

赵瑶瑶,彭雄,周金燕,等.2种改良剂配施对酸性土壤养分、酶活性及辣椒养分吸收的影响[J].华中农业大学学报,2025,44(4):68-78.
DOI:10.13300/j.cnki.hnlkxb.2025.04.007

2种改良剂配施对酸性土壤养分、酶活性及辣椒养分吸收的影响

赵瑶瑶¹,彭雄²,周金燕¹,陈琳娜¹,曹红亮³,胡红青¹,夏文建⁴,林杉¹

1. 华中农业大学资源与环境学院,武汉 430070; 2. 湖北省农业农村厅对外合作办公室,武汉 430071;

3. 华中农业大学工学院,武汉 430070; 4. 江西省农业科学院土壤肥料与资源环境研究所/
耕地改良与质量提升江西省重点实验室,南昌 330200

摘要 为探究哈茨木霉菌(H)与白云石(S)对酸性土壤的改良效果,以辣椒为供试作物进行盆栽试验,采用两因素三水平正交实验设计(哈茨木霉菌用量水平为0、3和6 g/盆,白云石用量水平为0、3和6 g/kg),共设置9组处理: H_0S_0 、 H_3S_0 、 H_6S_0 、 H_0S_3 、 H_3S_3 、 H_6S_3 、 H_0S_6 、 H_3S_6 、 H_6S_6 ,研究了2种改良剂配施对酸性土壤养分、酶活性及辣椒养分吸收的影响。结果显示,哈茨木霉菌与白云石配施显著提高土壤pH,高量配施处理(H_6S_6)的土壤有机质含量最高;配施处理提高土壤碱解氮的含量,高量菌剂与白云石配施(H_6S_3 、 H_6S_6)显著提高有效磷的含量;高量白云石与高量菌剂配施显著提高土壤全氮含量和土壤脲酶活性, H_6S_6 处理较对照处理(H_0S_0)全氮含量增加213.50%、脲酶活性提高61.97%;辣椒养分吸收方面, H_3S_3 处理的辣椒果实时全氮和全磷含量最高,较对照处理显著提高32.32%和292.37%。结果表明,哈茨木霉菌与白云石配施可有效改善酸性土壤的养分状况,提高土壤酶活性,促进辣椒对养分的吸收,其中 H_6S_6 处理在综合效益上表现最好。

关键词 酸性土壤;哈茨木霉菌;白云石;土壤养分;土壤酶活性;辣椒

中图分类号 S156.2 文献标识码 A 文章编号 1000-2421(2025)04-0068-11

近年来,由于大气酸沉降、化肥过量施用、土地利用方式变化及农田大面积集约化等影响,土壤酸化现象加速发展,对生态环境和农业生产的影响日益严峻。农田土壤酸化是土壤退化的重要表现形式。我国酸性土壤占全国陆地面积的23%,其中有40%~70%的耕地土壤受不同程度酸化的影响^[1-2]。根据2005—2014年测土配方施肥土壤基础养分数据,我国土壤酸化多发生于热带及亚热带地区,湖南省、广西壮族自治区、广东省分别有60.8%、70.2%、93.6%的农田土壤pH低于6.0,江西省、福建省等多个县市区农田土壤的平均pH值低于5.5^[3-4]。酸化导致土壤中 H^+ 浓度升高,引发 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 淋失^[5],增强重金属和 Al^{3+} 的有效性^[6],抑制植物生长^[7],还会通过降雨引发的重金属迁移对周边水体构成潜在风险^[8]。此外,土壤酸化降低氮、磷等养分有效性^[9],进而影响作物对养分的吸收利用。这种土壤肥力的

退化会显著抑制农作物生长,导致其品质下降^[10]。近年来,我国南方地区土壤酸化程度不断加剧,已成为制约农业生产发展和土壤可持续利用的重要影响因素。因此,采取有效措施改良酸化土壤已成为当前亟待解决的农业环境问题^[11]。土壤酸化改良可通过施用石灰等碱性物料、增施有机肥、优化农业管理措施以及实施保护性耕作等综合方法来实现。这些措施能够协同提高土壤pH值,改善土壤结构和养分状况,增强土壤微生物活性,并减少养分流失,从而有效缓解土壤酸化问题^[12]。

石灰和白云石是天然矿物改良剂,可有效改善土壤酸化状况,并提高土壤阳离子交换量^[13]。然而,过量或不合理施用可能会引起土壤酸化加剧、土壤板结及养分比例失调等问题^[14],进而对作物产量产生负面影响。白云石是一种碳酸盐矿物,作为无机土壤改良剂,其碱性特性可有效降低土壤酸度。研

收稿日期:2024-12-18

基金项目:国家重点研发计划项目(2021YFD1901202);江西省现代农业科研协同创新专项(JXXTCXQN202210);中国电建集团昆明勘测设计研究院有限公司重点研发项目(KD-KJRW2023-011)

赵瑶瑶,E-mail:yyzhao0423@163.com

通信作者:夏文建,E-mail:xiawenjian@163.com;林杉,E-mail:linshan@mail.hzau.edu.cn

究表明,施用白云石能够提高土壤盐基饱和度^[15],增强土壤对养分的固持能力^[16]。吴宏涛等^[17]通过室内培养试验表明,添加白云石可以显著提高酸性水稻土的pH值,改善土壤酸化状况。在50%田间持水量条件下(water holding capacity, WHC),白云石的施用可使土壤pH值达到或接近目标值(pH 6.5),同时减少土壤酸化导致的养分失衡问题。木霉(*Trichoderma*)生物防治机制多样,可以降低土壤中有害微生物丰度、促进植物分泌防御性酶,也可提升土壤相关酶活性、改善土壤作物根系微生物群落结构,提高作物对养分的吸收能力^[18]。王义坤等^[19]研究表明,施用哈茨木霉菌肥可显著提升苹果连作土壤中过氧化氢酶、脲酶和中性磷酸酶的活性,同时降低腐皮镰孢菌(*Fusarium solani*)的种群数量,有效缓解苹果连作障碍问题。汪坤等^[20]研究表明,哈茨木霉菌剂与生物炭基肥配施可有效改善植烟土壤的速效养分含量和酶活性,促进烟草植株对营养物质的吸收利用,降低烟草病害发生率,提高烟叶矿质元素含量,最终提升烟草品质。辣椒(*Capsicum annuum L.*)是一年生或多年生的草本植物,属茄科辣椒属,是我国重要的经济作物,其种植面积和产量位于全国蔬菜前列^[21]。近年来食品行业快速发展,辣椒的市场需求不断增加^[22]。但在酸胁迫下,土壤pH值降低会影响辣椒正常生长代谢,显著提高铝离子及重金属的生物有效性,导致植株吸收量增加。当其在组织内过量积累时,会破坏细胞膜完整性并抑制酶活性,最终引发代谢紊乱、生长受阻,严重时甚至出现植株死亡的现象^[23]。

目前对酸性土壤改良的相关研究多集中于石灰等碱性物料及有机肥的改良效果,而对哈茨木霉菌与白云石配施的探索较少^[24]。为此,本研究通过盆栽试验,设置不同浓度的哈茨木霉菌剂及白云石,旨在探究酸性土壤改良中哈茨木霉菌与白云石的最佳配比及其改良效果,包括对土壤养分、酶活性及辣椒养分吸收的影响,以期为酸性土壤的改良提供科学依据和指导。

1 材料与方法

1.1 供试材料

试验所用土壤采自湖北省咸宁市咸安区双溪桥镇(29°56'40"N, 114°30'46"E),土壤类型为棕红壤,除去其中的较大石块、根茎和枯枝落叶等杂质,取0~20 cm表层土壤,带回实验室自然风干,过2 mm

孔径筛后储存备用。试验土壤的理化性质见表1。试验所用的哈茨木霉菌由山东长泰生物科技有限公司提供,孢子数为2×10⁹个/g。河北燕西矿产品加工厂提供的白云石,粒径小于0.15 mm,pH为9.56,主要成分包括氧化钙(28.5%)、氧化镁(20.0%)、氧化钾(0.12%)以及氧化钠(0.25%)。试验采用的有机肥由施可得赛拉有限公司所提供,pH为8.0,养分组成包括全氮1.87%、全磷1.62%、全钾1.34%(以烘干基计)。施用的氮肥为尿素(N: 46%),磷肥为磷酸二氢钾(KH₂PO₄: 98%),钾肥为硫酸钾(K₂O: 52%)。供试作物为羊角椒,该品种在当地采购,其果实细长,一般长度在20 cm以上,果皮光滑,颜色多为黄绿色或绿色,成熟时转为红色。羊角椒生长周期适中,具有较高的产量和经济价值。该品种根系较为发达,对土壤环境变化较为敏感,适合作为本研究土壤改良效果的指示作物。

表1 土壤理化性质
Table 1 Soil physicochemical properties

土壤指标 Soil parameter	测定值 Measured value
pH	4.50
全氮/(g/kg) Total nitrogen	1.32
全磷/(g/kg) Total phosphorus	0.25
全钾/(g/kg) Total potassium	5.11
碱解氮/(mg/kg) Alkaline hydrolyzed nitrogen	89.37
有效磷/(mg/kg) Available phosphorus	20.47
速效钾/(mg/kg) Available potassium	38.50

1.2 试验设计

本试验前期在华中农业大学环境工程基地盆栽场开展,后期在温室培养,试验时间段为2022年9月至2023年1月。本试验采用高17.5 cm、开口直径16.0 cm、底面直径12.8 cm的花盆进行盆栽试验,每盆装风干土2 kg。

本试验采用两因素三水平正交试验设计,施入哈茨木霉菌(H)和白云石(S)2种改良剂,其中白云石的添加量为0、3、6 g/kg,哈茨木霉菌每盆用量水平为0、3、6 g。试验共9个处理,分别为H₀S₀、H₃S₀、H₆S₀、H₀S₃、H₃S₃、H₆S₃、H₀S₆、H₃S₆、H₆S₆,每个处理4次重复。哈茨木霉菌、白云石和有机肥、氮磷钾肥的施用量见表2,每盆施氮肥0.2 g,氮磷钾肥的质量比(N:P₂O₅:K₂O)为1:0.375:1.5,将氮肥总量的20%、磷肥总量的60%及钾肥总量的30%作为基肥,其余在开花期作为追肥。

试验开始前,按照处理比例称量白云石和哈茨

木霉菌、有机肥、氮磷钾肥与过孔径2 mm筛的风干土壤(2 kg)充分混匀,然后装入盆中。在试验前需要用去离子水调节湿度,通过称质量法保持田间持水量为18%,预培养3 d,以恢复土壤微生物活性。每盆定植3株辣椒幼苗,待生长至6叶1心时,每盆保留长势最均匀健康的1株进行后续试验,以减少个体差异对结果的干扰。

试验前期,辣椒在盆栽种植场生长,采用遮雨棚防止雨水干扰,并每周调整盆栽位置以消除微气候差异。后期因气候条件变化,辣椒移至温室培养,温室环境设置为温度18℃、湿度80%、光照8 h(日光灯补充),移入温室约40 d后进行收获。

表2 盆栽试验中各成分设计施用量

Table 2 Dosage of experimental design of potted plants

处理 Treatment	哈茨木霉/(g/盆) <i>Trichoderma harzia-</i> <i>num</i>	白云石/(g/kg) Dolomite	有机肥/(g/m ²) Organic fertilizer	基肥/% Application rate of base fertilizer			追肥/% Fertilizer application rate for topdressing		
				N	P	K	N	P	K
H ₀ S ₀	0	0	100	20	60	30	80	40	70
H ₃ S ₀	3	0	100	20	60	30	80	40	70
H ₆ S ₀	6	0	100	20	60	30	80	40	70
H ₀ S ₃	0	3	100	20	60	30	80	40	70
H ₃ S ₃	3	3	100	20	60	30	80	40	70
H ₆ S ₃	6	3	100	20	60	30	80	40	70
H ₀ S ₆	0	6	100	20	60	30	80	40	70
H ₃ S ₆	3	6	100	20	60	30	80	40	70
H ₆ S ₆	6	6	100	20	60	30	80	40	70

1.3 样品采集与指标测定

在辣椒的移栽期和收获期多点取样混匀,一份鲜样立即放入-4℃冰箱保存,另一份风干后,剔除杂物后研磨过筛,用于土壤性质测定。土壤全氮(TN)、全磷(TP)、全钾(TK)、碱解氮(AN)、有效磷(AP)、速效钾(AK)及土壤有机质(SOM)含量参照土壤农化分析方法^[25]进行测定。采用96微孔酶标板荧光分析法测定土壤过氧化氢酶、中性磷酸酶、脲酶、蔗糖酶活性。

在收获期收获时,将辣椒分为地上部分、地下部分和果实,将植物样品置于牛皮袋内,放入烘箱在105℃下杀青30 min,后于70~75℃烘干至恒质量。将植物各部分磨碎过筛,测定植物全量养分。全量养分测定前处理参照土壤农化分析方法^[25]。植物样品消煮后过滤,滤液用流动分析仪(SEAL AA3)测定植物全氮、全磷含量,植物全钾含量用火焰光度计测定。

1.4 数据处理方法

采用Microsoft Excel 2021对数据进行处理,使用Origin 2018进行数据可视化。使用IBM SPSS Statistic19进行数据分析,利用单因素方差分析(One-way ANOVA)及多重比较进行差异显著性分析。

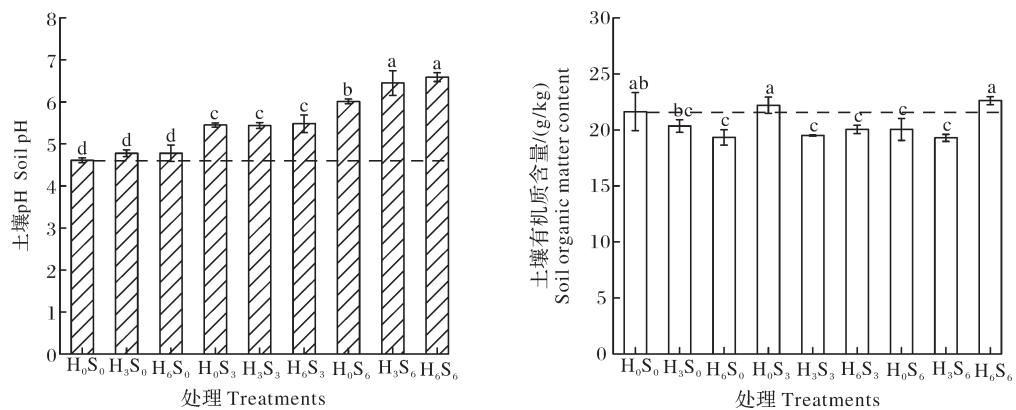
2 结果与分析

2.1 哈茨木霉菌与白云石添加对酸性土壤pH及土壤有机质的影响

由图1可知,单施白云石对土壤pH存在显著影响($P<0.05$),中量(H₀S₃)和高量(H₀S₆)白云石处理相比于对照处理(H₀S₀)pH值显著提高了18.22%和30.37%。当白云石与哈茨木霉菌剂配施时,对提高酸性土壤pH的效果更显著($P<0.05$)。特别是高量白云石与高量菌剂配施处理(H₆S₆),其pH值最高(6.59),改良效果最好。单施白云石的3个处理组中,高量白云石处理(H₀S₆)的土壤有机质含量显著低于H₀S₀、H₀S₃处理($P<0.05$),值为20.04 mg/kg。在高量菌剂与白云石配施条件下,H₆S₆较H₆S₀和H₆S₃处理土壤有机质含量分别提高了16.96%和12.82%。以上结果表明,白云石与哈茨木霉菌剂配施能有效提升酸性土壤pH,其中高量菌剂与高量白云石配施(H₆S₆)效果最佳。

2.2 哈茨木霉菌与白云石添加对酸性土壤速效养分的影响

由图2可知,在单施白云石条件下,高量白云石处理(H₀S₆)较对照(H₀S₀)和中量白云石处理(H₀S₃)的碱解氮含量分别提高了4.50%、18.15%。在中量



H_0 、 H_3 、 H_6 分别表示添加哈茨木霉菌剂0、3、6 g, S_0 、 S_3 、 S_6 分别表示添加白云石0、3、6 g。图中不同小写字母表示处理之间差异显著($P<0.05$),虚线为对照组(H_0S_0)基准线,用于对比各处理组的相对差异,下同。 H_0 、 H_3 and H_6 respectively represent the addition of 0, 3 and 6 g of *Trichoderma harzianum* fungus agent, and S_0 , S_3 and S_6 respectively represent the addition 0, 3 and 6 g of dolomite. Different lowercase letters indicate significant differences between treatments ($P<0.05$), the dotted line represents the baseline of the control group (H_0S_0), which is used to compare the relative differences of each treatment group, the same as below.

图1 哈茨木霉菌与白云石配施处理下土壤pH值及土壤有机质含量

Fig. 1 The content of SOM and pH in soil under the combined application of *Trichoderma hrzianum* and dolomite

白云石与哈茨木霉菌剂配施条件下, H_3S_3 和 H_6S_3 处理较 H_0S_3 处理的碱解氮含量显著提高了 12.87% 和 14.85% ($P<0.05$)。然而, 单施白云石显著降低土壤有效磷含量($P<0.05$), 其中 H_0S_6 处理值最低(13.27 mg/kg)。在高量菌剂条件下, 与中量白云石(H_6S_3)和高量白云石(H_6S_6)配施显著提高了土壤有效磷含

量, 其中 H_6S_6 处理效果较好(28.33 mg/kg)。此外, 单施白云石显著降低了土壤速效钾含量($P<0.05$), H_0S_3 和 H_0S_6 处理较 H_0S_0 处理分别降低了 32.77%、34.71%。以上结果表明, 哈茨木霉菌剂可缓解白云石对磷养分的负面效应, 通过配施协同提升土壤速效养分的有效性。

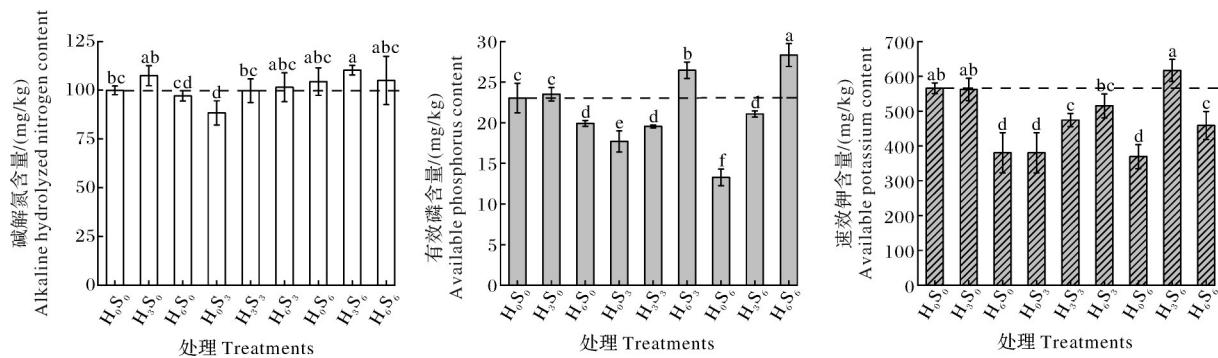


图2 哈茨木霉菌与白云石配施处理下土壤中碱解氮、有效磷及速效钾含量

Fig. 2 The content of AN, AP, and AK in soil under the combined application of *Trichoderma hrzianum* and dolomite

2.3 哈茨木霉菌与白云石添加对酸性土壤全量养分的影响

由图3可知, 单施白云石提高了土壤全氮含量, H_0S_3 、 H_0S_6 处理较 H_0S_0 处理分别增加了 128.39%、31.44%, 对全磷含量无显著影响。单施中量菌剂(H_3S_0)增加了土壤全磷含量, 值为 0.37 g/kg。单施白云石降低了土壤中全钾含量, H_0S_3 、 H_0S_6 相较于 H_0S_0 处理土壤中分别降低了 15.70%、89.36%; 单施菌剂显著降低了土壤全钾含量($P<0.05$), 与 H_0S_0 处理相比, H_3S_0 、 H_6S_0 处理分别降低

了 68.88%、88.61%。在白云石与哈茨木霉菌配施条件下, H_6S_6 处理的土壤全氮含量最高(1.84 g/kg), 但对全磷含量无显著影响。以上结果表明, 白云石和菌剂的配施在改善土壤全量养分方面具有一定的协同作用, 但对不同养分的影响存在差异。

2.4 哈茨木霉菌与白云石添加对酸性土壤酶活性的影响

由图4可知, 单施白云石对过氧化氢酶、中性磷酸酶及蔗糖酶活性无显著影响, 但显著提高了脲酶

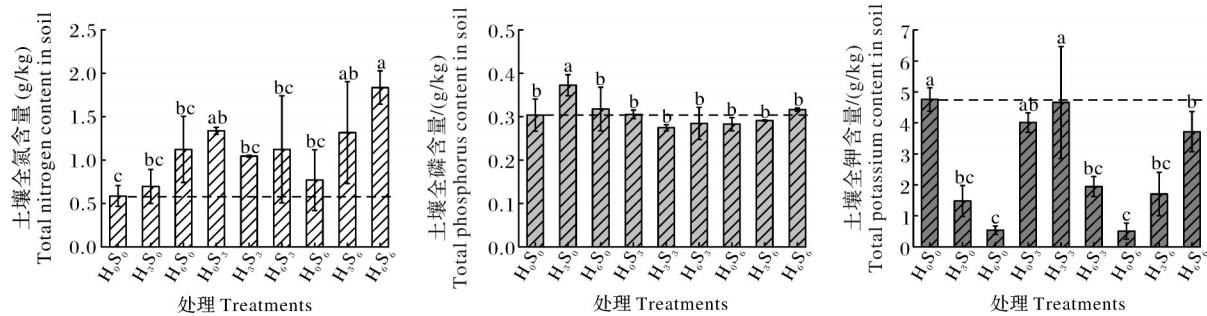


图3 哈茨木霉菌与白云石配施处理下土壤中全氮、全磷及全钾含量

Fig. 3 The content of TN, TP, and TK in soil under the combined application of *Trichoderma harzianum* and dolomite活性($P<0.05$)，其中高量白云石处理(H₀S₆)的酶活性最高[825.49 μg/(d·g)]。单施哈茨木霉菌抑制过氧化氢酶活性，H₃S₀和H₆S₀处理相较于H₀S₀处理酶活性分别降低了23.83%、27.67%；同时显著提高了中性磷酸酶活性($P<0.05$)，中量菌剂H₃S₀处理的酶活性最高[0.75 μmol/(h·g)]。哈茨木霉菌与白云石配施提高了土壤脲酶和蔗糖酶活性，H₆S₃、H₃S₆和H₆S₆处理较H₀S₀处理脲酶活性分别提高了41.75%、46.01%、61.97%，在整个研究时期H₆S₃处理的蔗糖酶活性最高[1 271.60 μg/(d·g)]。以上研究表明，菌剂与白云石配施对土壤脲酶和蔗糖酶活性的提升效果优于单施处理。

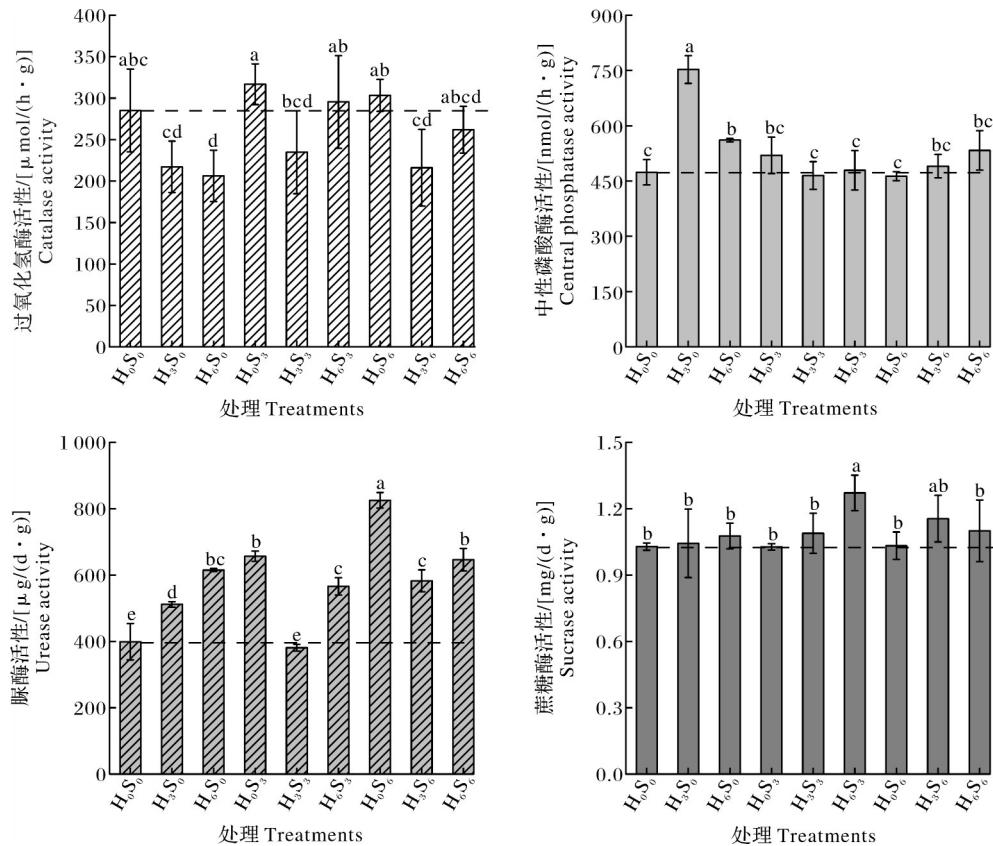


图4 哈茨木霉菌与白云石配施处理下土壤中过氧化氢酶、中心磷酸酶、脲酶和蔗糖酶活性

Fig. 4 Catalase, central phosphatase, urease and sucrase activities in soil under the combined application of *Trichoderma harzianum* and dolomite

2.5 哈茨木霉菌与白云石添加对辣椒植株及果实养分的影响

由图5可知，单施白云石对地上部氮及磷含量无显著影响，但提高了地上部钾含量，H₀S₃、H₆S₃处理

较H₀S₀处理分别提高了81.86%、26.12%。在菌剂与中量白云石配施条件下，H₃S₃处理的地上部氮含量最高，较H₀S₃、H₆S₃处理分别增加了14.43%、29.42%。单施哈茨木霉菌剂增加了辣椒地上部磷含

量,与 H_0S_0 处理相比, H_3S_0 、 H_6S_0 处理地上部磷含量分别增加了17.85%、26.78%。此外,配施处理显著提高了地上部钾含量($P<0.05$), H_3S_3 、 H_6S_3 、 H_3S_6 与 H_6S_6 较对照处理(H_0S_0)分别增加了68.36%、58.11%、38.57%、26.09%。

由图6可知,单施白云石处理中, H_0S_3 处理地下部氮含量最高(7.36 g/kg)。高量白云石与菌剂配施均增加了地下部氮含量, H_3S_6 、 H_6S_6 较 H_0S_0 处理分别增加了8.78%、13.48%。单施哈茨木霉菌剂降低了辣椒地下部磷含量, H_3S_0 、 H_6S_0 处理较 H_0S_0 处理分别降低了8.17%、5.42%。在中量白云石添加条件下,施用菌剂显著降低了辣椒地下部磷含量($P<0.05$),

其中 H_6S_3 处理最低(0.66 g/kg)。菌剂与高量白云石配施提高了地下部磷含量, H_6S_6 处理的辣椒地下部磷含量最高(1.16 g/kg)。单施白云石和单施菌剂均显著增加了地下部钾含量($P<0.05$), H_0S_3 、 H_0S_6 处理较 H_0S_0 处理分别增加了98.52%、72.18%, H_3S_0 、 H_6S_0 处理较 H_0S_0 处理分别增加了42.23%、41.11%。此外,哈茨木霉菌与高量白云石配施显著增加了地下部钾含量($P<0.05$), H_3S_6 、 H_6S_6 处理较 H_0S_0 处理分别增加了60.79%、54.97%。以上研究表明,白云石与哈茨木霉菌剂的配施在促进辣椒地上部和地下部养分吸收方面表现出显著的协同作用,尤其在提高钾含量方面效果显著。

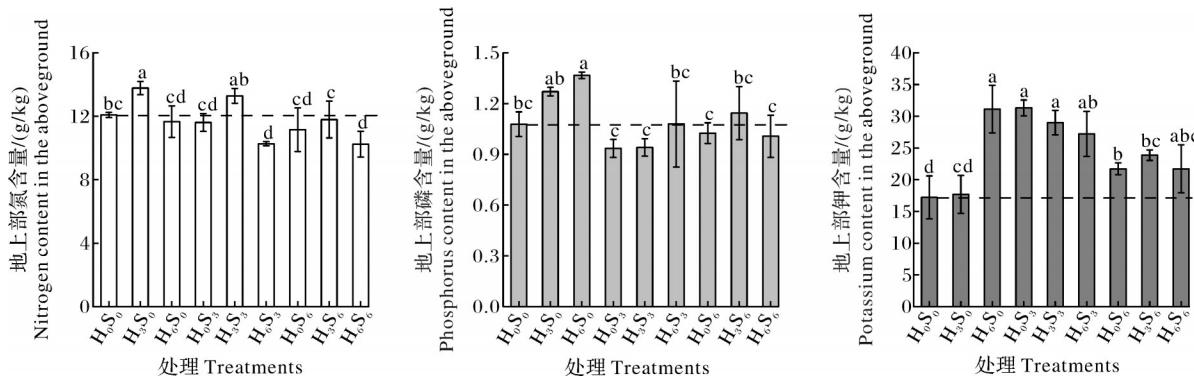


图5 哈茨木霉菌与白云石配施处理下辣椒地上部氮、磷、钾含量

Fig. 5 Total nitrogen, total phosphorus and total potassium contents in the aboveground part of chili pepper under the combined application of *Trichoderma harzianum* and dolomite

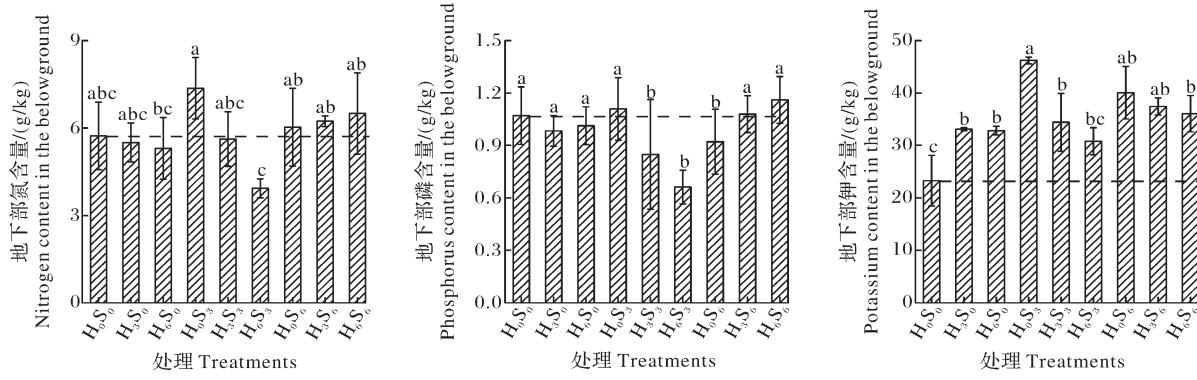


图6 哈茨木霉菌与白云石配施处理下辣椒地下部氮、磷、钾含量

Fig. 6 Total nitrogen, total phosphorus and total potassium contents in the belowground part of chili pepper under the combined application of *Trichoderma harzianum* and dolomite

由图7可知,单施白云石对辣椒果实时全氮含量无显著影响,但提高了全磷含量,中量白云石(H_0S_3)处理的果实时全磷含量最高(2.05 g/kg)。同时,单施白云石显著降低了果实时全钾含量($P<0.05$), H_0S_3 、 H_0S_6 处理较 H_0S_0 处理分别降低了22.61%、30.32%。单施哈茨木霉菌增加了果实时全氮含量, H_3S_0 、 H_6S_0 处理较 H_0S_0 处理分别提高了8.91%、16.81%,但降低

了全钾含量, H_3S_0 、 H_6S_0 处理相比于 H_0S_0 处理各降低了24.50%、12.63%。此外,单施菌剂显著提高了果实时全磷含量($P<0.05$), H_3S_0 、 H_6S_0 处理较 H_0S_0 处理分别提高了108.47%、123.73%。中量白云石与中量菌剂配施处理(H_3S_3)显著提高了果实时全氮含量($P<0.05$),较对照处理(H_0S_0)增加了32.32%。与 H_0S_0 相比,菌剂与白云石配施显著增加了辣椒果

实全磷含量($P<0.05$)，其中 H_3S_3 处理效果最好(4.63 g/kg)。然而，菌剂与白云石配施处理降低了果实时全钾含量，其中 H_6S_6 处理的全钾含量最低

(25.46 g/kg)。以上研究表明，中量白云石与中量菌剂配施(H_3S_3)在提高果实时全氮和全磷含量方面效果最好。

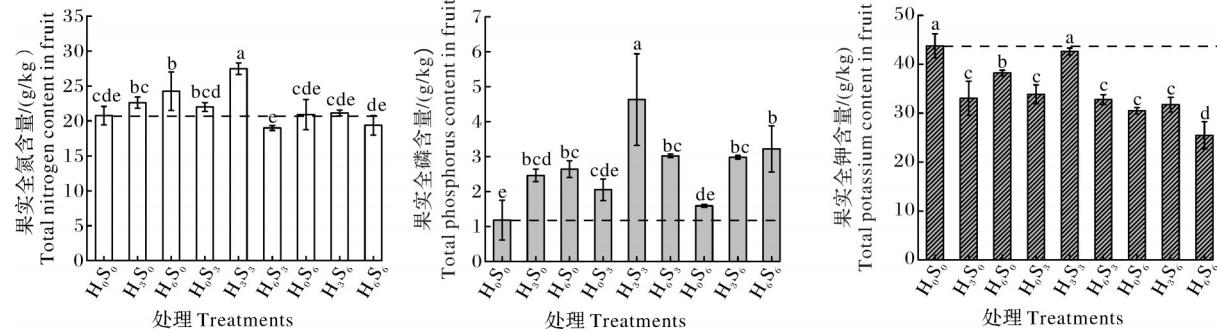


图7 哈茨木霉菌与白云石配施处理下辣椒果实养分含量

Fig. 7 Nutrient contents in pepper fruits under the combined application of *Trichoderma harzianum* and dolomite

3 讨论

3.1 哈茨木霉菌与白云石添加对酸性土壤养分的影响

土壤酸化加速了土壤中氮、磷、钾及盐基离子的流失，阻碍了土壤物质的转化过程，导致土壤肥力下降^[26]。本研究中，添加白云石显著降低了土壤有效磷的含量，这一现象可能与白云石的化学特性及其在土壤中的反应机制有关。白云石富含钙、镁等硅酸盐矿物质，施入土壤后，增加了土壤中交换性Ca和交换性Mg的含量。这些阳离子与土壤中的磷酸根离子结合，生成难溶性的磷酸盐沉淀，从而降低了磷的有效性^[27]。此外，辣椒生长过程中对磷的吸收也可能加剧了土壤有效磷的消耗，尤其是在高量白云石处理下，土壤pH值的升高可能进一步促进了磷的固定^[28]。本研究表明，白云石的添加显著降低了土壤速效钾含量，这可能与白云石改变土壤pH值有关^[29]。土壤pH值的升高影响了钾的溶解度和辣椒对钾的吸收，同时其他化学过程也可能导致速效钾含量的下降。哈茨木霉菌剂与白云石配施增加了土壤有机质含量，这与杜彩艳等^[30]的研究结果一致。哈茨木霉菌作为一种新型肥料，富含大量有益微生物，施入土壤后可通过分解产生有机酸，活化土壤养分，提高土壤肥力^[31]。此外，菌剂与土壤微生物的相互作用促进了氮、磷、钾的释放与稳固^[32]，同时微生物分泌的多糖类物质有助于形成土壤团粒结构，减少速效钾等养分的流失^[33]。

本研究结果表明，单施白云石对土壤全磷无显著影响，这可能是因为施用白云石提高了土壤养分的有效性和辣椒产量，辣椒植株从土壤中吸收了更

多的磷^[34]，也可能是由于土壤中的磷主要以难溶性形式存在，而白云石的添加对这些难溶性磷的溶解度影响较小，因此土壤全磷含量未出现显著变化。在菌剂与白云石配施条件下，全氮和全磷含量均无显著变化，可能是由于菌剂促进了土壤微生物活动，改善了土壤结构和养分循环，使养分保持在相对平衡状态，掩盖了白云石对全氮、全磷的潜在影响^[35]。然而，在中量白云石与中量菌剂配施下，全钾含量增加，这与姚少雄等^[36]的研究结果一致。在中量白云石条件下，pH的调节作用对钾的溶解度和辣椒的可利用性产生了积极影响，而菌剂的添加进一步促进了钾的释放和辣椒对钾的吸收。

3.2 哈茨木霉菌与白云石添加对酸性土壤酶活性的影响

土壤酸化通过影响微生物活动和酶活性来改变土壤的生物化学过程，进而影响土壤肥力和生态系统的健康^[37]。本研究中，单施白云石显著增加了脲酶的活性，这与吴宏涛^[38]的研究结果一致。白云石的添加可能通过促进土壤有机碳的矿化，为微生物提供了更多可利用的底物，从而增强了土壤酶活性。此外，本研究表明高量白云石与哈茨木霉菌配施显著提高了土壤脲酶活性，有利于土壤养分的转化，提高土壤肥力^[39]。在高量白云石条件下，菌剂添加对土壤脲酶、蔗糖酶以及中性磷酸酶的活性产生影响，这与宋以玲等^[40]的研究结果相似，菌剂添加改善了根际土壤微生物环境，促进根系分泌，提高了土壤酶活性，进而增加土壤中速效养分和有机质的含量。然而，土壤中的酶活性在不同处理中表现出不同的变化趋势，例如蔗糖酶活性在各处理间无显著变化，表明不同酶对土壤改良剂的响应机制可能存在

差异。

3.3 哈茨木霉菌与白云石添加对辣椒养分吸收的影响

酸性土壤通过降低养分的有效性^[41]、阻碍作物根系生长^[42-43]、改变根系微生物组成及活性^[44]以及影响土壤理化性质等方式,抑制植株对养分的吸收^[42]。本研究表明,单施白云石对辣椒地上部及地下部氮、磷含量无显著影响,但显著提高了地上部及地下部钾含量,这可能是因为白云石提高了土壤pH值,使原本被固定或不易被辣椒吸收的钾元素变得更加有效,也可能是因为添加白云石改变了土壤中钾的化学形态,进而影响土壤溶液中钾的浓度,促进辣椒对养分的吸收。白云石和哈茨木霉菌剂的添加对辣椒养分含量均有显著影响。白云石作为石灰类材料,可以中和土壤酸度,改善土壤的物理、化学性质,提高土壤养分的有效性,进而直接或间接影响辣椒的生长发育。哈茨木霉菌则通过改善微生物活性和代谢能力,提高土壤养分供给能力,促进辣椒生长发育。本研究发现,哈茨木霉菌剂与白云石配施可以提升作物养分含量,这可能与哈茨木霉菌在辣椒的根系定植有关,其通过促进作物根系对养分的吸收利用^[19],增强植株的养分获取能力。有研究表明,木霉能够通过激活植物的防御反应,增强植株对生物和非生物胁迫的抵抗力,进而促进植株生长和提高作物产量^[45]。菌肥的施用还能改善土壤环境,进一步促进植株对养分的吸收^[46]。

综合分析,白云石和哈茨木霉菌配施显著改善了酸化棕红壤的土壤养分状况,提高了土壤肥力。不同用量的白云石和哈茨木霉菌对土壤速效养分及全量养分有着不同的影响。不同浓度改良剂对土壤全氮、全磷、碱解氮和有效磷含量影响并未呈现一致的规律,这表明白云石和哈茨木霉菌对土壤养分的影响并非简单的增加或减少,而是因养分元素的不同而表现出不同的作用效果。因此,未来研究需进一步探讨白云石和哈茨木霉菌如何调控土壤养分含量的变化机制,以优化其在酸性土壤改良中的应用。

参考文献 References

- [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] TANG C X, RENGEL Z. Role of plant cation/anion uptake ratio in soil acidification [M]. Florida: CRC Press, 2003.
- [3] 全国农业技术推广服务中心.测土配方施肥土壤基础养分数据集:2005—2014[M].北京:中国农业出版社,2015.National agricultural technology extension service center. basic nutrient data set for soil formulation fertilization [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2015 (in Chinese).
- [4] 姚冬辉,吴建富,卢志红,等.江西省耕地土壤pH值和养分状况调查[J].湖南农业大学学报(自然科学版),2020,46(5): 574-579. YAO D H, WU J F, LU Z H, et al. Investigation of the pH value and nutrient status of cultivated soil in Jiangxi Province [J]. Journal of Hunan Agricultural University (natural sciences edition), 2020, 46(5): 574-579 (in Chinese with English abstract).
- [5] XU J M, TANG C, CHEN Z L. Chemical composition controls residue decomposition in soils differing in initial pH [J]. Soil biology and biochemistry, 2006, 38(3): 544-552.
- [6] 徐仁扣,李九玉,周世伟,等.我国农田土壤酸化调控的科学问题与技术措施[J].中国科学院院刊,2018,33(2):160-167. XU R K, LI J Y, ZHOU S W, et al. Scientific issues and controlling strategies of soil acidification of croplands in China [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2018, 33 (2) : 160-167 (in Chinese with English abstract).
- [7] CHE J, ZHAO X Q, SHEN R F. Molecular mechanisms of plant adaptation to acid soils: a review [J]. Pedosphere, 2023, 33(1):14-22.
- [8] 赵学强,潘贤章,马海艺,等.中国酸性土壤利用的科学问题与策略[J].土壤学报,2023,60(5):1248-1263. ZHAO X Q, PAN X Z, MA H Y, et al. Scientific issues and strategies of acid soil use in China [J]. Acta pedologica sinica, 2023, 60(5) : 1248-1263 (in Chinese with English abstract).
- [9] ZHENG S J. Crop production on acidic soils: overcoming aluminium toxicity and phosphorus deficiency [J]. Annals of botany, 2010, 106(1): 183-184.
- [10] BAQUY M A, LI J Y, XU C Y, et al. Determination of critical pH and Al concentration of acidic Ultisols for wheat and canola crops [J]. Solid earth, 2017, 8(1): 149-159.
- [11] 徐影,于镇华,李彦生,等.土壤酸化成因及其对农田土壤-微生物-作物系统影响的研究进展[J].土壤通报,2024,55(2): 562-572. XU Y, YU Z H, LI Y S, et al. Research progresses on soil acidification and its effects on soil-microorganism-crop systems in agricultural soil [J]. Chinese journal of soil science, 2024, 55(2): 562-572 (in Chinese with English abstract).
- [12] 刘娇娴,崔骏,刘洪宝,等.土壤改良剂改良酸化土壤的研究进展[J].环境工程技术学报,2022,12(1):173-184. LIU J X, CUI J, LIU H B, et al. Research progress of soil amelioration of acidified soil by soil amendments [J]. Journal of environmental engineering technology, 2022, 12(1) : 173-184 (in Chinese with English abstract).
- [13] SAARSALMI A, TAMMINEN P, KUKKOLA M, et al. Effects of liming on chemical properties of soil, needle nutrients and growth of Scots pine transplants [J]. Forest ecology and

- management, 2011, 262(2): 278-285.
- [14] LOMBI E, HAMON R E, MCGRATH S P, et al. Lability of Cd, Cu, and Zn in polluted soils treated with lime, beringite, and red mud and identification of a non-labile colloidal fraction of metals using isotopic techniques [J]. Environmental science & technology, 2003, 37(5): 979-984.
- [15] 文星, 李明德, 吴海勇, 等. 土壤改良剂对酸性水稻土 pH 值、交换性钙镁及有效磷的影响 [J]. 农业现代化研究, 2014, 35(5): 618-623. WEN X, LI M D, WU H Y, et al. The effects of acid soil modifiers on soil pH, exchangeable calcium and exchangeable magnesium, and available phosphorus in acid paddy soils [J]. Research of agricultural modernization, 2014, 35(5): 618-623 (in Chinese with English abstract).
- [16] 张国, 朱启法, 郭熙盛, 等. 皖南烟区白云石粉对酸性植烟土壤的改良研究 [J]. 土壤, 2014, 46(3): 534-538. ZHANG G, ZHU Q F, GUO X S, et al. Amelioration of dolomite on acidity of flue-cured tobacco soil in south Anhui [J]. Soils, 2014, 46(3): 534-538 (in Chinese with English abstract).
- [17] 吴宏涛, 胡金丽, 徐鹏, 等. 不同水分条件下添加白云石对酸性水稻土有机碳矿化的影响 [J]. 农业工程学报, 2021, 37(1): 148-157. WU H T, HU J L, XU P, et al. Effects of dolomite addition on organic carbon mineralization in acidic paddy soils under different moisture contents [J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(1): 148-157 (in Chinese with English abstract).
- [18] 孟素玲, 田彦梅, 顾欣, 等. 木霉的协同防病作用研究进展 [J]. 中国生物防治学报, 2022, 38(3): 739-747. MENG S L, TIAN Y M, GU X, et al. Research progress on synergistic disease prevention by *Trichoderma* [J]. Chinese journal of biological control, 2022, 38(3): 739-747 (in Chinese with English abstract).
- [19] 王义坤, 孙琪然, 段亚楠, 等. 三种菌肥对苹果连作土壤环境及平邑甜茶幼苗生长的影响 [J]. 植物营养与肥料学报, 2019, 25(4): 630-638. WANG Y K, SUN Q R, DUAN Y N, et al. Effect of three microbial fertilizers on environmental improvement of apple replanted soil and growth of *Malus hupehensis* Rehd. seedlings [J]. Journal of plant nutrition and fertilizers, 2019, 25(4): 630-638 (in Chinese with English abstract).
- [20] 汪坤, 魏跃伟, 姬小明, 等. 生物炭基肥与哈茨木霉菌剂配施对烤烟和植烟土壤质量的影响 [J]. 作物杂志, 2021(3): 106-113. WANG K, WEI Y W, JI X M, et al. Effects of combined application of biochar-based fertilizer and *Trichoderma harzianum* on the qualities of flue-cured tobacco and tobacco-growing soil [J]. Crops, 2021(3): 106-113 (in Chinese with English abstract).
- [21] 邹学校, 马艳青, 戴雄泽, 等. 辣椒在中国的传播与产业发展 [J]. 园艺学报, 2020, 47(9): 1715-1726. ZOU X X, MA Y Q, DAI X Z, et al. Spread and industry development of pepper in China [J]. Acta horticulturae sinica, 2020, 47(9): 1715-1726 (in Chinese with English abstract).
- [22] 徐晗, 鄢紫薇, 覃卫林, 等. 生物质炭调控辣椒连作障碍研究进展 [J]. 江苏农业科学, 2023, 51(6): 23-31. XU H, YAN Z W, QIN W L, et al. Research progress of biochar regulating continuous cropping obstacle of pepper [J]. Jiangsu agricultural sciences, 2023, 51(6): 23-31 (in Chinese with English abstract).
- [23] 孟远夺. 我国农田土壤酸化状况与治理措施探讨 [J]. 中国农业科技推广, 2014, 30(6): 38-39. MENG Y D. Discussion on acidification status and control measures of farmland soil in China [J]. China agricultural technology extension, 2014, 30(6): 38-39 (in Chinese).
- [24] 康飞, 杜学军, 胡树文, 等. 基于 Web of Science 和万方专利对土壤酸化和改良材料研究的计量分析 [J]. 土壤, 2021, 53(6): 1261-1270. KANG F, DU X J, HU S W, et al. Bibliometric analysis of soil acidification and improvement materials based on Web of Science and Wanfang patent database [J]. Soils, 2021, 53(6): 1261-1270 (in Chinese with English abstract).
- [25] 鲍士旦. 土壤农化分析 [M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000. BAO S D. Soil and agricultural chemistry analysis [M]. 3rd ed. Beijing: China Agriculture Press, 2000 (in Chinese).
- [26] 刘玉学, 刘微, 吴伟祥, 等. 土壤生物质炭环境行为与环境效应 [J]. 应用生态学报, 2009, 20(4): 977-982. LIU Y X, LIU W, WU W X, et al. Environmental behavior and effect of biomass-derived black carbon in soil: a review [J]. Chinese journal of applied ecology, 2009, 20(4): 977-982 (in Chinese with English abstract).
- [27] 李寿田, 周健民, 王火焰, 等. 不同土壤磷的固定特征及磷释放量和释放率的研究 [J]. 土壤学报, 2003, 40(6): 908-914. LI S T, ZHOU J M, WANG H Y, et al. Characteristics of fixation and release of phosphorus in three soils [J]. Acta pedologica sinica, 2003, 40(6): 908-914 (in Chinese with English abstract).
- [28] 王文军, 郭熙盛, 武际, 等. 施用白云石对酸性黄红壤作物产量及化学性质的影响 [J]. 土壤通报, 2006, 37(4): 723-726. WANG W J, GUO X S, WU J, et al. Effects of applying dolomite on crop yield and soil chemical properties in acid yellow-red soils areas [J]. Chinese journal of soil science, 2006, 37(4): 723-726 (in Chinese with English abstract).
- [29] 胡敏, 向永生, 鲁剑巍. 石灰用量对酸性土壤 pH 值及有效养分含量的影响 [J]. 中国土壤与肥料, 2017(4): 72-77. HU M, XIANG Y S, LU J W. Effects of lime application rates on soil pH and available nutrient content in acidic soils [J]. Soil and fertilizer sciences in China, 2017(4): 72-77 (in Chinese with English abstract).
- [30] 杜彩艳, 蜂述先, 杨鹏, 等. 施用生物有机肥对云当归产量、品质及土壤养分的影响 [J]. 中国土壤与肥料, 2024(1): 149-156. DU C Y, FENG S X, YANG P, et al. Effects of bio-organic fertilizer application on yield and quality of Yun angelica

- and the soil nutrients [J]. Soil and fertilizer sciences in China, 2024(1):149-156 (in Chinese with English abstract).
- [31] PANG G, CAI F, LI R X, et al. *Trichoderma*-enriched organic fertilizer can mitigate microbiome degeneration of monocropped soil to maintain better plant growth [J]. Plant and soil, 2017, 416(1):181-192.
- [32] VELMOUROUGANE K, PRASANNA R, SINGH S, et al. Modulating rhizosphere colonisation, plant growth, soil nutrient availability and plant defense enzyme activity through *Trichoderma viride-Azotobacter chroococcum* biofilm inoculation in chickpea [J]. Plant and soil, 2017, 421(1):157-174.
- [33] 葛均青,于贤昌,王竹红.微生物肥料效应及其应用展望 [J].中国生态农业学报,2003,11(3):87-88. GE J Q, YU X C, WANG Z H. The function of microbial fertilizer and its application prospects [J]. Chinese journal of eco-agriculture, 2003, 11 (3):87-88 (in Chinese with English abstract).
- [34] 王文军,郭熙盛,武际,等.白云石粉对皖南酸性红黄壤磷组分及磷有效性的影响 [J]. 土壤, 2006, 38 (4) : 448-452. WANG W J, GUO X S, WU J, et al. Effects of dolomite on chemical fractions and availability of phosphate in acid red and yellow soil of south Anhui Province [J]. Soils, 2006, 38 (4) : 448-452 (in Chinese with English abstract).
- [35] 侯晓萌,孔涛,霍宏亮,等.微生物菌剂对小叶杨复垦区土壤理化性质和酶活性的影响 [J].林业科学研究,2022,35(3): 55-62. HOU X M, KONG T, HUO H L, et al. Effects of microbial agents on soil physical and chemical properties and enzyme activities in *Populus simonii* reclamation area [J]. Forest research, 2022, 35 (3) : 55-62 (in Chinese with English abstract).
- [36] 姚少雄,周蓓蓓,李晓晴,等.哈茨木霉菌与有机肥复配强化植物修复强酸性重金属污染土壤的效果及机理 [J].土壤通报,2023,54(4):937-946. YAO S X, ZHOU B B, LI X Q, et al. Phytoextraction remediation effectiveness and mechanism by using *Trichoderma harzianum* with organic fertilizer for strongly acidic heavy metal contaminated soil [J]. Chinese journal of soil science, 2023, 54 (4) : 937-946 (in Chinese with English abstract).
- [37] 曹慧,孙辉,杨浩,等.土壤酶活性及其对土壤质量的指示研究进展 [J].应用与环境生物学报,2003,9(1):105-109. CAO H, SUN H, YANG H, et al. A review soil enzyme activity and its indication for soil quality [J]. Chinese journal of applied and environmental biology, 2003, 9(1) : 105-109 (in Chinese with English abstract).
- [38] 吴宏涛.白云石对酸性水稻土有机碳矿化的影响 [D]. 武汉:华中农业大学,2020. WU H T. Effects of dolomite application on organic carbon mineralization in acidic paddy soils [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2020 (in Chinese with English abstract).
- [39] 李金业,程昊,梁晓敏,等.酸化土壤改良与固碳研究进展 [J].生态学报,2024,44(17):7871-7884. LI J Y, CHENG H, LI-ANG X M, et al. Research progress of acidified soil amelioration and carbon sequestration [J]. Acta ecologica sinica, 2024, 44(17):7871-7884 (in Chinese with English abstract).
- [40] 宋以玲,于建,陈士更,等.复合微生物菌剂对棉花生理特性及根际土壤微生物和化学性质的影响 [J]. 土壤, 2019, 51 (3):477-487. SONG Y L, YU J, CHEN S G, et al. Effects of complex microbial agent on cotton physiological characteristics, microorganism and physicochemical properties in rhizosphere soil [J]. Soils, 2019, 51(3) : 477-487 (in Chinese with English abstract).
- [41] 李欣欣,杨永庆,钟永嘉,等.豆科作物适应酸性土壤的养分高效根系遗传改良 [J]. 华南农业大学学报,2019,40(5):186-194. LI X X, YANG Y Q, ZHONG Y J, et al. Genetic improvement for nutrient efficient roots of leguminous crops adapted to acidic soils [J]. Journal of South China Agricultural University, 2019, 40(5):186-194 (in Chinese with English abstract).
- [42] 张影,胡承孝,谭启玲,等.施用石灰对温州蜜柑树体营养和果实品质及酸性柑橘园土壤养分有效性的影响 [J]. 华中农业大学学报,2014,33(4):72-76. ZHANG Y, HU C X, TAN Q L, et al. Effects of liming on nutrition status, quality of Satsuma mandarin and acid soil nutrients availability of citrus orchard [J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2014, 33(4):72-76 (in Chinese with English abstract).
- [43] 于天一,郑亚萍,邱少芬,等.酸化土壤施钙对不同花生品种(系)钙吸收、利用及产量的影响 [J].作物杂志,2021(4):80-85. YU T Y, ZHENG Y P, QIU S F, et al. Effects of calcium (Ca) application in acidified soil on Ca absorption, utilization and yield of different peanut varieties (lines) [J]. Crops, 2021 (4):80-85 (in Chinese with English abstract).
- [44] HU Z K, DELGADO-BAQUERIZO M, FANIN N, et al. Nutrient-induced acidification modulates soil biodiversity-function relationships [J/OL]. Nature communications, 2024, 15 (1) : 2858 [2024-12-18]. <https://doi.org/10.1038/s41467-024-47323-3>.
- [45] WOO S L, HERMOSA R, LORITO M, et al. *Trichoderma*: a multipurpose, plant-beneficial microorganism for eco-sustainable agriculture [J]. Nature reviews. microbiology, 2023, 21 (5):312-326.
- [46] 任志超,穆耀辉,匡志豪,等.哈茨木霉配施高碳基肥对植烟土壤理化性质和细菌群落结构的影响 [J]. 江苏农业科学, 2023, 51(8):223-231. REN Z C, MU Y H, KUANG Z H, et al. Effects of *Trichoderma harzianum* combined with high-carbon fertilizer on physicochemical properties and bacterial community structure of tobacco-growing soil [J]. Jiangsu agricultural sciences, 2023, 51(8):223-231 (in Chinese with English abstract).

Effects of two amendment formulations on nutrients, enzyme activity and absorption of nutrient by chili peppers in acidic soils

ZHAO Yaoyao¹, PENG Xiong², ZHOU Jinyan¹, CHEN Linna¹,
CAO Hongliang³, HU Hongqing¹, XIA Wenjian⁴, LIN Shan¹

1. College of Resources and Environment, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China;

2. External Cooperation Office of Hubei Provincial Department of Agriculture and Rural Affairs,
Wuhan 430071, China;

3. College of Engineering, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China;

4. Institute of Soil and Fertilizer & Resources and Environment, Jiangxi Academy of
Agricultural Sciences/Jiangxi Province Key Laboratory of Arable Land Improvement and
Quality Enhancement, Nanchang 330200, China

Abstract Chili pepper was used to conduct a pot experiment to study the effects of *Trichoderma harzianum* and dolomite, and the combined application of both on the improvement of acidic soils. A two-factor and three-level orthogonal experiment (*Trichoderma harzianum* applied at 0 g/pot, 3 g/pot and 6 g/pot, and dolomite applied at 0 g/kg, 3 g/kg, and 6 g/kg) was designed to result in 9 treatment groups including H_0S_0 , H_3S_0 , H_6S_0 , H_0S_3 , H_3S_3 , H_6S_3 , H_0S_6 , H_3S_6 and H_6S_6 . The results showed that the combined application of *Trichoderma harzianum* and dolomite significantly increased soil pH. The H_6S_6 had the highest content of organic matter in soil. The combined application of *Trichoderma harzianum* and dolomite increased the content of alkaline-hydrolyzable nitrogen in soil, and the high-dose combination of *Trichoderma harzianum* with dolomite (H_6S_3 , H_6S_6) significantly increased the content of available phosphorus. The combined application of high-dose dolomite and high-dose *Trichoderma harzianum* significantly increased the content of total nitrogen and urease activity in soil. Compared with the control group (H_0S_0), the content of total nitrogen in the H_6S_6 treatment increased by 213.50% and the activity of urease in the H_6S_6 treatment enhanced by 61.97%. In terms of the absorption of nutrient by chili peppers, the content of total nitrogen and total phosphorus in the fruits in H_3S_3 treatment was the highest, significantly increased by 32.32% and 292.37% compared with that in H_0S_0 (CK). It is indicated that the combined application of *Trichoderma harzianum* and dolomite can effectively improve the nutrient status in acidic soils and the activity of enzyme in acidic soils, and promote the absorption of nutrient by chili peppers, with the H_6S_6 treatment having the best performance in terms of comprehensive benefits. It will provide a scientific basis for the improvement of acidified soil.

Keywords acidic soil; *Trichoderma harzianum*; dolomite; nutrients in soil; activity of enzyme in soil; chili pepper

(责任编辑:葛晓霞)