



山豆还田与氮肥减施对稻田土壤活性有机碳组分及酶活性的影响

全紫曼 漆燕 周泽弘 莫坤 韩文斌 梁琴

Effects of *Lathyrus sativus* return to the field and nitrogen rate reduction on paddy soil labile organic carbon and soil enzyme activities

QUAN Ziman, QI Yan, ZHOU Zehong, MO Kun, HAN Wenbin, LIANG Qin

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2023-0069>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于DNDC模型长期复种翻压绿肥对土壤有机碳和小麦产量的模拟

Simulation of soil organic carbon and wheat yield by long-term multiple cropping and rolling green manure based on DNDC model
草业科学. 2024, 41(2): 332 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2023-0395>

土壤有机碳组分对土地利用方式响应的Meta分析

Meta-analysis of soil organic carbon fraction response to land uses
草业科学. 2022, 39(6): 1115 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2021-0325>

土壤质地和有机碳分子组成对土壤有机碳的矿化和微生物碳积累效率的影响

Soil texture and organic carbon molecular composition are the main factors affecting soil organic carbon mineralization and microbial carbon accumulation efficiency
草业科学. 2023, 40(2): 365 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2021-0709>

雅鲁藏布江下游隧道工程对土壤有机碳稳定性的影响

Effects of the construction of the lower Yarlung Tsangpo River tunnel project on the stability of soil organic carbon
草业科学. 2023, 40(1): 15 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2022-0089>

牦牛粪尿返还对高寒草地土壤水解酶活性的影响

Effects of yak dung and urine deposition on the hydrolytic enzyme activities of an alpine grassland soil
草业科学. 2022, 39(11): 2262 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2022-0065>

科尔沁沙质草地不同水热梯度土壤胞外酶活性

Soil extracellular enzyme activities in different Horqin sandy grassland soil hydrothermal gradients
草业科学. 2023, 40(3): 589 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2022-0300>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

DOI: 10.11829/j.issn.1001-0629.2023-0069

全紫曼, 漆燕, 周泽弘, 莫坤, 韩文斌, 梁琴. 山豆还田与氮肥减施对稻田土壤活性有机碳组分及酶活性的影响. 草业科学, 2024, 41(5): 1057-1067.

QUAN Z M, QI Y, ZHOU Z H, MO K, HAN W B, LIANG Q. Effects of *Lathyrus sativus* return to the field and nitrogen rate reduction on paddy soil labile organic carbon and soil enzyme activities. Pratacultural Science, 2024, 41(5): 1057-1067.

山豆还田与氮肥减施对稻田土壤活性有机碳组分及酶活性的影响

全紫曼, 漆燕, 周泽弘, 莫坤, 韩文斌, 梁琴

(南充市农业科学院, 四川南充 637000)

摘要: 为探明绿肥山豆 (*Lathyrus sativus*) 还田配施氮肥在改良土壤方面的效应, 明确合适的绿肥配施氮肥比例, 设置 2×4 双因素试验, 研究绿肥的不同翻压量 [$15\ 000 (M_1)$ 、 $22\ 500 (M_2)$ 、 $30\ 000 (M_3)$ 、 $37\ 500 (M_4)$ $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$] 和氮肥的不同施氮量 [常规施氮量的 60% (N_1) 和 80% (N_2) 配比] 对土壤活性有机碳库各组分、碳库管理指数和酶活性等指标的影响。结果表明: 与常规施肥 (CF) 处理相比, 翻压一定量的绿肥并配施减量氮肥能有效提升稻田总有机碳、活性有机碳、可溶性有机碳、微生物生物量碳含量及碳库管理指数, 提升效果随配施比例的不同存在差异, 其中 M_4N_1 、 M_4N_2 处理提升效果最佳。在相同施氮水平下, 有机碳各组分含量、碳库管理指数及总体酶活性均呈现出随翻压量增加而增加的趋势。与 CF 处理相比, 翻压绿肥并配施氮肥对稻田土壤过氧化氢酶无显著影响 ($P > 0.05$), 对纤维素酶、蔗糖酶和 β -葡萄糖苷酶活性均具有显著影响 ($P < 0.05$)。总体酶活性均表现为 $M_4N_2 > M_4N_1 > M_3N_1 > M_3N_2 > M_2N_1 > M_2N_2 > M_1N_1 > M_1N_2 > CF > CK$ 处理。各有机碳组分之间具有显著 ($P < 0.05$) 或极显著 ($P < 0.01$) 的相关性, β -葡萄糖苷酶、纤维素酶与土壤活性有机碳各组分均呈正相关关系 ($P < 0.05$)。对土壤活性有机碳组分含量及土壤酶活性影响因素的灰色关联度综合分析结果表明, 60% 氮肥 + $37\ 500 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 绿肥模式的综合评价效果最好。

关键词: 稻田; 绿肥; 山豆; 施氮; 土壤活性有机碳; 土壤酶活性; 碳库管理指数

文献标识码: A 文章编号: 1001-0629(2024)05-1057-11

Effects of *Lathyrus sativus* return to the field and nitrogen rate reduction on paddy soil labile organic carbon and soil enzyme activities

QUAN Ziman, QI Yan, ZHOU Zehong, MO Kun, HAN Wenbin, LIANG Qin

(Nanchong Academy of Agricultural Sciences, Nanchong 637000, Sichuan, China)

Abstract: In this study, we aimed at exploring how returning *Lathyrus sativus* green manure to the field with nitrogen fertilizer affects soil improvement as well as determining the appropriate proportion of green manure with nitrogen fertilizer, 2×4 . We performed two-factor experiments, comprising two nitrogen application [60% (N_1) and 80% (N_2) of conventional] and four green manure turnover [$15\ 000 (M_1)$, $22\ 500 (M_2)$, $30\ 000 (M_3)$, and $37\ 500 (M_4)$ $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$] rates, respectively. We studied how the ratio of green manure and nitrogen fertilizer affects soil active organic carbon pool components, carbon pool management index, and enzyme activity. Our results demonstrated that compared with conventional fertilization (CF), green manure and a certain amount of nitrogen fertilizer could effectively improve the total organic, active organic, soluble organic,

收稿日期: 2023-02-16 接受日期: 2023-05-29

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2021YFD1700200); 国家现代农业产业技术体系资助项目 CARS-22); 四川省南充市科技计划项目 (21YFZJ0044); 四川省南充市科技计划项目 (22JCYJPT0028)

第一作者: 全紫曼 (1992-), 女, 四川西充人, 助理研究员, 硕士, 研究方向为绿肥研究利用。E-mail: 1220206422@qq.com

通信作者: 梁琴 (1990-), 女, 重庆铜梁人, 助理研究员, 硕士, 研究方向为绿肥研究利用。E-mail: 897311217@qq.com

and microbial biomass carbon contents as well as the carbon pool management index of rice fields. Moreover, this improvement effect differed fertilization proportion-dependently, with M_4N_1 and M_4N_2 treatments yielding the best improvement effects. At the same nitrogen application level, the organic carbon component content, carbon pool management index, and overall enzyme activity displayed an increasing trend with a turning over amount increase. Compared with the CF treatment, turning green manure and applying nitrogen fertilizer did not significantly affect soil catalase in the paddy fields, but significantly affected the cellulase and invertase β -Glucomannase activities. The overall enzyme activity showed upon $M_4N_2 > M_4N_1 > M_3N_1 > M_3N_2 > M_2N_1 > M_2N_2 > M_1N_1 > M_1N_2 > CF > CK$ treatment. We observed a significant or extremely significant positive correlation between organic carbon components, except for catalase, sucrase β -Glucomannase, and cellulase were positively correlated with active organic carbon in the soil. We comprehensively analyzed the grey correlation degree of the soil active organic carbon content and soil enzyme activity-influencing factors and determined the best comprehensive evaluation effect when applying the 60% nitrogen fertilizer + 37 500 kg·ha⁻¹ green fertilizer model.

Keywords: paddy fields; *Lathyrus sativus*; green manure; nitrogen application scheme; soil active organic carbon; soil enzyme activities; carbon management index

Corresponding author: LIANG Qin E-mail: 897311217@qq.com

土壤有机碳 (SOC) 作为陆生生态系统中最大的碳库, 是评价土壤肥力及表征温室效应的重要指标^[1]。氮肥过量使用会导致根系低分子含碳有机分泌物增多, 加快土壤有机碳分解^[2], 降低土壤固碳能力^[3]。Vanotti^[4] 研究表明长期过量施氮, 土壤有机碳含量降低了 17.4%。而目前我国稻田过量施用氮肥现象十分严峻, 单季氮肥用量平均为 180 kg·hm⁻², 比世界平均水平高 75% 左右, 长期过量施肥不仅导致稻田土壤质量下降, 还会增加稻田温室气体排放^[5], 因此寻求一种合理的农田管理措施, 在确保水稻产量不减产的前提下, 有效提高土壤有机碳固存能力, 对提高土壤质量, 减少 CO₂ 排放, 减缓温室效应将起到关键作用。

大量研究表明, 冬种绿肥还田并配施化肥的耕作方式是减少化肥使用、提高土壤有机碳含量的有效措施之一^[6-10]。例如, 在红粘土条件下, 翻压紫云英 (*Astragalus sinicus*) 并配施氮肥各处理与不施肥处理相比稻田土壤活性有机碳含量平均增加了 16.0%^[6]。在土壤条件比较肥沃的河流泥沙淤积土条件下, 翻压紫云英并配施氮肥各处理的土壤总有机碳较冬闲 + 不施肥处理平均增加了 8%, 活性有机碳含量平均增加了 15%^[7]。也有研究表明, 绿肥氮肥配施比例对稻田土壤有机碳固存的影响存在差异。其中, 翻压一定量紫云英并配施减量化肥能显著提升土壤活性有机碳含量, 且随着化肥施用量

的增加, 土壤活性有机碳含量呈先增后降的趋势, 其中以 45 t·hm⁻² 紫云英还田量配施 60% 化肥效果最佳^[8]。因此, 明确合理的绿肥氮肥配施比例能有效地提高绿肥对氮肥的替代效应。

土壤酶活性也是反映土壤肥力的重要指标, 在土壤的各种生物化学反应中起着不可替代的作用。前人研究表明连年翻压绿肥能有效提高土壤酶活性^[11-12]。研究^[8]表明, 翻压一定量紫云英并配施减量化肥能够显著增加蔗糖酶和相对 β -葡萄糖苷酶活性, 但不同化肥施用量对酶活的影响存在一定差异, 随化肥施用量的增加, β -葡萄糖苷酶活性呈递增的趋势, 而过氧化氢酶活性却显著降低。由此可见不同绿肥氮肥配施比例对酶活性的响应存在差异。绿肥碳化为土壤活性有机碳的过程需要经过一系列的酶促反应, 因此土壤酶活性是影响土壤活性有机碳的重要因素^[7, 9]。研究^[8]表明, 酚氧化酶和过氧化物酶对土壤活性有机碳组分含量起到间作作用, 而纤维素酶、 β -葡萄糖苷酶和蔗糖酶活性则起到直接作用。还有研究^[13]发现, β -葡萄糖苷酶、纤维素酶活性对土壤可溶性有机碳、微生物生物量碳和易氧化有机碳含量均具有显著影响。因此, 研究绿肥氮肥配施对土壤酶活性的影响还可进一步探明不同处理土壤碳库差异来源。

不同种类绿肥翻压后对土壤酶活性的影响不同, 其中禾本科绿肥黑麦草 (*Lolium perenne*) 翻压后

对提高土壤酶活性效果最好, 其次是豆科绿肥紫云英^[14]。不同绿肥品种对土壤活性有机碳的影响也存在差异, 且不同的活性有机碳成分对不同绿肥的响应程度也不一致^[15]。因此, 探索不同绿肥品种还田对土壤活性有机碳组分、土壤酶活性的影响十分有必要。目前有关绿肥配施化肥的不同比例对土壤活性有机碳含量及土壤酶活的影响还主要集中在紫云英绿肥, 而针对其他绿肥品种的研究还不多见, 尤其是山黧豆 (*Lathyrus sativus*)。因此, 本研究以豆科绿肥山黧豆作为研究材料, 通过连续 4 年定位试验, 探讨豆科绿肥山黧豆的不同翻压量与氮肥的不同施氮量对比对土壤活性有机碳含量及土壤酶活的影响, 以期山黧豆绿肥氮肥配施技术在稻田管理中的应用提供数据基础。

1 材料与方 法

1.1 试验地概况

试验地点位于南充市顺庆区芦溪镇兴阳山村 (30°57'18" N, 106°08'01" E), 地处四川盆地浅丘宽谷地貌区, 属于亚热带湿润季风气候, 海拔 247 m, 年平均温度 17 °C, 全年降水量 1 284 mm, 无霜期 305 d, 年日照 1 360 h, 供试土壤为水稻土, 试验前土壤 pH 7.95, 有机质 24.6 g·kg⁻¹, 全氮 1.58 g·kg⁻¹, 有效磷 6.40 mg·kg⁻¹, 速效钾 106.67 mg·kg⁻¹。

1.2 试验设计

试验于 2017 年 9 月—2021 年 9 月进行, 共设 10 个处理 (表 1), 试验采用随机区组设计, 设 3 次重复, 共 30 个小区, 小区面积 20 m² (5 m × 4 m), 小区之间采用水泥田坎相隔, 以防侧渗和串流。每年于 9 月下旬播种山黧豆, 播种量为 60 kg·hm⁻², 播种方式采用撒播, 次年于 4 月中旬盛花期翻压, 翻压量不够的处理采用异地移入。水稻于山黧豆翻压后 10~15 d 划行移栽, 行距 0.33 m, 株距 0.2 m, 栽插单株, 每公顷基本苗 150 000 株, 于 8 月下旬收割测产。绿肥季不施肥, 水稻季各小区等量供应磷钾, 100% 化肥施用量为尿素 (含 N 46%) 326 kg·hm⁻²、过磷酸钙 (含 P₂O₅ 12%) 625 kg·hm⁻²、氯化钾 (含 K₂O 60%) 125 kg·hm⁻², 在插秧前 1 d 施底肥 (60% 氮肥, 全部磷钾肥), 水稻移栽后 5~7 d 施分蘖肥 (30% 氮肥), 在主茎幼穗长 1~2 cm 时施穗肥 (10% 氮肥)。

表 1 试验设计
Table 1 Experimental design

处理 Treatment	施氮水平 Nitrogen application level	紫云英翻压量 Plowed milk vetch amount kg·hm ⁻²
CK	0	0
CF	150 (100%)	0
M ₁ N ₁	90 (60%)	15 000
M ₂ N ₁		22 500
M ₃ N ₁		30 000
M ₄ N ₁		37 500
M ₁ N ₂	120 (80%)	15 000
M ₂ N ₂		22 500
M ₃ N ₂		30 000
M ₄ N ₂		37 500

试验绿肥品种为南选山黧豆 (川审豆 2012008), 水稻品种为‘宜香优 2115’。

1.3 样品采集与分析

2021 年 9 月水稻收获后, 采用多点混合采样法采集各处理的表层 (0—20 cm) 土壤样品, 样品装入冰盒中运回实验室。土壤平均分为两份, 一份自然风干, 用于测定土壤总有机碳, 另一份储存于 4 °C 冰箱用于测定活性有机碳、可溶性有机碳、微生物生物量碳、纤维素酶、蔗糖酶、过氧化氢酶及 β-葡萄糖苷酶。土壤有机碳 (SOC) 采用重铬酸钾-浓硫酸外加热法, 活性有机碳 (AOC) 采用 333 mmol·L⁻¹ 高锰酸钾氧化法测定^[16]; 微生物生物量碳 (MBC) 采用氯仿熏蒸法测定; 土壤可溶性有机碳 (DOC) 采用 TOC 3100 分析仪测定^[16-17]。蔗糖酶、纤维素酶采用 3,5-二硝基水杨酸比色法测定, 其中底物分别为蔗糖、羟甲基纤维素钠; β-葡萄糖苷酶、过氧化氢酶采用比色法测定, 底物分别为对硝基苯-β-D-葡萄糖苷、L-DOPA (L-3,4-dihydroxyphenylalanine)^[18-20]。

1.4 数据分析

1.4.1 碳库管理指数

本研究参考土壤为撂荒地土壤, 其总有机碳含量为 16.5 g·kg⁻¹, 活性有机碳含量为 2.07 g·kg⁻¹。碳库指数 (CPI) 为样品土壤与参考田土壤有机碳含量的比值; 非活性有机碳 (NOAC) 为土壤有机碳含量

与活性有机碳含量的差值; 碳库活度 (A) 为活性有机碳与非活性有机碳比值; 碳库活度指数 (AI) 为样品土壤与参考田土壤碳库活度比值; 碳库活度碳库管理指数 (CPMI) 为碳库指数与碳库活度指数乘积 (%); 碳素有效率为活性有机碳组分含量与土壤有机碳含量比值 (%) [6]。

1.4.2 土壤酶活分析

总体酶活性 (TEA) 能消除不同土壤酶活性的量纲及大小的影响, 能很好地反映土壤中总体酶的活性及土壤肥力水平的高低, TEA 采用下面的公式计算 [21]:

$$TEA = \sum_{i=1}^n x_i / \bar{x}$$

式中: x_i 为供试土样第 i 种酶活性实测值; \bar{x} 为同种酶活性平均值。

1.4.3 灰色关联度分析

最后采用灰色系统理论 [22] 对试验结果进行总体分析。其中, 假定数列为 R_0 , 不同施肥模式土壤指标的比较数列为 R_i , $i = 1, 2, 3, \dots, n$, 且 $R_0 = [R_0(1), R_0(2), R_0(3), \dots, R_0(n)]$, $i = [R_i(1), R_i(2), R_i(3), \dots, R_i(n)]$, 则称 $\varepsilon_i(k)$ 为 R_0 与 R_i 在第 k 点的关联系数:

$$\varepsilon_i = \frac{\min_i \min_k |R_0(k) - R_i(k)| + \rho \max_i \max_k |R_0(k) - R_i(k)|}{|R_0(k) - R_i(k)| + \rho \max_i \max_k |R_0(k) - R_i(k)|}$$

式中: $|R_0(k) - R_i(k)|$ 表示 R_0 数列与 R_i 数列第 k 点的绝对差值, ρ 为分辨系数, 取 $\rho = 0.5$ 。

等权关联度公式为:

$$r_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \varepsilon_i(k)$$

依据关联度排列情况确定比较数列的优劣, 再依据各性状对处理优劣的影响程度赋予各关联系数不同的权重系数 ω_i , 将得加权关联度 t_i 。

加权关联度公式为:

$$t_i = \sum_{k=1}^n \omega_i(k) \varepsilon_i(k)$$

1.4.4 数据处理

试验数据采用 Excel 2010、SPSS 22.0 软件进行分析。处理间比较采用 One-way ANOVA 分析, 差异显著性分析采用 Duncan 法, 显著性水平为 0.05。相关性分析采用 Pearson 相关系数和双侧显著性检验。

2 结果与分析

2.1 绿肥翻压配施氮肥对土壤有机碳组分含量的影响

与空白对照 (CK) 处理相比, 绿肥翻压配施氮肥各处理均能显著促进土壤总有机碳 (SOC)、活性有机碳 (AOC)、可溶性有机碳 (DOC) 含量的积累及矿化, 增幅分别达 17.35%~37.67%、14.75%~49.36% 和 31.23%~68.95%; 除 M_1N_1 处理的微生物生物量碳 (MBC) 含量较 CK 无显著差异 ($P > 0.05$), 其余处理的 MBC 含量均显著提高, 增幅为 32.3%~68.40% ($P < 0.05$) (图 1)。与常规施肥 (CF) 处理相比, 除 M_1N_1 、 M_1N_2 处理, 其余处理的 SOC、MBC 含量均显著提高, 增幅分别为 6.59%~18.22% 和 4.65%~22.75%。 M_1N_1 、 M_2N_1 、 M_1N_2 和 M_2N_2 处理的 AOC 含量较 CF 处理未达显著差异, 其余处理均较 CF 处理显著提高, 增幅为 14.33%~32.05%。仅 M_4N_1 和 M_4N_2 处理的 DOC 含量较 CF 处理显著提高, 增幅分别为 18.95% 和 21.77%。在相同施氮水平下, SOC、AOC、DOC 和 MBC 含量均呈现出随翻压量的增加而增加的趋势。

试验进行 4 年后, 与 CK 处理相比, 除 M_1N_1 、 M_1N_2 处理, 其余处理的 DOC 有效率均显著提高 ($P < 0.05$) (表 2); 除 M_1N_1 处理, 其余处理的微生物熵均显著提高。所有处理的 AOC 有效率较 CK 处理均未达显著差异 ($P > 0.05$)。除 M_1N_1 的微生物熵较 CF 显著降低, 其余处理的微生物熵与 DOC 有效率较 CF 处理均无显著差异。

2.2 绿肥翻压配施氮肥对土壤碳库管理指数的影响

土壤碳库管理指数能灵敏地反映土壤碳素动态变化情况, 是用来衡量土壤肥力变化的重要指标之一, 其数值越大, 土壤肥力越高。绿肥翻压配施氮肥处理 NOAC、CPI 均较 CK 处理显著提高 ($P < 0.05$) (表 3)。与 CF 处理相比, 除 M_1N_1 、 M_1N_2 处理, 其余处理的 NOAC、CPI 均显著提高, 增幅分别为 6.61%~16.33%、6.84%~18.49%。

绿肥翻压配施氮肥 4 年后, 碳库活度 (A) 及碳库活度指数 (AI) 与 CK 处理相比差异均不显著 ($P > 0.05$) (表 3)。与 CF 相比, 仅 M_4N_1 、 M_4N_2 处理的 A 及 AI 显著提高, 增幅分别为 13.71%~13.78% 和 14.54%~14.62%。碳库管理指数表现为 $CK < CF < M_1N_1 < M_2N_1 <$

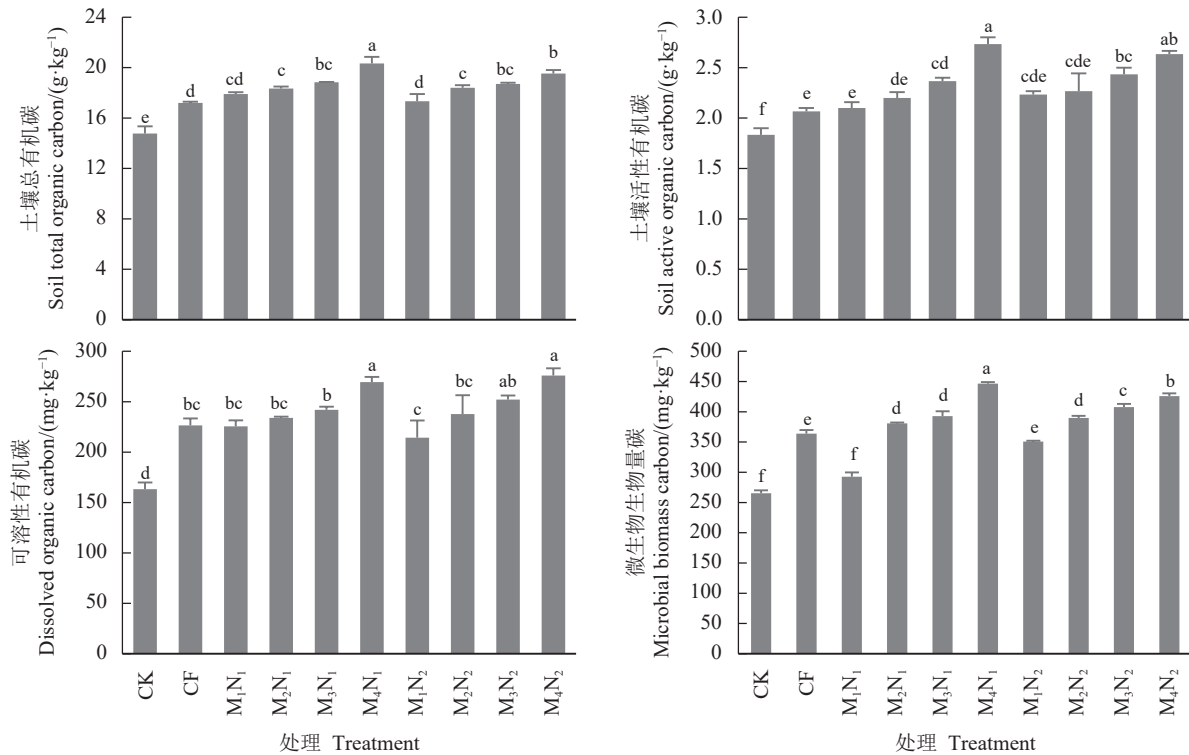


图 1 不同处理对土壤有机碳组分含量的影响

Figure 1 Soil labile organic carbon fraction contents upon different treatments

处理编号参见表 1; 不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

Treatment codes for Table 1; Different lowercase letters indicate significant differences among the treatments at the 0.05 level.

表 2 不同处理下土壤碳库各组分碳素有效率

Table 2 Different soil carbon component utilization ratios upon different treatments

处理 Treatment	AOC有效率 AOC efficiency	DOC有效率 DOC efficiency	微生物熵 Microbial quotient
CK	12.44 ± 0.57ab	1.11 ± 0.07c	1.79 ± 0.05d
CF	12.01 ± 0.12b	1.32 ± 0.04ab	2.11 ± 0.02abc
M ₁ N ₁	11.73 ± 0.32b	1.26 ± 0.02bc	1.64 ± 0.03d
M ₂ N ₁	12.00 ± 0.23b	1.28 ± 0.01ab	2.08 ± 0.02bc
M ₃ N ₁	12.57 ± 0.17ab	1.28 ± 0.02ab	2.09 ± 0.05abc
M ₄ N ₁	13.47 ± 0.60a	1.33 ± 0.03ab	2.20 ± 0.05a
M ₁ N ₂	12.91 ± 0.37ab	1.24 ± 0.08bc	2.03 ± 0.07c
M ₂ N ₂	12.31 ± 0.86ab	1.29 ± 0.09ab	2.12 ± 0.02abc
M ₃ N ₂	13.02 ± 0.40ab	1.35 ± 0.01ab	2.18 ± 0.03ab
M ₄ N ₂	13.49 ± 0.21a	1.41 ± 0.04a	2.18 ± 0.03ab

处理处理参见表 1; 同列不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$); 下表同。

Treatment for Table 1; Different lowercase letters indicate significant differences among the treatments at the 0.05 level. This is applicable for the following tables as well.

M₁N₂ < M₂N₂ < M₃N₁ < M₃N₂ < M₄N₂ < M₄N₁。

2.3 绿肥翻压配施氮肥对土壤酶活性的影响

不同施肥处理除对过氧化氢酶活性无显著影响外 ($P > 0.05$), 对其余 3 种酶活性和总体酶活性均具有显著影响 ($P < 0.05$) (表 4)。与 CK 处理相比, 所有配施处理的纤维素酶、蔗糖酶、β-葡萄糖苷酶、总体酶活性均显著提高。与 CF 处理相比, 所有处理的纤维素酶均显著提高, 增幅为 6.44%~11.03%。M₃N₁、M₄N₁、M₃N₂ 和 M₄N₂ 处理的蔗糖酶较 CF 处理均显著提升, 增幅为 15.16%~21.53%。M₄N₁、M₃N₂ 和 M₄N₂ 处理的 β-葡萄糖苷酶较 CF 处理显著提升, 增幅为 6.91%~8.00%。除 M₁N₂ 处理的总体酶活性较 CF 处理无显著差异外, 其余处理均较 CF 处理显著提高 2.97%~9.78%, 表现为 M₄N₂ > M₄N₁ > M₃N₁ > M₃N₂ > M₂N₁ > M₂N₂ > M₁N₁ > M₁N₂ > CF > CK。在减施等量氮肥条件下, 随山豆翻压量的增多, 总体酶活性均呈递增的趋势。

2.4 土壤有机碳库与土壤酶活性的相关性分析

土壤总有机碳、活性有机碳、可溶性有机碳及

表3 不同处理对土壤碳库管理指数的影响
Table 3 Different treatment effects on the soil carbon management index

处理 Treatment	非活性有机碳 NOAC/(g·kg ⁻¹)	碳库指数 CPI	碳库活度 A	碳库活度指数 AI	碳库管理指数 CMPI
CK	12.93 ± 0.56e	0.89 ± 0.04e	0.14 ± 0.01ab	0.89 ± 0.05ab	79.34 ± 3.20f
CF	15.13 ± 0.07d	1.04 ± 0.01d	0.14 ± 0.00b	0.85 ± 0.01b	88.96 ± 1.56ef
M ₁ N ₁	15.80 ± 0.15cd	1.08 ± 0.01cd	0.13 ± 0.00b	0.83 ± 0.03b	90.14 ± 2.79ef
M ₂ N ₁	16.13 ± 0.12bc	1.11 ± 0.01c	0.14 ± 0.00b	0.85 ± 0.02b	94.70 ± 2.73de
M ₃ N ₁	16.47 ± 0.03bc	1.14 ± 0.00bc	0.14 ± 0.00ab	0.90 ± 0.01ab	102.54 ± 1.64bcd
M ₄ N ₁	17.60 ± 0.56a	1.23 ± 0.03a	0.16 ± 0.01a	0.97 ± 0.05a	119.70 ± 3.64a
M ₁ N ₂	15.10 ± 0.55d	1.05 ± 0.03d	0.15 ± 0.00ab	0.93 ± 0.03ab	97.14 ± 1.48cde
M ₂ N ₂	16.13 ± 0.13bc	1.12 ± 0.01c	0.14 ± 0.01ab	0.88 ± 0.07ab	98.08 ± 8.64cde
M ₃ N ₂	16.27 ± 0.15bc	1.13 ± 0.01bc	0.15 ± 0.01ab	0.94 ± 0.03ab	105.99 ± 3.37bc
M ₄ N ₂	16.90 ± 0.26ab	1.18 ± 0.02ab	0.16 ± 0.00a	0.97 ± 0.02a	115.30 ± 1.63ab

NAOC: no active organic carbon; CPI: carbon pool index; A: activity; AI: activity index; CMPI: carbon pool management index.

表4 不同处理的土壤酶活性
Table 4 Soil enzyme activities upon different treatments

处理 Treatment	纤维素酶 Cellulase/ [mg·(d·g) ⁻¹]	蔗糖酶 Urease/ [mg·(d·g) ⁻¹]	过氧化氢酶 Catalase/ [mg·(d·g) ⁻¹]	β-葡萄糖苷酶 β-glucosidase/ [mg·(d·g) ⁻¹]	总体酶活性 Total enzyme activity
CK	35.62 ± 0.78b	23.40 ± 1.04f	70.98 ± 0.85a	26.55 ± 0.34d	3.52 ± 0.02f
CF	36.00 ± 0.41b	29.03 ± 0.39de	71.37 ± 0.29a	30.37 ± 0.27c	3.84 ± 0.03e
M ₁ N ₁	38.48 ± 0.44a	29.20 ± 0.41de	71.01 ± 0.37a	31.90 ± 1.00abc	3.95 ± 0.06d
M ₂ N ₁	38.43 ± 0.43a	30.73 ± 0.13cd	71.90 ± 0.10a	31.37 ± 0.53abc	4.00 ± 0.02cd
M ₃ N ₁	38.54 ± 0.21a	33.72 ± 0.27ab	71.13 ± 0.07a	31.58 ± 0.64abc	4.09 ± 0.03bc
M ₄ N ₁	38.32 ± 0.68a	35.28 ± 0.33a	71.04 ± 0.28a	32.76 ± 0.49a	4.17 ± 0.02ab
M ₁ N ₂	38.42 ± 0.34a	28.33 ± 1.24e	70.98 ± 0.56a	30.80 ± 0.26bc	3.89 ± 0.04de
M ₂ N ₂	38.68 ± 0.54a	29.55 ± 0.79de	71.57 ± 0.14a	31.39 ± 0.56abc	3.96 ± 0.03d
M ₃ N ₂	38.58 ± 0.10a	32.43 ± 0.43bc	71.68 ± 0.20a	32.47 ± 0.84ab	4.09 ± 0.02bc
M ₄ N ₂	39.97 ± 0.92a	35.13 ± 0.58a	71.28 ± 0.10a	32.80 ± 0.32a	4.22 ± 0.03a

微生物生物量碳均达到显著性 ($P < 0.05$) 或极显著 ($P < 0.01$) 差异水平, 表明土壤有机碳库组分之间存在密切的转化关系 (表5)。对土壤有机碳组分与土壤酶活进行相关性分析发现, 除过氧化氢酶以外, 土壤有机碳与其余3种酶活均呈正相关关系 ($P < 0.05$)。

2.5 不同施肥模式下稻田土壤碳库、酶活影响因素分析

根据灰色关联分析, 选取相关性分析中的指标 (微生物生物量碳、可溶性有机碳、活性有机碳、总有机碳、蔗糖酶、纤维素酶、过氧化氢酶、β-葡萄糖

苷酶) 进行综合分析, 计算等权关联度与加权关联度, 如表6所列, 等权关联度和加权关联度的位序一致, 排序为 $M_4N_1 > M_4N_2 > M_3N_2 > M_3N_1 > M_2N_2 > M_2N_1 > M_1N_2 > CF > M_1N_1 > CK$ 。

3 讨论

土壤碳库是陆地生态系统中最大的碳库^[23], 不同农田管理措施是影响土壤有机碳固存的重要途径, 研究表明绿肥翻压配施氮肥是提高土壤活性有机碳含量的有效管护措施^[7-9]。本研究也发现, 与不施肥处理相比, 山豇豆翻压并配施氮肥能够显著促

表 5 土壤有机碳库与酶活性之间的相关分析
Table 5 Pearson's correlation analysis of the soil organic carbon pool and enzyme activities

指标 Index	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	X ₈
X ₁	1.000							
X ₂	0.838**	1.000						
X ₃	0.877**	0.815**	1.000					
X ₄	0.848**	0.840*	0.819**	1.000				
X ₅	0.622*	0.573*	0.653**	0.522**	1.000			
X ₆	0.901*	0.858*	0.914**	0.864**	0.624**	1.000		
X ₇	0.252	0.056	0.101	0.219	-0.022	0.164	1.000	
X ₈	0.798**	0.712**	0.743**	0.721**	0.660**	0.751**	0.154	1.000

X₁: 总有机碳; X₂: 活性有机碳; X₃: 可溶性有机碳; X₄: 微生物生物量碳; X₅: 纤维素酶; X₆: 蔗糖酶; X₇: 过氧化氢酶; X₈: β-葡萄糖甘酶。* 表示显著相关(P < 0.05), ** 表示极显著相关(P < 0.01)。

X₁: soil total organic carbon; X₂: soil active organic carbon; X₃: dissolved organic carbon; X₄: microbial biomass carbon; X₅: cellulase; X₆: invertase; X₇: peroxidase; X₈: β-glucosidase. * indicated significant correlation at the 0.05 level, ** indicated extremely significant correlation at the 0.01 level.

表 6 不同施肥模式的综合分析
Table 6 Comprehensive analysis of the different fertilization modes

处理 Treatment	等权关联度(排序) Equal relational grade analysis (Rank)	加权关联度(排序) Weighted relational grade analysis (Rank)
CK	0.5228 (10)	0.5307 (10)
CF	0.6040 (8)	0.6142 (8)
M ₁ N ₁	0.6012 (9)	0.6046 (9)
M ₂ N ₁	0.6382 (6)	0.6523 (6)
M ₃ N ₁	0.6660 (4)	0.6784 (4)
M ₄ N ₁	0.7607 (1)	0.7749 (1)
M ₁ N ₂	0.6093 (7)	0.6217 (7)
M ₂ N ₂	0.6460 (5)	0.6619 (5)
M ₃ N ₂	0.6838 (3)	0.6977 (3)
M ₄ N ₂	0.7486 (2)	0.7606 (2)

进活性有机碳的积累, 且随绿肥氮肥配施比例的不同, 对土壤有机碳库各组分的影响存在差异, 这与马艳芹等^[7]、李增强等^[8-9] 研究结果一致, 由此可见绿肥氮肥配施比例对稻田土壤有机碳固存的影响存在差异。这是由于绿肥氮肥不同配施比例下混合翻压物的 C/N 存在差异, 而外源有机物质的 C/N 会影响其转化成土壤活性有机碳的能力^[24-25]。与常规施肥处理相比, 不是所有翻压绿肥并配施减量氮肥的处理均能有效促进活性有机碳的积累, 这可能是

由于当绿肥翻压量较少时, 其提供的外源有机物质分解的活性有机碳不能完全替代减施的氮肥所能转化的活性有机碳, 因此, 如果想要达到减施氮肥的效果, 需要进一步明确绿肥翻压量和氮肥添加量之间最佳的配比。在减施等量氮肥的条件下, 稻田土壤活性有机碳、可溶性有机碳及微生物生物量碳含量均随着山豆翻压量的增加而增加, 这是由于土壤活性有机碳主要来源于外源有机物质的分解^[26], 随着山豆翻压量的增多, 增加了外源有机物质含量, 从而提高了土壤活性有机碳含量。而且绿肥山豆与化肥的施入均能提高土壤养分条件, 增加微生物群落活性^[27-28], 从而有利于土壤微生物将更多的山豆绿肥转化为活性有机碳组分。

活性有机碳组分与总有机碳的比值来表征土壤有机碳的活性, 比值越大, 表明土壤有机碳越容易被分解、矿化^[29]。本研究发现, 与常规施肥相比, 翻压山豆并配施减量氮肥对土壤 DOC 有效率、微生物熵无显著影响, 这与杨滨娟等^[7] 研究结果一致, 但李增强等^[8] 研究发现翻压一定量的紫云英并配施减量化肥较常规施肥能够显著增加土壤 DOC 有效率, 而对微生物熵无显著影响, 不同的研究结果可能与气候条件、土壤类型以及田间管护措施等不同有关。土壤碳库管理指数常用来反映土壤有机碳组分的变化情况以及外界管理措施对土壤有机碳总量的影响^[30]。本研究也发现, 在减施等量氮肥

条件下,土壤碳库管理指数随山豆绿肥翻压量的增加而增加,其与土壤有机碳及其组分的变化趋势一致。Blair 等^[31]指出土壤碳库活度指数能反映土壤有机碳的活跃程度,本研究表明,与常规施肥处理相比,在减施 20%~40% 氮肥条件下翻压山豆绿肥量达到 37 500 kg·hm⁻² 时,土壤碳库活度指数有所提升 ($P < 0.05$)。由此可见,翻压一定量的绿肥并配施减量氮肥较常规施肥能有效提升土壤有机碳活跃程度。土壤碳库指数、土壤碳库管理指数均是反映土壤碳库稳定性的指标,本研究结果表明,与常规施肥处理相比,翻压山豆绿肥并配施氮肥处理的土壤碳库指数、土壤碳库管理指数增加了 1.01%~18.49% 和 1.30%~34.52%; 前人研究也表明^[7-9],翻压紫云英绿肥并配施氮肥较常规施肥能有效提高土壤碳库指数和碳库管理指数。综上可见,明确绿肥翻压量及氮肥施加量合适的配比,既能达到减施氮肥的目的,还对提高土壤碳库稳定性具有积极意义。

土壤酶作为生物催化剂,能反映土壤中物质代谢的旺盛程度,对农田管护措施比较敏感^[32]。本研究结果表明,与不施肥处理相比,翻压绿肥并配施氮肥能有效提高稻田土壤纤维素酶、蔗糖酶、 β -葡萄糖苷酶活性,这可能是由于一方面 β -葡萄糖苷酶与纤维酶是参与降解纤维素的主要酶^[33],绿肥的施入增加了酶促底物,从而导致 β -葡萄糖苷酶与纤维素酶的增加;另一方面土壤蔗糖酶与土壤有机质、氮、磷等营养元素含量和微生物数量密切相关^[34-35],绿肥氮肥施入提升了土壤微生态环境,增加了微生物的数量及土壤肥力,因此增加了酶活性。本研究结果还发现,绿肥翻压配施氮肥对过氧化氢酶无显著影响,但李增强等^[8]研究表明,绿肥化肥配施较对照能有效促进过氧化氢酶活性增加,这可能是由于不同种类绿肥品种翻压后对土壤酶活性的影响存在差异^[15],也可能受土壤类型、气候

条件以及田间管护措施等外在因素的影响。与常规施肥处理相比,只有部分绿肥氮肥配施处理能有效提高纤维素酶、蔗糖酶、 β -葡萄糖苷酶活性。由此可见,若想实现即减施氮肥,又提升土壤酶活性的目的,探索不同绿肥与氮肥配施比例对土壤酶活性的影响是十分必要的。本研究还发现,在减施等量氮肥条件下随山豆翻压量的增多,总体酶活性均呈递增的趋势,这可能是由于绿肥施入增加了外源有机物质含量,增加了酶促底物^[35],同时改善了土壤微生态环境,提升了微生物的数量,从而提升了土壤酶活性。

近年来,有关土壤酶与土壤有机碳转化的关系进行了大量研究,这些研究表明,某些土壤酶与土壤有机碳的转化密切相关^[18,36]。本研究结果也表明,蔗糖酶、 β -葡萄糖苷酶、纤维素酶与土壤有机碳各组分呈显著正相关,而过氧化氢酶对土壤有机碳组分无显著影响。这可能是由于纤维素酶、 β -葡萄糖苷酶能促进纤维素分解为葡萄糖,蔗糖酶能促进蔗糖水解成葡萄糖和果糖,这 3 种酶均能直接参与有机物质碳转化的过程^[37],而过氧化氢酶主要功能是解除土壤中过氧化氢的毒害作用,不能直接参加有机物质碳转化过程^[38],因此其对有机碳库的影响较小。

4 结论

翻压一定量的山豆绿肥并配施减量氮肥既能实现减施氮肥的目的,还能增加土壤活性有机碳组分的含量,提高土壤酶的活性,对改善土壤质量有一定的效果。从提升土壤碳库及酶活的角度来看,以 60% 氮肥 + 37 500 kg·hm⁻² 绿肥模式的综合评价最好。在减施等量氮肥水平下,有机碳各组分含量、碳库管理指数及总体酶活性均呈现出随山豆绿肥翻压量的增加而增加的趋势。土壤有机碳库组分之间存在密切的转化关系,土壤有机碳组分与蔗糖酶、 β -葡萄糖苷酶、纤维素酶之间均正相关 ($P < 0.05$)。

参考文献 References:

- [1] 冯婷婷,符云鹏,李海江,宋显峰,张晓娟. 不同有机物料对土壤有机碳库及烤烟品质的影响. 山东农业科学, 2017, 49(3): 89-93.
FENG T T, FU Y P, LI H J, SONG X F, ZHANG X J. Effects of different organic materials on quality of flue-cured tobacco and organic carbon pool in soils. Shandong Agricultural Sciences, 2017, 49(3): 89-93.
- [2] SHAUNA M, ROBERT G, RICHARD B. Effects of increased atmospheric CO₂, temperature, and soil N availability on root

- exudation of dissolved organic carbon by a N-fixing tree (*Robinia pseudoacacia* L.). *Plant and Soil*, 2000, 222(1/2): 191-202.
- [3] SHARROW S H, ISMAIL S. Carbon and nitrogen storage in agroforests, tree plantations, and pastures in western Oregon, USA. *Agroforestry Systems*, 2004, 60(2): 123-130.
- [4] VANOTTI M B, BUNGY L G, PETERSON A E. Nitrogen Fertilizer and Legumecereal Rotation Effects on Soil Productivity and Organicmatter Dynamics in Wisconsin. Boca Raton: CRC Press, 1997, 105-119.
- [5] 马艳芹, 钱晨晨, 孙丹平, 邓丽萍, 黄国勤, 陆卫斌. 施氮水平对稻田土壤温室气体排放的影响. *农业工程学报*, 2016, 32(S2): 128-134.
- MA Y Q, QIAN C C, SUN D P, DENG L P, HUANG G Q, LU W B. Effect of nitrogen fertilizer application on greenhouse gas emissions from soil in paddy field. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32(S2): 128-134.
- [6] 杨滨娟, 黄国勤, 兰延, 陈洪俊, 王淑彬. 施氮和冬种绿肥对土壤活性有机碳及碳库管理指数的影响. *应用生态学报*, 2014, 25(10): 2907-2913.
- YANG B J, HUANG G Q, LAN Y, CHEN H J, WANG S B. Effects of nitrogen application and winter green manure on soil active organic carbon and the soil carbon pool management index. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2014, 25(10): 2907-2913.
- [7] 马艳芹, 黄国勤. 紫云英还田配施氮肥对稻田土壤碳库的影响. *生态学杂志*, 2019, 38(1): 129-135.
- MA Y Q, HUANG G Q. Effects of combined application of Chinese milk vetch (*Astragalus sinicus* L.) and nitrogen fertilizer on paddy soil carbon pool. *Chinese Journal of Ecology*, 2019, 38(1): 129-135.
- [8] 李增强, 张贤, 王建红, 曹凯, 徐昌旭, 曹卫东. 化肥减施对紫云英还田土壤活性有机碳和碳转化酶活性的影响. *植物营养与肥料学报*, 2019, 25(4): 525-534.
- LI Z Q, ZHANG X, WANG J H, CAO K, XU C X, CAO W D. Effect of chemical fertilizer reduction with return of Chinese milk vetch (*Astragalus sinicus* L.) on soil labile organic carbon and carbon conversion enzyme activities. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2019, 25(4): 525-534.
- [9] 李增强, 张贤, 王建红, 曹凯, 徐昌旭, 曹卫东. 紫云英施用量对土壤活性有机碳和碳转化酶活性的影响. *中国土壤与肥料*, 2018(4): 14-20.
- LI Z Q, ZHANG X, WANG J H, CAO K, XU C X, CAO W D. Effects of Chinese milk vetch (*Astragalus sinicus* L.) application rate on soil labile organic carbon and C transformation enzyme activities. *Soils and Fertilizers Sciences in China*, 2018(4): 14-20.
- [10] 胡启良. 紫云英油菜混播与氮肥减施对双季稻田土壤碳氮和微生物群落多样性的影响. 南昌: 江西农业大学硕士学位论文, 2022.
- HU Q L. Effects of mixed cropping of chinese milk vetch and rape seed and reduced application of nitrogen fertilizer carbon and nitrogen in soil and microbial community diversity on double cropping rice field. Master Thesis. Nanchang: Jiangxi Agricultural University, 2022.
- [11] 王晋龙, 孙崇凤, 程永钢, 郑普山, 洪坚平. 不同绿肥对复垦地土壤化学性状及酶活性的影响. *中国土壤与肥料*, 2022(9): 85-93.
- WANG J L, SUN C F, CHENG Y G, DENG P S, HONG J P. Effects of different green manures on chemical properties and enzyme activities of reclaimed soil. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2022(9): 85-93.
- [12] 冯晓玲, 王俊, 高媛, 豆莹, 方震文. 绿肥和施氮对旱作冬小麦农田土壤酶活性的影响. *干旱地区农业研究*, 2022, 40(3): 129-135.
- FENG X L, WANG J, GAO Y, DOU Y, FANG Z W. Effects of green manure and nitrogen application on soil enzyme activities in a dryland winter wheat field. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2022, 40(3): 129-135.
- [13] LI S, ZHANG S R, PU Y L, LI T, XU X X, JIA Y X, DENG O G, GUO S. Dynamics of soil labile organic carbon fractions and C-cycle enzyme activities under straw mulch in Chengdu Plain. *Soil and Tillage Research*, 2016, 155: 289-297.
- [14] 张黎明, 邓小华, 周米良, 田峰, 赵炯平, 江智敏, 菅攀锋, 张明发. 不同种类绿肥翻压还田对植烟土壤微生物量及酶活性的影响. *中国烟草科学*, 2016, 37(4): 13-18.
- ZHANG L M, DENG X H, ZHOU M L, TIAN F, ZHAO J P, JIANG Z M, JIAN P F, ZHANG M F. Effects of different green manures on microbial biomass and enzyme activities of tobacco planting Soil. *Chinese Tobacco Science*, 2016, 37(4): 13-18.
- [15] 陈利云, 汪之波, 呼丽萍. 6种豆科绿肥植物与苹果树套种对果园土壤碳氮特征的影响. *草地学报*, 2021, 29(4): 671-676.
- CHEN L Y, WANG Z B, HU L P. Effects of interplanting six leguminous green manure plants in apple orchard on soil carbon and

- nitrogen characteristics. *Acta Agrestia Sinica*, 2021, 29(4): 671-676.
- [16] SIX J, ELLIOTT E T, PAUSTIAN K, DORAN W J. Aggregation and soil organic matter accumulation in cultivated and native grassland soils. *Soil Science Society of America Journal*, 1998, 62(5): 1367-1377.
- [17] 徐明岗, 于荣, 孙小凤, 刘骅, 王伯仁, 李菊梅. 长期施肥对我国典型土壤活性有机质及碳库管理指数的影响. *植物营养与肥料学报*, 2006(4): 459-465.
- XU M G, YU R, SUN X F, LIU Y, WANG B R, LI J M. Effects of long-term fertilization on labile organic matter and carbon management index (CMI) of the typical soils of China. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2006(4): 459-465.
- [18] 关松荫. 土壤酶及其研究法. 北京: 农业出版社, 1986.
- GUAN S Y. *Soil Enzyme and Study Method*. Beijing: Agricultural Press, 1986.
- [19] SHI W, DELL E, BOWMAN D, LYEMPERUMALK. Soil enzyme activities and organic matter composition in a turfgrass chronosequence. *Plant and Soil*, 2006, 288-296.
- [20] GARCIA R R, OCHOA V, HINOJOSA M B, CARREIRA J A. Suitability of enzyme activities for the monitoring of soil quality improvement in organic agricultural systems. *Soil Biology and Biochemistry*, 2008, 40(9): 2137-2145.
- [21] 和文祥, 谭向平, 王旭东, 唐明, 郝明德. 土壤总体酶活性指标的初步研究. *土壤学报*, 2010, 47(6): 1232-1236.
- HE W X, TAN X P, WANG X D, TANG M, HAO M D. Study on total enzyme activity index in soils. *Acta Pedologica Sinica*, 2010, 47(6): 1232-1236.
- [22] 李梅, 许蕊淇, 陈德彬, 岳万勇, 尹雪, 张薇. 不同药剂拌种防治马铃薯晚疫病试验. *云南农业科技*, 2019(6): 46-48.
- LI M, XU R Q, CHEN D B, YUE W Y, YIN X, ZHANG W. Experiment on controlling potato late blight by seed dressing with different chemicals. *Yunnan Agricultural Science and Technology*, 2019(6): 46-48.
- [23] LAL R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. *Science*, 2004, 304: 1623-1627.
- [24] 周国朋, 曹卫东, 白金顺, 聂军, 徐昌旭, 曾闹华, 高嵩涓, 王艳秋, 志水胜好. 多年紫云英—双季稻下不同施肥水平对两类水稻土有机质及可溶性有机质的影响. *中国农业科学*, 2016, 49(21): 4096-4106.
- ZHOU G P, CAO W D, BAI J S, NIE J, XU C X, ZENG N H, GAO S J, WANG Y Q, Shimizu Katsuyoshi. Effects of different fertilization levels on soil organic matter and dissolved organic matter in two paddy soils after multi-years' rotation of Chinese milk vetch and double-cropping rice. *Scientia Agricultura Sinica*, 2016, 49(21): 4096-4106.
- [25] 常单娜. 我国主要绿肥种植体系中土壤可溶性有机物特性研究. 北京: 中国农业科学院硕士学位论文, 2015.
- CHANG D N. Characteristics of soil dissolved organic matter in main green manure plantation systems in China. Master Thesis. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2015.
- [26] HAYNES R J. Labile organic matter fractions as central components of the quality of agricultural soils: An overview. *Advances in Agronomy*, 2005, 85: 221-268.
- [27] 杨滨娟, 黄国勤, 钱海燕. 秸秆还田配施化肥对土壤温度、根际微生物及酶活性的影响. *土壤学报*, 2014, 51(1): 150-157.
- YANG B J, HUANG G Q, QIAN H Y. Effects of straw incorporation plus chemical fertilizer on soil temperature, root microorganisms and enzyme activities. *Acta Pedologica Sinica*, 2014, 51(1): 150-157.
- [28] SHAH Z, AHMAD S R, RAHMAN H U. Soil microbial biomass and activities as influenced by green manure legumes and N fertilizer in rice-wheat system. *Pakistan Journal of Botany*, 2010, 42(4): 2589-2598.
- [29] 吕茂奎, 谢锦升, 周艳翔, 曾宏达, 江军, 陈细香, 胥超, 陈坦, 付林池. 红壤侵蚀地马尾松人工林恢复过程中土壤非保护性有机碳的变化. *应用生态学报*, 2014, 25(1): 37-44.
- LYU M K, XIE J S, ZHOU Y X, ZENG H D, JIANG J, CHEN X X, XU C, CHEN T, FU L C. Dynamics of unprotected soil organic carbon with the restoration process of *Pinus massoniana* plantation in red soil erosion area. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2014, 25(1): 37-44.
- [30] 张贵龙, 赵建宁, 宋晓龙, 刘红梅, 张瑞, 姬艳艳, 杨殿林. 施肥对土壤有机碳含量及碳库管理指数的影响. *植物营养与肥料学报*, 2012, 18(2): 359-365.
- ZHANG G L, ZHAO J N, SONG X L, LIU H M, ZHANG R, JI Y Y, YANG D L. Effects of fertilization on soil organic carbon and carbon pool management index. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2012, 18(2): 359-365.
- [31] BLAIR G J, LEFROY R, LISLE L. Soil carbon fractions based on their degree of oxidation, and the development of a carbon

- management index for agricultural systems. *Australian Journal of Agricultural Research*, 1995, 46(7): 1459.
- [32] 陈娟, 马忠明, 刘莉莉, 吕晓东. 不同耕作方式对土壤有机碳、微生物量及酶活性的影响. *植物营养与肥料学报*, 2016, 22(3): 667-675.
CHEN J, MA Z M, LIU L L, LYU X D. Effect of tillage system on soil organic carbon, microbial biomass and enzyme activities. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2016, 22(3): 667-675.
- [33] STRATEN P T, GULDBERG P, SCHRAMA D, ANDERSEN M H, MOERCH U, SEREMET T, SIEDEL C, REISFELD R A, BECKER J C. In situ cytokine therapy: Redistribution of clonally expanded T cells. *European Journal of Immunology*, 2001, 31(1): 250-258.
- [34] 王峥宇, 廉宏利, 孙悦, 马梓淇, 田平, 齐华, 姜英. 秸秆还田深度对春玉米农田土壤有机碳、氮含量和土壤酶活性的影响. *农业资源与环境学报*, 2021, 38(4): 636-646.
WANG Z Y, LIAN H L, SUN Y, MA Z Q, TIAN P, QI H, JIANG Y. Effects of straw return depth on soil organic carbon, nitrogen content, and soil enzyme activity of spring maize field. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2021, 38(4): 636-646.
- [35] 荆佳强, 萨仁其力莫格, 秦洁, 张海芳, 李明, 杨殿林. 利用方式对贝加尔针茅草原土壤微生物群落结构与土壤酶活性的影响. *中国草地学报*, 2022, 44(2): 33-40.
JING J Q, Sarenqilimoge, QIN J, ZHANG H F, LI M, YANG D L. Effects of utilization methods on soil microbial community structure and soil enzyme activity in *Stipa baicalensis* steppe. *Chinese Journal of Grassland*, 2022, 44(2): 33-40.
- [36] 王鹏, 郑学博, 梁洪波, 宋文静, 季璇, 徐艳丽, 况帅, 董建新. 不同施肥模式对植烟棕壤活性有机碳组分和酶活性的影响. *华北农学报*, 2021, 36(1): 187-196.
WANG P, ZHENG X B, LIANG H B, SONG W J, JI X, XU Y L, KUANG S, DONG J X. Effects of different fertilization models on active organic carbon components and enzyme activities of tobacco-growing brown soil. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2021, 36(1): 187-196.
- [37] WICKINGS K, GRANDY A S, REED S C, CLEVELAND C C. The origin of litter chemical complexity during decomposition. *Ecology Letter*, 2012, 15(10): 1180-1188.
- [38] 韩召强, 陈效民, 曲成闯, 张晓玲, 张俊, 黄春燕, 刘云梅. 生物质炭对黄瓜连作土壤理化性状、酶活性及土壤质量的持续效应. *植物营养与肥料学报*, 2018, 24(5): 1227-1236.
HAN Z Q, CHEN X M, QU C C, ZHANG X L, ZHANG J, HUANG C Y, LIU Y M. Sustained effects of biochar application on physico-chemical properties, enzyme activities and quality of soil with continuous planting of cucumber. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2018, 24(5): 1227-1236.

(责任编辑 苟燕妮)

如有印装质量问题, 请将原杂志寄回本刊编辑部, 由本部负责调换。