

酸性红壤添加石灰对甜玉米幼苗生长、养分累积和土壤理化性质的影响

张思文¹ 陈晓辉¹ 蔡远扬² 纪宗君¹ 陈圆¹ 朱齐超³
余文慧¹ 张福锁³ 吴良泉^{1*}

(1. 福建农林大学 资源与环境学院/国际镁营养研究所,福州 350002;

2. 吉林大学 植物科学学院,长春 130062;

3. 中国农业大学 资源与环境学院,北京 100193)

摘要 为探究酸性土壤甜玉米种植所需的适宜石灰用量。选取福建省平和县小溪镇典型的强酸性红壤(pH=3.91),以甜5号甜玉米先为供试材料,采用盆栽试验,设置石灰用量0 g/kg(L0)、1.2 g/kg(L1.2)、2.4 g/kg(L2.4)、3.6 g/kg(L3.6)和4.8 g/kg(L4.8),研究不同石灰用量对甜玉米幼苗生物量、根系生长、养分累积、土壤理化性质和酶活性的影响。结果表明:1)随石灰用量的增加,玉米幼苗株高、生物量(地上部+根系)、总根长、根面积、根体积、根系活力和养分(氮、磷、钾、钙和镁)累积量(地上部+根系)均呈先上升后下降趋势,以L2.4处理最佳;2)与L0相比,L2.4处理的玉米地上部和根系中氮、磷、钾、钙和镁累积量平均显著增加121.9%和186.7%;3)随石灰用量的增加,土壤pH、交换性钙含量、脲酶、蔗糖酶与过氧化氢酶活性提高,交换性酸和交换性铝含量降低,无机氮、速效钾、有效磷、交换性镁含量及酸性磷酸酶活性呈先上升后下降趋势;4)玉米幼苗养分累积的差异受石灰施用、土壤pH、土壤酶活性、土壤养分和根系的直接或间接影响,各因素影响系数大小依次为:土壤pH(0.82)>根系(0.65)>石灰施用(0.61)>土壤养分(0.33)>土壤酶活性(0.28)。综上,合理施用石灰可以有效改善酸性红壤性质、提高土壤酶活性、促进玉米根系生长,提高植株养分累积量。

关键词 酸性红壤; 石灰; 根系活力; 养分累积; 土壤性质; 土壤酶活性

中图分类号 S156.6

文章编号 1007-4333(2022)03-0041-12

文献标志码 A

Effects of supplement of lime in acidic red soil on the sweet maize seedling growth, nutrient accumulation, and soil physi-chemical properties

ZHANG Siwen¹, CHEN Xiaohui¹, CAI Yuanyang², JI Zongjun¹, CHEN Yuan¹,
ZHU Qichao³, YU Wenhui³, ZHANG Fusuo³, WU Liangquan^{1*}

(1. International Magnesium Institute/College of Resources and Environmental Sciences,
Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China;

2. College of Plant Sciences, Jilin University, Changchun 130062, China;

3. College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193, China)

Abstract In order to explore the suitable lime application amount for sweet maize (*Zea mays* L. *saccharata*) planting in acidic soil, a typical strong acidic red soil (pH=3.91) in Pinghe County was taken as study object and sweet maize variety 'Xiantian 5' was selected for the test. Pot experiments were conducted to study the effects of different lime (CaCO₃) application rates (0 g/kg (L0), 1.2 g/kg (L1.2), 2.4 g/kg (L2.4), 3.6 g/kg (L3.6) and 4.8 g/kg (L4.8))

收稿日期: 2021-09-01

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0200401, 2017YFD0200207);国家自然科学基金青年项目(41601244);福建省教育厅中青年教师科研项目(JAT160174)

第一作者: 张思文, 博士研究生, E-mail: zhangsiwen0820@163.com

通讯作者: 吴良泉, 讲师, 主要从事养分资源管理研究, E-mail: liangquan01@163.com

on the biomass, root growth, nutrient accumulations of sweet maize seedlings, and the physical and chemical properties and enzyme activities of soil. The results showed that: 1) The plant height, total biomass (shoot + root), total root length, root surface area, root volume, root activity and nutrients (nitrogen, phosphorus, potassium, calcium and magnesium, i. e., N, P, K, Ca and Mg, respectively) accumulation (shoot + root) firstly increased and then decreased with lime addition, reaching the peak under the L2.4 treatment. 2) Compared with L0, the average accumulations of N, P, K, Ca and Mg in shoots and roots under L2.4 were significantly increased by 121.9% and 186.7%, respectively. 3) With the increase of lime application rate, the pH, exchangeable Ca concentration, and the activities of urease, sucrase and catalase in soil increased. Meanwhile the exchangeable acid and aluminum concentration in soil decreased and the inorganic N, rapidly available K, available P, exchangeable Mg concentration and acid P activity increased first and then decreased. 4) The nutrient accumulations of sweet maize seedlings was directly or indirectly affected by lime application, soil pH, soil enzyme activity, soil nutrient and plant root. The order of standardized total effects was soil pH (0.82) > plant root (0.65) > lime application (0.61) > soil nutrient (0.33) > soil enzyme activity (0.28). In summary, the reasonable application of lime can effectively improve the physical and chemical properties and enzyme activity of acidic red soil, thereby promoting root growth and nutrient accumulation of sweet maize.

Keywords acid red soil; lime; root activity; nutrient accumulation; soil properties; soil enzyme activity

适宜的土壤酸碱度是实现农业生产可持续发展的重要条件^[1]。1980—2010年来,我国主要农田耕层土壤 pH 平均下降 0.5 个单位^[2]。根据 2005—2011 年测土配方施肥数据显示,我国有 150 万 hm^2 耕地土壤 pH 低于 5.5^[3], 主要集中分布在湖南、江西、福建、浙江、广东、广西、海南等南方地区^[4]。红壤是南方地区典型土壤,土壤背景 pH 较低,加之集约化农业生产,土壤酸化问题更加突出^[5]。土壤酸化会导致土壤质量下降,如养分失衡、重金属活性增加、微生物活性和土壤酶活性降低等,影响农作物根系的生长发育和对养分的吸收,造成减产或绝收^[6-10]。土壤酸化已成为限制我国南方耕地生产力提升重要因素之一^[5]。因此,开展土壤酸化改良研究中低产红壤耕地产能提升及农业可持续生产具有十分重要的意义。

施用石灰被认为是酸性土壤改良的最有效措施之一^[11]。酸性土壤中施用石灰可以降低土壤酸度,提高土壤 pH 以及土壤 Ca 和 Mg 的有效性^[12-13], 同时降低土壤 Al 和 Mn 对作物的毒害作用^[14-15]。Caires 等^[12] 研究表明撒施石灰可显著提高 0~10 cm 土层土壤的 pH, 减少 Ca、Mg 和 K 等养分的淋失, 并增加有益微生物和脲酶、过氧化氢酶、酸性磷酸酶、碱性磷酸酶等的活性。敖俊华等^[16] 研究发现施用石灰显著提高土壤 pH, 改善土壤中养分的有效性, 并且增加甘蔗的产量和含糖量。Hati 等^[17] 长达 30 年的定位试验表明, 长期且适量的施用石灰可以提升土壤 pH (从 5.0 上升到 6.0) 并疏松土壤, 其效

果仅次于施用有机肥。然而, 也有研究表明若长期过量施用石灰, 则会引起土壤中 Ca、K、Mg 离子的平衡失调, 破坏土壤结构, 形成石灰性板结田, 导致作物减产^[18-19]。由此可见, 确定适宜的石灰用量对于酸性土壤改良至关重要。

甜玉米又称为蔬菜玉米或水果玉米, 主要种植于我国南方地区^[20]。由于种植甜玉米经济效益显著, 近年来其栽培面积不断增加, 到 2016 年我国甜玉米种植面积已超 40 万 hm^2 ^[21-22]。然而种植户长期超量施肥和偏施氮肥使得土壤普遍酸化, 不利于甜玉米的可持续发展, 亟需提出酸性土壤改良方案^[23]。迄今为止关于酸性红壤条件下甜玉米种植的石灰改良的报道较少, 且具体用量也不确定。为玉米苗期根系生长提供良好的土壤条件是玉米后期营养生长和生殖生长的基础^[24], 而 4 叶期玉米的生长点仍在地下, 节生根的萌发质量会直接影响玉米地上部生长^[25-26]。因此, 为探究酸性土壤施用石灰对玉米苗期干物质和养分积累与土壤理化性质的影响, 本研究拟以先甜 5 号玉米幼苗为研究对象, 采用盆栽试验方法探究不同石灰用量对酸性红壤甜玉米幼苗生长、土壤理化性质和土壤关键酶活性的影响, 期为甜玉米种植和酸性土壤改良提供科学参考。

1 材料与方 法

1.1 试验材料

试验于 2019 年 10 月—11 月在福建农林大学国际镁营养研究所大棚内进行。试验土壤采自福建

省平和县小溪镇(24.34° N, 117.31° E), 该地区属南亚热带季风气候, 全年平均气温 21.2 °C, 无霜期 318 d, 年降雨量 1 696 mm, 干湿季明显, 土壤类型为典型砖红壤(pH 3.91)。土壤自然风干后, 剔除砾石及植物根茎等杂物, 通过孔径为 2 mm 的网筛, 保存用于装盆。土壤基本理化性质见表 1。甜玉米品种为“先甜 5 号”(Zea mays L. saccharata), 石灰为碳酸钙(福晨天津化学试剂有限公司, 95% 化学纯, 天津)。

1.2 试验方法

首先按照氢氧化钙滴定法^[27]确定供试土壤

酸性改良(目标 pH=6.0)的适宜石灰添加量, 然后据此设计 5 个石灰梯度, 依次为 0 g/kg(L0, CK)、1.2 g/kg(L1.2)、2.4 g/kg(L2.4)、3.6 g/kg(L3.6)和 4.8 g/kg(L4.8)。取 1.2 kg 供试土壤与不同用量的石灰混匀后装入 20 cm×16 cm×20 cm(上口径×下口径×高度)的塑料盆待后期玉米栽培。播种前, 浇去离子水以保持土壤含水量为 25%(质量比), 一周后播种 4~5 粒。出苗后, 每盆留苗 1 株, 试验过程不施用任何肥料, 每个处理设置 12 次重复。除石灰用量不同, 其他日常管理措施均一致。

表 1 供试土壤基本理化性质*

Table 1 Physical and chemical properties of the test soil

土壤 pH Soil pH	有机质/ (g/kg) SOM	铵态氮/ (mg/kg) NH ₄ ⁺ -N	硝态氮/ (mg/kg) NO ₃ ⁻ -N	有效磷/ (mg/kg) Avai. P	速效钾/ (mg/kg) R-Avai. K	交换性钙/ (mg/kg) Ex. Ca	交换性镁/ (mg/kg) Ex. Mg
3.91	11.62	80.31	87.89	130.93	97.92	423.42	81.96

注: 铵态氮(NH₄⁺-N)和硝态氮(NO₃⁻-N)的测定采用新鲜土样。下同。

Note: Fresh soil samples are used for determination of the concentrations of NH₄⁺-N and NO₃⁻-N. The same below.

1.3 植株样品采集与分析

玉米播种 4 周后进入幼苗期, 紧贴土表将幼苗剪断并用尺子测定其株高。然后分离土壤与根系, 分离过程中尽量保持根系的完整性, 将根系冲洗干净后, 对地上部和根系分别称重, 用 Epson 扫描仪(Perfection V800, Regent Instruments Inc., 加拿大)进行根系扫描, 采用 WinRHIZO Pro2009 软件分析总根长、根系面积和根体积^[28], 同时采用 TTC 还原法测定根系活力^[29]。地上部植株和根系用去离子水洗净, 经 105 °C 杀青 30 min 后于 70 °C 烘干至恒重, 称重后用磨样机粉碎留样。植株 N、P、K 浓度的测定方法参照鲍士旦^[27], 样品经 H₂SO₄-H₂O₂ 消煮制得待测液, 采用连续流动分析仪(希思迪, FLOWSYS, 意大利)测定 N 浓度, 电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-OES)(珀金埃尔墨, Avio 200, 美国)测定 P 浓度, 火焰光度计(上海仪电, FP640, 上海)测定 K 浓度; 另取样品经 HNO₃-HClO₄ 消煮制得待测液, 采用 ICP-OES 测定植株 Ca、Mg 和 Al 浓度。根冠比=根鲜重/地上部鲜重; 养分累积量=养分浓度×干重。

1.4 土壤样品采集与分析

玉米植株收获后(玉米播种 1 个月后), 对土壤进行取样, 将培养盆中的土壤充分混匀, 经四分法获取 50 g 土样并自然风干, 然后研磨分别过 1 mm(18 目)和 2 mm(10 目)筛用于相关指标测定。根据鲍士旦^[27]的方法, 土壤 pH 采用电极电位法测定(水土质量比 2.5:1)(赛默飞, A215, 新加坡), 土壤交换性酸与交换性铝浓度采用氯化钾交换—中和和滴定法测定, 土壤铵态氮和硝态氮采用氯化钾浸提法—连续流动分析仪(希思迪, FLOWSYS, 意大利)测定, 有效磷采用氟化铵盐酸浸提法测定, 速效钾、交换性钙和交换性镁浓度采用乙酸铵交换法。土壤脲酶、蔗糖酶、酸性磷酸酶和过氧化氢酶活性分别采用靛酚蓝比色法、硫代硫酸钠滴定法和高锰酸钾滴定法测定^[30-31]。

1.5 数据分析

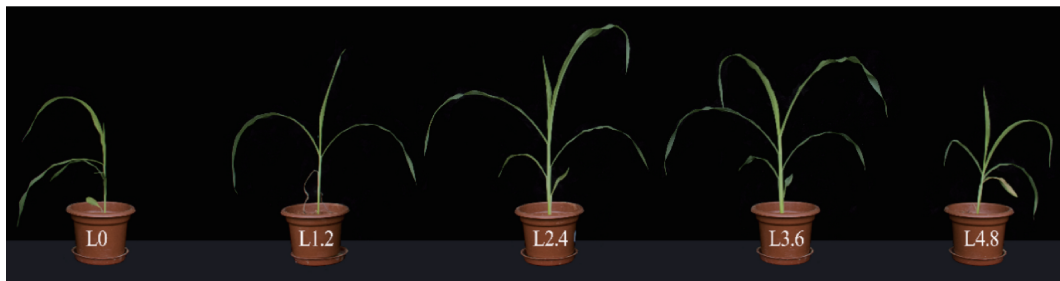
分别采用 Microsoft Excel 2016、IBM SPSS 21、IBM SPSS Amos 24 和 Origin 2020 软件进行试验数据的录入、计算、统计分析和制图, 显著性差异检验采用 Duncan 法。

2 结果与分析

2.1 不同石灰用量对甜玉米幼苗期生物量的影响

酸性土壤施用不同用量的石灰对玉米幼苗长势影响不同(图 1)。结合图 1 和表 2 可知,适量施用石灰会促进玉米幼苗生长,过量施用则会抑制植株生长。当石灰用量为 2.4 g/kg 时(L2.4),玉米幼苗的

株高、生物量及根冠比达到最大值,分别为 59.68 cm, 9.71 g/株和 0.23。低于该用量,幼苗株高、生物量和根冠比随着石灰的增加而增加,高于该用量则会显著抑制玉米地上部和地下部的生长。与 L0 处理相比较,L1.2、L2.4、L3.6 和 L4.8 处理的玉米幼苗总生物量(鲜重)分别提高 37.3%、51.8%、35.9% 和 17.1%;根冠质量比则显著提高 35.3%(L2.4) 或显著降低 23.5%(L4.8)。



L0、L1.2、L2.4、L3.6 和 L4.8 分别代表石灰用量为 0、1.2、2.4、3.6 和 4.8 g/kg。

L0, L1.2, L2.4, L3.6 and L4.8 represent the lime (CaCO_3) application amounts of 0, 1.2, 2.4, 3.6 and 4.8 g/kg, respectively.

图 1 不同石灰用量对甜玉米幼苗生长的影响

Fig. 1 Effects of lime rates on growth of sweet maize seedlings

表 2 不同石灰用量对甜玉米幼苗株高和生物量(鲜重和干重)的影响

Table 2 Effects of lime rates on biomass (fresh weight and dry weight) of sweet maize seedlings

处理 Treatment	株高/cm Plant height	地上部/(g/株) Shoot weight	根/(g/株) Root weight	总生物量/(g/株) Total biomass	根冠比 Root to shoot ratio
L0	47.24 c	5.48(1.15) d	0.92(0.17) c	6.40(1.33) d	0.17 b
L1.2	53.72 b	7.42(1.56) b	1.36(0.26) b	8.79(1.82) b	0.18 b
L2.4	59.68 a	7.88(1.66) a	1.83(0.35) a	9.71(2.00) a	0.23 a
L3.6	58.88 a	7.31(1.54) b	1.39(0.26) b	8.70(1.80) b	0.19 ab
L4.8	36.98 d	6.62(1.39) c	0.88(0.17) c	7.49(1.56) c	0.13 c

注:括号内数值为玉米幼苗干重;同列数据后不同小写字母表示不同处理间差异显著($P < 0.05$)。下同。

Note: Values in parentheses are the dry weights of sweet maize seedlings. Different lowercase letters within the same column indicate significant differences among different lime application amounts ($P < 0.05$). The same below.

2.2 不同石灰用量对甜玉米幼苗根系形态的影响

酸性土壤施用石灰可显著改善玉米幼苗根系生长且以 L2.4 处理效果最佳(表 3)。与 L0 处理相比,L2.4 处理的总根长、根表面积和根体积分别显著增加 333.4%、269.8% 和 181.8%。过量施用石灰则会抑制玉米幼苗生长,如 L4.8 处理玉米苗总根长、根表面积和根体积相比 L2.4 处理分别降低 153.2%、89.0% 和 60.0%,相比于 L0 处理增幅最小(分别增加 71.2%、95.6% 和 84.7%)。施用石灰

可显著降低玉米苗根系的铝浓度,且随着石灰用量的增加铝浓度显著降低(图 2);适当施用石灰可显著提高酸性红壤玉米幼苗根系活力,当石灰用量为 2.4 g/kg 时,根系活力最高($346.0 \mu\text{g}/(\text{g} \cdot \text{h})$),超过该用量,根系活力显著下降。

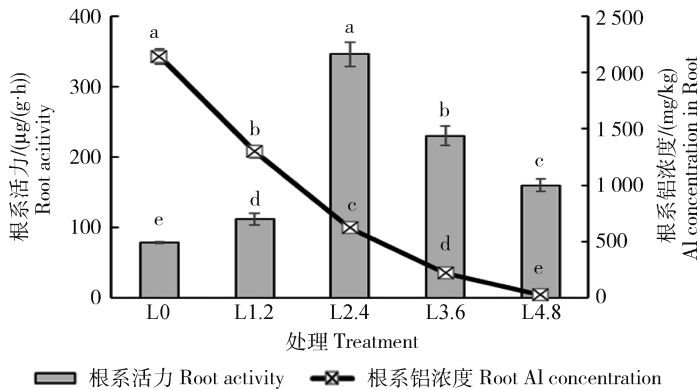
2.3 不同石灰用量对甜玉米幼苗养分累积的影响

不同石灰用量对玉米幼苗地上部和根系 N、P、K、Ca 和 Mg 的养分累积影响不同。随着石灰用量的增加,这五种养分的累积量均呈先增加后降低的

表 3 不同石灰用量对甜玉米幼苗根系形态指标的影响

Table 3 Effects of lime application rates on root morphological index of maize seedlings

处理 Treatment	总根长/(cm/株) Total root length	根表面积/(cm ² /株) Root surface area	根体积/(cm ³ /株) Root volume
L0	237.31 e	11.20 d	0.46 e
L1.2	561.15 c	29.38 b	0.87 c
L2.4	1 028.53 a	41.41 a	1.30 a
L3.6	654.76 b	29.42 b	1.03 b
L4.8	406.22 d	21.91 c	0.85 d



柱形和折线上不同小写字母分别表示不同石灰处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

Different lowercase letters on column and broken line indicate significant differences among different lime treatments ($P < 0.05$).

图 2 不同石灰用量处理对甜玉米幼苗根系活力和铝浓度的影响

Fig. 2 Effects of lime application rates on root activity and aluminum concentration of maize seedlings

趋势,当石灰用量为 2.4 g/kg 时,养分累积量达到最大(图 3)。与不施石灰(L0)处理相比,L2.4 处理的地上部 N、P、K、Ca 和 Mg 累积量分别显著提高 109.9%、103.7%、101.1%、181.8% 和 112.9%;根系 N、P、K、Ca 和 Mg 累积量分别显著提高 129.6%、136.7%、140.3%、294.5% 和 222.1%。当石灰用量为 4.8 g/kg 时,养分累积量的增加幅度(与 L0 相比)最小,地上部 N、P、K、Ca 和 Mg 的累积量分别提高 60.4%、58.7%、49.6%、132.1% 和 54.9%;根系 Ca 和 Mg 的累积量分别提高 124.1% 和 30.1%,而 N、P 和 K 的累积量与 L0 处理无明显差异。

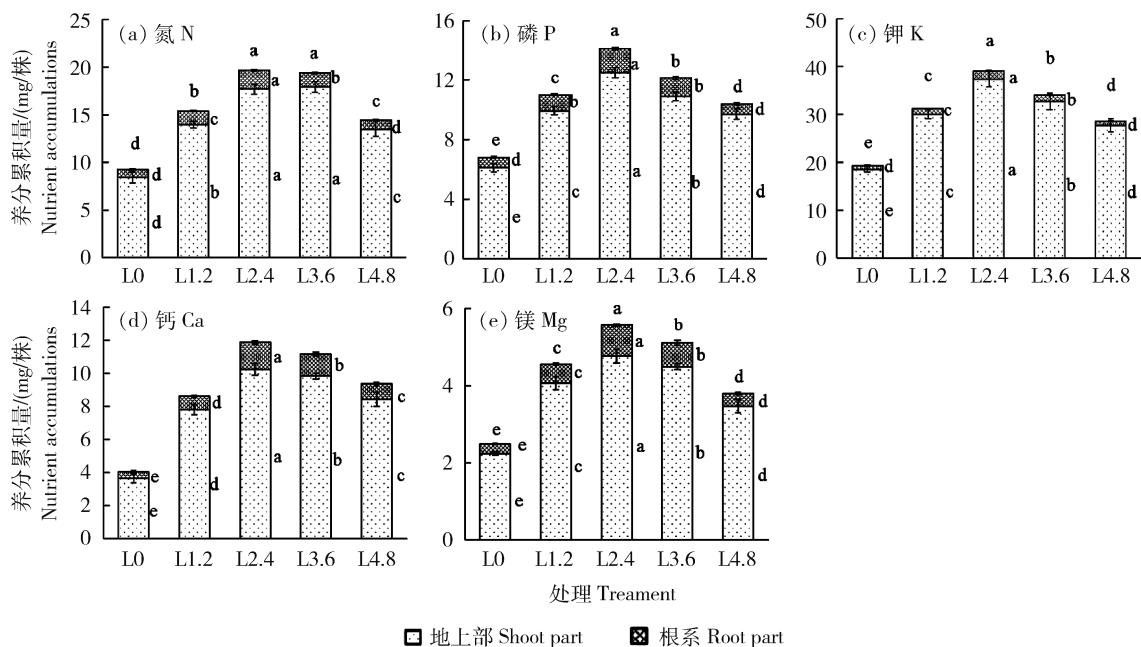
2.4 不同石灰用量对土壤理化性质和酶活性的影响

施用石灰不仅改善酸性红壤的土壤理化性质,还影响土壤的酶活性。如表 4 所示,土壤 pH、交换性钙含量随着石灰用量的增加而显著增加,土壤交换性酸和交换性铝含量则随着石灰用量的增加而逐渐降低,当石灰用量为 3.6 g/kg 时,土壤中交换性

酸和交换性铝含量趋于 0。随着石灰用量增加,土壤无机氮、有效磷、速效钾和交换性镁含量呈先上升后下降趋势,其中铵态氮含量随着石灰用量的增加逐渐下降。当石灰用量为 3.6 g/kg 时,土壤无机氮和有效磷含量达到最大,较 L0 处理分别提高 49.0% 和 31.3%;石灰用量为 2.4~3.6 g/kg 时,速效钾和交换性镁含量达到最大,较 L0 处理分别提高 16.3% 和 11.9%。从表 5 可以看出,随着石灰用量的增加,酸性红壤中脲酶、蔗糖酶与过氧化氢酶的活性均逐渐增加,酸性磷酸酶活性则表现出先上升后下降趋势,在 L3.6 处理达到最大值 (4.18 mg/(g·h))。

2.5 石灰施用与土壤、根系、植株养分累积量指标的路径分析

玉米幼苗养分累积受石灰施用、土壤 pH、土壤酶活性、土壤养分和根系直接或间接影响,各影响因素的影响系数大小依次为土壤 pH > 根系 > 石灰施用 > 土壤养分 > 土壤酶活(图 4)。结构方程模型的



柱形上方、右侧上和右侧下方不同小写字母分别表示玉米幼苗总养分(地上部+根系)、地上部和根系养分积累不同处理间差异显著($P < 0.05$)。

Different lowercase letters above the column, right upper and right lower indicate significant differences ($P < 0.05$) total, shoot and root nutrient accumulation of sweet maize seedlings among different treatments, respectively.

图3 不同石灰用量处理对甜玉米幼苗氮、磷、钾、钙和镁累积的影响

Fig. 3 Effects of lime rates on nitrogen, phosphorus, potassium, calcium and magnesium accumulation of maize seedlings

表4 不同石灰用量对酸性红壤土壤理化性质的影响

Table 4 Effects of different lime application rates on soil physical and chemical properties of acidic red soil

处理 Treatment	土壤酸度 Soil acidity			大量元素/(mg/kg) Macroelement			中量元素/(mg/kg) Midelement		
	pH	交换性酸/ (cmol/kg) Ex. acid	交换性铝/ (cmol/kg) Ex. Al	无机氮 Inorganic nitrogen		有效磷 Ava. P	有效钾 Ava. K	交换性钙 Ex. Ca	交换性镁 Ex. Mg
				NH ₄ ⁺ -N	NO ₃ ⁻ -N				
L0	3.91 e	8.13 a	7.45 a	73.3 a	92.5 e	131.7 d	99.9 b	413.9 e	83.2 c
L1.2	5.05 d	3.98 b	3.50 b	42.0 b	165.1 d	151.5 c	103.1 b	829.5 d	86.1 b
L2.4	6.02 c	1.19 c	0.94 c	26.1 c	202.6 c	160.7 b	115.7 a	1 228.9 c	93.6 a
L3.6	6.59 b	0.13 d	—	10.5 d	239.5 a	172.9 a	116.6 a	1 597.9 b	92.6 a
L4.8	7.35 a	—	—	8.9 d	214.4 c	148.9 c	103.1 b	2 103.3 a	84.2 bc

注:同行数据后不同小写字母表示不同处理间差异显著($P < 0.05$)。

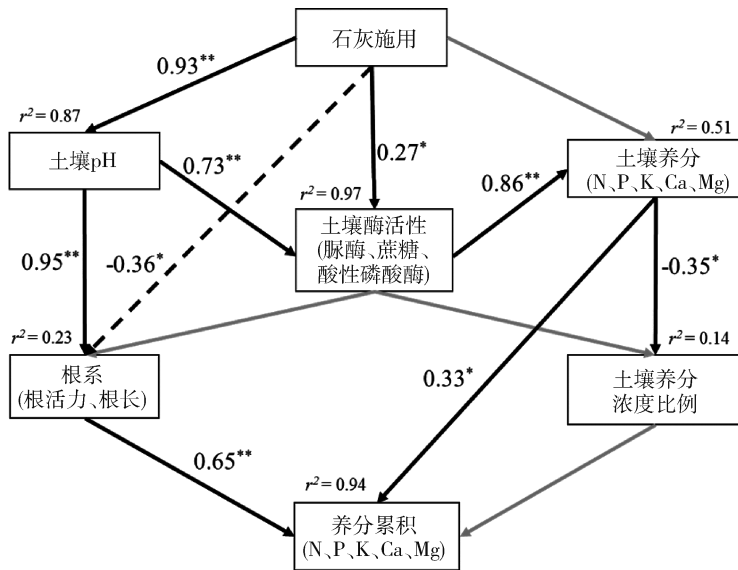
Note: Different lowercase letters within same raw indicate significant differences among different treatments ($P < 0.05$).

结果表明,石灰施用可以通过影响土壤pH、土壤酶活性、土壤养分和根系间接影响玉米幼苗总养分积累量,影响系数分别为0.84和-0.23,总影响系数为0.61(表6)。土壤pH和土壤酶活性间接影响玉米

幼苗总养分积累量,总影响系数分别为0.82和0.28。根系与土壤养分对玉米幼苗养分积累存在直接的正效应,影响系数分别0.65和0.33。土壤养分比例对养分积累无显著影响。

表 5 不同石灰用量对酸性红壤土壤酶活性的影响
Table 5 Effects of different lime application rates on soil enzyme activity of acidic red soil

处理 Treatment	activity of acidic red soil mg/(g · h)			
	脲酶 Urease	蔗糖酶 Sucrase	酸性磷酸酶 Acid phosphatase	过氧化氢酶 Catalase
L0	0.13 e	12.14 e	2.05 d	0.83 e
L1.2	0.22 d	18.38 d	2.89 c	1.09 d
L2.4	0.34 c	37.41 c	3.64 b	1.66 c
L3.6	0.45 b	51.63 b	4.18 a	2.08 b
L4.8	0.51 a	57.79 a	3.68 b	2.76 a



实线表示显著正相关,虚线表示显著负相关,灰线表示无显著相关;土壤酶活性为脲酶、蔗糖酶、酸性磷酸酶的主成分1,土壤养分为无机氮、有效磷、速效钾、交换性钙和镁的主成分1,根系为根活力和根长主成分1,土壤养分比例为氮、磷、钾和镁分别与钙比例的主成分1,养分累积为总氮、磷、钾、钙和镁累积的主成分1;“*”表示两项指标存在显著正相关性($P<0.05$);“**”表示两项指标存在极显著正相关性($P<0.01$)。

The solid line, dashed line and gray line show significant positive correlation, negative correlation and no significant correlation, respectively. Soil enzyme activity is the principal component 1 (PC1) of urease, sucrase and acid phosphatase; Soil nutrient is the PC1 of inorganic N, available P, available K, exchangeable Ca and Mg. Root is the PC1 of root activity and total root length. Soil nutrient ratio is the PC1 of soil N, P, K and Mg ratio to Ca. * indicates that there is a significant positive correlation between the two indicators ($P<0.05$) and ** indicates that the two indicators have a very significant positive correlation ($P<0.01$).

图 4 石灰施用、土壤、根系与植株养分累积指标间关系的结构方程模型

Fig. 4 Structural equation model (SEM) of the causal relationship among lime application, soil, root and nutrient accumulation to nutrient accumulation

表 6 各影响因素对玉米幼苗养分累积的影响总系数

Table 6 Total effects for each variable in relation to nutrient accumulation of maize seedling

因素 Factor	土壤 pH Soil pH	根系 Root	石灰施用 Lime application	土壤养分 Soil nutrients	土壤酶活性 Soil enzyme activity
总影响 Total effect	0.82	0.65	0.61	0.33	0.28

3 讨论

3.1 石灰施用对甜玉米幼苗生物量与根系的影响

本研究通过在酸性红壤上的玉米幼苗石灰梯度盆栽试验表明,随着石灰用量的增加,甜玉米幼苗长势呈现先增加后降低的趋势(图1,表2)。该研究结果与酸性土壤上油菜和水稻的产量随着石灰施用量增加的变化规律一致^[32]。低pH、高土壤铝离子(Al^{3+})浓度是酸性土壤抑制植株生长的一个重要原因^[33-34],尤其当pH降低到4.50以后,土壤铝则主要以 Al^{3+} 态存在,会直接危害作物生长^[6]。已有研究表明, Al^{3+} 会通过影响根尖细胞分裂和伸长,阻止主根轴和侧根生成,形成典型的“粗短”根型,导致根系无法进行正常养分吸收^[35]。如在水稻上的研究表明,当铝离子浓度超过5 mg/kg时便会对水稻幼苗根的伸长产生抑制作用,影响其对养分吸收^[36]。本研究结果显示,在pH为3.91的酸性土壤上施用石灰后,土壤pH升高、土壤和玉米根系中铝离子浓度均显著降低,此时,根系活力显著提高,进而促进了根系的生长(石灰用量介于1.2~2.4 g/kg)(表2,图2,表3),与胡敏等^[28]在大麦幼苗上的研究结果相似。

3.2 石灰施用对土壤养分有效性的影响

土壤养分有效性也会影响植株养分吸收^[16]。本研究通过结构方程模型也进一步证明酸性土壤施用石灰可以影响土壤pH和土壤酶活性进而影响土壤养分并最终影响养分累积量(图4)。石灰用量介于1.2~2.4 g/kg时,此时pH为5.05~6.02,随着石灰用量的增加,土壤无机氮、有效磷、速效钾、交换性钙和镁含量,以及土壤酶(脲酶、蔗糖酶、酸性磷酸酶、过氧化氢酶)活性均呈现上升趋势。徐光泽等^[37]和邓小华等^[38]的研究发现,施用生石灰后土壤过氧化氢酶、中性磷酸酶、脲酶活性均显著提高,与本研究结果规律一致。这可能是由于土壤酶活性对pH变化敏感,碱性物质的添加对土壤酶起到激活作用^[39]。已有研究表明,土壤酸碱度会影响土壤养分有效性^[40]。石灰施用后,土壤pH显著提高,增加了土壤氮矿化速率和硝化速率,其主要原因可能是施用石灰改善了土壤酸度环境,提高了土壤氧化铵细菌的生物多样性和活性^[41],因而提高无机氮含量,同时降低了酸性土壤中铝氧化物对磷的吸附,提高了土壤磷的生物有效性^[42-43]。不仅如此,石灰的施入直接引入 Ca^{2+} ,大量 Ca^{2+} 与土壤中

Mg^{2+} 和 K^+ 竞争相同的吸附位点,从而提高土壤溶液中 Mg^{2+} 和 K^+ 的含量^[13]。

3.3 石灰用量对植株生长的影响

石灰用量并非越多越好^[16,28,32],本研究中,玉米幼苗期的养分与干物质的累积量随着石灰用量的增加变化规律相似(先上升后下降),且都在石灰用量为2.4 g/kg时最佳(图3),这说明确定适宜的石灰用量对于玉米生长非常重要。敖俊华等^[16]研究表明,在pH为4.45的酸性土壤上施用1.2 g/kg石灰时,甘蔗产量和糖分含量最佳,石灰施用过多时则表现出负效应。于世举等^[44]研究表明,在酸性土壤上施用石灰超过1 500 kg/hm²时,石灰对水稻的增产效果明显下降。本研究中,当石灰用量超过2.4 g/kg时,甜玉米地上部和根系的生物量与根系活力均呈现下降趋势,这可能是由于过量施用石灰导致土壤pH过高(pH \approx 7或pH $>$ 7),抑制了植物组织和器官的分化^[45];也有研究表明钙离子与其它阳离子(NH_4^+ 、 Mg^{2+} 、 K^+)的拮抗作用也会抑制作物对养分的吸收^[46-47]。随着培养液中 Ca^{2+} 含量的增加,N同化量呈现先升高后降低规律,当 Ca^{2+} 浓度超过4 mmol/L时,小麦幼苗对N的吸收被明显抑制^[48];周卫等^[49]在黑麦草上的研究也表明随着 Ca^{2+} 浓度的增加,对 Mg^{2+} 的吸收抑制作用明显增强。也有研究表明,过多施用石灰会造成土壤溶液中钾与钙比例失调,降低作物对 K^+ 的吸收^[50]。此外,土壤pH提升过高也会抑制土壤微生物生长、降低无机氮的有效性^[51];并且,过量的 Ca^{2+} 还会与土壤磷形成磷酸钙盐沉淀,从而降低土壤有效磷含量^[52]。本研究中,当石灰用量大于3.6 g/kg时,此时土壤pH $>$ 6.5,土壤无机氮、有效磷、速效钾和交换性镁含量均不断降低(表4)。综上,施用石灰改良酸性土壤时,要考虑石灰的用量,结合已有研究^[27-28,53],强酸性土壤(pH=3.91)种植甜玉米改良所需的石灰用量约为2.4 g/kg,折合大田用量约5.2 t/hm²,但本研究的玉米幼苗试验只进行到幼苗时期,建议在今后的研究中需进一步探究石灰施用对玉米全生育期养分吸收和干物质积累的影响。

4 结论

酸性土壤施用石灰可以提高土壤pH,降低土壤酸度,然而,对于作物而言,石灰用量并非越多越好。随着石灰用量的增加,玉米幼苗(V4期)的根系活力、生物量与养分累积量呈现先上升后下降趋势,

当石灰用量为 2.4 g/kg(土壤 pH=6.02)时,根系活力、生物量与养分累积量达到最高。若石灰用量超过 3.6 g/kg,土壤无机氮、有效磷、速效钾、交换性镁含量、酸性磷酸酶均显著降低;与此同时,玉米幼苗根系活力、生物量与养分累积量也显著下降,玉米幼苗生长受到抑制。结果表明施用石灰改良酸性(pH=3.91)土壤的适宜用量为 2.4 g/kg(折合大田用量约 5.2 t/hm²)。本研究可为酸性土壤改良提供科学参考。由于试验周期较短(仅考虑幼苗期),需进一步设置大田试验,探究该石灰用量对甜玉米生长后期及产量的影响,为土壤酸化改良提供更全面的评估。

参考文献 References

- [1] 赵其国, 孙波, 张桃林. 土壤质量与持续环境: I. 土壤质量的定义及评价方法[J]. 土壤, 1997(3): 113-120
Zhao Q G, Sun B, Zhang Y L. Soil quality and sustainable environment I. Definition and evaluation method of soil quality [J]. *Soils*, 1997(3): 113-120 (in Chinese)
- [2] Guo J H, Liu X J, Zhang Y, Shen J L, Han W X, Zhang W F, Christie P, Gouling K W, Vitousek P M, Zhang F S. Significant acidification in major Chinese croplands [J]. *Science*, 2010, 327(5968): 1008-1010
- [3] 孟远夺. 我国农田土壤酸化状况与治理措施探讨[J]. 中国农业推广, 2014, 30(6): 38-39
Meng Y D. Soil acidification status and control measures in farmland of China [J]. *China Agricultural Technology Extension*, 2014, 30(6): 38-39 (in Chinese)
- [4] 赵其国, 周健民. 为 21 世纪土壤科学的创新发展作出新的贡献: 参加第 17 届国际土壤学大会综述[J]. 土壤, 2002, 34(5): 237-256
Zhao Q G, Zhou J M. New contributions to the innovative development of soil science in the 21 st century: participating in the summary of the 17th international congress of soil sciences[J]. *Soils*, 2002, 34(5): 237-256 (in Chinese)
- [5] 徐仁扣, 李九玉, 周世伟, 徐明岗, 沈仁芳. 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, Xu M G, Shen R F. 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)
- [6] Rengel Z. *Handbook of Soil Acidity*[M]. Basel, New York, Marcel Dekker, Inc., 2003
- [7] Cai Z, Wang B, Xu M, Zhang H, He X, Zhang L, Gao S. Intensified soil acidification from chemical N fertilization and prevention by manure in an 18-year field experiment in the red soil of southern China[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2015, 15(2): 260-270
- [8] Zhu Q C, Liu X J, Hao T X, Zeng M F, Shen J B, Zhang F S, de Vries W. Cropland acidification increases risk of yield losses and food insecurity in China [J]. *Environmental Pollution*, 2020, 256: 113145
- [9] 鲁艳红, 廖育林, 聂军, 周兴, 谢坚, 杨曾平, 吴浩杰. 长期施用氮磷钾肥和石灰对红壤性水稻土酸性特征的影响[J]. 土壤学报, 2016, 53(1): 202-212
Lu Y H, Liao Y L, Nie J, Zhou X, Xie J, Yang Z P, Wu H J. Effect of long-term fertilization and lime application on soil acidity of reddish paddy soil [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2016, 53(1): 202-212 (in Chinese)
- [10] 樊廷录, 周广业, 王勇, 丁宁平, 高育锋, 王淑英. 甘肃省黄土高原旱地冬小麦-玉米轮作制长期定位施肥的增产效果[J]. 植物营养与肥料学报, 2004, 10(2): 127-131
Fan T L, Zhou G Y, Wang Y, Ding N P, Gao Y F, Wang S Y. Long-term fertilization on yield increase of winter wheat-maize rotation system in Loess Plateau dryland of Gansu[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2004, 10(2): 127-131 (in Chinese)
- [11] 蔡东, 肖文芳, 李国怀. 施用石灰改良酸性土壤的研究进展[J]. 中国农学通报, 2010, 26(9): 206-213
Cai D, Xiao W F, Li G H. Advance on study of liming on acid soils[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2010, 26(9): 206-213 (in Chinese)
- [12] Caires E F, Garbuio F J, Churka S, Barth G, Corrêa J C L. Effects of soil acidity amelioration by surface liming on no-till corn, soybean, and wheat root growth and yield[J]. *European Journal of Agronomy*, 2008, 28(1): 57-64
- [13] Tang C, Rengel Z, Diatloff E, Gazey C. Responses of wheat and barley to liming on a sandy soil with subsoil acidity[J]. *Field Crops Research*, 2003, 80(3): 235-244
- [14] Holland J E, White P J, Glendining M J, Gouling K W T, McGrath S P. Yield responses of arable crops to liming: an evaluation of relationships between yields and soil pH from a long-term liming experiment [J]. *European Journal of Agronomy*, 2019, 105: 176-188
- [15] Li G D, Conyers M K, Helyar K R, Poile G J, Cullis B R. Long-term surface application of lime ameliorates subsurface

- soil acidity in the mixed farming zone of south-eastern Australia[J]. *Geoderma*, 2019, 338: 236-246
- [16] 敖俊华, 黄振瑞, 江水, 邓海华, 陈顺, 李奇伟. 石灰施用对酸性土壤养分状况和甘蔗生长的影响[J]. 中国农学通报, 2010, 26(15): 266-269
- Ao J H, Huang Z R, Jiang Y, Deng H H, Chen S, Li Q W. Effects of applying lime on the properties of acid soil and the growth of sugarcane [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2010, 26(15): 266-269 (in Chinese)
- [17] Hati K M, Swarup A, Mishra B, Manna M C, Wanjari R H, Mandal K G, Misra A K. Impact of long-term application of fertilizer, manure and lime under intensive cropping on physical properties and organic carbon content of an Alfisol [J]. *Geoderma*, 2008, 148(2): 173-179.
- [18] 姜勇, 张玉革, 梁文举. 温室蔬菜栽培对土壤交换性盐基离子组成的影响[J]. 水土保持学报, 2005, 19(6): 78-81
- Jiang Y, Zhang Y G, Liang W J. Influence of greenhouse vegetable cultivation on composition of soil exchangeable base cations[J]. *Journal of Soil Water Conservation*, 2005, 19(6): 78-81 (in Chinese)
- [19] Haling R E, Simpson R J, Delhaize E, Hocking P J, Richardson A E. Effect of lime on root growth, morphology and the rhizosheath of cereal seedlings growing in an acid soil [J]. *Plant and Soil*, 2010, 327(2): 199-212
- [20] 刘培, 邵宇婷, 王志国, 唐艺玲, 王建武. 减氮对华南地区甜玉米//大豆间作系统产量稳定性的影响[J]. 中国生态农业学报, 2019, 27(9): 1332-1343
- Liu P, Shao Y T, Wang Z G, Tang Y L, Wang J W. Effect of nitrogen reduction on yield stability of sweet maize//soybean intercropping system in south China [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2019, 27(9): 1332-1343 (in Chinese)
- [21] 高磊, 李余良, 李武, 俞婷, 李高科, 李春艳, 胡建广. 不同施氮水平对南方甜玉米氮素吸收利用的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(5): 1215-1224
- Gao L, Li Y L, Li W, Yu T, Li G K, Li C Y, Hu J G. Effects of nitrogen application on yields and nitrogen use efficiency of sweet corn in south China [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2017, 23(5): 1215-1224 (in Chinese)
- [22] 颜晓军, 叶德练, 吴良泉, 孟祥明, 郑朝元, 许炜东, 张世昌. 优化施磷对华南酸性红壤区甜玉米产量、磷肥利用效率和碳排放的影响[J]. 中国农业大学学报, 2020, 25(11): 22-33
- Yan X J, Ye D L, Wu L Q, Meng X M, Zheng C Y, Xu W D, Zhang S C. Effects of optimal phosphorus application strategies on the yield, phosphorus use efficiency and carbon emission of sweet maize in acid red soil of South China [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2020, 25(11): 22-33 (in Chinese)
- [23] 彭王栋, 储诚兴, 钟雅清, 赖伟洪, 张海斌, 黄柳瑜, 石晓晓, 韦家亮. 甜玉米秸秆还田对土壤地力与产量、效益的影响[J]. 广东农业科学, 2015, 42(15): 25-30
- Peng W D, Chu C X, Zhong Y Q, Lai W H, Zhang H B, Huang L Y, Shi X X, Wei J L. Effects of returning to field of sweet corn straw on soil fertility, yield and benefit [J]. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2015, 42(15): 25-30 (in Chinese)
- [24] Kurtyka R, Ma? kowski E, Kita A, Karcz W. Effect of calcium and cadmium on growth and accumulation of cadmium, calcium, potassium and sodium in maize seedlings [J]. *Polish Journal of Environmental Studies*, 2008, 17(1): 51-56
- [25] 李翠兰, 李志洪, 张晋京, 崔俊涛, 杨文影. 不同肥料处理对玉米苗期根系生长的影响[J]. 吉林农业大学学报, 2001, 23(3): 87-89
- Li C L, Li Z H, Zhang J J, Cui J T, Yang W Y. Effects of fertilizer treatments on root growth of maize during seeding stage [J]. *Journal of Jilin Agricultural University*, 2001, 23(3): 87-89 (in Chinese)
- [26] Wang Y, Zhang X Y, Chen J, Chen A J, Wang L Y, Guo X Y, Niu Y L, Liu S R, Mi G H, Gao Q. Reducing basal nitrogen rate to improve maize seedling growth, water and nitrogen use efficiencies under drought stress by optimizing root morphology and distribution [J]. *Agricultural Water Management*, 2019, 212: 328-337.
- [27] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000
- Bao S D. *Soil and Agricultural Chemistry Analysis* [M]. Beijing: Chinese Agriculture Press, 2000 (in Chinese)
- [28] 胡敏, 向永生, 鲁剑巍. 石灰用量对酸性土壤酸度及大麦幼苗生长的影响[J]. 中国农业科学, 2016, 49(20): 3896-3903
- Hu M, Xiang Y S, Lu J W. Effects of lime application rates on soil acidity and barley seeding growth in acidic soils [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2016, 49(20): 3896-3903 (in Chinese)
- [29] 高俊凤. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006
- Gao J F. *Experimental Guidance for Plant Physiology* [M]. Beijing: Higher Education Press, 2006 (in Chinese)
- [30] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京: 农业出版社, 1986: 1-353
- Guan S Y. *Soil Enzyme and Research Methods for Soil*

- Enzyme[M]. Beijing: Agricultural Press, 1986: 1-353 (in Chinese)
- [31] 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, 1999: 1-638
- Lu R K. *Analytical Methods for Soil and Agricultural Chemistry* [M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 1999:1-638 (in Chinese)
- [32] 闫志浩, 胡志华, 王士超, 王士超, 槐圣昌, 武红亮, 王瑾瑜, 邢婷婷, 余喜初, 李大明, 卢昌艾. 石灰用量对水稻油菜轮作区土壤酸度、土壤养分及作物生长的影响[J]. 中国农业科学, 2019, 52(23): 4285-4295
- Yan Z H, Hu Z H, Wang S C, Huai S C, Wu H L, Wang J Y, Xing T T, Yu X C, Li D M, Lu C A. Effects of lime content on soil acidity, soil nutrients and crop growth in rice-rape rotation system[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2019, 52(23): 4285-4295 (in Chinese)
- [33] Zhang X, Long Y, Huang J J, Xia J X. Molecular mechanisms for coping with Al toxicity in plants [J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2019, 20(7): 1551-1553
- [34] Lauricella D, Butterly C R, Clark G J, Sale P W G, Li G D, Tang C X. Effectiveness of innovative organic amendments in acid soils depends on their ability to supply P and alleviate Al and Mn toxicity in plants[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2020, 20(11): 3951-3962
- [35] Blarney F P C, Nishizawa N K, Yoshimura E. Timing, magnitude, and location of initial soluble aluminum injuries to Mungbean roots [J]. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 2004, 50(1): 67-76
- [36] 郝鲁宁, 刘厚田. 铝对水稻幼苗的生理影响[J]. 植物学报, 1989, 31(11): 847-853
- Hao L N, Liu H T. Effects of aluminium on physiological functions of rice seedlings[J]. *Journal of Integrative Plant Biology*, 1989, 31(11): 847-853 (in Chinese)
- [37] 徐光泽, 席飞虎, 张重义. 施用生石灰对烤烟根际生物学特征及烟叶产质量的影响[J]. 江西农业学报, 2014, 26(7): 67-70
- Xu G Z, Xi F H, Zhang Z Y. Effects of using quick lime on biological characteristics of rhizospheric microorganisms of flue-cured tobacco, and yield and quality of tobacco leaves[J]. *Acta Agriculturae Jiangxi*, 2014, 26(7): 67-70 (in Chinese)
- [38] 邓小华, 黄杰, 杨丽丽, 陈金, 李源环, 田明慧, 周米良, 田峰, 张明发. 石灰、绿肥和生物有机肥协同改良酸性土壤并提高烟草生产效益[J]. 植物营养与肥料学报, 2019, 25(9): 1577-1587
- Deng X H, Huang J, Yang L L, Chen J, Li Y H, Tian M H, Zhou M L, Tian F, Zhang M F. The synergistic effect of lime, green manure and bio-organic fertilizer on restoration of acid field and improvement of tobacco production efficiency[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2019, 25(9): 1577-1587 (in Chinese)
- [39] 王涵, 王果, 黄颖颖, 陈璟, 陈妹妹. pH变化对酸性土壤酶活性的影响[J]. 生态环境, 2008, 17(6): 2401-2406
- Wang H, Wang G, Huang Y Y, Chen J, Chen M M. The effects of pH change on the activities of enzymes in an acid soil [J]. *Ecology and Environment*, 2008, 17(6): 2401-2406 (in Chinese)
- [40] 邓小华, 杨哲宇, 李玉辉, 刘勇军, 张明发, 周米良, 张瑶, 李源环. 施用改良剂对植烟土壤酶活性和养分含量的影响[J]. 烟草科技, 2019, 52(2): 33-39
- Deng X H, Yang Z Y, Li Y H, Liu Y J, Zhang M F, Zhou M L, Zhang Y, Li Y H. Effects of amendment application on enzyme activities and nutrient contents in tobacco-planting soils[J]. *Tobacco Science and Technology*, 2019, 52(02): 33-39 (in Chinese)
- [41] Bäckman J S K, Hermansson A, Tebbe C C, Lindgren P E. Liming induces growth of a diverse flora of ammonia-oxidising bacteria in acid spruce forest soil as determined by SSCP and DGGE[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2003, 35(10): 1337-1347
- [42] Souza R F, Faquin V, Ferreira Torres P R, et al. Liming and organic fertilizer: influence on phosphorus adsorption in soils [J]. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 2006, 30(6): 975-983
- [43] Li H X, Li Y X, Xu Y, Lu X Q. Biochar phosphorus fertilizer effects on soil phosphorus availability[J]. *Chemosphere*, 2020, 244: 125471
- [44] 于世举. 石灰改良酸性土壤的效果[J]. 现代农业科技, 2012(1): 278
- YU S J. The effect of lime on improving acid soil[J]. *Modern Agricultural Sciences and Technology*, 2012(1): 278 (in Chinese)
- [45] 易善军, 孙振元, 韩蕾, 巨关升, 钱永强. 植物耐碱机理及相关基因研究进展[J]. 世界林业研究, 2011, 24(1): 28-32
- Yi S J, Sun Z Y, Han L, Ju G S, Qian Y Q. Research advance on alkali-resistant mechanism of plants and related genes[J]. *World Forestry Research*, 2011, 24(1): 28-32 (in Chinese)
- [46] Ohno T, Grunes D L. Potassium magnesium interactions

- affecting nutrient uptake by wheat forage [J]. *Soil Science Society of America*, 1985, 49(3): 685-690
- [47] Li Y, Cui S, Chang S X, Zhang Q P. Liming effects on soil pH and crop yield depend on lime material type, application method and rate, and crop species; a global meta-analysis[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2019, 19(3): 1393-1406
- [48] 王志强, 王春丽, 林同保. 外源钙离子对小麦幼苗氮素代谢的影响[J]. *生态学报*, 2008, 28(8): 3662-3667
- Wang Z Q, Wang C L, Lin T B. Effects of exogenous Ca^{2+} on nitrogen metabolism in wheat seedlings [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(8): 3662-3667 (in Chinese)
- [49] 周卫, 林葆. 植物钙素营养机理研究进展[J]. *土壤学进展*, 1995, 23(2): 12-17
- Zhou W, Lin B. Research progress of plant calcium nutrition mechanism[J]. *Progress in Soil Science*, 1995, 23(2): 12-17 (in Chinese)
- [50] Amarasiri S L, Olsen S R. Liming as related to solubility of P and plant growth in an acid tropical soil [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1973, 37(5): 716-721
- [51] 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)
- [52] Elisal A A, Shamshuddin J, Che F I, Ishak C F, Ismail R. Increasing rice production using different lime sources on an acid sulphate soil in merbok, malaysia [J]. *Tropical Agricultural Science*, 2014, 37(2): 223-247
- [53] 张思文, 杨文浩, 童灵, 张雪, 苏达, 王正, 李学贤, 吴良泉. 施用石灰对果园酸性土壤镁吸附解吸特征的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2021(2): 23-31
- Zhang S W, Yang W H, Tong L, Zhang X, Su D, Wang Z, Li X X, Wu L Q. Effect of lime application on characteristics of magnesium adsorption-desorption in acid soil of orchard[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2021(2): 23-31 (in Chinese)

责任编辑: 杨爱东