

矿物调理剂对丘陵红壤天目小香薯产量和酶生态化学计量特征的影响

于金珠¹, 吴辰晨², 姬浩楠¹, 李松昊³, 邬奇峰³, 秦 华¹, 陈俊辉¹

(1. 浙江农林大学 环境与资源学院, 浙江 杭州 311300; 2. 杭州锦海农业科技有限公司, 浙江 杭州 311300;

3. 杭州市临安区农林技术推广中心, 浙江 杭州 311300)

摘要: 【目的】采用田间小区试验研究施用矿物调理剂对天目小香薯 *Ipomoea batatas* 产量、土壤微生物生物量、酶活性及生态化学计量特征的短期影响, 探明影响土壤微生物养分限制的主要因素, 为改善南方丘陵红壤肥力提供理论依据。

【方法】设置空白对照 (ck), 以白云石、钾长石为主要原料制备的矿物调理剂 3 (W1) 和 6 t·hm⁻² (W2) 2 个处理。于天目小香薯收获期测定产量和地上部生物量、土壤化学性质及碳、氮、磷循环相关酶活性。【结果】与 ck 相比, 矿物调理剂显著降低了土壤交换性酸 ($P < 0.05$), 且 W2 处理显著提高了土壤 pH、碱解氮和有效磷质量分数 ($P < 0.05$), 但对天目小香薯产量无显著影响。相比 ck, W1 处理显著提高了土壤微生物生物量氮 (MBN) 质量分数 91.1% ($P < 0.05$), W2 处理提高了微生物生物量碳 (MBC) 质量分数 67.1% ($P < 0.05$), 且两者均显著提高了微生物生物量氮磷比 (MBN/MBP) ($P < 0.05$), 分别提高了 148.2% 和 131.8%。相比 ck, W1 和 W2 处理均显著降低了酸性磷酸酶活性 ($P < 0.05$), 分别降低了 31.9% 和 45.4%, 且 W2 处理显著降低了亮氨酸氨基肽酶活性 (52.4%, $P < 0.05$)。但两者对 β -葡萄糖苷酶、纤维二糖水解酶和 β -1,4-N-乙酰氨基葡萄糖苷酶 (NAG) 无显著影响。土壤酶生态化学计量特征分析发现: W2 处理显著提高了酶化学计量的向量长度 (19.7%, $P < 0.05$), 显著降低了向量角度 (10.5%, $P < 0.05$), 表明施用高量矿物调理剂提高了 MBC 限制, 而缓解了 MBP 限制。冗余分析表明: 土壤 pH、碱解氮、MBC、MBN 是影响土壤酶活性及其化学计量特征的主要因子。【结论】施用矿物调理剂短期内可有效降低土壤酸度, 增加速效养分含量, 缓解土壤微生物磷限制, 从而有助于降低南方丘陵红壤磷限制对作物生长的影响。图 3 表 2 参 32

关键词: 矿物调理剂; 红壤; 土壤微生物; 土壤酶; 天目小香薯

中图分类号: S158.3 文献标志码: A 文章编号: 2095-0756(2023)03-0531-09

Effects of mineral conditioner on the yield of sweet potato and coenzymatic stoichiometry in a hilly red soil

YU Jinzhu¹, WU Chenchen², JI Haonan¹, LI Songhao³, WU Qifeng³, QIN Hua¹, CHEN Junhui¹

(1. College of Environment and Resources, Zhejiang A&F University, Hangzhou 311300, Zhejiang, China;

2. Hangzhou Jinhai Agricultural Science and Technology Co., Ltd., Hangzhou 311300, Zhejiang, China; 3. Agroforestry

Technology Extension Centre of Lin'an District, Hangzhou 311300, Zhejiang, China)

Abstract: [Objective] With a field survey, this study is aimed to investigate the responses of sweet potato (*Ipomoea batatas*) yield, soil microbial biomass, enzyme activity and stoichiometry to mineral conditioner application and determine the main factors affecting the status of soil microbial nutrient limitation so as to provide a theoretical basis for improving the fertility of hilly red soil in Southern China. [Method] With a non-amended control (ck), a mineral conditioner amendment which was prepared from a mixture of dolomite and

收稿日期: 2022-07-31; 修回日期: 2022-11-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (41977083); 浙江省自然科学基金资助项目 (LZ22C160001)

作者简介: 于金珠 (ORCID: 0000-0001-8174-0390), 从事耕地质量培育与提升研究。E-mail: 15957110682@163.com。通信作者: 陈俊辉 (ORCID: 0000-0003-2070-805X), 副教授, 硕士生导师, 从事土壤微生物与碳氮循环研究。E-mail: junhui@zafu.edu.cn

potassium feldspar, was applied at 3 (W1) and 6 t·hm⁻² (W2), respectively. [Result] Compared with ck, the application of mineral conditioner significantly decreased soil exchangeable acid content ($P < 0.05$); The W2 treatment significantly increased soil pH, available nitrogen (N) and available phosphorus (P) contents ($P < 0.05$), but had no significant effect on the yield of sweet potato; Compared with ck, W1 and W2 significantly increased soil microbial biomass nitrogen (MBN) and carbon (MBC) (91.1% and 67.1%, respectively, $P < 0.05$), while both of them increased the ratio of microbial biomass nitrogen/phosphorus ratio (MBN/MBP) (148.2% and 131.8%, respectively, $P < 0.05$); Compared with ck, W1 and W2 significantly reduced the activity of acid phosphatase (by 31.9% and 45.4%, respectively, $P < 0.05$), and W2 treatment significantly reduced the activity of leucine aminopeptidase (by 52.4%, $P < 0.05$), but they had no significant effect on the activities of β -glucosidase, cellobiohydrolase and β -1,4-N-acetylglucosaminidase; Soil enzymatic stoichiometry showed that W2 significantly increased the vector length (by 19.7%, $P < 0.05$) and reduced the vector angle (by 10.5%, $P < 0.05$), indicating that the high amendment rate of mineral conditioner increased microbial C limitation and alleviated their P limitation. As was shown by redundant analysis, soil pH, available N, MBC and MBN were the main factors affecting soil enzyme activity and its stoichiometry. [Conclusion] The application of mineral conditioner can effectively reduce soil acidity, increase the available nutrient content, and alleviate soil microbial P limitation, thereby helping to potentially reduce the P limitation to crop growth in hilly red soils from Southern China. [Ch, 3 fig. 2 tab. 32 ref.]

Key words: mineral conditioner; red soil; soil microorganisms; soil enzymes; *Ipomoea batatas*

土壤酸化是中国耕地面临的主要障碍之一,近30 a来,中国耕地土壤pH平均降低了0.5^[1]。南方红壤地区高温多雨,集约化经营程度高,化肥施用量大,土壤酸化状况尤为突出。土壤酸化不仅降低土壤养分有效性、抑制作物根系生长和养分吸收,而且对土壤生物多样性和农业生态环境造成负面影响^[2]。阻控土壤酸化、改良酸性土壤肥力、提高土壤生物学活性对促进区域农业绿色可持续发展具有重要意义。

土壤微生物及其胞外酶是土壤有机质分解和养分转化的直接驱动者,两者对土壤环境变化极为灵敏,是衡量土壤肥力和健康状况的重要指标^[3-4]。近年来,土壤酶生态化学计量特征被广泛应用于衡量土壤微生物能量和养分资源限制状况,表征土壤微生物代谢需求与土壤养分供应之间的生物化学平衡^[5]。土壤酶生态化学计量主要以参与碳循环相关的 β -葡萄糖苷酶(BG)、纤维二糖水解酶(CB),参与氮循环相关的亮氨酸氨基肽酶(LAP)和 β -1,4-N-乙酰氨基葡萄糖苷酶(NAG)以及参与磷循环相关的酸性磷酸酶(PHOS)的比值为研究对象。土壤酶碳:氮:磷(C:N:P)在全球尺度上相对稳定,当比值偏离时表明微生物受到C、N或者P的限制^[6]。酶化学计量的向量长度(vector length)和向量角度(vector angle)可以较好地表征微生物的能量和养分限制状况^[3]。土壤酸碱性影响土壤酶活性,当土壤pH过低时,土壤微生物与胞外酶活性受到抑制,进而影响土壤酶生态化学计量特征^[7]。探明不同改良措施引起的土壤酸碱度、养分变化与土壤微生物养分限制状况之间的关系对促进土壤肥力和作物生长具有重要意义。

天目小香薯 *Ipomoea batatas* 是浙江省杭州市临安区的特色农产品^[8]。随着天目小香薯市场需求日益扩大,一些丘陵山地被开垦用于番薯种植。然而,丘陵红壤往往立地条件差,水分养分蓄纳功能弱,土壤酸化程度高,需要进行合理的土壤质量管理。施用土壤调理剂是改善红壤结构、酸碱性和养分有效性的重要手段之一。其中,矿物型土壤调理剂在均衡土壤肥力、提高作物抗逆性及优化土壤生态环境质量等方面均发挥着积极作用^[9]。研究表明:利用石灰石、钾长石等制成的矿物调理剂可有效调节土壤pH、改善土壤酸化、提高土壤微生物和酶活性^[10-11]。尽管丘陵红壤施用石灰等矿物型土壤调理剂已有较多研究^[9],然而目前研究集中在改善农田土壤酸化、增加土壤养分和提升产量等方面,其如何影响土壤酶活性及微生物养分限制状况尚缺乏报道。并且,矿物调理剂类型多样,不同调理剂效果差异大,亟待开发适合不同土壤和作物的土壤调理剂产品。为此,本研究通过田间试验研究矿物调理剂施用对天目小香薯产量、土壤养分、微生物生物量、土壤酶活性及生态化学计量特征的短期影响,探明影响土壤酶活性和

微生物代谢限制的主要因素, 从土壤酶生态化学计量角度评估矿物调理剂的施用效果, 旨在为改善丘陵红壤质量提供理论依据。

1 研究区与方法

1.1 研究区概况

研究区位于浙江省杭州市临安区潜川镇(30°12'N, 119°42'E)。该区属亚热带季风气候, 温暖湿润, 四季分明, 年降水量为 1 420 mm, 年均气温为 15.9 °C, 年日照时数为 1 774 h, 无霜期为 236 d。供试土壤为粉砂发育的红壤为主, 土壤 pH 5.36, 有机碳为 6.75 g·kg⁻¹, 全氮为 0.75 g·kg⁻¹, 全磷为 0.60 g·kg⁻¹, 全钾为 2.17 g·kg⁻¹, 碱解氮为 100.88 mg·kg⁻¹, 速效钾为 145.52 mg·kg⁻¹, 有效磷为 2.5 mg·kg⁻¹。

1.2 材料及试验设计

小区试验设置 3 个处理: 不施矿物调理剂(对照 ck)、施用矿物调理剂 3 t·hm⁻² (W1) 和矿物调理剂 6 t·hm⁻² (W2)。矿物调理剂是由白云石、钾长石为主要原料经煅烧制成的一种粉末状物质, 其基本性质为 pH 8.22, 氧化钾质量分数为 35.20%, 氧化锰质量分数为 21.42%, 氧化硅质量分数为 8.54%, 全钾质量分数为 0.05%, 全磷质量分数为 0.38%, 全氮质量分数为 2.80%, 速效钾质量分数为 283 mg·kg⁻¹。每处理设置 3 个重复, 随机区组设计, 小区面积为 49 m² (7 m×7 m), 每个小区之间设置 1 m 宽的保护行。试验于 2021 年 4 月下旬布置, 将矿物调理剂表面撒施后翻入 0~25 cm 土壤, 混合均匀。翻耕后起垄, 垄长 7.0 m、宽 0.5 m、高 0.2 m, 垄距 0.2 m。各试验小区施肥及田间日常管理措施均完全一致。各小区施肥量为 120 kg·hm⁻² 尿素(氮质量分数为 46.2%), 225 kg·hm⁻² 钙镁磷肥(五氧化二磷、氧化钾和氧化镁质量分数分别为 12%、42%、10%), 225 kg·hm⁻² 氯化钾(氧化钾质量分数为 62.7%)。天目小香薯秧苗扦插定植于垄上, 每垄株距为 0.3 m。

1.3 土壤样品采集与处理

于 2021 年 8 月底采收天目小香薯, 测定藤长、地上部生物量及其产量。同时, 在各小区内按照五点法采集 0~15 cm 土壤, 剔除其中的植物根系、残体和石子等杂物, 充分混匀后置于无菌塑封袋低温带回实验室。每份混合样品过 2 mm 筛子, 挑去石粒、根系以及植物残体, 并分成 3 份: 1 份室温自然风干, 用于基本理化性质的测定; 1 份存于 4 °C 冰箱, 用于土壤酶活性和微生物量的测定; 剩余样品经冷冻干燥后存放于 -70 °C 冰箱。

1.4 测定方法

1.4.1 土壤化学性质的测定 土壤化学性质分析参考鲁如坤^[12]的方法。土壤水分含量采用烘干法测定; 土壤 pH 值按 1.0:2.5 土水质量体积比测定; 土壤有机碳(SOC)采用重铬酸钾氧化, 浓硫酸外加热法测定; 全氮(TN)采用凯氏定氮法测定; 土壤全磷(TP)采用高氯酸-硫酸消煮, 钼锑抗比色法测定; 土壤速效钾(AK)用醋酸铵提取, 火焰光度法测定; 土壤有效磷(AP)采用盐酸氟化铵浸提, 分光光度法测定; 土壤碱解氮(AN)采用碱解扩散法测定; 土壤交换性酸、氢和铝采用氯化钾交换, 中和滴定法测定。土壤微生物生物量碳(MBC)、微生物生物量氮(MBN)和微生物生物量磷(MBP)采用氯仿熏蒸提取法分析^[13-14]。

1.4.2 土壤酶活性分析 土壤酶活性测定参照 SAIYA-CORK 等^[15]的方法。本研究测定了 5 种土壤酶活性, 包括 β-葡萄糖苷酶(BG)、纤维二糖水解酶(CB)、β-1,4-N-乙酰基氨基葡萄糖苷酶(NAG)、亮氨酸氨基酐酶(LAP)、酸性磷酸酶(PHOS)。称取相当于 2 g 干质量的鲜土于 100 mL 离心管中, 用 50 mmol·L⁻¹ 醋酸铵缓冲液(pH 5.0)浸提, 取 200 μL 土壤悬液于 96 孔板中, 并立即加入 50 μL 反应底物。微孔板放入 25 °C 培养箱中避光培养 3 h, 加入 10 μL 0.5 mol·L⁻¹ 的氢氧化钠结束反应。用多功能酶标仪(Synergy™ H1, Biotek)检测荧光裂解产物 4-甲基伞形酮或 4-甲基香豆素的产量, 检测时以 365 nm 为激发波长, 450 nm 为检测波长。酶活性单位为 nmol·g⁻¹·h⁻¹。

1.4.3 土壤酶化学计量特征分析 采用土壤酶生态化学计量特征向量分析, 即向量长度和向量角度, 表征土壤微生物代谢受碳、氮和磷的限制状况^[3]。向量长度越大, 表示碳限制越大; 向量角度 < 45° 和 > 45° 分别表示氮限制或磷限制的相对程度, 偏离程度越大, 限制越强。

1.5 数据分析与统计

采用 SPSS 26.0 进行数据处理和分析。单因素方差分析 (one-way ANOVA) Duncan 法多重比较检验不同处理间的差异显著性, 显著性水平为 0.05; 利用 CANOCO 4.5 进行冗余分析 (RDA), 确定影响土壤酶活性与计量比的关键因子。

2 结果与分析

2.1 矿物调理剂对土壤化学性质和天目小香薯产量的影响

由表 1 可知: 相比 ck, W2 处理显著提高了土壤 pH、AN 和 AP, 提高幅度分别为 17.7%、48.3% 和 40.7% ($P < 0.05$)。W1 和 W2 处理显著降低了土壤交换性酸 (57.0% 和 67.1%)、交换性 H^+ (57.7% 和 69.2%) 和交换性 Al^{3+} (57.1% 和 60.7%, $P < 0.05$)。W1 和 W2 处理对 SOC、TP、DOC、DN、AK、C/N、C/P、N/P 均无显著影响。由表 2 可知: 与 ck 相比, W1 和 W2 处理显著提高了天目小香薯藤长 38.5% 和 39.7% ($P < 0.05$), 但对天目小香薯产量、地上生物量、地上部与产量的比值均无显著影响。

表 1 不同处理土壤化学性质指标

Table 1 Soil chemical properties under different treatments

处理	pH	SOC/ ($g \cdot kg^{-1}$)	TP/ ($g \cdot kg^{-1}$)	TN/ ($g \cdot kg^{-1}$)	DOC/ ($mg \cdot kg^{-1}$)	DN/ ($mg \cdot kg^{-1}$)	AK/ ($mg \cdot kg^{-1}$)	AP ($mg \cdot kg^{-1}$)
ck	5.42±0.06 b	6.90±1.34 a	0.60±0.07 a	0.77±0.01 ab	201.07±8.74 a	93.53±5.85 a	105.26±22.54 a	2.53±0.44 b
W1	6.10±0.22 ab	8.86±1.92 a	0.63±0.11 a	0.84±0.03 a	216.33±15.28 a	91.53±5.05 a	79.49±12.94 a	2.92±0.10 ab
W2	6.38±0.46 a	8.07±1.03 a	0.57±0.07 a	0.76±0.04 b	202.67±27.78 a	93.20±4.91 a	81.45±16.41 a	3.56±0.42 a

处理	AN/ ($mg \cdot kg^{-1}$)	C/N	C/P	N/P	交换性酸/ ($cmol \cdot kg^{-1}$)	交换性 H^+ / ($cmol \cdot kg^{-1}$)	交换性 Al^{3+} / ($cmol \cdot kg^{-1}$)
ck	162.45±26.22 b	9.14±1.72 a	11.85±2.39 a	1.30±0.15 a	0.79±0.19 a	0.52±0.16 a	0.28±0.05 a
W1	202.10±12.25 ab	9.97±2.08 a	13.04±0.74 a	1.36±0.24 a	0.34±0.15 b	0.22±0.08 b	0.12±0.07 b
W2	240.86±20.28 a	10.80±1.02 a	14.97±3.41 a	1.37±0.21 a	0.26±0.06 b	0.16±0.01 b	0.11±0.07 b

说明: SOC 为土壤有机碳; TP 为全磷; TN 为全氮; DOC 为可溶性有机碳; DN 为可溶性氮; AK 为速效钾; AP 为有效磷; AN 为碱解氮; C/N 表示 SOC/TN; C/P 表示 SOC/TP; N/P 表示 TN/TP; 同列不同小写字母表示不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

表 2 不同处理天目小香薯产量和地上部生物量

Table 2 Sweet potato yield and aboveground biomass under different treatments

处理	产量/($t \cdot hm^{-2}$)	地上部生物量/($t \cdot hm^{-2}$)	藤长/m	地上部/产量
ck	25.77±1.78 a	2.94±1.15 a	1.56±0.06 b	0.12±0.05 a
W1	28.67±0.96 a	3.19±0.11 a	2.16±0.31 a	0.11±0.01 a
W2	28.46±2.21 a	2.55±0.89 a	2.18±0.17 a	0.09±0.04 a

说明: 同列不同小写字母表示不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

2.2 矿物调理剂对土壤微生物生物量碳、氮和磷质量分数的影响

由图 1 可知: 与 ck 相比, W1 处理显著提高了 MBN (91.1%)、MBN/MBP (148.2%) ($P < 0.05$)。W2 处理显著提高了 MBC (67.1%)、MBC/MBP (168.2%) 和 MBN/MBP (131.8%) ($P < 0.05$)。W1 和 W2 处理对 MBP 和 MBC/MBN 均无显著影响。

2.3 矿物调理剂对土壤酶活性及其生态化学计量特征的影响

由图 2 可知: W1 处理显著降低了 PHOS 活性 (31.9%, $P < 0.05$), 而对 BG、CB、NAG、LAP 活性、酶 C/N、酶 C/P、酶 N/P、向量长度、向量角度均无显著影响。W2 处理显著降低了 PHOS 活性 (45.4%)、LAP 活性 (52.4%), 提高了酶 C/P (96.7%)、向量长度 (19.7%)、向量角度 (10.5%) ($P < 0.05$), 而对其他指标无影响, 表明高量矿物调理剂施用提高了微生物碳限制, 而缓解了微生物磷限制。

冗余分析 (图 3) 表明: 土壤化学性质对土壤酶活性及生态化学计量比的总解释率为 98.3%, 其中第 1 轴解释了变量的 96.1%, 第 2 轴解释了变量的 2.2%。AN ($F=18.05$, $P=0.002$), pH ($F=7.87$, $P=0.016$),

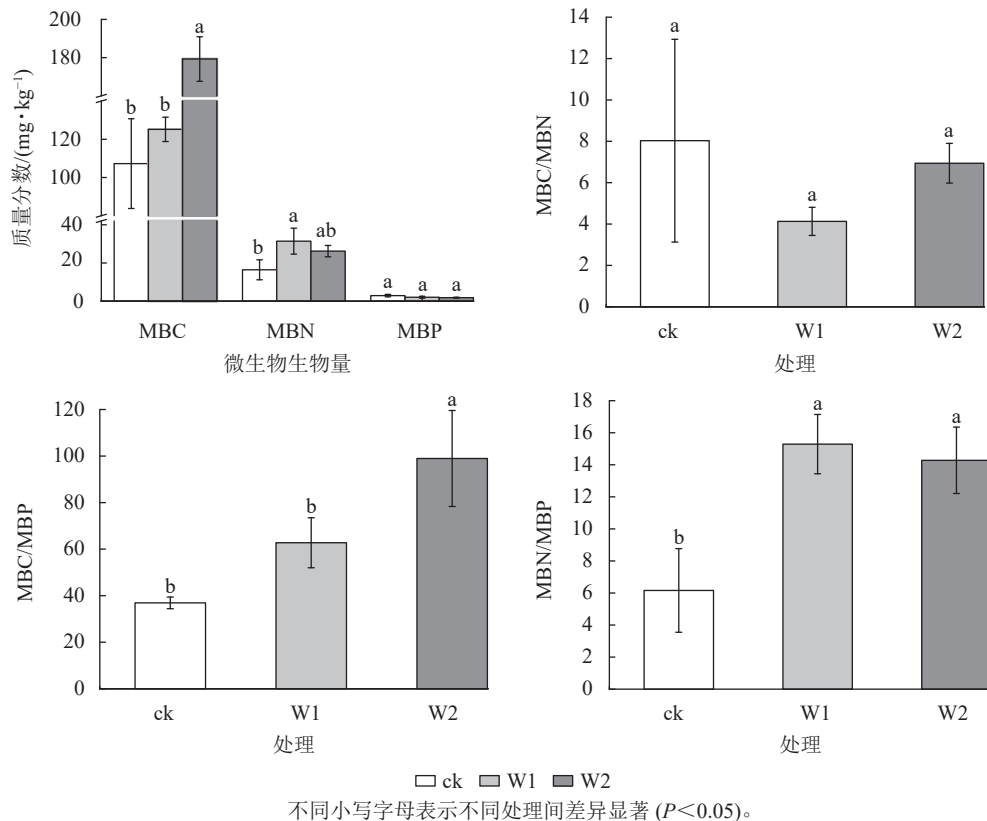


图 1 不同处理土壤微生物生物量及计量比

Figure 1 Soil microbial biomass C, N and P and their ratios under different treatments

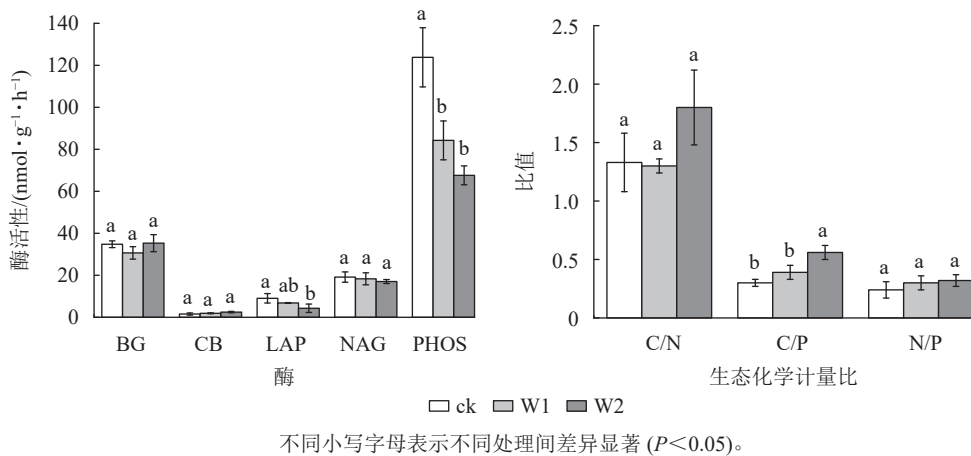


图 2 不同处理土壤酶活性及生态化学计量比

Figure 2 Soil enzyme activities and stoichiometry under different treatments

MBN ($F=6.211$, $P=0.048$), MBP ($F=5.61$, $P=0.044$) 是显著影响土壤酶活性及化学计量比的主要因子, 解释率分别为 72.0%、53.0%、47.0%、45.0%。

3 讨论

3.1 矿物调理剂对土壤化学性质与天目小香薯产量的影响

本研究中, 施用 $6 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的矿物调理剂可显著提高土壤 pH, 这与矿物调理剂富含的氧化钾和氧化镁可中和土壤中的 H^+ 有关^[16]。李昂等^[17]发现: 红壤中施用白云石、钾长石、牡蛎壳和麦饭石等 4 种矿物调理剂可使 pH 提高 3.2%~28.0%, 其中白云石提高幅度最明显, 但低用量的矿物调理剂对土壤 pH 无显著影响。可能是因为本研究所用调理剂的 pH 较低, 低用量的矿物调理剂难以有效中和土壤酸度。

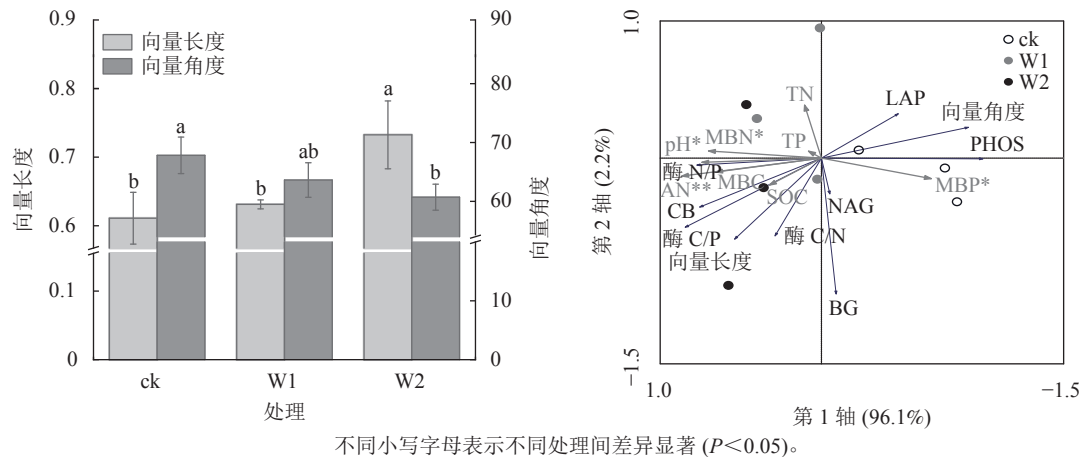


图3 不同处理的向量长度和向量角度及土壤化学性质与酶活性及生态化学计量比的冗余分析(RDA)

Figure 3 Vector lengths and vector angles under different treatments and redundancy analysis (RDA) of soil chemical properties and enzyme activity and stoichiometry

2种矿物调理剂均可显著降低土壤交换性酸、氢和铝质量分数,可能是因为调理剂自身含有丰富的交换性阳离子,如钙离子和镁离子会与土壤交换性氢和铝发生作用,从而降低土壤中交换性酸质量摩尔浓度^[2,18]。本研究供试土壤全磷和有效磷质量分数均相对较低,这与亚热带红壤中铁、铝质量分数较高且酸性较强,使得磷易于被铁铝离子固定成磷酸铁和磷酸铝^[19]有关。施用高用量矿物调理剂后土壤有效磷质量分数显著高于对照,说明本研究制备的矿物调理剂有利于提高土壤有效磷水平。这与矿物调理剂含有一定量的磷元素^[10]、以及矿物调理剂中的硅迁移到黏土颗粒表面取代了土壤中的磷酸根离子,进而增加土壤磷有效性有关^[20]。此外,施用矿物调理剂也显著提高了土壤碱解氮质量分数。龚玲婷等^[9]研究表明:矿物质调理剂可有效改善土壤酸性、提高土壤有效氮质量分数,促进作物氮素吸收。施用矿物调理剂后土壤有机碳质量分数并无显著变化,这是因为矿物调理剂中几乎不含有有机质成分,短时间内难以直接提高土壤有机碳质量分数^[21]。

2种用量矿物调理剂分别显著提高了土壤微生物生物量氮和碳质量分数,说明施用矿物调理剂有利于丘陵红壤微生物生长。相关研究表明:施用矿物调理剂可以改变土壤结构,提高土壤pH和养分含量,在一定程度上改善了微生物生存环境,进而提高微生物的活性^[9]。李致博^[22]研究发现:土壤pH升高可显著提高土壤戴氏菌属 *Taifanglania*、产黄杆菌属 *Rhodanobacter*、链霉菌属 *Streptomyces* 等的丰度。同时,矿物调理剂的施用增加了土壤有效氮质量分数,刺激了微生物生长^[23-24]。相反,施用矿物调理剂后微生物量磷未显著变化,可能是因为土壤有效磷质量分数较低,微生物生长受磷限制。有研究表明: MBC/MBN 在作物生长季节的变化不大,即土壤微生物生物量碳和土壤微生物生物量氮能维持相对稳定的比例^[25],这与本研究结果相似。土壤有效磷和碱解氮的输入缓解了土壤微生物的养分限制,而较低的有机碳输入促进了微生物的能量限制^[26],促使 MBC/MBP 显著提高。2种水平矿物调理剂施用均未显著改变天目小香薯的产量与地上部生物量,说明矿物调理剂对天目小香薯生长无显著影响。有研究表明:块茎类植物,如马铃薯 *Solanum tuberosum* 对钾的需求较大,其次是氮磷^[27]。本研究调理剂施用并未改变天目小香薯产量,可能与所制备的矿物调理剂中总养分质量分数,特别是钾质量分数较低有关。

3.2 矿物调理剂对土壤酶活性及酶生态化学计量特征的影响

高用量的矿物调理剂显著降低了土壤LAP活性,这主要是由于矿物调理剂施用增加了土壤碱解氮质量分数,为微生物生长提供了氮源,满足了微生物生长的氮素需求,从而降低了氮获取相关酶的分泌和活性。许森平等^[7]研究表明:土壤微生物可通过调节自身胞外酶的分泌来缓解养分限制,当土壤中氮的有效性增加后,与氮转化相关的酶活性呈下降趋势。与此相似,矿物调理剂施用显著提高了土壤有效磷质量分数,降低了PHOS活性,这进一步印证了微生物影响胞外酶分泌的生态化学计量学调控作用。SPEIR等^[28]发现:无机磷添加可抑制土壤微生物或植物根系分泌磷酸酶作用,降低土壤微生物对磷素的需求,进而抑制磷酸酶的活性。本研究土壤pH与酸性磷酸酶活性呈显著负相关,这可能因为亚热带红

壤 pH 普遍呈酸性 ($\text{pH} < 6.5$), 低 pH 条件下土壤微生物将分泌更多的酸性磷酸酶矿化有机磷, 以满足微生物和植物对磷的需求^[29]。

酶生态化学计量比反映了微生物获取碳、氮与磷的相对需求, 酶 C/N 和酶 C/P 越高, 表明土壤微生物对碳获取酶的投资高于对氮和磷获取酶的投资, 即微生物受碳源限制高于受氮、磷限制^[30]。本研究发现: 2 种水平矿物调理剂施用对酶 C/N 无显著影响, 但高用量调理剂显著提高了酶 C/P, 说明高用量矿物调理剂使微生物对碳获取酶的投资相对高于磷获取酶。这可能与矿物调理剂本身未能直接提供有机质而提高了土壤有效磷质量分数有关, 暗示高用量矿物调理剂的施用微生物更易受碳限制, 而缓解了磷限制^[20, 31]。全球尺度酶 C/N、C/P 和 N/P 平均值分别为 1.41、0.62 和 0.44^[26]。本研究中, 对照土壤的酶 C/P 远低于全球平均值, 说明相较于磷, 土壤存在较强的碳限制。高用量矿物调理剂显著提高了向量长度, 而降低了向量角度, 且所有处理的向量角度均大于 45° , 这进一步印证了高用量的矿物调理剂提高了微生物生物量碳限制而缓解了微生物生物量磷限制。冗余分析结果进一步证明: 碱解氮、pH、土壤微生物生物量氮和土壤微生物生物量磷显著影响土壤酶活性及化学计量比, 说明土壤速效养分和微生物生物量变化可潜在影响丘陵红壤酶化学计量学特征。ZHANG 等^[29]对黄土高原撂荒地和人工刺槐林 *Robinia pseudoacacia* 研究发现: 土壤生态酶活性和化学计量学的变化与土壤中的可溶碳氮呈显著正相关。曾泉鑫等^[32]研究表明: 长期氮添加加剧了毛竹 *Phyllostachys edulis* 土壤微生物生物量碳、微生物生物量磷限制, 认为氮添加会降低土壤有效磷和可溶性碳, 从而造成土壤碳和土壤磷限制。本研究表明: 矿物调理剂施用使土壤有效磷质量分数增加, 缓解了土壤微生物生物量磷限制, 而进一步加剧了碳限制。

4 结论

矿物调理剂短期内可显著提高土壤 pH 和速效养分质量分数, 降低土壤交换性酸质量摩尔浓度, 但对天目小香薯生长和产量影响不显著。2 种用量矿物调理剂均显著提高了土壤微生物生物量, 降低了酸性磷酸酶活性, 缓解了土壤微生物的磷限制, 加剧碳限制。冗余分析表明: 土壤 pH、碱解氮、微生物生物量碳氮是影响土壤酶活性及其化学计量特征的主要因子。因此, 施用矿物调理剂短期内可有效降低土壤酸度, 增加速效养分质量分数, 缓解土壤微生物生物量磷限制, 有助于降低南方丘陵红壤磷限制对作物生长的影响。在丘陵红壤施用矿物调理剂时应注意配合其他管理措施, 如秸秆还田或增施有机肥, 减弱微生物生物量碳限制, 促进微生物的碳源和养分平衡。

5 参考文献

- [1] GUO J H, LIU X J, ZHANG Y, *et al.* Significant acidification in major Chinese croplands [J]. *Science*, 2010, **327**(5968): 1008 – 1010.
- [2] 王小兵, 骆永明, 李振高, 等. 长期定位施肥对亚热带丘陵地区红壤旱地质量的影响 I. 酸度 [J]. *土壤学报*, 2011, **48**(1): 98 – 102.
WANG Xiaobing, LUO Yongming, LI Zhengao, *et al.* Effect of long-term stationary fertilization on upland red soil quality in subtropical hilly regions I. acidity [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2011, **48**(1): 98 – 102.
- [3] MOORHEAD D L, SINSABAUGH R L, HILL B H, *et al.* Vector analysis of ecoenzyme activities reveal constraints on coupled C, N and P dynamics [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2016, **93**: 1 – 7.
- [4] CUI Yongxing, BING Haijian, FANG Linchuan, *et al.* Extracellular enzyme stoichiometry reveals the carbon and phosphorus limitations of microbial metabolisms in the rhizosphere and bulk soils in alpine ecosystems [J]. *Plant and Soil*, 2021, **458**(1/2): 7 – 20.
- [5] SINSABAUGH R L, FOLLSTAD SHAH J J, HILL B H, *et al.* Ecoenzymatic stoichiometry of stream sediments with comparison to terrestrial soils [J]. *Biogeochemistry*, 2012, **111**(1/3): 455 – 467.
- [6] SINSABAUGH R L, HILL B H, FOLLSTAD SHAH J J. Ecoenzymatic stoichiometry of microbial organic nutrient acquisition in soil and sediment [J]. *Nature*, 2009, **462**(7274): 795 – 798.
- [7] 许森平, 任成杰, 张伟, 等. 土壤微生物生物量碳氮磷与土壤酶化学计量对气候变化的响应机制 [J]. *应用生态学报*, 2018, **29**(7): 2445 – 2454.

- XU Miaoping, REN Chengjie, ZHANG Wei, *et al.* Responses mechanism of C:N:P stoichiometry of soil microbial biomass and soil enzymes to climate change [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2018, **29**(7): 2445 – 2454.
- [8] 顾建强, 马闪闪, 李立增, 等. 八种肥料对小番薯生长性状及产量的影响[J]. *南方农业*, 2020, **14**(31): 15 – 18.
GU Jianqiang, MA Shanshan, LI Lizeng, *et al.* Effects of eight kinds of fertilizers on growth traits and yield of sweet potato [J]. *South China Agriculture*, 2020, **14**(31): 15 – 18.
- [9] 龚玲婷, 石林, 蔡如梦. 矿物质调理剂对土壤养分含量及植物营养吸收的影响[J]. *土壤*, 2019, **51**(5): 916 – 922.
GONG Lingting, SHI Lin, CAI Rumeng. Effects of mineral conditioner on soil nutrient contents and nutrient absorption by lettuce [J]. *Soils*, 2019, **51**(5): 916 – 922.
- [10] SHI Renyong, LI Jiuyu, XU Renkou, *et al.* Ameliorating effects of individual and combined application of biomass ash, bone meal and alkaline slag on acid soils [J]. *Soil and Tillage Research*, 2016, **162**: 41 – 45.
- [11] 蒙园园, 石林. 矿物质调理剂中铝的稳定性及其对酸性土壤的改良作用[J]. *土壤*, 2017, **49**(2): 345 – 349.
MENG Yuanyuan, SHI Lin. Stability of aluminum in mineral conditioners and amelioration on acid soil [J]. *Soils*, 2017, **49**(2): 345 – 349.
- [12] 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 Rukun. *Methods of Soil Agricultural Chemical Analysis* [M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000.
- [13] WU J, JOERGENSEN R G, POMMERENING B, *et al.* Measurement of soil microbial biomass C by fumigation-extraction: an automated procedure [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1990, **22**(8): 1167 – 1169.
- [14] MARTIN J K, CORRELL R L. Measurement of microbial biomass phosphorus in rhizosphere soil [J]. *Plant and Soil*, 1989, **113**(2): 213 – 221.
- [15] SAIYA-CORK K R, SINSABAUGH R L, ZAK D R. The effects of long term nitrogen deposition on extracellular enzyme activity in an *Acer saccharum* forest soil [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2002, **34**(6): 1309 – 1315.
- [16] de VARGAS J P R, dos SANTOS D R, BASTOS M C, *et al.* Application forms and types of soil acidity corrective: changes in depth chemical attributes in long term period experiment [J]. *Soil and Tillage Research*, 2019, **185**: 47 – 60.
- [17] 李昂, 王旭, 范洪黎. 4种土壤调理剂改良红壤铝毒害的效果研究[J]. *中国土壤与肥料*, 2014(4): 7 – 11.
LI Ang, WANG Xu, FAN Hongli. Effects of four soil conditioners on alleviating aluminum toxicity in acid red soil [J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2014(4): 7 – 11.
- [18] LEHMANN J, da SILVA J P Jr, STEINER C, *et al.* Nutrient availability and leaching in an archaeological Anthrosol and a Ferralsol of the Central Amazon basin: fertilizer, manure and charcoal amendments [J]. *Plant and Soil*, 2003, **249**(2): 343 – 357.
- [19] LIU Jie, SCHULZ H, BRANDL S, *et al.* Short-term effect of biochar and compost on soil fertility and water status of a Dystric Cambisol in NE Germany under field conditions [J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2012, **175**(5): 698 – 707.
- [20] CLEVELAND C C, TOWNSEND A R. Nutrient additions to a tropical rain forest drive substantial soil carbon dioxide losses to the atmosphere [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2006, **103**(27): 10316 – 10321.
- [21] 包骏瑶, 赵颖志, 严淑娴, 等. 不同农林废弃物生物质炭对雷竹林酸化土壤的改良效果[J]. *浙江农林大学学报*, 2018, **35**(1): 43 – 50.
BAO Junyao, ZHAO Yingzhi, YAN Shuxian, *et al.* Soil amelioration with biochars pyrolyzed from different feedstocks of an acidic bamboo (*Phyllostachys violascens*) plantation [J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2018, **35**(1): 43 – 50.
- [22] 李致博. 土壤酸化对养分淋失、微生物多样性及柑橘生长的影响[D]. 福州: 福建农林大学, 2020.
LI Zhibo. *Effects of Soil Acidification on Nutrient Leaching, Microbial Diversity and Citrus Growth* [D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2020.
- [23] STEVENS C J, DISE N B, MOUNTFORD J W, *et al.* Impact of nitrogen deposition on the species richness of grasslands [J]. *Science*, 2004, **303**(5665): 1876 – 1879.
- [24] SUDING K N, COLLINS S L, GOUGH L, *et al.* Functional- and abundance-based mechanisms explain diversity loss due to N fertilization [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2005, **102**(12): 4387 – 4392.
- [25] CZIMCZIK C I, MASIELLO C A. Controls on black carbon storage in soils [J/OL]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2007,

- 21(3): GB3005 [2022-07-02]. doi: 10.1029/2006GB002798.
- [26] 喻岚晖, 王杰, 廖李容, 等. 青藏高原退化草甸土壤微生物量、酶化学计量学特征及其影响因素 [J]. 草地学报, 2020, 28(6): 1702 – 1710.
- YU Lanhui, WANG Jie, LIAO Lirong, *et al.* Soil microbial biomass, enzyme activities and ecological stoichiometric characteristics and influencing factors along degraded meadows on the Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2020, 28(6): 1702 – 1710.
- [27] 刘玉荣, 贾双勤, 强生军, 等. 钾肥在旱地马铃薯栽培技术中的应用研究 [J]. 中国农机化学报, 2022, 43(2): 121 – 126.
- LIU Yurong, JIA Shuangqin, QIANG Shengjun, *et al.* Application of potassic fertilizer in potato cultivation in dryland [J]. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 2022, 43(2): 121 – 126.
- [28] SPEIR T W, COWLING J C. Phosphatase activities of pasture plants and soils: relationship with plant productivity and soil P fertility indices [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 1991, 12(3): 189 – 194.
- [29] ZHANG Wei, XU Yadong, GAO Dexin, *et al.* Ecoenzymatic stoichiometry and nutrient dynamics along a revegetation chronosequence in the soils of abandoned land and *Robinia pseudoacacia* plantation on the Loess Plateau, China [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2019, 134: 1 – 14.
- [30] SINSABAUGH R L, LAUBER C L, WEINTRAUB M N, *et al.* Stoichiometry of soil enzyme activity at global scale [J]. *Ecology Letters*, 2008, 11(11): 1252 – 1264.
- [31] REED S C, VITOUSEK P M, CLEVELAND C C. Are patterns in nutrient limitation belowground consistent with those aboveground: results from a 4 million year chronosequence [J]. *Biogeochemistry*, 2011, 106(3): 323 – 336.
- [32] 曾泉鑫, 张秋芳, 林开森, 等. 酶化学计量揭示5年氮添加加剧毛竹林土壤微生物碳磷限制 [J]. 应用生态学报, 2021, 32(2): 521 – 528.
- ZENG Quanxin, ZHANG Qiufang, LIN Kaimiao, *et al.* Enzyme stoichiometry evidence revealed that five years nitrogen addition exacerbated the carbon and phosphorus limitation of soil microorganisms in a *Phyllostachys pubescens* forest [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2021, 32(2): 521 – 528.