

不同有机物料还田对白浆土土壤化学计量特征及胞外酶活性的影响

高瑞敏^{1,2}, 严君^{1,2}, 韩晓增¹, 陈旭^{1,2}, 邹文秀^{1,2},
陆欣春^{1,2}, 许梦琪^{1,3}, 杨舒纯^{1,2}, 蒋锐⁴

(1. 中国科学院东北地理与农业生态研究所黑土地保护与利用重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150081;
2. 中国科学院大学现代农业科学学院, 北京 100049; 3. 东北林业大学林学院, 黑龙江 哈尔滨 150040;
4. 北大荒集团八五二分公司农业技术推广中心, 黑龙江, 双鸭山 155100)

摘要:为探究不同有机物料还田对白浆土土壤化学计量特征及胞外酶活性的影响,在东北白浆土地区开展2 a定位试验,设置常规耕作对照(CK,无秸秆无有机肥添加)、秸秆还田(S)、有机肥还田(M)和秸秆搭配有机肥还田(SM)共4个处理。结果表明,与CK相比,施用有机物料均可增加土壤有机碳、全氮和全磷含量,分别增加1.81%~6.91%、1.54%~7.48%和2.04%~7.26%,但对土壤C:N、C:P、N:P无显著影响。施用有机物料均可显著增加土壤碳、氮、磷获取酶的活性,其中土壤氮获取酶活性的增加最为显著,增幅为60.03%~131.15%,且有机肥还田和秸秆搭配有机肥还田对3种土壤获取酶的提升效果优于秸秆还田处理。胞外酶化学计量散点图结果表明,土壤微生物群落受碳和磷的共同限制,而有机物料的投入可缓解这种限制;基于随机森林分析发现,土壤有效磷、碱解氮、微生物量碳、微生物量氮和微生物量磷是影响土壤微生物碳和磷限制指标的重要因素。

关键词:白浆土;有机物料还田;土壤化学计量比;土壤胞外酶活性;土壤微生物养分限制

中图分类号:S158; S34 **文献标志码:**A

Effects of returning different organic materials to soil on stoichiometric characteristics and extracellular enzyme activities of albic soil

GAO Ruimin^{1,2}, YAN Jun^{1,2}, HAN Xiaozeng¹, CHEN Xu^{1,2}, ZOU Wenxiu^{1,2},
LU Xinchun^{1,2}, XU Mengqi^{1,3}, YANG Shuchun^{1,2}, JIANG Rui⁴

(1. Key Laboratory of Black Land Protection and Utilization, Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Harbin, Heilongjiang 150081, China; 2. College of Advanced Agricultural Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. College of Forestry, Northeast Forestry University, Harbin, Heilongjiang 150040, China; 4. Agricultural Technology Extension Center of Beidahuang Group 852 Company, Shuangyashan, Heilongjiang 155100, China)

Abstract: To explore the effects of different organic materials returning on soil stoichiometric characteristics and extracellular enzyme activities in albic soil, a two-year positioning experiment was conducted in the albic soil region of Northeast China. Four treatments were established: conventional tillage control (CK, with no straw and organic fertilizer addition), straw returning (S), organic fertilizer returning (M) and straw combined with organic fertilizer returning (SM). The results indicated that, compared with the control, the application of organic materials increased soil organic carbon, total nitrogen, and total phosphorus contents increased by 1.81%~6.91%, 1.54%~7.48%, and 2.04%~7.26%, respectively, but had no significant effect on soil C:N, C:P and N:P ratios. Fur-

收稿日期:2024-02-02

修回日期:2024-04-09

基金项目:国家重点研发计划(2022YFD1500802);黑龙江省“揭榜挂帅”科技攻关项目(2021ZXJ05B03);中国科学院战略性先导科技专项A类(XDA28070000);现代农业产业技术体系建设专项资金资助项目(CARS-04)

作者简介:高瑞敏(2000-),女,陕西榆林人,硕士研究生,研究方向为土壤微生物生态。E-mail: gaoruimin@iga.ac.cn

通信作者:严君(1982-),女,宁夏灵武人,副研究员,主要从事土壤微生物生态研究。E-mail: yanjun@iga.ac.cn

thermore, the application of organic materials significantly increased the activities of soil carbon, nitrogen and phosphorus acquisition enzymes, with the most pronounced increase observed in soil nitrogen acquisition enzyme activity, ranging from 60.03% to 131.15%. Notably, the effect of organic fertilizer returning to the field and straw combined with organic fertilizer returning on the three soil acquisition enzymes was better than that of straw returning treatment. The results from the extracellular enzyme stoichiometric scatter plot showed that the soil microbial community was jointly limited by carbon and phosphorus, and the input of organic materials could alleviate this limitation. Based on random forest analysis, it was discovered that soil available phosphorus, available nitrogen, microbial biomass carbon, microbial biomass nitrogen and microbial biomass phosphorus were important factors affecting soil microbial carbon and phosphorus limitation indicators.

Keywords: albic soil; organic materials returning; soil stoichiometric ratios; soil extracellular enzyme activity; soil microbial nutrients limitation

有机物料富含有机质、蛋白质和氮、磷、钾及多种微量元素在内的矿质元素,养分全面且肥效持久,在改善土壤肥力和为植物提供营养等方面具有重要作用^[1]。合理的有机物料还田措施能够显著改善土壤结构,提升土壤保水保肥能力,提高土壤微生物活性,从而构建健康稳定的土壤生态系统^[2]。作为一种环境友好型的土壤改良措施,有机物料还田技术近年来受到了广泛关注和研究。

胞外酶是评价土壤质量的重要指标,参与土壤生态系统中许多重要的生物化学过程^[3]。胞外酶对土壤环境变化较为敏感,可直接评估土壤微生物活性及微生物对土壤环境中营养物质循环的贡献,同时也有助于推断微生物获取碳、氮或磷的相对能力^[4]。土壤胞外酶种类繁多,目前被广泛研究的主要包含参与碳循环的 β -1,4-葡萄糖苷酶(β -1,4-glucosidase, BG)、参与氮循环的 β -1,4-N-乙酰葡萄糖苷酶(β -1,4-N-acetylglucosaminidase, NAG)和亮氨酸氨基肽酶(leucine aminopeptidase, LAP),以及参与磷循环的酸性磷酸酶(APS)等^[1]。有机物料是农田土壤有机质和氮、磷、钾等矿质养分的重要来源,与仅施用无机肥料相比,施用有机物料通常会增加土壤胞外酶活性,这反映了其更高的养分循环能力^[5]。Wu等^[6]研究发现,秸秆还田显著增加了东北黑土0~20 cm土层土壤N-获取酶活性,且N-获取酶活性同微生物生物量之间存在显著的正相关关系。Koishi等^[7]研究表明,秸秆和绿肥还田能够显著显著增加黄绵土土壤BG和NAG活性,而施用粪肥则降低了这两种酶活性。此外,Jiang等^[8]研究表明,与不施肥相比,长期添加有机肥可提高砂质红壤BG、NAG、LAP和APS的活性。Ali等^[9]对小麦-玉米种植系统的研究发现,APS、LAP以及NAG活性均可通过长期施用有机肥而显著改变。

白浆土是东北黑土地主要耕地土壤类型之一,黑土层薄,白浆层酸、硬、瘦,限制了作物产量的提升^[10]。改良与充分利用该类土壤资源,对于改变东北地区白浆土生产力低的现状及保障我国粮食安全具有重要意义。目前有机物料还田已被证实可显著改良白浆土土壤物理结构与化学性质,改善土壤微生态环境,提高作物产量^[11-12]。然而,不同有机物料还田对白浆土土壤胞外酶的化学计量特征及微生物资源限制情况尚不明确。基于此,本研究通过开展不同有机物料还田对白浆土土壤微生物养分状态和代谢限制的试验,以期明晰土壤微生物对有机物料还田过程的响应及其对土壤养分循环的影响。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验于2020—2022年在黑龙江省双鸭山市852农场管理区(46°17'N, 132°44'E)开展,该地区属寒温带大陆性季风气候,多年平均气温3.2℃,多年平均降水量548 mm,10℃以上平均活动积温2 700℃,年平均无霜期140~150 d。土壤类型为典型白浆土,0~15 cm土层土壤基本理化性质为:有机碳20.0 g·kg⁻¹,全氮1.73 g·kg⁻¹,碱解氮132.4 mg·kg⁻¹,全磷0.67 g·kg⁻¹,有效磷20.9 mg·kg⁻¹,全钾21.6 g·kg⁻¹,速效钾110 mg·kg⁻¹,pH值6.1。

1.2 试验设计

试验设置4个处理:常规耕作对照(CK,无秸秆无有机肥添加),秸秆还田(S,玉米秸秆还田量10 000 kg·hm⁻²,烘干基计重),有机肥还田(M,腐熟牛粪施用量30 000 kg·hm⁻²,烘干基计重),秸秆搭配有机肥还田(SM,玉米秸秆还田量10 000 kg·hm⁻²+腐熟牛粪施用量30 000 kg·hm⁻²);每个处理4次重复,随机排列,共16个小区,小区面积为24

m²。还田措施于每年玉米收获后进行,首先使用铁锹在各还田处理小区挖一条相应深度的“垄沟”,按处理设置分别将粉碎处理的玉米秸秆、有机肥平铺在“垄沟”的横截面,再将土覆盖于横截面,确保秸秆、有机肥与土壤充分混合。供试秸秆为上茬玉米收获后的秸秆,其养分含量为有机碳 410.0 g·kg⁻¹,全氮 15.4 g·kg⁻¹,全磷 5.77 g·kg⁻¹,全钾 16.4 g·kg⁻¹;有机肥取自试验地附近养殖场的腐熟牛粪,其养分含量为有机碳 243.5 g·kg⁻¹,全氮 16.0 g·kg⁻¹,全磷 5.88 g·kg⁻¹,全钾 16.2 g·kg⁻¹。

供试作物为玉米(‘德美亚 3 号’),每年 5 月 10 日左右播种,同年 10 月 4 日左右收获,种植密度为 7 万株·hm⁻²。播种时每个小区施入氮肥(尿素) 65 kg·hm⁻²、磷肥(磷酸二铵) 70.0 kg·hm⁻²、钾肥(硫酸钾) 60.0 kg·hm⁻²作为底肥,在玉米大喇叭口期追施氮肥 65 kg·hm⁻²,作物生长期无灌溉,其余管理措施同当地大田。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 土壤样品采集 于 2022 年 10 月玉米收获时,采用 9 点采样法采集各处理 0~15 cm 土层土壤样品,将相同处理的土壤样品混合均匀,挑除根系、植物残体及其他可见的杂物,过 2 mm 筛后分为两部分,一部分储存在 4℃ 冰箱,用于胞外酶活性和土壤微生物生物量的测定;另一部分风干,用于土壤基础理化性质测定。

1.3.2 测定项目及计算方法 土壤有机碳(OC)与全氮(TN)含量采用元素分析仪(Elementar vario MACRO cube, Germany)测定;土壤碱解氮(AN)含量采用碱解扩散法测定;土壤全磷(TP)含量采用碱熔-钼锑抗比色法测定;土壤有效磷(AP)含量采用碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法测定;土壤微生物量碳(MBC)、微生物量磷(MBP)和微生物量氮(MBN)的含量采用氯仿熏蒸浸提法测定^[13]。

土壤胞外酶活性采用 96 微孔板荧光法测定^[14],以 β-1,4-葡萄糖苷酶(β-1,4-glucosidase, BG)为碳获取酶,亮氨酸氨基肽酶(leucine aminopeptidase, LAP)与 β-1,4-N-乙酰氨基葡萄糖苷酶(β-1,4-N-acetylglucosaminidase, NAG)为氮获取酶,酸性磷酸酶(acid phosphatase, APS)为磷获取酶,以每小时每克土壤样品所得底物的摩尔数(nmol·g⁻¹·h⁻¹)表示土壤胞外酶活性的大小。

试验采用 3 种方法分析土壤微生物的元素限制情况^[15]。第一种方法基于散点图,以(NAG+LAP)/APS 活性作为 X 轴, BG/(NAG+LAP) 活性作为 Y 轴,散点图的 4 个象限分别代表氮限制、磷限

制、碳和磷共同限制及碳和氮共同限制。第二种方法计算了 3 个比率,分别为胞外酶 C:N(BG:(NAG+LAP))、胞外酶 C:P(BG:APS)、胞外酶 N:P((NAG+LAP):APS),其中较高的胞外酶 C:N 和胞外酶 C:P 分别代表较低的 N 限制和 P 限制。第三种方法基于矢量分析,矢量长度(L)和矢量角度(A),计算公式如下:

$$L = \sqrt{(\ln BG / \ln [NAG + LAP])^2 + (\ln BG / \ln APS)^2}$$

$$A = \text{Degrees}(\text{ATAN2}(\ln BG / \ln APS),$$

$$(\ln BG / \ln [NAG + LAP]))$$

式中,矢量长度增加表明微生物碳的局限性增加;矢量角度>45°和<45°分别表示磷和氮的限制。

1.4 数据处理

采用 SPSS 27.0 单因素方差分析(one-way ANOVA)和显著性检验,采用 R 4.3.0 进行土壤碳氮磷化学计量比与胞外酶活性指标的相关性分析,采用随机森林分析确定胞外酶活性限制影响因素的贡献度,利用 Origin 2022 绘图。

2 结果与分析

2.1 不同有机物料还田对土壤养分及其化学计量特征的影响

施用不同有机物料对白浆土土壤碳、氮、磷含量及化学计量比产生的影响不同(表 1),S、M 和 SM 处理均可较 CK 增加白浆土的有机碳(OC)、全氮(TN)、碱解氮(AN)、全磷(TP)和有效磷(AP)含量,且均以 SM 处理的增幅最大。土壤 AP 与 AN 含量的变化趋势一致,均表现为 SM>M>S>CK,SM 处理的 AP 与 AN 含量分别较 CK 显著提高 7.26% 与 7.48%(P<0.05)。土壤 C:N、C:P、N:P 变化范围分别为 11.01~11.06、28.92~29.57 和 2.62~2.68,不同有机物料还田下土壤碳、氮、磷含量的化学计量比与 CK 均无显著差异。

2.2 不同有机物料还田对土壤微生物量及其化学计量特征的影响

施用不同有机物料均有利于土壤微生物量碳(MBC)、微生物量氮(MBN)和微生物量磷(MBP)含量的增加(图 1A~C)。与 CK 相比,M 和 SM 处理的 MBC 含量分别显著增加 59.09% 和 92.24%(P<0.05),S、M 和 SM 处理的 MBN 含量分别显著增加 73.65%、109.61% 和 131.90%(P<0.05),S、M 和 SM 处理的 MBP 含量分别显著增加 105.43%、117.26% 和 261.46%(P<0.05)。由图 1D~F 可知,S、M 和 SM 处理均较 CK 显著降低了土壤 MBC:MBN 和 MBC:MBP,其中 S 处理的 MBC:MBN 降幅更大,S

和 SM 处理的 MBC : MBP 降幅更大, SM 处理的 MBN : MBP 值较 CK 显著降低 34.77% ($P < 0.05$)。

2.3 不同有机物料还田对土壤胞外酶活性及其化学计量特征的影响

不同处理之间土壤胞外酶活性及其化学计量比存在差异(图 2)。与 CK 相比, SM 和 M 处理的碳获取酶(BG)活性显著增加 31.04% 和 16.52% ($P < 0.05$)。LAP 和 NAG 均为土壤中重要的氮获取酶,与 CK 相比, S、M 与 SM 处理的氮获取酶(NAG + LAP)活性显著增加 65.06% ~ 115.88% ($P < 0.05$)。S、M 和 SM 处理的磷获取酶(APS)活性均较 CK 显著增加,增幅为 28.09% ~ 46.02% ($P < 0.05$),其中

SM 处理酶活性最高,为 $466.40 \text{ nmol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ 。与 CK 相比, S、M 与 SM 处理的胞外酶 C : N 显著降低 37.60% ~ 39.29% ($P < 0.05$), C : P 显著降低 10.19% ~ 19.41% ($P < 0.05$); N : P 较 CK 显著增加,其中 M 和 SM 处理分别增加 44.48% 和 47.93% ($P < 0.05$)。

矢量分析结果表明(图 2G、H),有机物料还田处理均显著降低了矢量长度($P < 0.05$);所有处理矢量角度均大于 45° , S、M 和 SM 处理的矢量角度分别较 CK 显著降低 3.89%、5.26% 和 5.77% ($P < 0.05$)。线性回归方程与胞外酶化学计量散点图表明(图 3),矢量长度和矢量角度呈极显著正相关关系($P < 0.001$),所有处理中土壤胞外酶均受碳与磷共同限制。

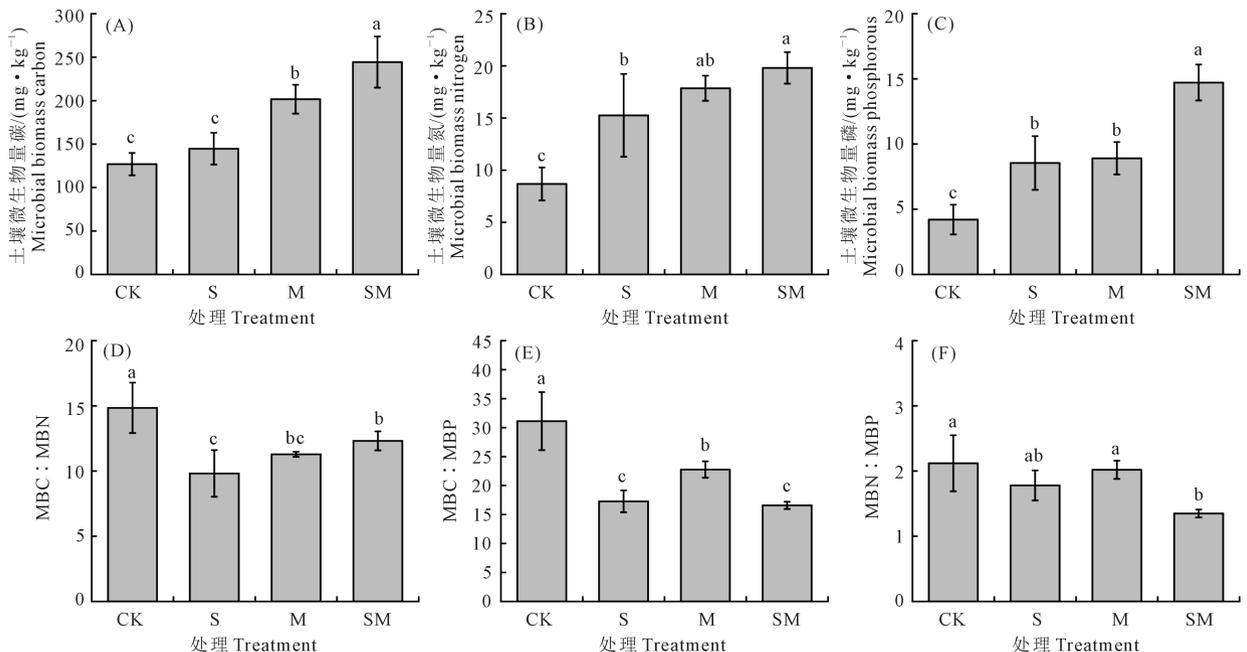
表 1 有机物料还田对白浆土土壤碳、氮、磷含量及其化学计量比的影响

Table 1 Effects of organic materials returning on soil carbon, nitrogen and phosphorus contents and their stoichiometric ratios of albic soil

处理 Treatment	有机碳 OC $\text{/(g} \cdot \text{kg}^{-1}\text{)}$	全氮 TN $\text{/(g} \cdot \text{kg}^{-1}\text{)}$	全磷 TP $\text{/(g} \cdot \text{kg}^{-1}\text{)}$	碱解氮 AN $\text{/(mg} \cdot \text{kg}^{-1}\text{)}$	有效磷 AP $\text{/(mg} \cdot \text{kg}^{-1}\text{)}$	C : N	C : P	N : P
CK	$18.51 \pm 0.70\text{b}$	$1.68 \pm 0.06\text{b}$	$0.64 \pm 0.01\text{b}$	$128.38 \pm 2.44\text{c}$	$17.40 \pm 0.34\text{c}$	$11.03 \pm 0.03\text{a}$	$29.00 \pm 0.75\text{a}$	$2.63 \pm 0.07\text{a}$
S	$18.83 \pm 0.47\text{b}$	$1.71 \pm 0.05\text{b}$	$0.65 \pm 0.01\text{ab}$	$132.36 \pm 1.04\text{b}$	$18.02 \pm 0.21\text{b}$	$11.06 \pm 0.05\text{a}$	$28.92 \pm 0.49\text{a}$	$2.62 \pm 0.05\text{a}$
M	$19.35 \pm 0.39\text{ab}$	$1.76 \pm 0.03\text{ab}$	$0.66 \pm 0.02\text{a}$	$134.58 \pm 0.99\text{b}$	$18.26 \pm 0.17\text{b}$	$11.01 \pm 0.01\text{a}$	$29.42 \pm 0.28\text{a}$	$2.68 \pm 0.02\text{a}$
SM	$19.78 \pm 0.35\text{a}$	$1.80 \pm 0.03\text{a}$	$0.67 \pm 0.01\text{a}$	$137.98 \pm 2.39\text{a}$	$18.66 \pm 0.06\text{a}$	$11.03 \pm 0.03\text{a}$	$29.57 \pm 0.25\text{a}$	$2.68 \pm 0.03\text{a}$

注: C : N 为土壤有机碳与全氮含量的比值; C : P 为土壤有机碳与全磷含量的比值; N : P 为土壤全氮与全磷含量的比值。同列不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

Note: C : N is the ratio of soil organic carbon content to total nitrogen content. C : P is the ratio of soil organic carbon content to total phosphorus content. N : P is the ratio of total nitrogen content to total phosphorus content. Different lowercase letters in the same column indicate significant differences among treatments ($P < 0.05$).



注:不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。下同。

Note: Different lowercase letters indicate significant differences among treatments ($P < 0.05$). The same below.

图 1 有机物料还田对白浆土土壤微生物量及其化学计量比的影响

Fig. 1 Effects of organic materials returning on microbial biomass and stoichiometry ratio of albic soil

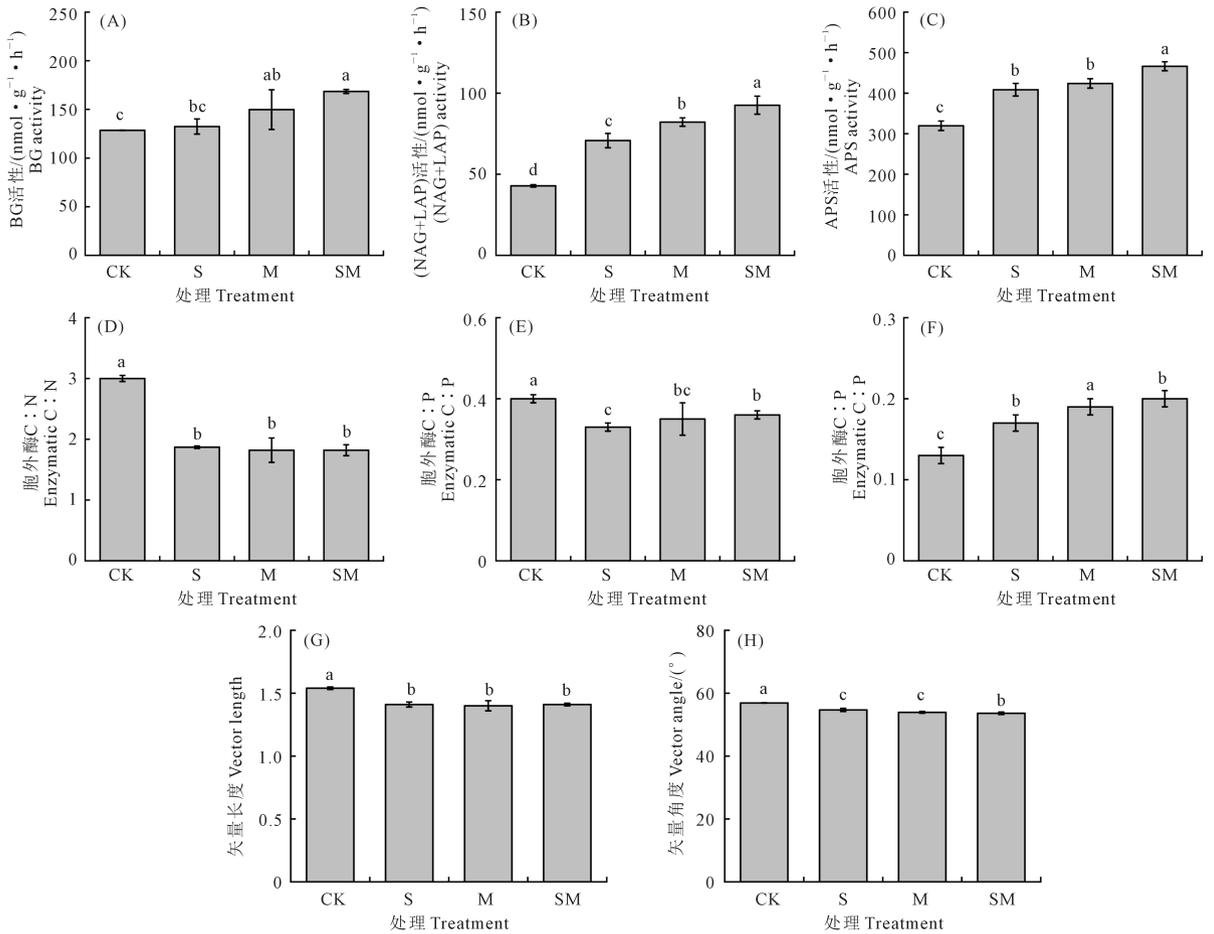


图 2 有机物料还田对白浆土土壤胞外酶活性及其化学计量比的影响

Fig.2 Effects of organic materials returning on extracellular enzyme activities and stoichiometry ratio of albic soil

2.4 土壤性质与胞外酶活性的关系

土壤胞外酶活性及其计量比受到土壤理化性质的调控(图 4),BG 活性同土壤 OC、TN、AN、TP、AP、MBC、MBN、MBP 及 MBN:MBP 呈显著正相关关系($P<0.05$),APS 活性、NAG+LAP 活性同除 C:N、C:P、N:P 外的所有土壤理化性质均呈显著正相关关系($P<0.05$);矢量角度同除 C:N、C:P 与 N:P 外的所有土壤理化性质均呈显著正相关关系($P<0.05$),矢量长度同土壤 AN、TP、AP、MBN、MBP、MBC:MBC:MBP 呈显著正相关关系($P<0.05$)。随机森林分析结果表明(图 5),AP、MBP、MBC:MBN 和 MBC:MBP 是影响矢量长度的关键因子,而 AP、OC、MBC、MBN、MBP、MBC:MBC 则显著影响矢量角度,其中 AP 含量是影响矢量长度和角度的最重要因素。

3 讨论

3.1 有机物料还田对白浆土土壤碳、氮、磷含量及其化学计量特征的影响

外源有机物料还田是增加土壤养分的重要途径^[16],添加外源有机物可以扩大土壤活性有机碳库

的容量,保持有机碳库的供需平衡,显著增加土壤养分含量,增强养分供给能力^[17]。本研究中,不同有机物料还田均为白浆土带来大量有机质,提供了养分支撑,其中有机肥还田(M)和秸秆搭配有机肥还田(SM)处理对土壤碳、氮、磷含量的提升效果优于秸秆还田处理(S),这可能是由于有机肥分解速率快,可在短时间内快速提高土壤速效养分含量^[18]。土壤中碳、氮、磷循环是一个相对复杂、缓慢且稳定的过程。本研究发现,有机物料连续还田 2 a 虽提升了土壤碳、氮、磷含量,但土壤 C:N、C:P 与 N:P 均无显著变化。这可能是由于有机物料投入的时间相对较短,而土壤养分比例的变化需较长时间的调节,短期内难以表现出显著变化;此外,土壤的全量养分还受生物、物理和化学等因素的共同影响。

3.2 有机物料还田对白浆土土壤微生物量碳、氮、磷含量及其化学计量特征的影响

土壤微生物量碳、氮、磷是土壤碳氮磷库中最活跃的组分之一,其含量可直接反映土壤同化和矿化能力,也是微生物分解代谢活性和功能多样性的关键决定因素^[19]。本研究中,有机物料添加显著增

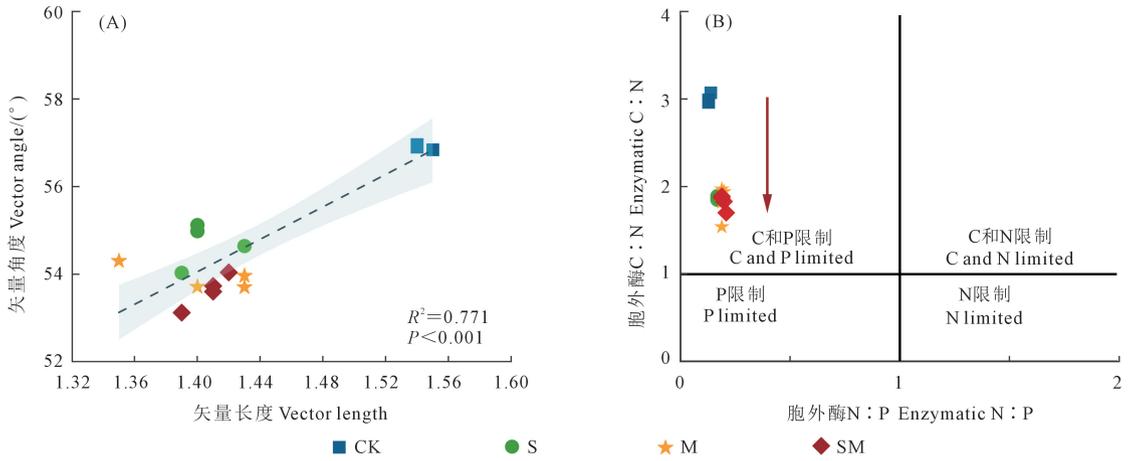


图 3 有机物料还田土壤胞外酶化学计量特征比较分析

Fig.3 Comparative analysis of the stoichiometry characteristic of extracellular enzymes in organic materials returning soil

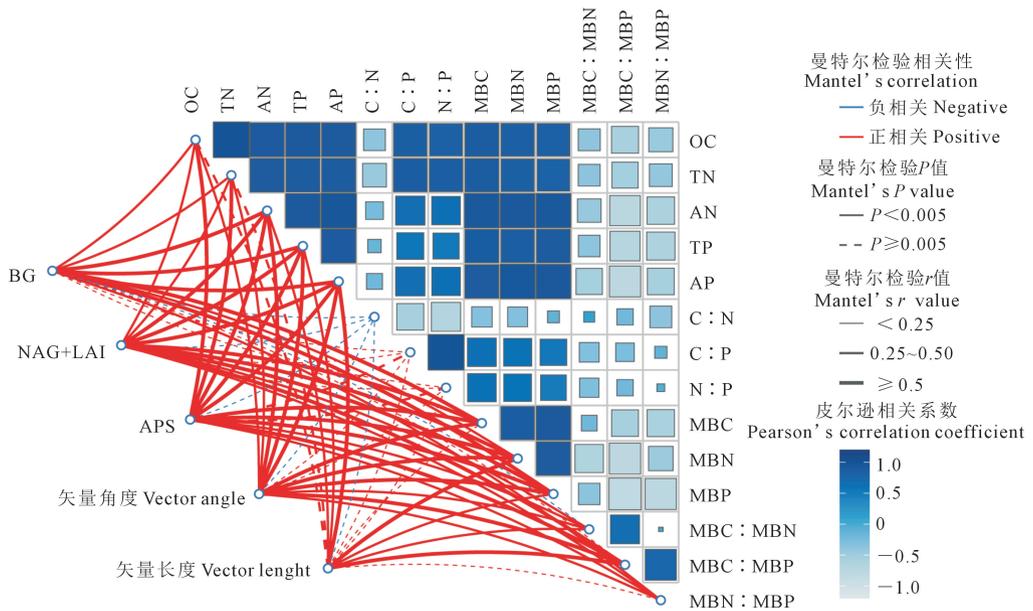
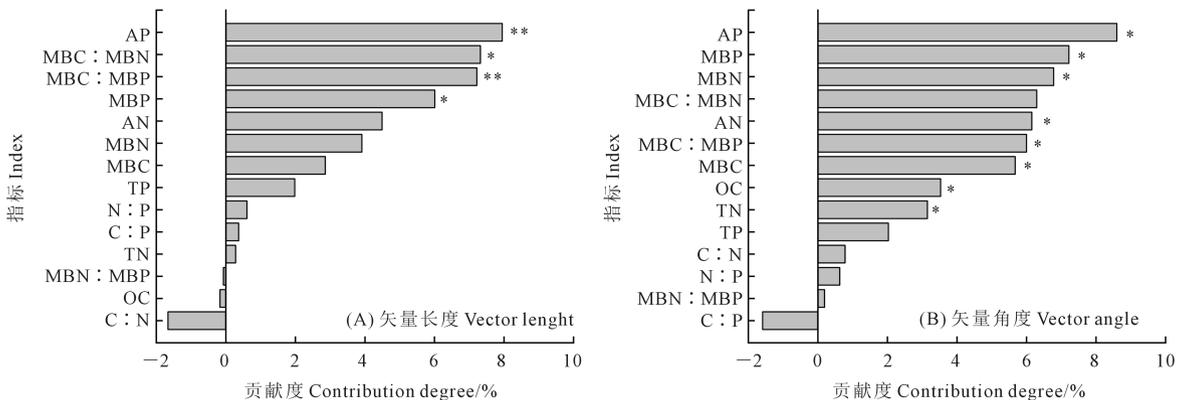


图 4 土壤性质与胞外酶活性相关性热图

Fig.4 Heat map of correlation between soil properties and extracellular enzyme activities



注: * 表示 $P < 0.05$ 水平显著; ** 表示 $P < 0.01$ 水平显著。

Note: * indicate significant at $P < 0.05$ level; ** indicate significant at $P < 0.01$ level.

图 5 土壤胞外酶活性限制因素的随机森林分析

Fig.5 Random forest analysis of limiting factors on soil extracellular enzyme activity

加了土壤的微生物量碳、氮、磷含量,增幅为13.86%~261.46%。这是由于秸秆和有机肥能为土壤提供丰富营养,在改善土壤结构的同时,还可为微生物的生长和代谢提供能量,从而增加了土壤微生物的生物量和活性^[20];此外,有机物料添加通过影响植物根系有机化合物(糖、氨基酸和维生素等)的释放,进一步增加土壤微生物的生物量^[21]。本研究还发现,有机肥还田和秸秆搭配有机肥还田处理对土壤微生物量碳、氮、磷含量的提升效果优于秸秆还田处理,这与有机物料的碳源组成有关,秸秆含有纤维素和木质素等结构稳定的化学成分,大量的芳香环结构和羟基基团难以被微生物降解^[22];而有机肥富含含氧有机化合物(碳水化合物、蛋白质等),比芳香碳和烷基碳更容易被微生物降解利用^[23]。

土壤 MBC 与 MBN 的比值可反映微生物群落结构的特征,土壤细菌、放线菌和真菌的 MBC : MBN 分别为 5 : 1、6 : 1 和 10 : 1^[24]。本研究中,不同组重复下 CK 处理土壤 MBC : MBN 值为 13.76 ~ 17.74,有机物料还田后土壤 MBC : MBN 显著降低至 8.55~13.39,其中 S 处理最低。梁尧等^[25]研究发现,秸秆与有机肥 C : N 分别约为 60 : 1 与 10 : 1,高 C : N 值的有机物料进入土壤后,由于易分解的能源物质(主要是碳源)含量较丰富,导致土壤中矿质氮表现为净生物固持,随能源物质的消耗,C : N 值逐渐降低,微生物固持氮会重新释放^[26]。本研究发现,有机物料还田后土壤 MBC : MBN 值降低,可能是有机物料的添加为土壤微生物提供了大量碳源与少量氮源,促使微生物为获取足够氮源而迅速增加其生物量,进而降低 MBC : MBN 值^[27]。已有研究表明,有机物料可通过增加有机碳来提高土壤对磷的吸附性,以维持土壤碳磷比和磷的有效性,从而间接提高土壤有效磷含量,减少土壤中磷的淋溶损失^[28]。本研究发现,相比于 CK,有机物料还田降低了土壤 MBC : MBP 与 MBN : MBP,其中秸秆搭配有机肥还田处理的 MBC : MBP 和 MBN : MBP 值最低,分别为 16.58 和 1.35,可能是由于秸秆搭配有机肥还田处理显著提升了 MBP 含量,加速了土壤中不稳定磷向微生物量磷的转化。

3.3 不同有机物料还田对白浆土土壤胞外酶活性及其化学计量特征的影响

作为土壤系统物质循环和能量转换的重要参与者,土壤胞外酶对生物和非生物环境的变化非常敏感,是衡量土壤质量的重要指标^[29]。不同有机物料对白浆土碳、氮、磷获取酶的活性影响不同(图 2),与 CK 相比,除 S 处理碳获取酶无显著变化外,

各有机物料还田处理均显著提升了土壤碳、氮、磷获取酶活性,其中 SM 处理效果最为显著。这是由于相较于仅施用矿物肥料,有机物料(如粪便、秸秆)还田可通过增加不稳定的有机物或土壤总有机碳在不同时间范围内以不同的方式来调控微生物活性及养分需求,进而对土壤胞外酶活性产生影响^[30-31]。其中相对于两者单独还田,秸秆和有机肥混合还田为微生物提供了更丰富的碳源,提高了土壤微生物活性,从而促进土壤胞外酶的合成^[21]。土壤胞外酶化学计量比可揭示微生物生长和代谢的能量限制,评估土壤微生物对 C、N 和 P 养分资源的需求^[32]。本研究发现,有机物料还田可显著降低土壤胞外酶 C : N,尽管秸秆和有机肥本身的碳氮比存在显著差异,但不同有机物料间土壤胞外酶 C : N 并无显著差异,这进一步证实了 Kallenbach 等^[33]的结论,即有机物料的 C : N 并非微生物对其反应的准确预测指标。此外,由于长期累积效应和其他间接因素的相互作用,有机物料类型对土壤胞外酶 C : N 的影响机制还需进一步明确^[34]。

矢量长度是衡量土壤微生物是否受到碳可用性限制的重要指标,矢量长度越长表明碳限制越大;矢量角度表明土壤微生物受氮、磷限制的相对程度,矢量角度越大意味着磷限制越大^[35]。本研究中各处理的矢量长度均大于 1.2,矢量角度均大于 45°,有机物料还田处理下两指标均较 CK 显著降低,其中有机肥还田和秸秆搭配有机肥还田处理的降低效果优于秸秆还田处理。通常大量外源有机质的添加会加剧作物与微生物对土壤氮的争夺^[9],但本研究中,有机物料还田下微生物主要受到磷限制,并未转化为氮限制,可能是由于试验地土壤氮呈饱和状态^[14]。此外,有机物料的添加可缓解微生物受到的磷限制,其中有机肥还田和秸秆搭配有机肥还田缓解土壤微生物碳和磷限制的效果更优。

4 结 论

外源有机物料还田可显著促进白浆土土壤速效碳、氮、磷含量与微生物生物量的周转,加速土壤碳、氮、磷循环,相比于无秸秆无有机肥添加处理,施用有机物料处理的土壤有机碳、全氮和全磷含量分别增加 1.81%~6.91%、1.54%~7.48%和 2.04%~7.26%,C 获取酶、N 获取酶及 P 获取酶分别增加 2.99%~31.04%、65.06%~115.88%和 28.09%~46.02%。白浆土土壤微生物的生长主要受土壤碳和磷限制,有机物料还田可有效缓解这两种限制,其中有机肥还田和秸秆搭配有机肥还田处理效果

最优。随机森林分析结果表明,土壤有效磷(AP)、碱解氮(AN)、微生物量碳(MBC)、微生物量氮(MBN)和微生物量磷(MBP)是影响土壤微生物碳和磷限制的重要指标。

参考文献:

- [1] 苗宇, 侯瑞星, 裴浩, 等. 有机物料还田对黑土胞外酶化学计量特征的影响[J]. 农业工程学报, 2023, 39(22): 207-215.
MIAO Y, HOU R X, PEI H, et al. Impact of organic material incorporation on the chemical stoichiometry characteristics of extracellular enzymes in black soil[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2023, 39(22): 207-215.
- [2] 潘艳花, 曹立国, 薛治军, 等. 连续施用农业废弃物组合肥制种玉米田理化性质及酶活性和重金属变化特征[J]. 干旱地区农业研究, 2022, 40(6): 132-146, 184.
PAN Y H, CAO L G, XUE Z J, et al. Characteristics of physicochemical properties, enzyme activities and heavy metal changes of seed maize field under continuous application of agricultural waste compost [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2022, 40(6): 132-146, 184.
- [3] LIU C H, MA J Y, QU T T, et al. Extracellular enzyme activity and stoichiometry reveal nutrient dynamics during microbially-mediated plant residue transformation[J]. Forests, 2023, 14(1): 34.
- [4] FENG L X, CAO B, WANG X J. Response of soil extracellular enzyme activity and stoichiometry to short-term warming and phosphorus addition in desert steppe[J]. PeerJ, 2023, 11: e16227.
- [5] ZHANG Y L, LI T T, WU H H, et al. Effect of different fertilization practices on soil microbial community in a wheat-maize rotation system [J]. Sustainability, 2019, 11(15): 4088.
- [6] WU G H, CHEN Z H, JIANG N, et al. Effects of long-term no-tillage with different residue application rates on soil nitrogen cycling[J]. Soil and Tillage Research, 2021, 212: 105044.
- [7] KOISHI A, BRAGAZZA L, MALTAS A, et al. Long-term effects of organic amendments on soil organic matter quantity and quality in conventional cropping systems in Switzerland [J]. Agronomy, 2020, 10(12): 1977.
- [8] JIANG Y L, ZHANG R Q, ZHANG C P, et al. Long-term organic fertilizer additions elevate soil extracellular enzyme activities and tobacco quality in a tobacco-maize rotation [J]. Frontiers in Plant Science, 2022, 13: 973639.
- [9] ALI S, DONGCHU L, JING H, et al. Soil microbial biomass and extracellular enzymes regulate nitrogen mineralization in a wheat-maize cropping system after three decades of fertilization in a Chinese Ferrosol[J]. Journal of Soils and Sediments, 2021, 21(1): 281-294.
- [10] 中华人民共和国农业部, 中华人民共和国国家发展和改革委员会, 中华人民共和国财政部, 等. 《东北黑土地保护规划纲要(2017-2030年)》[EB/OL]. (2021-04-30). https://www.cas.cn/zt/kjzt/hlhc/htzc/202105/t20210512_4787740.shtml.
Ministry of Agriculture of the PRC, National Development and Reform Commission, Ministry of Finance of the PRC, et al. Outline of northeast black soil protection plan (2017-2030) [EB/OL]. (2021-04-30). https://www.cas.cn/zt/kjzt/hlhc/htzc/202105/t20210512_4787740.shtml.
- [11] 陆欣春, 范欣欣, 邹文秀, 等. 肥沃耕层构建对白浆土土壤肥力

- 和玉米产量的影响[J]. 应用生态学报, 2023, 34(4): 883-891.
- LU X C, FAN X X, ZOU W X, et al. Effects of the construction of fertile and cultivated soil layer on soil fertility and maize yield in albic soil[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2023, 34(4): 883-891.
- [12] ZHANG X T, WANG J, FENG X Y, et al. Effects of tillage on soil organic carbon and crop yield under straw return[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2023, 354: 108543.
- [13] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000: 25-81.
BAO S D. Soil and agricultural chemistry analysis [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000: 25-81.
- [14] ZHANG N W, CHEN X, HAN X Z, et al. Responses of microbial nutrient acquisition to depth of tillage and incorporation of straw in a Chinese Mollisol [J]. Frontiers in Environmental Science, 2021, 9: 737075.
- [15] ZHENG L, CHEN H, WANG Y Q, et al. Responses of soil microbial resource limitation to multiple fertilization strategies[J]. Soil and Tillage Research, 2020, 196: 104474.
- [16] SHANG L R, WAN L Q, ZHOU A A, et al. Effects of organic fertilizer on soil nutrient status, enzyme activity, and bacterial community diversity in *Leymus chinensis* steppe in Inner Mongolia, China [J]. PLoS One, 2020, 15(10): e0240559.
- [17] CSITÁRI G, TÓTH Z, KÖKÉNY M. Effects of organic amendments on soil aggregate stability and microbial biomass in a long-term fertilization experiment (IOSDV) [J]. Sustainability, 2021, 13(17): 1-14.
- [18] 谷月, 吴景贵. 有机物料还田土壤碳、氮及微生物量动态影响研究 [J]. 中国农业科技导报, 2022, 24(4): 126-133.
GU Y, WU J G. Study on dynamic effects of organic materials on soil carbon, nitrogen and microbial biomass [J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2022, 24(4): 126-133.
- [19] XUE H L, LAN X, LIANG H G, et al. Characteristics and environmental factors of stoichiometric homeostasis of soil microbial biomass carbon, nitrogen and phosphorus in China [J]. Sustainability, 2019, 11(10): 11102804.
- [20] LI S P, ZHAO L, WANG C, et al. Synergistic improvement of carbon sequestration and crop yield by organic material addition in saline soil: a global meta-analysis [J]. Science of the Total Environment, 2023, 891: 164530.
- [21] VAHEDI R, RASOULI S M, BARIN M, et al. Interactions between biochar and compost treatment and mycorrhizal fungi to improve the qualitative properties of a calcareous soil under rhizobox conditions [J]. Agriculture, 2021, 11(10): 11100993.
- [22] 赵秀云, 赵昕宇, 杨津津, 等. 堆肥过程中木质素的降解机理及影响因素研究进展[J]. 环境工程, 2021, 39(6): 128-136.
ZHAO X Y, ZHAO X Y, YANG J J, et al. Research progress on lignin degradation mechanism and influencing factors during composting [J]. Environmental Engineering, 2021, 39(6): 128-136.
- [23] HAN M Z, WANG M M, ZHAI G Q, et al. Difference of soil aggregates composition, stability, and organic carbon content between eroded and depositional areas after adding exogenous organic materials [J]. Sustainability, 2022, 14(4): 14042143.
- [24] YU Q G, HU X, MA J W, et al. Effects of long-term organic material applications on soil carbon and nitrogen fractions in paddy fields [J]. Soil and Tillage Research, 2020, 196: 104483.