

明润廷,那立苹,万方,等. 蚯蚓粪酸土改良剂对酸性土壤酸碱性、肥力及上海青生长的影响评价[J]. 华中农业大学学报, 2025, 44(4): 58-67.
DOI: 10.13300/j.cnki.hnlkxb.2025.04.006

蚯蚓粪酸土改良剂对酸性土壤酸碱性、 肥力及上海青生长的影响评价

明润廷¹, 那立苹², 万方¹, 吴海程¹, 王薇¹, 伍玉鹏¹, 谭文峰¹

1. 华中农业大学资源与环境学院, 武汉 430070; 2. 浙江省农业科学院环境资源与土壤肥料研究所, 杭州 310021

摘要 为了强化蚯蚓粪酸土改良性能,通过物理混合和蚯蚓堆肥2种方式在蚯蚓粪(vermicompost, V)中加入高碱度物质牡蛎壳粉(oyster shell powder, M)及生物炭粉(biochar, B),制备蚯蚓粪酸土改良剂B+M+V和BMV,并通过盆栽试验对比B+M+V、BMV与生石灰(quicklime powder, L)、牡蛎壳粉(M)、生物炭(B)、蚯蚓粪(V)等改良剂的施用效果。结果显示:L和M施用下土壤降酸效果最为明显,土壤pH分别提升3.18和2.81个单位,土壤酸碱缓冲容量(soil acid-base buffering capacity, pHBC)增幅分别为196.81%和236.97%;B+M+V和BMV施用下土壤降酸效果次之,土壤pH分别提升1.35和1.49个单位,土壤酸碱缓冲容量增幅分别为124.97%和104.07%;B和V施用下土壤降酸效果最弱。施用V、B+M+V和BMV均能有效提高土壤肥力,其中B+M+V和BMV施用后土壤有机质分别提升197.53%和222.51%,同时显著提高了土壤有效磷、有效钾含量和CEC值。施用B+M+V和BMV时上海青株高及生物量均显著高于L、M和B处理,并显著提高了上海青吸收N、P和K的累积量。主成分分析评价显示,L和M的降酸能力最强,V、B+M+V和BMV培肥效果最好,B+M+V、BMV施用下上海青的生长状况最好,而B+M+V和BMV在综合改良效果中表现最优。以上结果表明,制备的2种蚯蚓粪酸土改良剂有效结合了纯蚯蚓粪培肥土壤和高碱度物质强降酸能力的优点,能够在酸性土壤改良中发挥优异的综合作用。

关键词 酸性土壤; 土壤改良; 改良剂; 蚯蚓粪; 综合评价

中图分类号 S156.6 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2025)04-0058-10

土壤酸化是指土壤pH持续降低、土壤中交换性酸含量持续增加的过程^[1]。土壤酸化会导致土壤结构破坏、土壤养分流失,还能够使土壤重金属活性增强,降低土壤质量和生产力,使作物减产^[2]。2010年中国农田酸化土壤面积达全国土壤面积的22.7%^[3],到2015年中国酸性土壤(pH<6.5)的面积上升到311.1万km²左右,达到了全国陆域面积的32.4%^[4]。土壤酸化已对我国农业生产、农产品品质和生态环境构成潜在威胁,开展酸性土壤改良是实现酸土可持续利用与生产力提升、实现“藏粮于地”战略的关键^[1]。

施加土壤改良剂是改良酸性土壤、快速提升土壤pH的有效举措^[5]。目前广泛使用的包括石灰类(石灰石、白云石等)、矿物类工业副产品(磷石膏、碱渣等)等无机物料改良剂和农作物秸秆类(新鲜秸

秆、生物炭等)、有机肥类(腐熟粪便、蚯蚓粪等)等有机物料改良剂2大类^[6-7]。土壤酸碱缓冲容量(soil acid-base buffering capacity, pHBC)作为评价土壤抗酸化能力的重要指标,能够维持土壤pH的相对稳定,为作物生长提供稳定的酸碱环境^[8]。无机物料改良剂因其较高的碱度,在提高酸性土壤pH、增加阳离子交换量和酸碱缓冲能力方面表现优异^[4,7]。但无机物料大量施用后土壤容易板结,且存在粉尘污染^[7,9],工业副产品中存在的重金属等污染物在长期施用后可能会造成土壤污染等其他环境问题^[7,10]。作物秸秆和有机肥等物料施用后对酸性土壤pH的提升速度较慢,但生物炭施用后可有效提高土壤有机质含量和蔬菜产量^[11],且有机物料中通常含有大量的腐殖质和营养元素,不仅能够增加土壤养分和有机质含量、提升土壤肥力,还能使得作物增

收稿日期:2024-11-21

基金项目:国家重点研发计划项目(2021YFD1901202)

明润廷, E-mail: 3258186409@qq.com

通信作者: 伍玉鹏, E-mail: wyp19851205@126.com

产^[12-13]。总体来看,无机物料降酸效果好,但易引发土壤结构破坏或土壤污染等问题,有机物料能够综合提高土壤肥力,但降酸见效慢、周期长。因此,近年来,有机-无机改良剂配合施用改良酸性土壤等措施逐渐成为热点^[1,4,14]。相较于单一改良剂施用,目前不同类型改良剂组合施用的研究结果较少,且大部分研究均通过不同改良剂之间的简单混合来实现互配^[15],尚未更深入研究不同类型改良剂的有机结合方式。

蚯蚓堆肥是将畜禽粪便等农业有机废弃物转化为蚯蚓粪有机肥的有效手段^[16]。有机物料在蚯蚓过腹过程中,受蚯蚓肠道特殊环境、微生物群落结构及肠道压力的影响,形成了具有特殊理化及微生物性质的蚯蚓粪^[17]。蚯蚓粪已被证实在土壤培肥中具有良好的效果,但其偏中性的化学性质限制了其在酸性土壤改良中的应用。在蚯蚓粪中简单混合高碱度无机物料或是强化蚯蚓粪酸土改良性能的有效手段。但在蚯蚓堆肥前的物料中混合高碱度无机物料,是否能够利用蚯蚓过腹过程将高碱度物料有机地融入蚯蚓粪中,以实现更优的改良效果尚不清楚。

上海青(*Brassica chinensis* L.)作为一种典型蔬菜,其生长快速、种植范围广泛、富含营养成分,在我国各地广泛栽培^[18]。本研究以上海青为供试作物进行盆栽试验,通过与生石灰等传统改良剂对比,探究2种蚯蚓粪酸土改良剂对土壤酸度、肥力及上海青生长的影响,并全面、综合地评价2种不同制备方式蚯蚓粪酸土改良剂的施用效果,以期对蚯蚓堆肥改良剂的应用提供新的思路。

1 材料与方法

1.1 供试土壤与改良剂

供试土壤采自湖北省咸宁市咸安区双溪桥镇郭田铺村,土壤类型为红壤。采用土钻采集0~30 cm土壤,剔除砾石、根系等杂物,风干后过2 mm孔径筛。土壤理化性质如下:pH 4.84,有机质 13.70 g/kg,碱解氮 26.95 mg/kg,有效磷 3.41 mg/kg,有效钾 85.73 mg/kg,交换性氢 2.15 cmol/kg,交换性铝 1.80 cmol/kg,阳离子交换量(cation exchange capacity,CEC)7.38 cmol/kg。

生石灰粉(quicklime powder,L)购买自宜春惠灰科技有限公司,其CaO含量≥80%,pH为12.46。牡蛎壳粉(oyster shell powder,M)购买自山东富田正大生物科技有限公司,其CaO含量≥45%,pH为8.28。生物炭(biochar,B)购买自河南星诺环保材料有限公司,由玉米秸秆热解所得,总氮(total nitrogen,TN)含量为0.87%,总碳(total carbon,TC)含量为32.90%,pH为10.25。

赤子爱胜蚓(*Eisenia fetida*)和牛粪均购自湖北田申甲生物环保科技有限公司。纯牛粪接种赤子爱胜蚓后经28 d的蚯蚓堆肥处理获得纯蚯蚓粪(vermicompost,V)。按照纯蚯蚓粪:生物炭:牡蛎壳粉干质量为22:2:1的比例进行混合,得到物理混合的蚯蚓粪酸土改良剂(B+M+V)。按照牛粪:生物炭:牡蛎壳粉干质量比为22:2:1的比例混合,之后接种赤子爱胜蚓,经28 d的蚯蚓堆肥获得过腹混合的蚯蚓粪酸土改良剂(BMV)。其中22:2:1的混合比例由前期的蚯蚓堆肥试验确定,该比例可在提高蚯蚓粪碱度的同时最大程度地保持蚯蚓堆肥的高效性。V、B+M+V和BMV的基本性质如表1所示。

表1 V、B+M+V和BMV的基本性质
Table 1 Basic properties of V, B+M+V and BMV

改良剂种类 Types of amendment	pH	总碳/% Total carbon	总氮/% Total nitrogen	总磷/(g/kg) Total phosphorus	总钾/(g/kg) Total potassium	碱度/(cmol/kg) Basicity
V	6.95	17.98	2.00	20.52	10.74	83.18
B+M+V	7.31	19.41	1.82	19.67	9.68	107.15
BMV	7.60	19.95	1.82	17.39	9.49	119.55

1.2 盆栽试验设计

试验共设置8个处理:CK(不施改良剂)、L(施加1%生石灰粉)、M(施加1%牡蛎壳粉)、B(施加1%生物炭)、B+M(施加0.67%生物炭和0.33%牡蛎壳粉)、V(施加8.33%纯蚯蚓粪)、B+M+V(施加8.33%物理混合的蚯蚓粪酸土改良剂)、BMV(施加

8.33%过腹混合的蚯蚓粪酸土改良剂)。各处理施用比例均为改良剂质量与干土质量比,其中B+M+V、BMV施加量为8.33%以确保改良剂中所含的高碱度物质成分(生物炭+牡蛎壳粉)施入量为1%。每个处理3次重复。

正式进行盆栽试验前,调节土壤含水率为23%

进行1周的预培养,以活化土壤微生物和消除干湿效应。在土壤中按1.257、1.540和0.509 g/kg混入 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 、 $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ 和KCl作为底肥。在塑料花盆中装入折合2 kg干土质量的预培养土壤,按各处理混入改良剂,移栽大小一致的具有2~3片真叶的上海青幼苗2棵。盆栽放置于室外大棚进行培养,每2~3 d通过称质量法浇水1次保持水分维持在23%左右,移栽38 d后收获上海青。

1.3 取样及测定

上海青收获季将植物样品与土壤分离。土壤理化性质参照文献[19]的方法测定,土壤pH采用玻璃电极法(土水质量比为1:2.5)测定,土壤交换性酸总量(soil exchangeable acid, EA)、交换性 H^+ 、交换性 Al^{3+} 用氯化钾交换-中和滴定法测定,碱解氮(alkali-hydrolyzable nitrogen, AN)采用碱解扩散滴定法测定,有效磷(available phosphorus, AP)采用碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法测定,有效钾(available potassium, AK)采用2M冷硝酸浸提-火焰光度法测定,土壤有机质(soil organic matter, SOM)使用总有机碳分析仪(elementar)测定,土壤阳离子交换量(CEC)采用氯化钡缓冲液法[20]测定。土壤酸碱缓冲容量(pH-BC)采用胡天睿等[21]提出的方法测定pH后采用指数方程拟合、求导后获得[8]。

上海青株高用尺子测定,叶片数采用目测计数,测量地上部与地下部鲜质量,地上部与地下部干质量在上海青洗净、烘干至恒质量测定。将整个植株研磨后用浓硫酸-双氧水消解,用全自动凯氏定氮仪测定全氮含量,用钼锑抗比色法测定全磷含量,用火焰光度计测定植物全钾含量,计算每盆植株养分累积量。

1.4 数据分析

为综合评价不同改良剂施用的效果,本研究将测定的所有指标数据归一化处理,经主成分分析筛选后计算综合评价得分。归一化是将不同类型的数值相互之间进行比较的一种方法,是目前常用的标准化换算方式。换算公式[22]如下:

$$U_i = \frac{X_i - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} \quad (1)$$

$$U_i = \frac{X_{\max} - X_i}{X_{\max} - X_{\min}} \quad (2)$$

式(1)~(2)中, X_i 为各项指标的实测值, X_{\max} 和 X_{\min} 分别为该项指标的最大值和最小值。所测数据

与预期结果成正相关时用公式(1),所测数据与预期结果成负相关时用公式(2)。

将归一化后的数据利用SPSS 24.0软件的因子分析模块进行主成分分析,保留累计贡献率达到90%以上的各主成分进行综合评分 D_z ,评分指标包括降酸能力 D_a (pH、交换性氢、交换性铝、交换性酸、pHBC)、培肥效果 D_f (有机质、碱解氮、有效磷、有效钾、CEC)及上海青生长状况 D_g (叶片数、株高、地上地下部鲜质量与干质量、生物量鲜质量与干质量、上海青N、P、K含量及积累量),计算公式[22-23]如下:

$$D = \sum_{j=1}^n P_j \times F_j \quad (3)$$

$$F_j = \sum_{i=1}^n C_{ij} \times U_i \quad (4)$$

$$C_{ij} = \frac{B_{ij}}{\sqrt{\lambda_j}} \quad (5)$$

式(3)~(5)中: F_j 为各个主成分; P_j 为各个主成分的方差贡献率; C_{ij} 为各个指标的主成分系数; B_{ij} 为各个指标的载荷系数; λ_j 为各个主成分的特征根。

综合改良效果的评分 D_z 按以下公式计算:

$$D_z = \frac{1}{3}U(D_a) + \frac{1}{3}U(D_f) + \frac{1}{3}U(D_g) \quad (6)$$

其中, $U(D_a)$ 、 $U(D_f)$ 、 $U(D_g)$ 是按公式(1)~(2)归一化后的数值。

本研究采用Microsoft Excel 2019进行数据处理,并利用IBM SPSS Statistics 24.0软件进行数据统计分析,采用单因素方差分析比较处理间各指标差异的显著性。图像绘制均使用Origin 9.1软件绘制,其中主成分分析采用Origin中的Principal Component Analysis进行绘制;回归分析由Origin进行回归方程拟合与绘制。

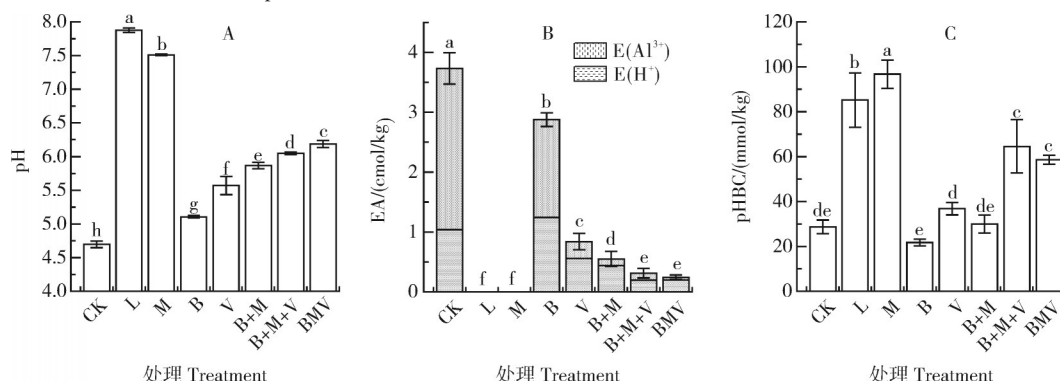
2 结果与分析

2.1 不同改良剂施用下土壤酸度及酸碱缓冲容量的变化

相较于CK,L和M处理有效提高了土壤pH值,分别增加3.18和2.81个单位,增幅最显著(图1A)。L和M施加后的土壤已偏碱性,因此未在土壤中检测出交换性酸和交换性铝含量(图1B)。B和V处理对土壤pH值的提升作用最小,仅增加了0.41和0.87个单位,其中B处理对土壤交换性酸(EA)的降低作用最小,降幅为22.92%。改良剂B+M+V和BMV对土壤pH的增幅以及交换性酸的降幅仅次于L和

M处理,pH值分别提高了1.35和1.49个单位、交换性酸分别降低了91.64%和93.43%,与CK相比差异显著。土壤酸碱缓冲容量(pHBC)是评价土壤抗

酸化能力的一个重要指标。L、M、B+M+V、BMV处理均显著提升了土壤酸缓冲容量,增幅分别为196.81%、236.97%、124.97%、104.07%(图1C)。



A: 土壤pH; B: 土壤交换性酸(EA); C: 土壤酸碱缓冲容量(pHBC)。不同小写字母表示不同处理间差异显著($P < 0.05$)。E(Al³⁺)、E(H⁺)分别代表交换性铝、交换性氢,下同。A: Soil pH; B: Soil exchangeable acid; C: Soil acid-base buffering capacity (pHBC). Different lowercase letters indicate significant difference between different treatments ($P < 0.05$). E(Al³⁺) and E(H⁺) respectively represent exchangeable aluminum and exchangeable hydrogen, the same as below.

图1 改良剂施用下土壤酸度及酸碱缓冲容量的变化

Fig. 1 Changes of soil acidity and acid-base buffer capacity under the application of conditioners

2.2 不同改良剂施用下土壤肥力的变化

相对于不添加改良剂的处理,B、V、B+M、B+M+V和BMV处理显著增加了土壤有机质含量,增幅分别为76.63%、133.75%、59.05%、197.53%和222.51%,其中施用B+M+V和BMV对土壤有机质含量的提升效果显著高于其他处理(图2A)。L、B和B+M+V处理对土壤碱解氮含量无显著影响,V处理显著增加了土壤碱解氮含量,增幅为55.96%,M、B+M、BMV处理则显著降低了土壤碱解氮含量,降幅分别为48.70%、35.70%、21.34%(图2B)。相比CK,B、V、B+M+V、BMV处理可以显著增加土壤有效磷含量(图2C),B、V、B+M、B+M+V、BMV处理均显著增加了土壤有效钾含量(图2D)。V、B+M+V和BMV处理相比CK显著提升了土壤的阳离子交换量,但L、M、B和M+B处理对土壤阳离子交换量的影响不显著(图2E)。

2.3 不同改良剂施用下上海青的生长状况

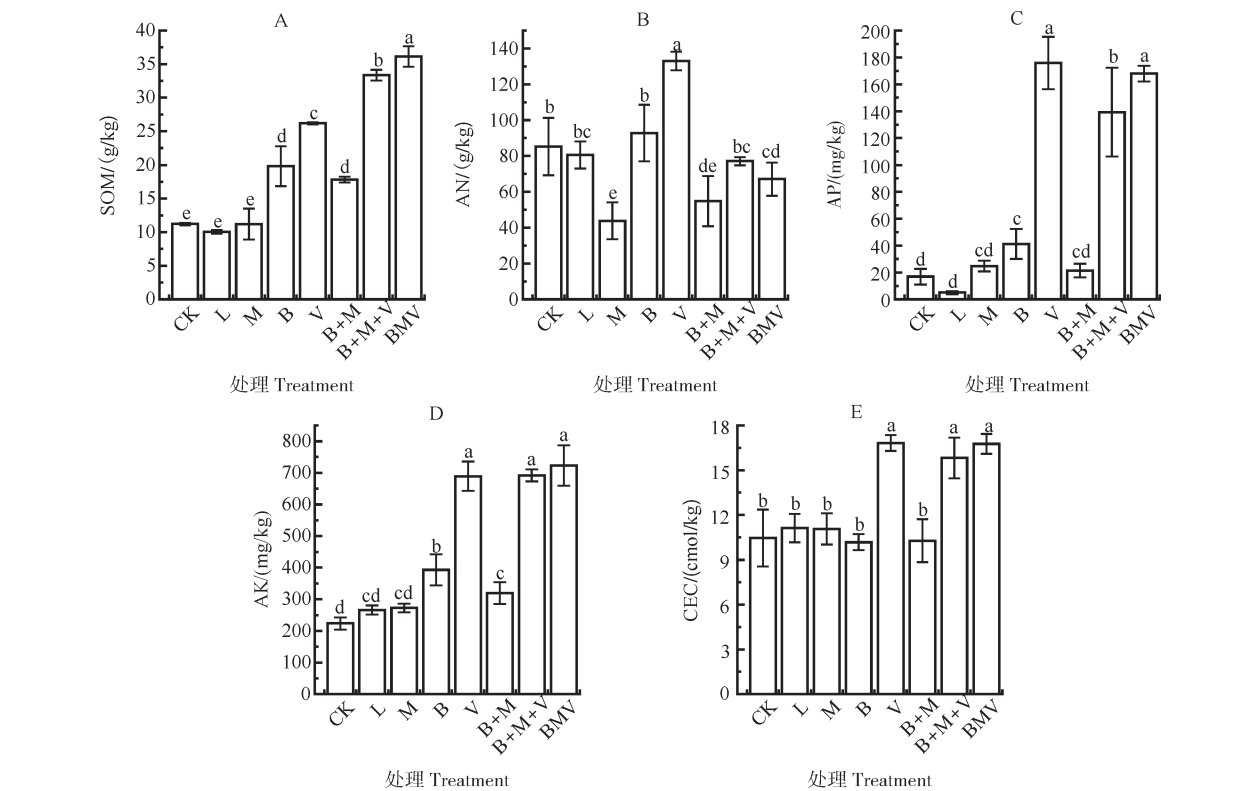
L和M处理显著降低了上海青的株高,分别降低了3.09、1.69 cm(表2)。而V、B+M、B+M+V、BMV处理则对上海青的生长发育有较显著的促进作用,表现为显著增加的叶片数和株高,其中B+M+V处理对上海青的叶片分蘖的促进效果最好(平均叶片数20),B+M处理上海青的株高最高(平均

12.99 cm)。虽然相比CK未显著改变株高和叶片数,但L、M的施用显著降低了上海青的生物量。总体来看,V、B+M、B+M+V、BMV的添加相比CK显著增加了上海青的生物量。

不同改良剂处理之间上海青的N含量无显著差异,但N积累量之间差异显著(表3)。相比CK,L、M处理显著降低了上海青的N积累量,而B、V、B+M、B+M+V和BMV处理显著增加了上海青的N积累量,其中施用B+M+V对上海青的N积累增幅最多(为257.06%)。上海青对P、K的吸收与改良剂种类有关,相比CK,L、M处理显著降低了上海青P、K的含量,V和B+M+V处理则显著增加了上海青P的含量并以B+M+V处理最高(为6.69 g/kg)。施用B、V、B+M+V和BMV显著增加了上海青K的含量,其中施用V的上海青K含量最高(为35.64 g/kg)。施用B+M+V上海青P和K的积累量最高,分别为9.81和50.73 mg/盆。

2.4 不同改良剂的综合效果评价

根据主成分分析对不同改良剂的降酸能力、培肥效果、上海青生长状况以及综合改良效果进行评分(图3),其中降酸能力由大到小分别为:M(1.74)>L(1.73)>B+M+V(1.32)>BMV(1.32)>B+M(1.05)>V(0.98)>B(0.41)>CK(0.27)。培肥能力由大到小分别为:V(1.52)>BMV(1.41)>B+M+



A: 土壤有机质(SOM)含量;B:土壤碱解氮(AN)含量;C:土壤有效磷(AP)含量;D:土壤有效钾(AK)含量;E:阳离子交换量(CEC)。
A: Content of soil organic matter; B: Content of soil alkali-hydrolyzed nitrogen; C: Content of soil available phosphorus; D: Content of soil available potassium; E: Cation exchange capacity.

图2 改良剂施用下土壤肥力的变化
Fig. 2 Changes of soil fertility under the application of conditioners

表 2 改良剂施用下上海青生长的变化

Table 2 Changes of the growth of Shanghaiqing under the application of conditioners

处理 Treatment	叶片数 Number of blades	株高/cm Height	单盆鲜质量/(g/pot) Fresh weight		单盆干质量/(g/pot) Dry weight	
			地上部 Overground	地下部 Underground	地上部 Overground	地下部 Underground
CK	13.67±1.15de	8.36±1.45cd	7.85±2.97de	0.47±0.21c	0.35±0.11ef	0.024±0.006d
L	11.00±2.65e	5.27±2.82e	1.21±0.71f	0.27±0.10c	0.06±0.03g	0.030±0.010d
M	12.00±2.00de	6.67±2.10de	2.83±1.53ef	0.31±0.13c	0.15±0.08fg	0.027±0.011d
B	14.00±1.73cd	9.86±0.90bc	9.44±3.37d	0.62±0.35bc	0.48±0.20de	0.043±0.020cd
V	16.67±2.08bc	12.38±1.22ab	15.33±2.69c	1.00±0.13ab	0.80±0.16bc	0.059±0.004bc
B+M	17.67±0.58ab	12.99±1.59a	17.63±4.76bc	1.02±0.12a	0.66±0.20cd	0.076±0.010ab
B+M+V	20.00±1.00a	11.94±1.12ab	24.38±4.74a	1.26±0.45a	1.36±0.25a	0.096±0.031a
BMV	17.33±1.15ab	12.05±1.06ab	20.57±1.93ab	1.23±0.02a	1.02±0.12b	0.076±0.005ab

注:同一列不同小写字母表示不同处理间差异显著($P<0.05$),下同。Different lowercase letters in the same column indicated significant difference between different treatments ($P<0.05$), the same as below.

V (1.30)>B (0.59)>B+M (0.36)>L (0.32)>CK (0.32)>M (0.26)。上海青的生长状况从好到坏分别为: B+M+V (2.41)>BMV (1.92)>V (1.66)>B+M (1.55)>B (1.06)>CK (0.79)>M (0.39)>L (0.14)。综合改良效果由强到弱分别为: B+M+V (0.77)>BMV (0.74)>V (0.66)>B+M (0.40)>M (0.39)>L (0.38)>B (0.26)>CK (0.13)。

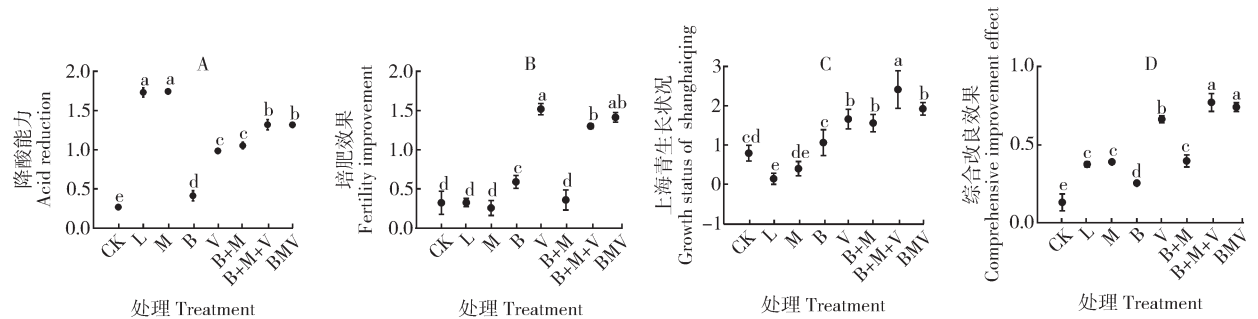
2.5 土壤指标的主成分分析与综合指标间的回归分析

根据不同改良剂的组分,本研究将施用的7种改良剂分为无机改良剂(L、M)、有机改良剂(B、V)和有机无机混合改良剂(B+M、B+M+V、BMV)3

表 3 改良剂施用下上海青养分吸收的变化

Table 3 Changes of nutrient absorption of Shanghaiqing under the application of conditioner

处理 Treatment	N		P		K	
	含量/(g/kg) Content	积累量/(mg/pot) Accumulation	含量/(g/kg) Content	积累量/(mg/pot) Accumulation	含量/(g/kg) Content	积累量/(mg/pot) Accumulation
CK	30.94±1.33ab	11.69±3.61f	5.43±0.28cde	2.07±0.70de	29.00±1.38b	10.94±3.31def
L	33.91±1.54a	3.82±1.60ef	3.63±0.24f	0.41±0.18e	17.39±1.69d	1.91±0.54f
M	34.11±0.47a	7.17±2.78ef	4.89±0.20e	1.04±0.46de	22.68±0.28c	4.79±1.97ef
B	28.52±0.5b	15.11±6.59de	5.27±0.60de	2.74±1.02cd	34.05±0.17a	17.97±7.52cde
V	33.29±1.33a	28.66±5.29bc	6.28±0.34ab	5.43±1.18b	35.64±2.00a	30.91±7.58bc
B+M	31.13±2.44ab	22.68±5.50cd	5.93±0.6bc	4.41±1.46bc	27.48±0.58b	20.11±5.11cd
B+M+V	28.94±3.37b	41.74±5.42a	6.69±0.32a	9.81±2.24a	34.37±4.09a	50.73±14.90a
BMV	30.90±1.49ab	33.77±3.27ab	5.72±0.32bcd	6.28±0.98b	34.04±3.48a	37.52±7.48ab



A: 改良剂降酸能力; B: 改良剂培肥效果; C: 上海青生长状况; D: 改良剂综合改良效果。A: The acid reducing ability of conditioner; B: Fertilizer improvement effect of conditioner; C: Growth status of Shanghaiqing; D: Comprehensive improvement effect of conditioner.

图 3 不同改良剂的综合评分

Fig. 3 Comprehensive scores of different conditioners

组,对反映土壤酸度和肥力的 10 个指标进行主成分分析(图 4)。结果显示主成分 1 的方差贡献率为 45.6%,主成分 2 的方差解释率为 38.8%,2 个主成分可以较好地反映出改良剂对土壤降酸的能力和培肥的效果。沿 PC1 轴从左到右,改良剂的降酸能力逐渐增强,其中无机改良剂的降酸能力最强。沿 PC2 轴从下到上,改良剂的培肥效果逐渐增强,其中有机改良剂的培肥效果最好。有机无机混合改良剂的降酸能力和培肥效果均居中,但与有机改良剂的培肥效果无明显差异。

将改良剂降酸能力、培肥效果、上海青生长状况和综合改良效果的综合得分进行回归分析(图 5)。以降酸能力为自变量,培肥效果、上海青生长状况和综合改良效果为因变量得到的回归方程分别为 $Y = -1.58X^2 + 3.22X - 0.46$ ($R^2 = 0.51, P < 0.001$), $Y = -2.66X^2 + 5.17X - 0.54$ ($R^2 = 0.68, P < 0.001$), $Y = -0.66X^2 + 1.54X - 0.25$ ($R^2 = 0.73, P < 0.001$), 在降酸能力综合得分为 1 左右时,培肥效果、上海青生长状况和综合改良效果达到最大值。而培肥效

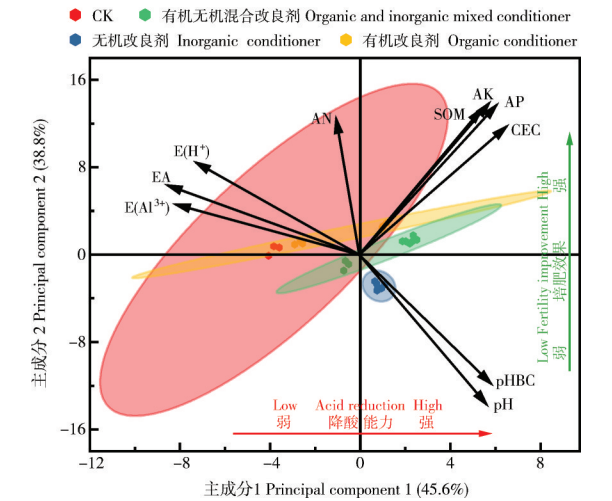
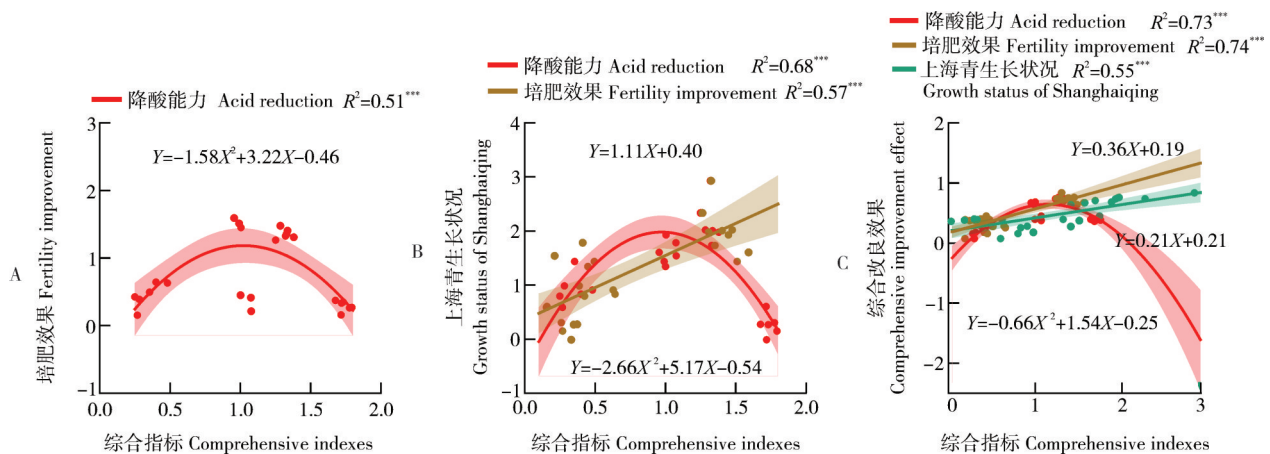


图 4 不同类型改良剂土壤指标的主成分分析

Fig. 4 Principal component analysis of soil indexes of different types of conditioner

果、上海青生长状况和综合改良效果之间呈正相关关系。这说明在研制改良剂时,除了考虑改良剂的降酸能力,还应该更多关注改良剂的培肥效果以及对作物生长状况的影响。



A: 培肥效果与降酸能力回归曲线; B: 上海青生长状况与降酸能力、培肥效果回归曲线; C: 综合改良效果与上海青生长状况、降酸能力、培肥效果回归曲线。***表示在0.001水平上显著($P < 0.001$)。A: Regression curve of fertility improvement and acid reduction; B: Regression curve of growth status of Shanghaiqing and acid reduction, fertility improvement; C: Regression curve of the comprehensive improvement effect and the growth status of Shanghaiqing, acid reduction, fertility improvement.*** indicate significant at 0.001 level.

图5 改良剂各综合指标间的回归分析

Fig. 5 Regression analysis among various comprehensive indexes of conditioner

3 讨论

在盆栽试验中,本研究施用的改良剂均可有效提高土壤pH、降低土壤交换性酸、交换性铝和交换性氢含量(图1),这与前人的研究结果一致^[6,14]。其中添加L和M对土壤pH的提升和酸缓冲容量的增加显著高于B+M+V和BMV处理(图1),这是因为碳酸盐在土壤酸化缓冲中作用较强,极少的碳酸盐就可在短时间内改善土壤酸度,使土壤pH达到较高水平^[8,24]。但需要注意的是,石灰和牡蛎壳粉中的CaO、CaCO₃在短时间内会快速消耗,土壤胶体中的潜性酸持续释放,而改良剂中的碱性物质逐渐枯竭,在停止施用石灰和牡蛎壳粉后土壤容易复酸^[25]。本研究B+M+V和BMV中虽然含有等量的高碱度物质成分(各处理施入的高碱度物质含量均为1%),但在盆栽施用中降酸效果不如单独施用牡蛎壳粉、石灰等改良剂(图4)。这可能是因为,在蚯蚓过腹和物料简单混合过程中,CaO等和原料中的酸性物质快速反应消耗(如堆肥中的有机酸和腐植酸)^[8],进而在短期盆栽试验中表现为稍弱的降酸效果。但从长期抑酸的目标考虑,B+M+V和BMV可能表现更好,因为有机物料难降解的特性有助于延长其产生的有机阴离子脱羧基化和碱性物质释放过程^[1,4],例如骨炭中的碱性物质释放会随着土壤pH的降低而不断增加^[25],可以有效抑制土壤复酸。

在蚯蚓粪中简单混合或在蚯蚓堆肥前的物料中混合牡蛎壳粉和生物炭相比纯蚯蚓粪均可以显著提

升pH、碱度及碳酸钙当量(表1),有利于增强蚯蚓粪改良剂对酸性土壤的降酸能力。这一方面可归结于添加的牡蛎壳粉和生物炭均是高pH的碱性物质,另一方面也可能和生物炭对蚯蚓堆肥过程的影响有关。在蚯蚓堆肥过程中,有机物腐殖化过程产生的腐殖酸是导致pH下降的主要原因^[26],而适量生物炭的添加可有效抑制堆肥产物pH值的降低^[27]。B+M+V改良剂的pH值低于BMV(表1)可能是因为B+M+V在蚯蚓堆肥后添加生物炭,剔除了生物炭对蚯蚓堆肥过程的调控作用。BMV处理对土壤pH的提升效果显著优于B+M+V处理(图1),这可能与BMV本身较高的pH值有关。但土壤交换性酸含量和pHBC在BMV和B+M+V处理之间并无显著差异(图1),说明2种蚯蚓粪改良剂在实际盆栽应用中的土壤降酸能力并无明显区别,这在降酸能力的综合评价中得到了证实(图4)。

土壤肥力是评价土地肥沃程度的重要指标,改良剂的施用普遍能增强土壤肥力,但其对具体土壤养分含量指标的影响与改良剂本身的性质有关。例如当改良剂中含有高碳的生物炭、蚯蚓粪时(B、V、B+M、B+M+V、BMV),施用后土壤的有机质含量较高;改良剂中含有高养分的蚯蚓粪时(V、B+M+V、BMV),土壤的速效养分含量较高(图2)。改良剂中含有牡蛎壳粉(M、B+M、BMV)的处理土壤碱解氮含量显著低于其他处理(图2),可能是因为牡蛎壳粉能够提高土壤N转化相关的酶活性^[28],加速土壤中的氮以NO_x、NH₃等形式损失^[29]。CEC能够表征

土壤养分供应能力和肥力水平,其大小取决于土壤胶体的比表面积和表面负电荷密度^[30]。蚯蚓粪含有丰富的腐殖质,其具有较大的比表面积,可水解产生大量的负电荷官能团,聚集在腐殖质表面,因而施用含有蚯蚓粪的改良剂时(V、BMV、B+M+V)可显著提高土壤的CEC。综合来看,所有使用的改良剂中以V、B+M+V和BMV的培肥效果最好(图4)。与B+M+V相比,施用BMV时土壤中有效磷含量更高(图2),可能是由于土壤pH提升增强了土壤中磷的有效性^[15],如增加土壤中无机磷的溶解、吸附态磷的解吸以及磷与其他土壤组分的反应等^[31]。但从综合培肥效果上看,B+M+V与BMV之间无显著差异。

酸性土壤改良的最终目的是提高农业生产能力。但本研究结果显示施加L和M显著抑制了上海青的生长,这可能是因为其对土壤pH的影响过于强烈(土壤pH由4.84提升至7.5以上),超出了植物的适宜生长范围^[32]。B+M+V、BMV虽含有等量的高碱度物质,但显然缓冲了对土壤pH的影响,加之其提供了上海青生长所需的养分,促进了上海青的生长发育。由此来看,在酸性土壤改良剂的研发中不能仅考虑其降酸能力的大小,还应当考虑其降酸的作用方式及培肥效果。这一观点也在降酸能力和上海青生长状况综合得分的回归曲线分析中得到证实(图5),即降酸能力得分大于0.97时,降酸能力越强,上海青生长状况越差,而培肥效果越好,上海青生长状况越好。

综上所述,本研究制备的蚯蚓粪酸性土壤改良剂虽然在降酸能力上不如生石灰、牡蛎壳粉等传统改良剂,但能够缓冲传统改良剂对土壤pH的冲击,改善土壤养分,并在作物生长中表现出显著的促进作用。蚯蚓过腹与简单物理混合2种方式制备的蚯蚓粪改良剂在综合效果上并无显著区别,从改良剂制备的便捷程度考虑,更加推荐通过简单物理混合蚯蚓粪、牡蛎壳粉和生物炭的方式进行生产。本研究从蚯蚓堆肥与蚯蚓粪入手,为酸性土壤改良剂的制备提供了新的思路 and 方向,但鉴于本研究采用盆栽开展,蚯蚓粪改良剂在大田中的长期施用效果需要进一步验证。

参考文献 References

[1] 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 con-

trolling 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).

[2] HE H, LI Y, HE L F. Aluminum toxicity and tolerance in Solanaceae plants[J]. South African journal of botany, 2019, 123: 23-29.

[3] 邵礼阳,林威鹏,张凤姬,等.生物炭对酸性土壤改良的研究进展[J].广东农业科学,2021,48(1):35-44. GAO L Y, LIN W P, ZHANG F J, et al. Research progress of biochar in improving soil acidification[J]. Guangdong agricultural sciences, 2021, 48(1): 35-44 (in Chinese with English abstract).

[4] 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).

[5] LIU M, TAN X, ZHENG M X, et al. Modified biochar/humic substance/fertiliser compound soil conditioner for highly efficient improvement of soil fertility and heavy metals remediation in acidic soils[J/OL]. Journal of environmental management, 2023, 325: 116614 [2024-11-21]. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.116614>.

[6] 矫威.不同改良剂对作物生长发育及酸性土壤理化性状的影响[D].武汉:华中农业大学,2014. JIAO W. Effects of different admendments on crop growth and physical and chemical properties of acidic soil [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2014 (in Chinese with English abstract).

[7] 索琳娜,马杰,刘宝存,等.土壤调理剂应用现状及施用风险研究[J].农业环境科学学报,2021,40(6):1141-1149. SUO L N, MA J, LIU B C, et al. Soil conditioner application status and application of risk research [J]. Journal of agro-environment science, 2021, 40(6): 1141-1149 (in Chinese with English abstract).

[8] 刘莉.四川盆地典型紫色土的酸度特征和酸缓冲性能[D].重庆:西南大学,2022. LIU L. Acidity characteristics and acid buffering performance of typical purple soil in Sichuan Basin [D]. Chongqing: Southwest University, 2022 (in Chinese with English abstract).

[9] 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).

[10] DAI Z M, ZHANG X J, TANG C, et al. Potential role of biochars in decreasing soil acidification: a critical review [J]. Science of the total environment, 2017, 581/582: 601-611.

[11] 黄连喜,魏岚,李衍亮,等.花生壳生物炭对土壤改良、蔬菜增产及其持续效应研究[J].中国土壤与肥料,2018(1):101-107. HUANG L X, WEI L, LI Y L, et al. Study on soil quality

- improvement, vegetable yield increasing of peanut shell biochar and its residual effect[J]. Soil and fertilizer sciences in China, 2018(1):101-107 (in Chinese with English abstract).
- [12] 黄赛花, 刘通, 黄友良, 等. 蚯蚓粪复配硼钼调理剂对土壤改良和茄子生长的影响作用[J]. 生态环境学报, 2021, 30(3): 523-531. HUANG S H, LIU T, HUANG Y L, et al. Effects of molybdenum-and boron-enriched earthworm cast as a soil conditioner on soil improvement and eggplant growth[J]. Ecology and environmental sciences, 2021, 30(3): 523-531 (in Chinese with English abstract).
- [13] GOSWAMI L, NATH A, SUTRADHAR S, et al. Application of drum compost and vermicompost to improve soil health, growth, and yield parameters for tomato and cabbage plants[J]. Journal of environmental management, 2017, 200: 243-252.
- [14] 于天一, 孙秀山, 石程仁, 等. 土壤酸化危害及防治技术研究进展[J]. 生态学杂志, 2014, 33(11): 3137-3143. YU T Y, SUN X S, SHI C R, et al. Advances in soil acidification hazards and control techniques[J]. Chinese journal of ecology, 2014, 33(11): 3137-3143 (in Chinese with English abstract).
- [15] 明润廷, 万方, 那立苹, 等. 改良剂施用下的土壤降酸培肥效果: 基于中国酸性土壤改良研究的Meta分析[J]. 土壤学报, 2025, 62(2): 400-410. MING R T, WAN F, NA L P, et al. Effect of soil acid reduction and fertilizer cultivation under conditioner application: Meta-analysis based on acid soil improvement studies in China [J]. Acta pedologica sinica, 2024, 62(2): 400-410 (in Chinese with English abstract).
- [16] GUO L Y, WU G L, LI C H, et al. Vermicomposting with maize increases agricultural benefits by 304% [J]. Agronomy for sustainable development, 2015, 35(3): 1149-1155.
- [17] PATHMA J, SAKTHIVEL N. Microbial diversity of vermicompost bacteria that exhibit useful agricultural traits and waste management potential[J/OL]. SpringerPlus, 2012, 1: 26 [2024-11-21]. <https://doi.org/10.1186/2193-1801-1-26>.
- [18] 王敬, 孟珂, 陈璇, 等. 酸雨对生菜和上海青的产量、品质及生理特性的影响[J]. 生态环境学报, 2023, 32(6): 1098-1107. WANG J, MENG K, CHEN X, et al. Effects of acid rain on yield, quality and physiological characteristics of lettuce and *Brassica chinensis* L. [J]. Ecology and environmental sciences, 2023, 32(6): 1098-1107 (in Chinese with English abstract).
- [19] 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).
- [20] 王虹, 崔桂霞. 用氯化钡缓冲液法测定土壤阳离子交换量[J]. 土壤, 1989, 21(1): 49-51. WANG H, CUI G X. Determination of cation exchange capacity of soil by barium chloride buffer solution[J]. Soils, 1989, 21(1): 49-51 (in Chinese).
- [21] 胡天睿, 蔡泽江, 王伯仁, 等. 长期不同施肥下红壤酸碱缓冲性能变化[J]. 中国土壤与肥料, 2022(6): 48-54. HU T R, CAI Z J, WANG B R, et al. Changes in acid-base buffering characteristics of red soil under long-term different fertilizations[J]. Soil and fertilizer sciences in China, 2022(6): 48-54 (in Chinese with English abstract).
- [22] 陈雷, 张枫叶, 贺群岭, 等. 基于隶属函数法和主成分分析评价花生品种花针期抗旱性[J]. 江苏农业科学, 2024, 52(14): 87-94. CHEN L, ZHANG F Y, HE Q L, et al. Evaluation of drought resistance of peanut cultivars at pod-pin stage based on membership function method and principal components analysis[J]. Jiangsu agricultural sciences, 2024, 52(14): 87-94 (in Chinese with English abstract).
- [23] 郑志杰. 五种改良剂对鄂南地区酸性土壤改土培肥及温室气体减排效果[D]. 武汉: 华中农业大学, 2023. ZHENG Z J. Effects of five types of amendments on improving soil fertility and reducing greenhouse gas emission in acidic soil in southern Hubei Province [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2023 (in Chinese with English abstract).
- [24] 韩春爽, 武俊男, 秦治家, 等. 吉林西部不同种植年限水稻土壤缓冲性能研究[J]. 东北农业科学, 2016, 41(2): 56-61. HAN C S, WU J N, QIN Z J, et al. Studies on acid buffering ability of saline-alkali paddy soil of different cultivation years in western Jilin Province [J]. Journal of northeast agricultural sciences, 2016, 41(2): 56-61 (in Chinese with English abstract).
- [25] 赵文瑞, 孔群芳, 张文娟, 等. 骨粉生物炭对酸性土壤的改良作用[J]. 土壤学报, 2024, 61(5): 1299-1309. ZHAO W R, KONG Q F, ZHANG W J, et al. Alleviating effects of bone meal biochars on acidic soil [J]. Acta pedologica sinica, 2024, 61(5): 1299-1309 (in Chinese with English abstract).
- [26] HANC A, CHADIMOVA Z. Nutrient recovery from apple pomace waste by vermicomposting technology[J]. Bioresource technology, 2014, 168: 240-244.
- [27] WU Y P, LI Q F, ZHENG Y, et al. Optimizing biochar addition for vermicomposting: a comprehensive evaluation of earthworms' activity, N₂O emissions and compost quality [J/OL]. Biochar, 2023, 5(1): 4 [2024-11-21]. <https://doi.org/10.1007/s42773-022-00203-9>.
- [28] WU B, LI J, SHENG M P, et al. The application of biochar and oyster shell reduced cadmium uptake by crops and modified soil fertility and enzyme activities in contaminated soil[J]. Soil, 2022, 8(1): 409-419.
- [29] 杨晓菲. 牡蛎壳粉对砖红壤活性氮损失特征的影响[D]. 湛江: 广东海洋大学, 2023. YANG X F. Effect of oyster shell powder on the characteristics of activated nitrogen loss in latosol [D]. Zhanjiang: Guangdong Ocean University, 2023 (in Chinese with English abstract).
- [30] 马纪龙, 马琨, 谢铁娜, 等. 基于机器学习的农田土壤阳离子交换量空间分布预测[J/OL]. 环境科学, 2024: 1-20 [2024-11-20]. <https://doi.org/10.13227/j.hj.kx.202403189>. MA J L, MA K, XIE T N, et al. Prediction of spatial distribution of cation exchange capacity in farmland soil based on machine

- learning [J/OL]. Environmental science, 2024: 1-20 [2024-11-20]. <https://doi.org/10.13227/j.hjks.202403189> (in Chinese with English abstract).
- [31] 周昊文,王香琪,齐永波,等. 矿物质调理剂用量对酸性土壤养分状况和油菜生长的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2021(3): 243-249. ZHOU H W, WANG X Q, QI Y B, et al. Effects of amounts of mineral conditioner on the nutrient status in acid soil and the yield of oilseed rape[J]. Soil and fertilizer sciences in China, 2021(3): 243-249 (in Chinese with English abstract).
- [32] 金亚波, 韦建玉, 屈冉. 蚯蚓与微生物、土壤重金属及植物的关系[J]. 土壤通报, 2009, 40(2): 439-445. JIN Y B, WEI J Y, QU R. The relationship of earthworm and microorganisms, heavy metals in soil and plants[J]. Chinese journal of soil science, 2009, 40(2): 439-445 (in Chinese with English abstract).

Effects of vermicompost-based acid soil conditioners on acidity-alkalinity and fertility in acidic soil, and growth of Shanghaiqing

MING Runtong¹, NA Liping², WAN Fang¹, WU Haicheng¹, WANG Wei¹, WU Yupeng¹, TAN Wenfeng¹

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

2. Institute of Environmental Resources, Soil and Fertilizer, Zhejiang Academy of Agricultural Sciences, Hangzhou 310021, China

Abstract Two vermicompost-based acid soil conditioners including B+M+V and BMV were developed by incorporating high-alkalinity substances-oyster shell powder (M) and biochar (B) into vermicompost (V) through physical mixing and vermicomposting to enhance the improvement performance of vermicompost acid soil. A pot experiment was conducted to compare the effects of applying B+M+V, BMV, and other amendments including quicklime (L), oyster shell powder (M), biochar (B), and vermicompost (V). The results showed that the effect of reducing the acid in soil was most significant under the application of L and M, with pH in soil increased by 3.18 and 2.81 units, and soil acid-base buffering capacity (pH-BC) increased by 196.81% and 236.97%, respectively. The effect of reducing the acid in soil was the second under the application of B+M+V and BMV, with pH in soil increased by 1.35 and 1.49 units, and pH-BC increased by 124.97% and 104.07%, respectively. The effect of reducing the acid in soil was the weakest under the application of B and V. The application of V, B+M+V, and BMV effectively improved the fertility in soil. Among them, the application of B+M+V and BMV increased the content of organic matter in soil by 197.53% and 222.51%, respectively, while significantly increasing the content of available phosphorus and available potassium, and the value of cation exchange capacity (CEC) in soil. The plant height and biomass of Shanghaiqing under the application of B+M+V and BMV were significantly higher than those under the application of L, M, and B. The accumulated absorption of nitrogen, phosphorus, and potassium by Shanghaiqing were significantly increased under the application of B+M+V and BMV. The results of principal component analysis showed that L and M excelled at reducing the acid in soil, V, B+M+V, and BMV were good at improving the fertility in soil, while B+M+V and BMV were effective in promoting the growth of plant. B+M+V and BMV performed the best in the comprehensive improvement of acid soil. It is indicated that the two types of vermicompost-based acid soil conditioners developed effectively combine the advantages of pure vermicompost for improving the fertility in soil and high alkalinity substances for strongly reducing the acid in soil, and can play an excellent comprehensive role in improving acid soils.

Keywords acid soil; improvement of soil; conditioner; vermicompost; comprehensive evaluation

(责任编辑:葛晓霞)