范贝贝,黄尚书,黎鑫林,等.硅酸盐矿物基土壤改良剂降低土壤酸度及促进菠菜生长的效果[J].山西农业大学学报(自然科学版),2025,45(1):93-102.
Fan B B, Huang S S, Li X L, et al.Research on the effect of silicates mineral based soil amendments on reducing soil acidity and promoting the growth of spinach[J].Journal of Shanxi Agricultural University(Natural Science Edition), 2025,45(1):93-102.
doi: 10.13842/j.cnki.issn1671-8151.202407063

硅酸盐矿物基土壤改良剂降低土壤酸度及促进菠菜生长的效果

范贝贝[1,2],黄尚书[3*],黎鑫林[4],周林[2],王成孜[4],伍亮[4]

(1.中国科学院 南京土壤研究所,江苏 南京 211135;2.中国农业大学 资源与环境学院,北京 100193;
3.江西省红壤及种质资源研究所,江西 南昌 331717;4.江西省吉安市井冈山农业科技园管理委员会,江西 吉安 343036)

摘　要:[目的]土壤酸化是限制农业绿色高质量发展的重要因素之一,研发高效土壤改良剂有助于提高酸性农田生产力,保障粮食安全。[方法]本研究采用盆栽试验,评估来源广泛的硅酸盐矿物基土壤改良剂在降低土壤酸度和缓解铝毒害的效果,明确其对菠菜生长的影响。[结果]与对照相比,硅酸盐矿物+牡蛎壳(T2)、硅酸盐矿物+硅钙钾镁肥(T3)、硅酸盐矿物+羟基磷灰石(T4)和硅酸盐矿物+生物炭(T5)处理均能提高土壤pH(0.21~1.46个单位),降低土壤交换性酸(24.3%~85.2%)、交换性氢(11.0%~65.9%)和交换性Al^{3+}(30.9%~94.7%);其中,T2处理在提高土壤pH(1.46个单位)和降低土壤交换性Al^{3+}(94.7%)方面效果最佳。同时,T2、T3、T4和T5处理也降低了土壤交换性Al^{3+}在土壤交换性酸中的占比(9.0%~64.8%)。此外,T2、T3、T4和T5处理均能促进菠菜生长,提高植株钙镁累积量,并降低植株铝浓度。与对照相比,菠菜地上部鲜重和干重分别增加0.60~17.90倍和0.16~5.32倍;植株钙镁累积量分别增加123.0%~1170.0%和75.0%~1684.0%,植株铝浓度降低10.2%~86.0%。Pearson和PCA分析结果表明,土壤交换性Al^{3+}含量($P<0.001$)、植株铝浓度($P<0.01$)和植株镁浓度($P<0.001$)是影响菠菜生物量的重要因素。[结论]综上,硅酸盐矿物复配牡蛎壳制备的硅酸盐矿物基土壤改良剂在土壤酸化阻控和促进作物生长方面具有较大的应用前景,可为硅酸盐矿物利用和土壤酸化改良提供技术支持。

关键词:硅酸盐矿物; 土壤酸化; 交换性Al^{3+}; 菠菜生物量; 钙镁吸收
中图分类号:S141.9　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1671-8151(2025)01-0093-10

Research on the effect of silicates mineral based soil amendments on reducing soil acidity and promoting the growth of spinach

Fan Beibei[1,2], Huang Shangshu[3*], Li Xinlin[4], Zhou Lin[2], Wang Chengzi[4], Wu Liang[4]

(*1.Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 211135, China; 2.College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193, China; 3.Jiangxi Institute of Red Soil and Germplasm Resources, Nanchang 331717, China; 4.Jinggangshan Agricultural Science and Technology Park Management Committee, Ji'an 343016, China*)

Abstract:[Objective]Soil acidification is one of the key factors limiting the green and high-quality development of agriculture. Developing effective soil amendments can enhance the productivity of acidic farmlands and ensure food security. [Methods]In this study, pot experiments were conducted to evaluate the effects of silicate mineral based soil amendments from diverse sources on reducing soil acidity and alleviating aluminum (Al) toxicity, and promoting the growth of spinach. [Results]The results

收稿日期:2024-07-24　　**修回日期**:2024-09-09
基金项目:中央高校基本科研业务费专项资金(2021TC117);江西省重点研发计划(20203BBF63038);井冈山农高区省级科技专项"揭榜挂帅"项(20222-051261)
作者简介:范贝贝(ORCID:0000-0002-1157-7863),硕士,助理工程师,研究方向:土壤酸化改良和新型土壤调理剂研发,E-mail:jiubeifan@issas.ac.cn
*通信作者:黄尚书(ORCID:0000-0003-1779-9712),博士,副研究员,研究方向:土壤结构和酸化改良,Email: hss1232005@163.com

demonstrated that, compared with CK, treatments including silicate mineral+oyster shell (T2), silicate mineral+silica-calcium-potassium-magnesium fertilizer (T3), silicate mineral+hydroxyapatite (T4) and silicate mineral+biochar (T5) increased soil pH by 0.21 to 1.46 units and reduced exchangeable acidity by 24.3% to 85.2%, exchangeable H^+ by 11.0% to 65.9%, and exchangeable Al^{3+} by 30.9% to 94.7%. Among these, T2 treatment demonstrated the best results, increasing soil pH by 1.46 units and reducing soil exchangeable Al^{3+} by 94.7%. Besides, T2, T3, T4, and T5 treatments reduced the proportion of exchangeable Al^{3+} in soil exchangeable acidity by 9.0% to 64.8%. These treatments also promoted spinach growth, enhanced the accumulation of Ca and Mg in plants, and reduced the concentration of Al in plants. In addition, fresh weight and dry weight of spinach increased by 0.60 to 17.90 times and 0.16 to 5.32 times, respectively. The treatments enhanced plant Ca accumulation by 123.0% to 1170.0% and Mg accumulation by 75.0% to 1684.0%, while reducing plant Al concentration by 10.2% to 86.0%. Pearson correlation and PCA analysis showed that soil exchangeable Al^{3+} content ($P<0.001$), plant Al concentration ($P<0.01$) and plant Mg concentration ($P<0.001$) were the core factors affecting spinach biomass. [Conclusion]Silicate mineral based soil amendments, particularly those combining silicate minerals with oyster shells, showed great potential for preventing soil acidification and promoting crop growth. These findings provided technical support for the utilization of silicate minerals and the improvement of soil acidification.

Keywords: Silicate mineral, Soil acidification, Exchangeable Al^{3+}, Spinach biomass, Calcium and magnesium uptake

土壤酸化是土壤退化的重要表现之一,已成为全球农业可持续发展的重要限制因子[1]。全球约30%的土地面积为酸性土壤(pH≤5.5),全球约50%的可耕地土壤为酸性[2]。在自然条件下,土壤酸化过程十分缓慢,红壤pH降低约1个单位需要229万年[3]。近年来,因大气酸沉降、铵态氮肥大量施用、作物收获移除、有机碳矿化、豆科植物连作等因素影响,土壤酸化速度加剧[4-6]。我国土壤pH<6.5的酸性土壤约3.11×10^6 km^2,约占陆域国土面积的32.4%;与第二次全国土壤普查相比,我国酸性土壤总面积增加6.45×10^5 km^2[4]。如山东省级耕地地力评价结果表明,30年来(1984-2015),中强酸性(pH≤4.5)、酸性(5.0<pH≤5.5)和弱酸性(5.5<pH≤6.5)耕地面积比例分别增加0.98%、6.06%和9.36%。鲁东地区(青岛、烟台和威海)地区土壤pH降低1.0~1.3个单位,土壤酸化严重。土壤酸化会导致pH降低,诱导铝和锰的释放会造成植物根系损伤,抑制植物根系的细胞分裂、伸长和扩张,并破坏其细胞骨架、叶绿体和线粒体膜结构,从而导致作物减产甚至绝收[2,7-8]。酸性土壤元素Ca^{2+}、Mg^{2+}、K^+、Na^+、P等的缺乏,导致土壤肥力下降,限制了植物和土壤生物群的生长[9-10]。此外,有毒重金属的有效性随着土壤pH值的降低而增加,土壤酸化也增加了作物重金属积累的潜在风险[10-11]。因此,开发有效的土壤改良剂来减少土壤酸化或改善土壤酸度对于农业可持续发展和粮食生产至关重要。

目前,石灰、牡蛎壳、石膏、钢渣、生物炭、羟基磷灰石、硅酸盐矿物等土壤改良剂被用来阻控土壤酸化并缓解土壤铝毒害[6,12-13]。作为土壤的主要成分,硅酸盐矿物被公认为环境友好、储量丰富、易于开采且成本较低的绿色材料[10,14]。近年来,硅酸盐矿物作为酸性土壤改良剂引起研究人员的广泛关注。硅酸盐矿物施用到酸性土壤中,能溶解释放碱基离子和水溶性硅酸盐,与H^+和Al^{3+}发生置换反应,进而缓解土壤酸化[12,14-15]。此外,硅酸盐矿物也能提高土壤有效硅含量,增强植物对金属(Al、Mn、Cd等)的耐受性,提高植物必需营养素的吸收和积累,进而促进植物生长[16-17]。但大多数天然结晶硅酸盐矿物对酸化土壤的改良效果并不明显,导致其施用量大,进而增加了酸化土壤改良的成本[14,18]。如施用0.4%麦饭石仅使土壤pH增加0.33个单位,毒性铝降低7.08%[19];而添加20%硅灰石可使土壤pH提高3.42个单位,土壤交换性Al^{3+}降低54.5%[14]。相关研究表明,采用多种材料制备的复合型酸性土壤改良剂能高效缓解土壤酸化,降低土壤铝毒害,并促进植物生长,提高作物的产量。如使用1%硅酸盐基土壤改良剂可使土壤pH增加2.15个单位,土壤交换性酸和交换性Al^{3+}分别降低93.8%和100%,进而使菠菜鲜重增加15.9倍[15]。张传峰[20]发现施用2%硅灰石-硅酸钠-生物炭复合材料可使土壤pH增加1.4个单位,并提高酸害容量17.5 μmol/g,进而增强土壤酸缓冲能力。

本研究针对耕地土壤酸化日益加剧,选取胶东半岛招远市典型酸化农田土壤为研究对象,采

用盆栽试验评估硅酸盐矿物分别与牡蛎壳粉、硅钙钾镁肥、羟基磷灰石和生物炭复配制备的硅酸盐矿物基土壤改良剂阻酸降铝的效果和潜力,明确其对菠菜生长及其钙镁硅元素累积的影响,筛选有效的硅酸盐矿物基土壤改良剂,为应用硅酸盐矿物改良酸化农田提供理论依据和技术方法。

1　材料与方法

1.1　试验土壤与材料

本试验土壤采自山东省招远市山上李家村附近农田土壤。采用随机布点法采集0～20 cm的表层土壤,多点混合得到土壤样品。样品转移至实验室后,自然风干、去除杂物,粗磨后过20目筛的样品全部置于无色聚乙烯薄膜上,充分搅拌、混合直至均匀备用。供试土壤黏粒、粉粒和砂粒占比分别为0.50%、76.00%和23.50%;田间持水量为20.4%。土壤pH为4.31、电导率(EC)为0.250 mS/cm、交换性总酸为4.10 cmol/kg、交换性Al^{3+}为2.80 cmol/kg、有机质为16.2 g/kg、速效磷为64.1 mg/kg、速效钾为141 mg/kg、碱解氮为145 mg/kg。

本研究采用的硅酸盐矿物购买自莱州市永兴石粉厂,其pH为7.52,SiO_2、CaO、MgO、Al_2O_3、Fe_2O_3和Na_2O质量分数分别为67.60%、2.91%、0.81%、18.20%、1.89%和2.05%。牡蛎壳购买自山东地宝土壤修复科技有限公司,其pH为8.90,SiO_2、CaO、MgO、Al_2O_3、Fe_2O_3和Na_2O质量分数分别为0.86%、96.60%、0.25%、0.21%、0.25%和0.67%。硅钙钾镁肥购买自贵州金正大生态工程有限公司,其pH为10.7,SiO_2、CaO、MgO、Al_2O_3、Fe_2O_3和Na_2O质量分数分别为23.20%、44.70%、3.06%、7.22%、5.89%和0.27%。羟基磷灰石($Ca_{10}(PO_4)_6(OH)_2$,分析纯)购买自上海华蓝化学科技有限公司。生物炭原料为小麦秸秆,在500 ℃缺氧条件下热解3 h制备,其pH为10.30,碳(C)、氮(N)和氢(H)质量分数分别为11.50%、0.24%和1.17%。

供试植物为菠菜(*Spinacia oleracea* L.),种子购买自哈里姆种子(天津)有限公司,在中国大部分地区可春夏秋冬四季播种。

1.2　盆栽试验

将硅酸盐矿物、牡蛎壳粉、硅钙钾镁肥、羟基磷灰石和生物炭过100目筛,按照固定的重量比例将硅酸盐矿物与其它材料加入搅拌机中,混合均匀,制得粉末状硅酸盐矿物基土壤改良剂。本试验中,硅酸盐矿物与复配材料重量比为7∶3。盆栽试验共6个处理:(1)不添加任何材料的对照(CK);(2)10 g/kg硅酸盐矿物处理(T1);(3)7 g/kg硅酸盐矿物+3 g/kg牡蛎壳处理(T2);(4)7 g/kg硅酸盐矿物+3 g/kg硅钙钾镁肥处理(T3);(5)7 g/kg硅酸盐矿物+3 g/kg羟基磷灰石处理(T4);(6)7 g/kg硅酸盐矿物+3 g/kg生物炭处理(T5)。每个处理设置3个重复,随机摆放在中国农业大学招远研究生培养基地的玻璃温室中。

将风干过筛的土壤样品(20目筛)与土壤调理剂充分混合,然后将1000 g混合样品装入上口径15 cm、下口径10 cm、高14 cm的塑料育苗盆中。菠菜移栽前,浇水平衡7 d。在2021年9月12日将长势相同且具有3片真叶菠菜苗移栽到育苗中,每盆移栽3株。菠菜生长期间,菠菜田间持水量的60%,于2021年10月10号收获菠菜植株,并采集土壤样品。

1.3　土壤与植物样品分析

植物样品分为地上部和地下部,在65 ℃烘干7 d至恒重。将植株地上部分和地下部分的干样充分混合、研磨,并通过0.15 mm的筛子备用。称取0.100 0 g植物样品,采用硝酸(8 mL)消解,消解液中的镉、钙、镁、铝和硅浓度采用电感耦合等离子体发射光谱法(ICP-OES,Avio 200,PerkinElmer,美国)测定。每个试验处理取3个平行样品进行指标分析,数据以3次重复的平均值±标准差表示。

土壤pH采用酸度计测定(上海雷磁pH500型),EC值采用EC计测定(上海雷磁DDSJ-308A型)。土壤有机质采用重铬酸钾容量法-外加热法测定,速效磷采用0.5 mol/L碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法测定,速效钾采用1 mol/L乙酸铵浸提-火焰光度法测定,碱解氮采用采用碱解扩散法测定。土壤交换性酸和交换性氢采用1 mol/L KCl提取,0.02 mol/L NaOH溶液滴定测定。

供试试验材料的pH采用固液比1∶5测定,氧化物组成(总成分)采用X射线荧光光谱分析。采用元素分析仪(Vario MAC-RO Cube,德国)测定原始生物炭的碳(C)、氮(N)和氢(H)元素含量。

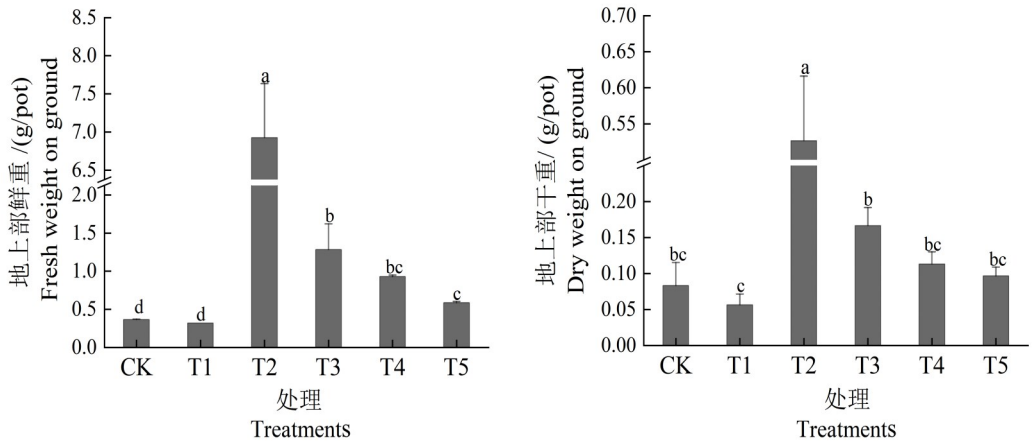
1.4 数据处理

采用Excel 2020和Origin 2024b进行数据分析和作图,利用SPSS 24.0进行单因素方差分析,用Duncan法进行多重比较,$P<0.05$为差异显著。采用Pearson相关分析法和PCA评价菠菜生物量与核心因子之间的相关关系。

2 结果与分析

2.1 施用土壤改良剂后菠菜生物量

硅酸盐矿物基土壤改良剂施用对菠菜生物量的影响如图1所示。与对照相比,除硅酸盐矿物(T1)处理外,其余处理均提高了菠菜的生物量。其中,硅酸盐矿物+牡蛎壳(T2)、硅酸盐矿物+硅钙钾镁肥(T3)、硅酸盐矿物+羟基磷灰石(T4)和硅酸盐矿物+生物炭(T5)处理使菠菜地上部鲜重分别增加17.90倍、2.50倍、1.53倍和0.60倍,T2效果最佳。与CK相比,T2、T3、T4和T5地上部干重,分别增加5.32倍、1.00倍、0.36倍和0.16倍。



图中不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)

Different lowercase letters in the figure indicate significant differences between treatments ($P<0.05$)

图1 硅酸盐矿物基土壤改良剂施用后菠菜的生物量

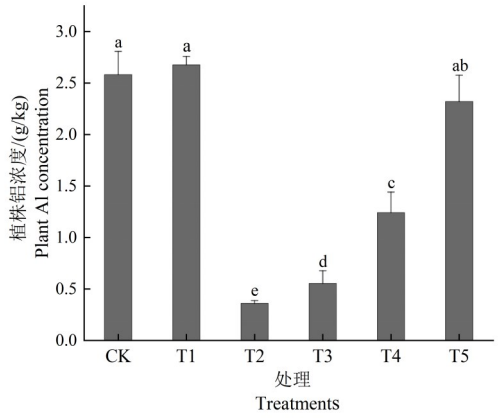
Fig.1 Biomass of spinach after applying silicate mineral based soil amendments

2.2 施用土壤改良剂后菠菜植株铝浓度

如图2所示,与对照相比,T2、T3、T4和T5处理均不同程度的降低菠菜根系对铝的吸收,效果优于T1处理。其中,T2、T3和T4处理显著减少菠菜植株铝浓度,分别降低了86.0%、78.5%和51.9%。T5处理使植株铝浓度降低10.2%,与对照之间不存在显著差异($P<0.05$)。

2.3 施用土壤改良剂后菠菜植株钙镁硅浓度

菠菜中含有大量的微量元素,是人体补充钙、镁、硅等元素的重要来源。土壤改良剂对菠菜植株钙、镁和硅元素吸收的影响如图3所示。与对照相比,T1、T2、T3、T4和T5处理使植株钙浓度和镁浓度分别提高9.0%~78.9%和4.1%~109.0%(图3A)。其中,T2、T3、T4和T5处理使植株钙浓度分别增加44.7%、62.1%、78.9%和42.8%;T2、T3和T4处理使植株镁浓度分别增加109.0%、69.1%和58.5%。对于植株硅浓度,T1



图中不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)

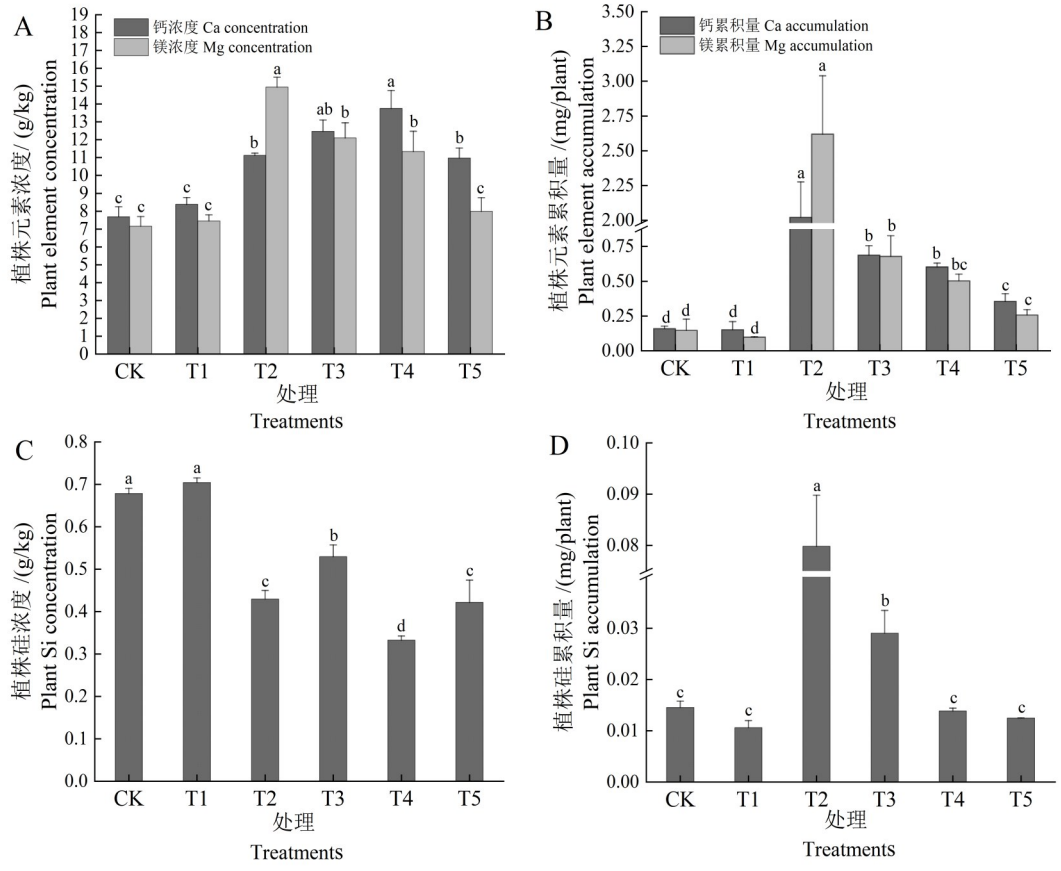
Different lowercase letters in the figure indicated significant differences between treatments ($P<0.05$)

图2 硅酸盐矿物基土壤改良剂对植株铝浓度的影响

Fig.2 Effects of silicate mineral-based soil amendments on aluminum concentration in plants

处理使植株硅浓度增加3.8%,但其它处理使植株硅浓度降低21.9%～51.0%。

与对照相比,T2、T3、T4和T5处理显著提高了植株的钙(123.0%～1170.0%)和镁(75.0%～1684.0%)累积量(图3B)。其中,T2处理使植株钙累积量和镁累积量分别增加1170.0%和1684.0%,显著高于其它处理($P<0.05$)。此外,T2和T3处理显著增加了植株硅累积量,增幅分别为449.0%和99.6%($P<0.05$)(图3D)。



图中不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)

Different lowercase letters in the figure indicated significant differences between treatments ($P<0.05$)

图3　硅酸盐矿物基土壤改良剂对植株吸收钙、镁和硅元素的影响

Fig.3　Effects of silicate mineral-based soil amendments on calcium, magnesium, and silicon uptake by spinach

2.4　施用土壤改良剂后土壤酸度特征

施用土壤改良剂可不同程度地提高土壤pH值,降低土壤酸度(表1)。与对照相比,T1、T2、T3、T4、T5处理使土壤pH分别增加0.03、1.46、0.72、0.33、0.21个单位,土壤交换性酸分别降低10.4%、85.2%、54.8%、48.5%、24.3%。其中T2和T3效果最好,显著高于其它处理($P<0.05$)。如图4所示,随着土壤pH的增加,T1、T2、T3、T4和T5处理均增加了土壤交换性H^+的占比(18.3%～131.0%),降低土壤交换性Al^{3+}的占比(9.0%～64.8%)。其中,T2处理使土壤交换性H^+占比增加131.0%,土壤交换性Al^{3+}占比降低64.8%。土壤改良剂施用土壤后,T1、T2、T3、T4和T5处理也使土壤交换性Al^{3+}含量分别降低19.5%、94.7%、63.7%、60.9%和30.9%,均与对照存在显著差异($P<0.05$)。同时,T2、T3、T4和T5处理也降低了土壤交换性H^+含量(11.0%～65.9%)。其中,T2和T3处理在降低提高土壤pH、降低土壤酸度和交换性Al^{3+}占比方面存在较大优势。

2.5　施用土壤改良剂后土壤理化性质

如表2所示,与对照相比,T3和T5处理使土

表1 硅酸盐矿物基土壤改良剂施用后土壤酸度的变化特征

Table 1 Changes of soil acidity after applying silicate mineral based soil amendments

处理 Treatments	土壤pH Soil pH	土壤交换性酸/(cmol/kg) Soil exchangeable acid	土壤交换性H^+/(cmol/kg) Soil exchangeable H^+	土壤交换性Al^{3+}/(cmol/kg) Soil exchangeable Al^{3+}
CK	4.48±0.11d	3.83±0.09a	1.27±0.25a	2.56±0.19a
T1	4.51±0.02d	3.43±0.17b	1.37±0.05a	2.06±0.12b
T2	5.94±0.07a	0.57±0.05f	0.43±0.03d	0.13±0.04e
T3	5.20±0.13b	1.73±0.12e	0.80±0.14c	0.93±0.17d
T4	4.81±0.08c	1.97±0.05d	0.97±0.05bc	1.00±0.08d
T5	4.69±0.09cd	2.90±0.08c	1.13±0.05ab	1.77±0.10c

注:同列不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。

Note: Different lowercase letters in the same column indicated significant differences between treatments ($P<0.05$).

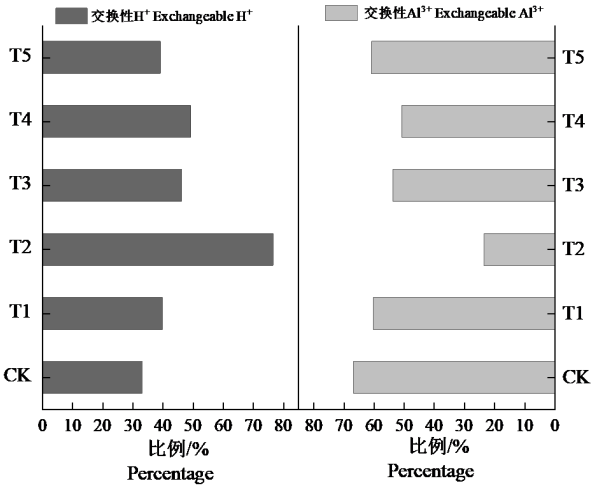


图4 硅酸盐矿物基土壤改良剂施用后交换性H^+和Al^{3+}的占比比例变化

Fig.4 Changes in the proportion of exchangeable H^+ and Al^{3+} after the application of silicate mineral-based soil amendments

壤EC值分别增加20.1%和7.24%。土壤改良剂施用对有机质含量影响不大,不同处理的土壤有机质含量集中分布在16.0~17.0 g/kg。此外,施用土壤调理剂均能提土壤速效磷含量,T1、T2、T3、T4和T5处理使速效磷含量分别增加28.3%、18.6%、2.4%、87.1%和2.9%。此外,T3和T5处理显著增加了土壤速效钾的含量,增幅分别为17.9%和42.3%。

2.6 不同土壤调理剂处理下植株生物量与植株元素累积能力和环境因子的相关性

Pearson相关性分析结果表明(图5A),菠菜干重(DW)与植株镁浓度($r=0.81$,$P<0.001$)和土壤pH($r=0.91$,$P<0.001$)呈极显著正相关,与植株铝浓度($r=-0.70$,$P<0.01$)、土壤交换性H^+($r=-0.81$,$P<0.001$)和交换性Al^{3+}($r=-0.79$,$P<0.001$)呈显著负相关。此外,土壤pH与交换性H^+($r=-0.88$,$P<0.001$)和交换性Al^{3+}($r=-0.88$,$P<0.001$)呈极显著负相关,这表明土壤pH增加有利于缓解铝毒害,促进菠菜生长。PCA分析结果如图所示(图5B),前2个主成分的累计贡献率构成总方差的85.1%,分别为75.4%

表2 硅酸盐矿物基土壤改良剂施用后土壤EC和速效养分含量的变化特征

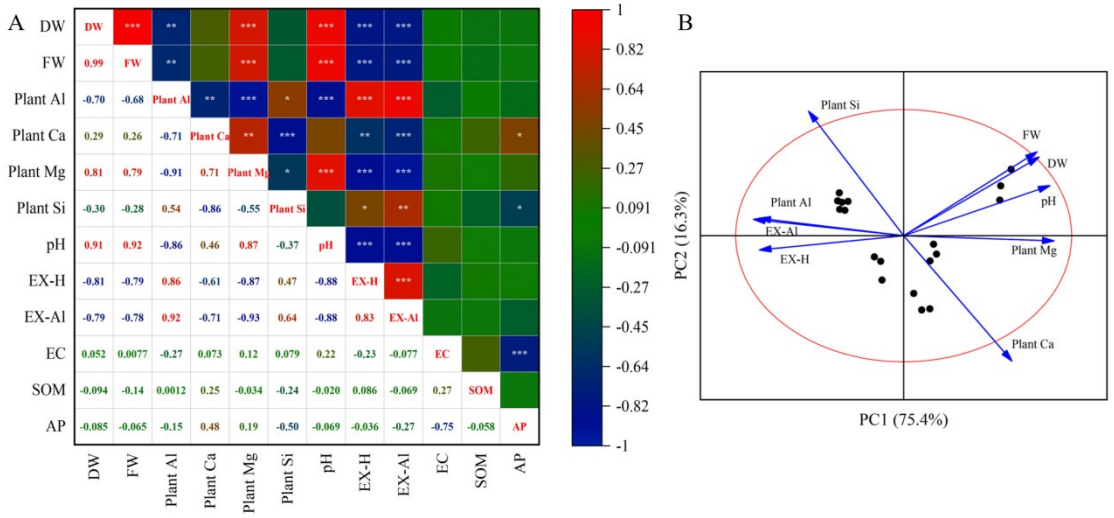
Table 2 Changes of EC and available nutrient content in soil after applying silicate mineral-based soil amendments

处理 Treatments	EC/(μs/cm)	有机质/(g/kg) Organic matter	速效磷/(mg/kg) Available phosphorus	速效钾/(mg/kg) Available potassium
CK	359±2.50c	16.7±1.25a	75.9±0.69d	229±7.27cd
T1	333±16.00d	16.8±0.26a	97.4±3.67b	239±8.64c
T2	357±4.50c	16.7±0.45a	90.0±5.07c	188±6.37e
T3	431±7.50a	17.4±0.28a	77.7±2.73d	270±3.53b
T4	308±12.80e	17.1±0.52a	142.0±3.21a	218±12.90d
T5	385±3.86b	17.5±0.54a	78.1±2.01d	326±5.07a

注:同列不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。

Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant differences between treatments ($P<0.05$).

(PC1)和16.3%(PC2)。菠菜生物量(DW和FW)与土壤pH和植株镁浓度呈正相关,与植株铝浓度、土壤交换性H^+和交换性Al^{3+}呈负相关,这与Pearson相关分析结果一致。



DW:植株干重;FW:植株鲜重;Plant Al:植株铝浓度;Plant Ca:植株钙浓度;Plant Mg:植株镁浓度;Plant Si:植株硅浓度;pH:酸碱度;EX-H:土壤交换性H^+;EX-Al:土壤交换性Al^{3+};SOM:土壤有机质;AP:土壤速效磷。*、**、***均表示显著相关,显著水平分别为0.05、0.01、0.001

DW: plant dry weight; FW: plant fresh weight; Plant Al: plant aluminum concentration ; Plant Ca: plant calcium concentration; Plant Mg: plant magnesium concentration; Plant Si: plant silicon concentration; pH: pH value; EX-H: soil exchangeable H^+; EX-Al: soil exchangeable Al^{3+}; SOM: soil organic matter; AP: soil available phosphorus. *, **, and *** indicated significant correlation at 0.05, 0.01, and 0.001 level, respectively

图5　植株生物量与核心监测指标之间的相关性分析(A)和PCA分析(B)

Fig.5　Correlation analysis (A) and PCA analysis (B) between plant biomass and core monitoring indicators

3　讨论

土壤酸化是限制作物生长和产量的关键土壤障碍因素之一。随着土壤pH的降低,土壤溶液中活性Al^{3+}含量增加,导致土壤铝毒害加剧,严重影响植物的生长[7, 13]。本研究发现,施用土壤改良剂均能提高土壤pH,降低土壤交换性酸,该结果与前人的研究结果一致[21]。硅酸盐矿物施用到土壤会与土壤酸性介质发生反应,水解释放的羟基和构溶性硅酸盐可中和土壤H^+,降低土壤交换性酸,提高土壤pH[12, 14, 22]。姜雯琪等[14]发现施用50 g/kg的硅酸盐矿物硅灰石能显著提高江西红壤pH(3.15个单位),使土壤交换性Al^{3+}含量降低46.4%。此外,增施10 g/kg硅酸盐基矿物调理剂也能使土壤pH增加2.07~2.15个单位,土壤交换性酸和交换性Al^{3+}分别降低91.3%~93.8%和96.1%~100%,有效阻控土壤酸化[15]。对于酸化严重土壤,土壤酸度主要由土壤交换性Al^{3+}贡献[21]。土壤改良剂添加显著减少了交换性Al^{3+}含量,并调节土壤交换性酸的组成,降低土壤交换性Al^{3+}在土壤交换性酸的比例,有效缓解土壤铝毒害。在酸性土壤中,土壤pH是控制土壤交换性Al^{3+}含量的关键因素(图5A)。随着土壤改良剂施用导致的pH增加,增强土壤溶液中活性铝转化生成毒性低的氢氧化铝或者有机结合态铝,进而降低土壤交换性Al^{3+}含量[11, 15, 22]。此外,硅酸盐矿物释放可溶性硅酸盐能与土壤中Al^{3+}反应生成稳定的羟基硅酸盐沉淀,进一步降低土壤铝毒害[14]。此外,施用5种土壤改良剂均能提高土壤速效磷含量,促进磷与Al^{3+}形成磷酸铝沉淀,缓解土壤铝毒害[11, 23](图5A)。以上结果表明施用硅酸盐矿物基土壤改良剂能降低土壤活性酸(pH)和潜性酸(交换性酸)的含量,有效改善土壤酸化。

与单一硅酸盐材料(T1)相比,硅酸盐矿物基土壤改良剂在提高土壤pH和降低土壤酸度方面更具备优势。对于T2和T3处理,土壤pH增加0.72~1.46个单位,土壤交换性酸降低54.5%~85.2%,土壤交换性Al^{3+}减少63.7%~94.7%。牡蛎壳含有大量的CaO,快速水解释放的OH^-能

有效中和土壤H^+,同时产生的Ca^{2+}能与土壤胶体中H^+和Al^{3+}发生交换反应,进而提高土壤pH[24-25]。对于酸化严重的棕壤,施用10 g/kg的牡蛎壳粉可使土壤pH从4.57提高到7.06,土壤交换性酸和Al^{3+}降低100%[11]。硅钙钾镁肥含有富含Si、Ca、Mg和K的强碱性改良剂,能水解生成大量盐基离子,与土壤交换性酸进行交换反应,增加土壤交换性盐基总量,降低土壤酸度[26-27]。酸化稻田增施硅钙钾镁肥能显著增加土壤pH和盐基饱和度,降低土壤交换性Al^{3+}[27]。其中,硅钙钾镁肥溶解释放的交换性盐基离子Ca^{2+}和Mg^{2+}是土壤酸度降低的关键因子。因此,施用硅酸盐矿物基土壤改良剂能改善土壤酸化,缓解铝毒害;硅酸盐矿物+牡蛎壳粉(T2)和硅酸盐矿物+硅钙钾镁肥(T3)联合施用具有更好的改良效果。

在酸性土壤中,当pH<5.0时,土壤铝毒性可能是植物生长最有害的限制因素。土壤溶液中Al^{3+}浓度达到5 μmol/L时,能强烈抑制植物根系生长,并干扰营养物质的吸收、运输和利用,抑制酶活性和激素平衡,导致农作物减产甚至绝产[13,28]。施用硅钙基调理剂能提高土壤pH,降低土壤酸度和交换性Al^{3+}含量,并显著促进菠菜的生长[15]。本研究发现,施用4种硅酸盐矿物基土壤改良剂均能促进菠菜生长,提高菠菜地上部鲜重和干重。与对照相比,单施10 g/kg硅酸盐矿物使菠菜的地上部鲜重和干重分别降低12.7%和31.9%。相关性和PCA分析结果表明(图5),植株生物量与植株铝浓度和土壤交换性Al^{3+}呈显著($P<0.01$)或极显著($P<0.001$)负相关关系。与硅酸盐矿物基土壤改良剂相比,单施硅酸盐矿物在降低土壤酸度和交换性Al^{3+}方面效果不明显,菠菜生长仍遭受严重的铝毒害。此外,单施硅酸盐矿物促进了菠菜根系对铝的吸收累积,可能会抑制菠菜的生长。在酸性土壤中施用10 g/kg赤泥(Al_2O_3:21.9%)可使土壤活性铝含量增加和菠菜植株铝浓度分别增加89.6%和32.9%,植株生长受到抑制[11]。王宇函等[29]发现,外源铝添加可使小白菜植株铝含量128.6%,鲜重和干重分别降低了83.3%和80.0%。硅酸盐矿物基土壤改良剂能显著提高土壤pH,促进土壤溶液中的Al^{3+}以毒性小的形态($Al(OH)_3^0$、$Al(OH)_2^+$、$Al(OH)^{2+}$、Al-HA等)的形式存在,降低土壤交换性Al^{3+}含量,抑制植物根系对铝的吸收,减轻菠菜生长的铝毒害[11,28]。施用4种硅酸盐矿物基土壤改良剂也促进了根系对钙镁元素的吸收,显著增加植株钙镁元素浓度和累积量。研究表明,外源钙、镁等盐基离子的添加能减轻铝胁迫下Al^{3+}对植株根系生长的毒害作用[30-32]。外源补充的Ca^{2+}和Mg^{2+}可与Al^{3+}在细胞膜竞争吸附位点,降低根细胞质膜表面的Al^{3+}活性,进而缓解Al^{3+}对根系的毒害作用[13,33-34]。王爱勤等[35]发现,提高营养液中钙浓度能显著降低小麦根系对铝的吸收和累积,并提高小麦根、叶鞘和叶片各器官中钙含量。其中,Ca^{2+}与Al^{3+}在细胞膜表面吸附位点竞争作用增强,降低根系对Al^{3+}的吸收,进而缓解铝累积对植物根系细胞分裂和伸长的抑制作用。此外Ca^{2+}和Mg^{2+}也能通过恢复根膜完整性、降低活性氧诱导的氧化损伤以及调节抗氧化酶活性水平来缓解植物幼苗的铝毒性[31-32]。外源施镁可以降低玉米根系对铝的吸收,并调节抗氧化保护酶活性,有效降低Al^{3+}诱导的植物根系氧化应激反应,进而促进玉米根系生长[31]。Silva等[36]也发现,施Mg^{2+}能促进植物根系柠檬酸的分泌,进而缓解铝对大豆根系的毒害作用,且效果显著优于Ca^{2+}。相关性分析也表明,菠菜生物量与植株镁浓度呈极显著正相关($P<0.001$),与植株钙浓度呈正相关。可见,硅酸盐矿物基土壤改良剂施用后提高菠菜对钙镁元素的吸收和累积能减轻铝对植物生长的毒害。

4 结论

本研究将硅酸盐矿物分别与牡蛎壳、硅钙钾镁肥、羟基磷灰石和生物炭复配制备硅酸盐矿物基土壤改良剂。施用以上硅酸盐矿物基土壤改良剂均能降低土壤酸度、减轻铝对菠菜生长的毒害作用,促进菠菜的生长。同时,硅酸盐矿物基土壤改良剂也能降低植株铝浓度,促进植株对钙镁元素的累积,提高菠菜的品质。菠菜生物量与植株镁浓度呈极显著正相关($r=0.81$,$P<0.001$),与土壤交换性Al^{3+}呈极显著负相关($r=-0.79$,$P<0.001$)。其中,硅酸盐矿物+牡蛎壳处理在降低土壤酸度和交换性Al^{3+}等方面表现最佳,菠菜生物量也显著高于其它处理($P<0.05$)。

参考文献

[1]Lal R. Restoring soil quality to mitigate soil degradation[J].

Sustainability, 2015, 7(5): 5875-5895.

[2]Zhao W R, Li J Y, Jiang J, et al. The mechanisms underlying the reduction in aluminum toxicity and improvements in the yield of sweet potato (*Ipomoea batatas* L.) after organic and inorganic amendment of an acidic ultisol[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2020, 288: 106716.

[3]Jiang J, Xu R K, Zhao A Z. Surface chemical properties and pedogenesis of tropical soils derived from basalts with different ages in Hainan, China[J]. CATENA, 2011, 87(3): 334-340.

[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.

[5]沈仁芳,赵学强. 酸性土壤可持续利用[J]. 农学学报, 2019, 9(3): 16-20.
Shen R F, Zhao X Q. The sustainable use of acid soils[J]. Journal of Agriculture, 2019, 9(3): 16-20.

[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.

[7]Shetty R, Vidya C S N, Prakash N B, et al. Aluminum toxicity in plants and its possible mitigation in acid soils by biochar: a review [J]. Science of the Total Environment, 2021, 765: 142744.

[8]张玲玉,赵学强,沈仁芳. 土壤酸化及其生态效应[J]. 生态学杂志, 2019, 38(6): 1900-1908.
Zhang L Y, Zhao X Q, Shen R F. Soil acidification and its ecological effects[J]. Chinese Journal of Ecology, 2019, 38(6): 1900-1908.

[9]Geng N, Kang X R, Yan X X, et al. Biochar mitigation of soil acidification and carbon sequestration is influenced by materials and temperature[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2022, 232: 113241.

[10]Long L L, Huang N, Liu X, et al. Enhanced silicate remediation in cadmium-contaminated alkaline soil: amorphous structure improves adsorption performance [J]. Journal of Environmental Management, 2023, 326(Part B): 116760.

[11]Fan B B, Ding S, Peng Y T, et al. Supplying amendments alleviates aluminum toxicity and regulates cadmium accumulation by spinach in strongly acidic soils[J]. Journal of Environmental Management, 2022, 324: 116340.

[12]王其选,陈海宁,王巍翰,等. 酸性农田土壤改良材料的选择与应用研究进展[J]. 山东农业科学, 2024, 56(5): 171-180.
Wang Q X, Chen H N, Wang W H, et al. Progress in selection and application of soil improvement materials for acidic farmland[J]. Shandong Agricultural Sciences, 2024, 56(5): 171-180.

[13]来宏伟,倪妮,时仁勇,等. 生物质炭和$Ca(OH)_2$缓解土壤酸化过程中植物铝毒性的模拟对比研究[J]. 土壤学报, 2023, 60(4): 1017-1025.
Lai H W, Ni N, Shi R Y, et al. Contrasting effects of biochar and $Ca(OH)_2$ on alleviating plant aluminum toxicity during soil acidification: a simulation study[J]. Acta Pedologica Sinica, 2023, 60(4): 1017-1025.

[14]姜雯琪,徐从斌,孙天然. 硅酸盐矿物对酸化土壤的调理及无机碳固定性的影响[J/OL]. 农业环境科学学报, 2024: 1-15. (2024-05-23)[2024-09-09]. https://link.cnki.net/urlid/12.1347.s.20240521.1238.004.
Jiang W Q, Xu C B, Sun T R. Soil conditioning and inorganic carbon accumulation in acidified soil by silicate rock[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2024: 1-15. (2024-05-23)[2024-09-09]. https://link.cnki.net/urlid/12.1347.s.20240521.1238.004.

[15]范贝贝,彭宇涛,潘成杰,等. 矿物调理剂对酸性土壤酸度降低和菠菜镉累积的影响[J]. 中国农业大学学报, 2023, 28(5): 96-105.
Fan B B, Peng Y T, Pan C J, et al. Effects of mineral amendments on acidic soil acidity reduction and spinach cadmium accumulation [J]. Journal of China Agricultural University, 2023, 28(5): 96-105.

[16]de Sousa A, Saleh A M, Habeeb T H, et al. Silicon dioxide nanoparticles ameliorate the phytotoxic hazards of aluminum in maize grown on acidic soil [J]. Science of the Total Environment, 2019, 693: 133636.

[17]Wang H Y, Wen S L, Chen P, et al. Mitigation of cadmium and arsenic in rice grain by applying different silicon fertilizers in contaminated fields[J]. Environmental Science and Pollution Research International, 2016, 23(4): 3781-3788.

[18]陈燕霞,唐晓东,游媛,等. 石灰和沸石对酸化菜园土壤改良效应研究[J]. 广西农业科学, 2009, 40(6): 700-704.
Chen Y X, Tang X D, You Y, et al. Improved effects of lime and zeolite on acidizing vegetable soil[J]. Guangxi Agricultural Sciences, 2009, 40(6): 700-704.

[19]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 A, Wang X, Fan H L. Effects of four soil conditioners on alleviating aluminum toxicity in acid red soil[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2014(4): 7-11.

[20]张传峰,朱霞萍,钟佳祺,等. 硅灰石-硅酸钠-生物炭复合材料对酸性黄壤的改良研究[J/OL]. 矿产综合利用, 2022: 1-16. (2022-11-25)[2024-09-09]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1251.TD.20221124.1629.004.html.
Zhang C F, Zhu X P, Zhong J Q, et al. Improvement of acidic yellow soil by wollastonite-sodium silicate-biochar composites [J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2022: 1-16. (2022-11-25)[2024-09-09]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1251.TD.20221124.1629.004.html.

[21]王其选,范贝贝,王巍翰,等. 土壤改良剂对强酸性土壤中菠菜生长和镉累积的影响[J]. 山东农业科学, 2024, 56(4): 111-117.
Wang Q X, Fan B B, Wang W H, et al. Effects of soil amendments on spinach growth and cadmium accumulation in

strongly acidic soil[J]. Shandong Agricultural Sciences, 2024, 56(4): 111-117.

[22]Steiner F, Zoz T, Pinto A S Jr, et al. Effects of aluminum on plant growth and nutrient uptake in young physic nut plants[J]. Semina: Ciências Agrárias, 2012, 33(5): 1779-1788.

[23]陈思宇,周嘉文,刘鸿雁,等.改良剂对酸性土壤上伴矿景天铝毒缓解作用及镉锌吸收性的影响[J].生物工程学报,2020,36(3):529-540.
Chen S Y, Zhou J W, Liu H Y, et al. Effects of amendments on the alleviation of aluminum toxicity and cadmium and zinc uptake by sedum plumbizincicola in acid soils [J]. Chinese Journal of Biotechnology, 2020, 36(3): 529-540.

[24]Fan B B, Li X, Fu T H, et al. Simultaneous realization of cadmium bioavailability reduction and spinach growth promotion in acidic soils with calcined oyster shells and dolomite [J]. Soil Use and Management, 2024, 40 (1): e12979.

[25]占静,文阳平,王莹,等.牡蛎壳粉对稻田土壤酸化与镉污染的协同调控效应[J].江西农业大学学报,2023,45(4):787-794.
Zhan J, Wen Y P, Wang Y, et al. Synergistic regulatory effects of oyster shell powder on soil acidification and cadmium pollution in paddy fields [J]. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis, 2023, 45(4): 787-794.

[26]冀建华,李絮花,刘秀梅,等.硅钙钾镁肥对南方稻田土壤酸度的改良作用[J].土壤学报,2019,56(4):895-906.
Ji J H, Li X H, Liu X M, et al. Effect of Si-Ca-K-Mg fertilizer remedying acid paddy soil in South China[J]. Acta Pedologica Sinica, 2019, 56(4): 895-906.

[27]冀建华,李絮花,刘秀梅,等.硅钙钾镁肥对南方稻田土壤酸性和盐基离子动态变化的影响[J].应用生态学报,2019,30(2):583-592.
Ji J H, Li X H, Liu X M, et al. Effects of fertilizer of calcium silicon magnesium potassium on the dynamics of soil acidity and exchangeable base cation in paddy field of Southern China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2019, 30 (2): 583-592.

[28]Zhou J W, Li Z, Zhou T, et al. Aluminum toxicity decreases the phytoextraction capability by cadmium/zinc hyperaccumulator Sedum plumbizincicola in acid soils [J]. Science of the Total Environment, 2020, 711: 134591.

[29]王宇函,吕波,张林,等.不同土壤改良剂对酸性铝富集红壤毒性缓解效应的差异[J].华中农业大学学报,2019,38(2):73-80.
Wang Y H, Lü B, Zhang L, et al. Differences in toxicity mitigation effects of different amendments on acidic aluminum-enriched red soil [J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2019, 38(2): 73-80.

[30]王子豪.镁、硅、钙、氨基酸的不同组合缓解水稻镉毒害的生理机制研究[D].雅安:四川农业大学,2018.
Wang Z H. Physiological mechanisms of different combinations of magnesium, silicon, calcium and amino acid on alleviating cadmium toxicity in Rice [D]. Yaan: Sichuan Agricultural University, 2018.

[31]Kong X Y, Peng Z P, Li D X, et al. Magnesium decreases aluminum accumulation and plays a role in protecting maize from aluminum-induced oxidative stress [J]. Plant and Soil, 2020, 457: 71-81.

[32]Pandey P, Srivastava R K, Dubey R S. Salicylic acid alleviates aluminum toxicity in rice seedlings better than magnesium and calcium by reducing aluminum uptake, suppressing oxidative damage and increasing antioxidative defense[J]. Ecotoxicology, 2013, 22(4): 656-670.

[33]Bose J, Babourina O, Rengel Z. Role of magnesium in alleviation of aluminium toxicity in plants [J]. Journal of Experimental Botany, 2011, 62(7): 2251-2264.

[34]Watanabe T, Okada K. Interactive effects of Al, Ca and other cations on root elongation of rice cultivars under low pH [J]. Annals of Botany, 2005, 95(2): 379-385.

[35]王爱勤,何龙飞,沈振国,等.铝胁迫下钙对小麦幼苗营养元素吸收和转运的影响[J].西南农业学报,2002,15(2):42-47.
Wang A Q, He L F, Shen Z G, et al. Effects of calcium on the absorption and distribution of nutrient elements of wheat seedlings under aluminum stress[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2002, 15(2): 42-47.

[36]Silva I R, Smyth T J, Israel D W, et al. Magnesium is more efficient than calcium in alleviating aluminum rhizotoxicity in soybean and its ameliorative effect is not explained by the Gouy-Chapman-Stern model[J]. Plant & Cell Physiology, 2001, 42 (5): 538-545.

(编辑:郭玥微)