3 indicate *Sesbania* biochar, bentonite, and urease inhibitor, respectively. WF, and GM indicate winter fallow, and planting green manure, respectively. Different capital letters above the bars indicate significant difference between WF and GM under the same synergistic material, while different lowercase letters indicate significant difference among synergistic material treatments under the same planting pattern ($P < 0.05$). In ANOVA, G and S represent the cropping pattern and synergistic material, respectively; *, and ** indicate the effect at the 0.05 and 0.01 significance levels, respectively.

理化性质、紫云英翻压量及气候条件的异质性有关。冬种紫云英配施膨润土对水稻产量的提升效果优于单种紫云英处理^[20]。本研究结果也表明, 与单种紫云英相比, 冬种紫云英并配施膨润土对稻谷的增产效果更佳。潜在机制可能在于, 施加膨润土可以显著提高土壤速效磷的含量, 同时通过其层间吸附特性有效减少紫云英腐解释放的养分淋溶损失^[29-30], 促进水稻对养分的吸收与积累, 进而实现产量协同提升。前期研究表明, 冬种紫云英配施脲酶抑制剂对水稻产量的提升效果优于单种紫云英^[20]; 满江红与脲酶抑制剂配施可提升表观氮回收效率及水稻产量^[31]。本研究结果也表明, 与单种紫云英或单独施用脲酶抑制剂处理相比, 紫云英-脲酶抑制剂协同还田可显著提高水稻植株氮素积累量(图1), 进而提高氮素的利用效率、提升产量。前期研究表明, 在湖北省黄石市酸性稻田土壤条件下, 冬种紫云英配施膨润土对水稻的增产效果优于配施脲酶抑制剂^[20]。本研究中, 在碱性紫色土稻田冬种紫云英模式下, 以配施脲酶抑制剂处理效果最佳。

3.2 绿肥与增效材料联合应用有效培肥稻田土壤

土壤容重、孔隙度及团聚体稳定性作为关键物理结构参数, 通过调控水气传输、根系生长环境及养分有效性, 对植物生长产生协同效应^[32-33]。生物炭可通过多重物理、化学和生物机制改善土壤结构, 降低容重, 提高孔隙度, 并促进大团聚体形成及提升团聚体平均重量直径^[34], 本研究在冬闲或冬种绿肥两种种植制度下, 施田菁炭均降低小团聚体占比, 提高大团聚体占比及团聚体平均重量直径, 且紫云英与田菁炭配施能够进一步强化田菁炭降低土壤容重、增加土壤孔隙度及提高土壤团聚体组成稳定性的效果。这是由于, 作物秸秆因富含纤维素及养分, 其腐解过程中可通过物理效应降低土壤容重, 并通过其疏松结构提升导水率, 进一步增加了土壤通透性^[35-36]。本研究中, 在两种种植制度中, 施脲酶抑制剂有利于土壤微团聚体向大团聚体的转化, 这可能是由于, 脲酶抑制剂的使用会影响细菌、真菌的基因丰度^[37-38], 细菌、真菌通过分泌多糖等有机物质可以促进土壤颗粒的团聚; 且真菌菌丝能够缠绕和连接土壤颗粒, 形成稳定的团聚体^[39]。

土壤速效养分含量作为衡量土壤养分供给水平的关键参数, 为水稻高产提供了必要的营养保障^[40]。前期研究结果表明^[28], 施生物炭可显著提高“非粮化”复耕区土壤有效磷和速效钾含量。本研究中, 在两种种植制度中, 施田菁炭均能显著提升土壤有效磷和速效钾含量, 但冬种紫云英并配施田菁炭与单施田菁炭相比, 土壤有效磷和速效钾含量无显著差异。冬种紫云英并配施田菁炭较单种紫云英或单施田菁炭处理土壤有机碳、全氮含量显著提升, 这与前人^[20]研究结果基本一致。这是由于, 二者协同还田, 既能通过紫云英快速提升土壤有机碳和全氮含量, 又可依托生物炭多孔结构和较大的比表面积吸附土壤中的氮素和促进土壤碳封存^[41-42], 最终实现土壤有机碳和土壤全氮的显著提升。

土壤微生物对土壤环境能起到指示作用^[43]。本研究中, 冬种紫云英并配施田菁炭较单种紫云英或单施膨润土处理土壤 MBC 含量显著提升, 这与前期研究^[20]结果基本一致。这是由于紫云英与田菁炭配施, 为土壤微生物提供了更多的碳源和能量来源; 且施田菁炭有利于改善土壤结构, 为微生物生长和定殖提供了环境, 从而间接促进了土壤 MBC 的提升。蔗糖酶是土壤生物化学过程的积极参与者, 能够加速土壤中有机碳的积累与分解转化, 进而影响土壤的

碳循环^[44-45]。本研究中, 冬种紫云英与田菁炭配施较单种紫云英或单施田菁炭土壤蔗糖酶活性显著提升。这可能是由于绿肥供应有机物质, 生物炭促进微生物活动, 两者共施加速有机质的分解和养分的释放, 从而提升蔗糖酶的活性。

最小数据集作为综合评价土壤肥力水平的有效手段, 近年来已得到广泛应用。前期大量研究揭示了绿肥或增效材料单施对土壤物理、化学、生物性质的多维调控机制, 并进一步明确了最小数据集是评价土壤质量的有效手段^[18, 46-47]。本研究将筛选得到的 13 项关键土壤质量因子纳入 MDS 计算中, 结果表明, 冬种紫云英模式下, 配施田菁炭与脲酶抑制剂均能显著提升土壤质量指数 (SQI), 而配施膨润土的效果不显著, 且 3 种增效材料中田菁炭对土壤质量的综合提升效果最优。从土壤改良机理来看, 田菁炭可为土壤微生物提供良好的栖息环境, 提高微生物活性, 促进有机碳转化与养分循环, 同时增强土壤团聚体稳定性, 提升土壤保水保肥能力, 进而减少紫云英腐解过程中氮素的淋溶损失。脲酶抑制剂则主要通过减缓氨挥发与氮素流失来提高土壤全氮含量, 对其他土壤性状影响较小, 因此其对土壤质量的整体提升效果弱于田菁炭。本研究仅综合评价了冬种紫云英配施 3 种增效材料对四川丘陵区土壤质量的影响, 有关冬种紫云英与不同增效材料协同提升土壤质量的内在机制仍不明确, 有待进一步深入研究。

4 结论

在四川丘陵区紫色土水稻种植系统中, 冬种紫云英可显著提升土壤的综合肥力, 与增效材料共同应用可进一步强化紫云英对产量和土壤的改良效果。冬种紫云英配施脲酶抑制剂主要通过减缓氨挥发与氮素流失来提高土壤全氮含量, 冬种紫云英配施田菁炭提高微生物活性, 促进有机碳转化与养分循环, 同时增强土壤团聚体稳定性, 提升土壤保水保肥能力, 进而减少紫云英腐解过程中氮素的淋溶损失。整体上, 冬种紫云英与增效材料协同应用是四川丘陵区提高水稻产量、改良土壤的有效措施。

参 考 文 献:

[1] 周虹. 四川省水稻产业现状及发展对策[J]. 四川农业科技, 2015, (9): 46-48.
Zhou H. Current situation and development strategies of rice industry in Sichuan Province[J]. Sichuan Agricultural Science and Technology, 2015, (9): 46-48.

[2] 袁漫漫, 刘勤, 张少磊, 等. 太湖地区稻田绿肥固氮量及绿肥还田对水稻产量和稻田土壤氮素特征的影响[J]. 土壤学报, 2011, 48(4): 797-803.
Yuan M M, Liu Q, Zhang S L, *et al.* Effects of biological nitrogen fixation and plow-down of green mature crop on rice yield and soil nitrogen in paddy field[J]. Acta Pedologica Sinica, 2011, 48(4): 797-803.

[3] 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.
Gao S J, Zhou G P, Cao W D. Effects of milk vetch (*Astragalus sinicus*) as winter green manure on rice yield and rate of fertilizer application in rice paddies in south China[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2020, 26(12): 2115-2126.

[4] Gao S J, Zhou G P, Chang D N, *et al.* Southern China can produce more high-quality rice with less N by green manuring[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2023, 196: 107025.

[5] 王慧, 韩上, 唐杉, 等. 紫云英翻压还田对稻田土壤团聚体组成及其碳氮的影响[J]. 土壤学报, 2023, 60(3): 868-880.
Wang H, Han S, Tang S, *et al.* Continuous multi-year application of Chinese milk vetch in paddy soil and its effect on soil aggregates distribution and their carbon and nitrogen content[J]. Acta Pedologica Sinica, 2023, 60(3): 868-880.

[6] Huang Y N, Huang L, Gao J S, *et al.* Effects of long-term green manure application on organic carbon fractions and clay minerals and their interactions in paddy soil aggregates[J]. Plant and Soil, 2023, 507(1-2): 109-126.

[7] Ma Z B, Liang T, Fu H R, *et al.* Long-term green manuring increases soil carbon sequestration via decreasing qCO₂ caused by lower microbial phosphorus limitation in a dry land field[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2024, 374: 109142.

[8] 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.

[9] 曹卫东, 周国朋, 高嵩涓. 绿肥内源驱动土壤健康的作用与机制[J]. 植物营养与肥料学报, 2024, 30(7): 1274-1283.
Cao W D, Zhou G P, Gao S J. Effects and mechanisms of green manure on endogenous improving soil health[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2024, 30(7): 1274-1283.

[10] 潘占东, 马倩倩, 陈晓龙, 等. 添加生物质炭对黄土高原旱作农田土壤养分、腐殖质及其组分的影响[J]. 草业学报, 2022, 31(2): 14-24.
Pan Z D, Ma Q Q, Chen X L, *et al.* Effects of biochar addition on nutrient levels and humus and its components in dry farmland soils on the Loess Plateau[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2022, 31(2): 14-24.

[11] Sheng Y Q, Zhu L Z. Biochar alters microbial community and carbon sequestration potential across different soil pH[J]. Science of the Total Environment, 2018, 622-623: 1391-1399.

[12] 汤家喜, 李玉, 朱永乐, 等. 生物炭与膨润土对辽西北风沙土理化性质的影响研究[J]. 干旱区资源与环境, 2022, 36(3): 143-150.
Tang J X, Li Y, Zhu Y L, *et al.* Effect of biochar and bentonite on physicochemical properties of sandy soil in northwestern Liaoning

- Province[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2022, 36(3): 143–150.
- [13] 赵雪淞, 宋王芳, 杨晨曦, 等. 膨润土对花生连作根际土壤肥力和作物产量的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2019, (3): 63–68.
Zhao X S, Song W F, Yang C X, *et al.* Effects of bentonite on rhizosphere soil fertility and crop yield of peanut continuous cropping[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2019, (3): 63–68.
- [14] 辛苏宁, 王磊, 卢艳丽, 等. 添加脲酶/硝化抑制剂条件下基于¹⁵N示踪的夏玉米当季肥料氮去向研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2024, 30(6): 1092–1102.
Xin S N, Wang L, Lu Y L, *et al.* Study on the fate of fertilizer nitrogen during summer maize season based on high abundance of ¹⁵N under application of urease/nitrification inhibitors[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2024, 30(6): 1092–1102.
- [15] 史多鹏, 叶子壮, 李杰, 等. 氮肥配施生物炭和脲酶抑制剂对夏玉米-冬小麦产量及氮素利用的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2023, 41(4): 51–60.
Shi D P, Ye Z Z, Li J, *et al.* Effects of nitrogen combined with biochar and urease inhibitor on yield and nitrogen utilization of summer maize-winter wheat system[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2023, 41(4): 51–60.
- [16] Cheng K, Wang X Y, Fu L B, *et al.* Interaction between dissolved organic carbon and fungal network governs carbon mineralization in paddy soil under co-incorporation of green manure and biochar[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2023, 14: 1233465.
- [17] Li M S, Zhou X, Wei L Z, *et al.* Effect of biochar and green manure on soil nutrients and rhizosphere soil fungal community structure [PP/OL]. Research Square Platform LLC (2022-03-15) [2025-09-01]. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-1411902/v1>.
- [18] 谢志坚, 吴佳, 段金贵, 等. 生物炭基肥与紫云英联合还田对红壤区早稻干物质累积和氮素利用特征的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2020, 26(9): 1732–1739.
Xie Z J, Wu J, Duan J G, *et al.* Effects of combining biochar-based fertilizer and milk vetch on dry matter accumulation and N use efficiencies of early rice in reddish paddy field of south China[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2020, 26(9): 1732–1739.
- [19] 王胜昭, 钱壮壮, 庄舜尧, 等. 绿肥配施生物炭基肥对水稻产量和氮素利用的影响[J]. *江苏农业科学*, 2023, 51(5): 122–129.
Wang S Z, Qian Z Z, Zhuang S Y, *et al.* The effect of green manure combined with biochar based fertilizer on rice yield and nitrogen utilization[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2023, 51(5): 122–129.
- [20] 李明帅. 紫云英与增效材料联合应用对水稻生长和土壤碳氮含量的影响[D]. 湖北武汉: 华中农业大学硕士学位论文, 2021.
Li M S. Effects of combined application of Chinese milk vetch and synergistic materials on rice growth and soil carbon and nitrogen contents[D]. Wuhan, Hubei: MS Thesis of Huazhong Agricultural University, 2021.
- [21] 叶子壮, 王松燕, 陆潇, 等. 秸秆还田、覆膜和施氮对旱地麦田土壤质量的影响[J]. *环境科学*, 2024, 45(4): 2292–2303.
Ye Z Z, Wang S Y, Lu X, *et al.* Effects of straw retention, film mulching, and nitrogen input on soil quality in dryland wheatfield[J]. *Environmental Science*, 2024, 45(4): 2292–2303.
- [22] 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.
- Lu R K. Analytical methods for soil and agricultural chemistry[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000.
- [23] Elliott E T. Aggregate structure and carbon, nitrogen, and phosphorus in native and cultivated soils[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1986, 50(3): 627–633.
- [24] 鲍士旦. 土壤农化分析(3版)[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
Bao S D. Soil and agricultural chemistry analysis (3rd ed.)[M]. Beijing: China Agricultural Press, 2000.
- [25] 宋鉴恒, 黄婧宇, 郭欣玉, 等. 秸秆还田与化肥配施对冬小麦土壤微生物量及化学计量特征和微生物熵的影响[J]. *环境科学*, 2025, 46(6): 3957–3964.
Song J H, Huang J Y, Guo X Y, *et al.* Influence of straw return and fertilizer matching on microbial quantity and stoichiometric characteristics and microbial entropy of winter wheat soils[J]. *Environmental Science*, 2025, 46(6): 3957–3964.
- [26] Tagar A A, Adamowski J, Memon M S, *et al.* Soil fragmentation and aggregate stability as affected by conventional tillage implements and relations with fractal dimensions[J]. *Soil and Tillage Research*, 2020, 197: 104494.
- [27] 李鹏飞, 张兴昌, 郝明德, 等. 基于最小数据集的黄土高原矿区复垦土壤质量评价[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(16): 265–273.
Li P F, Zhang X C, Hao M D, *et al.* Soil quality evaluation for reclamation of mining area on Loess Plateau based on minimum data set[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2019, 35(16): 265–273.
- [28] 胡铁军, 周飞, 潘丽卿, 等. 绿肥翻压配施生物炭对“非粮化”复耕区土壤质量和水稻产量的影响[J]. *中国农业科技导报*, 2026, 28(4): 180–190.
Hu T J, Zhou F, Pan L Q, *et al.* Effect of green manure tillage combined with biochar application on soil quality and rice yield in “non-grain” reclamation area[J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2026, 28(4): 180–190.
- [29] 刘爱平, 冯启明, 王维清, 等. 几种天然多孔矿物对钾肥的吸附及缓释效果[J]. *环境科学与技术*, 2012, 35(5): 131–135, 146.
Liu A P, Feng Q M, Wang W Q, *et al.* Adsorption of potash by several natural porous minerals and slow-releasing effect of potash fertilizer[J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, 35(5): 131–135, 146.
- [30] 刘爱平, 冯启明, 王维清, 等. 膨润土对钾肥的吸附性能及缓释效果研究[J]. *非金属矿*, 2010, 33(6): 49–51.
Liu A P, Feng Q M, Wang W Q, *et al.* Research on adsorption property and slow-releasing effect of bentonite to potash fertilizer[J]. *Non-metallic Mines*, 2010, 33(6): 49–51.
- [31] Yang G Y, Ji H T, Sheng J, *et al.* Combining *Azolla* and urease inhibitor to reduce ammonia volatilization and increase nitrogen use efficiency and grain yield of rice[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 743, 140799.
- [32] Bronick C J, Lal R. Soil structure and management: A review[J]. *Geoderma*, 2005, 124(1–2): 3–22.
- [33] Bengough A G, McKenzie B M., Hallett P D, *et al.* Root elongation, water stress, and mechanical impedance: A review of limiting stresses and beneficial root tip traits[J]. *Journal of Experimental Botany*,

- 2011, 62(1): 59–68.
- [34] Adekiya A O, Olayanju T M A, Ejue S W, *et al.* Contribution of biochar in improving soil health[J]. *Soil Biology*, 2020, 59: 99–113.
- [35] 赵丽丽, 李陆生, 蔡焕杰, 等. 有机物料还田对土壤水导气性的综合影响[J]. *中国农业科学*, 2019, 52(6): 1045–1057.
- Zhao L L, Li L S, Cai H J, *et al.* Comprehensive effects of organic materials incorporation on soil hydraulic conductivity and air permeability[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2019, 52(6): 1045–1057.
- [36] 李娜, 龙静泓, 韩晓增, 等. 短期翻耕和有机物还田对东北暗棕壤物理性质和玉米产量的影响[J]. *农业工程学报*, 2021, 37(12): 99–107.
- Li N, Long J H, Han X Z, *et al.* Effects of short-term plowing and organic amendments on soil physical properties and maize yield in dark brown soil in Northeast China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2021, 37(12): 99–107.
- [37] 黄兆玮, 董磊, 王趁义, 等. 新型脲酶抑制剂对土壤脲酶活性和土壤微生物量的影响[J]. *中国水土保持科学*, 2021, 19(5): 99–105.
- Huang Z W, Dong L, Wang C Y, *et al.* Effects of novel urease inhibitors on soil urease activity and soil microbial diversity[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2021, 19(5): 99–105.
- [38] 王趁义, 陈仙仙, 黄兆玮, 等. 第四类脲酶抑制剂对土壤脲酶活性和微生物量的影响[J]. *水土保持通报*, 2019, 39(2): 149–154.
- Wang C Y, Chen X X, Huang Z W, *et al.* Effect of fourth-type urease inhibitors on soil urease activity and microbial growth[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2019, 39(2): 149–154.
- [39] Lehmann A, Zheng W, Ryo M, *et al.* Fungal traits important for soil aggregation[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2020, 10: 2904.
- [40] 冯静琪. 皖南稻区紫云英-水稻系统中的稻秸还田效应[D]. 重庆: 西南大学硕士学位论文, 2021.
- Feng J Q. Effect of rice straw returning in Chinese milk vetch-rice system in southern Anhui Province[D]. Chongqing: MS Thesis of South West University, 2021.
- [41] Amalina F, Abd Razak A S, Zularisam A W, *et al.* Comprehensive assessment of biochar integration in agricultural soil conditioning: Advantages, drawbacks, and future prospects[J]. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 2023, 132: 103508.
- [42] Shi S W, Zhang Q Z, Lou Y L, *et al.* Soil organic and inorganic carbon sequestration by consecutive biochar application: Results from a decade field experiment[J]. *Soil Use and Management*, 2021, 37(1): 95–103.
- [43] Zhang F S, Zhu Y G, Peng J J, *et al.* Linking the soil microbiome to soil health[J]. *Scientia Sinica Vitae*, 2020, 51(1): 1–11.
- [44] 夏品华, 喻理飞, 寇永珍, 等. 贵州高原草海湿地土壤有机碳分布特征及其与酶活性的关系[J]. *环境科学学报*, 2017, 37(4): 1479–1485.
- Xia P H, Yu L F, Kou Y Z, *et al.* Distribution characteristics of soil organic carbon and its relationship with enzyme activity in the Caohai Wetland of the Guizhou Plateau[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2017, 37(4): 1479–1485.
- [45] Dick R P, Bandick A K. Soil enzyme activities as integrative indicators of soil health[M]. *Soil Enzymology*, 2003, 18(1): 65–73.
- [46] Li P, Zhang H J, Deng J J, *et al.* Cover crop by irrigation and fertilization improves soil health and maize yield: Establishing a soil health index[J]. *Applied Soil Ecology*, 2023, 182: 104727.
- [47] 史多鹏, 叶子壮, 李惠通, 等. 生物炭和氮肥配施对夏玉米-冬小麦轮作体系耕层土壤质量的影响[J]. *应用生态学报*, 2023, 34(2): 442–450.
- Shi D P, Ye Z Z, Li H T, *et al.* Effects of combined application of biochar and nitrogen fertilizer on soil quality of summer maize-winter wheat system[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2023, 34(2): 442–450.