

李 慧, 包雨婷, 张琳枝, 等. 秸秆与石灰配施改良红壤酸度的协同效应及其对玉米氮素利用的影响[J]. 江苏农业学报, 2025, 41(8): 1517-1525.

doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2025.08.008

秸秆与石灰配施改良红壤酸度的协同效应及其对玉米氮素利用的影响

李 慧, 包雨婷, 张琳枝, 王宁远, 代新俊

(忻州师范学院生物系, 山西 忻州 034000)

摘要: 本研究以郑单 958 为材料, 通过盆栽试验探究玉米秸秆与石灰配施对红壤理化性质及玉米生长发育的影响。试验采用双因素设计, 设置不同梯度玉米秸秆施用量(0、2%、4%、6%)和石灰施用量(0 g/kg、2 g/kg)。结果表明, 当石灰施用量相同, 随秸秆施用量的升高, 土壤交换性铝含量显著降低($P < 0.05$), 土壤交换性铝占比显著降低($P < 0.05$)。当秸秆施用量相同时, 秸秆配施石灰处理土壤交换性铝含量、交换性酸含量均显著低于单独施用秸秆处理($P < 0.05$), 表明秸秆与石灰配施对降低红壤酸度具有协同效应。当石灰施用量相同, 随着秸秆施用量的增加, 土壤有机质含量和土壤酶活性整体上呈上升趋势。秸秆施用量相同时, 秸秆配施石灰处理土壤铵态氮含量显著低于单独施用秸秆处理($P < 0.05$), 这可能是因为 pH 值升高促进了硝化微生物的活性, 使 NH_4^+ 转化为 NO_3^- 。双因素方差分析结果表明, 秸秆施用量与石灰施用量的交互效应对土壤 pH 值、交换性酸含量、交换性铝含量、交换性氢含量、铵态氮含量有极显著影响($P < 0.01$)。冗余分析结果表明, 土壤交换性铝含量与土壤酶活性及土壤养分含量呈负相关。本研究结果表明, 施用 4% 玉米秸秆 + 2 g/kg 石灰处理效果最好, 能够显著提高土壤 pH 值, 降低土壤交换性铝含量, 缓解铝离子对玉米根系的毒害作用, 同时促进玉米生长及其对氮素的吸收利用。本研究为红壤改良和玉米高效栽培提供了理论依据。

关键词: 玉米秸秆; 石灰; 红壤酸度特征; 土壤肥力; 玉米氮素吸收

中图分类号: S156.6 文献标识码: A 文章编号: 1000-4440(2025)08-1517-09

Synergistic effect of combined application of straw and lime on improving red soil acidity and its impact on nitrogen utilization in maize

LI Hui, BAO Yuting, ZHANG Linzhi, WANG Ningyuan, DAI Xinjun

(Department of Biology, Xinzhou Normal University, Xinzhou 034000, China)

Abstract: In this study, Zhengdan 958 was used as the material to explore the effects of combined application of corn straw and lime on the physical and chemical properties of red soil and the growth and development of corn through a pot experiment. A two-factor experimental design was adopted, with different gradients of corn straw application rates (0, 2%, 4%, 6%) and lime application rates (0 g/kg, 2 g/kg). The results showed that with the same lime application rate, the content of soil exchangeable aluminum and its proportion decreased significantly ($P < 0.05$) as the straw application rate increased. When the straw application rate was the same, the contents of soil exchangeable aluminum and exchangeable acid in the treatment of straw combined with lime were significantly lower than those in the treatment of straw alone ($P < 0.05$), indicating that the combined application of straw and lime had a synergistic effect

收稿日期: 2025-06-23

基金项目: 山西省基础研究计划项目(202103021223370、2024030-21222331); 山西省高等学校科技创新项目(2024L328); 忻州师范学院 1331 工程院级研究项目(2021KY13)

作者简介: 李 慧(1991-), 女, 山西晋中人, 博士, 讲师, 主要从事土壤肥力调控研究。(E-mail) 18735423170@163.com

通讯作者: 代新俊, (E-mail) 18335072301@163.com

in reducing red soil acidity. With the same lime application rate, soil organic matter content and soil enzyme activity showed an overall upward trend with the increase of straw application rate. At the same straw application rate, the content of soil ammonium nitrogen in the treatment of straw combined with lime was significantly lower than that in the treatment of straw alone ($P < 0.05$), which might be due to the increase of pH value promoting the activity of nitrifying microorganisms, leading to the conversion of NH_4^+ to NO_3^- . The results of two-way analysis of variance showed that the interaction effect of straw application rate and lime application rate had extremely significant effects ($P < 0.01$) on soil pH, exchangeable acid content, exchangeable aluminum content, exchangeable hydrogen content, and ammonium nitrogen content. Redundancy analysis results showed that soil exchangeable aluminum content was negatively correlated with soil enzyme activity and soil nutrient content. The results of this study demonstrated that the application of 4% corn straw + 2 g/kg lime had the best effect, which could significantly increase soil pH, reduce soil exchangeable aluminum content, alleviate the toxic effect of aluminum ions on corn roots, and promote corn growth and its absorption and utilization of nitrogen. This study provides a theoretical basis for red soil improvement and efficient corn cultivation.

Key words: corn straw; lime; red soil acidity characteristics; soil fertility; maize nitrogen absorption

红壤是中国南方农作区的典型土壤类型,在高温多雨气候条件下,土壤内部发生脱硅富铝化作用,致使土壤 pH 值降低、盐基离子流失、肥力下降^[1]。近年来,化肥的过量施用加剧了红壤酸化进程^[2]。红壤酸化过程中,土壤中 Al^{3+} 和 H^+ 富集,对作物根系产生毒害作用,抑制作物养分吸收和生长发育^[3]。同时 Al^{3+} 与盐基离子竞争土壤胶体表面的阳离子交换位点,加速钾、钠、钙、镁等营养元素的淋失,造成红壤肥力下降和生态环境退化^[4]。因此,探索有效的红壤酸化改良技术对保障农业可持续发展具有重要意义。

石灰是一种传统的土壤改良剂,可提高土壤 pH 值^[5-6]、提高养分有效性^[7]。然而,单一施用石灰存在肥力提升有限^[8]、土壤易复酸化^[9]、抑制微生物活性^[10]、破坏土壤结构^[11]等问题。而秸秆分解过程中会产生腐殖酸,能够缓解土壤酸化^[12]。此外,秸秆还田可促进养分循环利用,在提高土壤肥力的同时减少氮肥投入,从而间接延缓土壤酸化^[13-14]。

目前关于土壤改良的研究多集中于单一施用石灰或秸秆,但二者协同调控土壤酸化的机制尚不明确。为探究石灰与秸秆在改良土壤方面的协同增效作用,本研究拟设置双因素试验,系统分析石灰和玉米秸秆对酸化土壤改良的协同作用以及对玉米氮素吸收的影响,以期为土壤酸化改良和氮肥高效利用提供理论依据。

1 材料与amp;方法

1.1 试验材料

试验于 2023 年 10-11 月在忻州师范学院进行。

供试土壤采自中国科学院红壤生态实验站(28°13'N, 116°55'E) 0~20 cm 耕层农田。土壤基本理化性质为:pH 值 4.52,有机质含量 8.03 g/kg,全氮含量 1.01 g/kg,硝态氮含量 8.55 mg/kg,铵态氮含量 18.21 mg/kg,有效磷含量 10.56 mg/kg,速效钾含量 71.82 mg/kg。土壤经自然风干后剔除石砾及植物残体,过 2 mm 网筛备用。

供试玉米(*Zea mays* L.)品种为郑单 958。所用熟石灰纯度 $\geq 95\%$ (惠灰实业有限公司产品)。玉米秸秆粉碎后过 20 目网筛,粒径 ≤ 1 mm,其全氮含量 0.73%,全碳含量 40.63%。

1.2 试验设计

盆栽试验采用双因素完全随机设计,试验因素包括玉米秸秆施用量和石灰施用量。共设置 8 个处理,分别为未施用玉米秸秆和石灰(对照,CK)、施用 2 g/kg 石灰(S0L2)、施用 2%玉米秸秆(S2L0)、施用 2%玉米秸秆+2 g/kg 石灰(S2L2)、施用 4%玉米秸秆(S4L0)、施用 4%玉米秸秆+2 g/kg 石灰(S4L2)、施用 6%玉米秸秆(S6L0)、施用 6%玉米秸秆+2 g/kg 石灰(S6L2)。各处理玉米秸秆和石灰施用量均按照风干土质量百分比计算。每盆装风干土壤 2 kg,分别添加秸秆和石灰混匀,并统一施入氮肥(尿素,100 mg/kg)和磷钾肥(KH_2PO_4 ,100 mg/kg)作为基肥。所用塑料盆上口口径 24 cm,下口径 12.5 cm,高 15.5 cm。土壤含水量维持在 70%田间持水量。每盆播种 10 粒玉米种子,出苗后定苗至 4 株/盆。各处理设 3 次重复,定期统一浇水,保持管理措施一致。

1.3 试验方法

在玉米出苗后 45 d,将玉米植株从盆中取出,剔

除根系上附着的土壤,用剪刀将玉米地下部和地上部分分离,用去离子水冲洗干净后放入烘箱。105 °C 杀青 30 min,在 65 °C 烘箱中烘干至恒重。将烘干的玉米地下部和地上部粉碎。玉米株高用直尺测量,干物质重用电子天平测定,氮含量用凯氏定氮法测定,氮素吸收量=氮含量×干物质重量。

土壤 pH 利用 pH 计测定。土壤交换性酸(交换性铝和交换性氢)含量采用 KCl 交换-氢氧化钠中和滴定法测定。有机质含量采用重铬酸钾低温加热法测定。土壤全氮含量、硝态氮含量、铵态氮含量、有效磷含量、速效钾含量、脲酶活性、蔗糖酶活性和酸性磷酸酶活性依据《土壤农业化学分析方法》^[15]的方法测定。

1.4 数据分析

利用软件 Microsoft Excel 2010 进行图表绘制,利用软件 SPSS 19.0 进行统计分析,通过 Duncan's 多重比较法检验不同处理间土壤理化指标及玉米生长指标的差异显著性,并通过冗余分析(RDA)探究土壤酶活性与环境因子的关系。

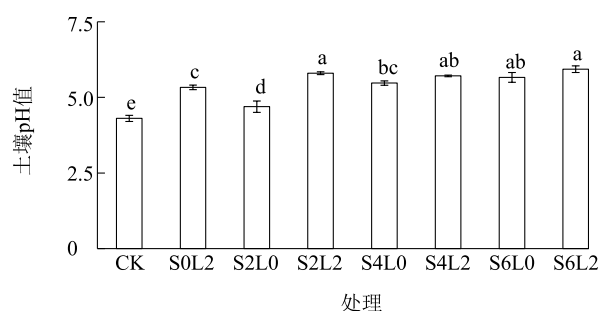
2 结果与分析

2.1 秸秆与石灰配施对土壤 pH 值的影响

如图 1 所示,S2L0 处理、S4L0 处理和 S6L0 处理土壤 pH 值均显著高于 CK ($P < 0.05$)。S2L2 处理、S4L2 处理和 S6L2 处理土壤 pH 值显著高于 S0L2 处理($P < 0.05$)。S0L2 处理土壤 pH 值显著高于 CK ($P < 0.05$),S2L2 处理土壤 pH 值显著高于 S2L0 处理($P < 0.05$)。S4L2 处理土壤 pH 值与 S4L0 处理无显著差异($P > 0.05$),S6L2 处理土壤 pH 值与 S6L0 处理无显著差异($P > 0.05$)。

2.2 秸秆与石灰配施对土壤交换性酸含量的影响

如图 2 所示,S0L2 处理、S2L0 处理、S2L2 处理、S4L0 处理、S4L2 处理、S6L0 处理、S6L2 处理土壤交换性氢含量显著高于 CK ($P < 0.05$)。与 CK 相比,S2L0 处理、S4L0 处理和 S6L0 处理土壤交换性铝含量分别显著降低 26.50%、52.88% 和 61.11% ($P < 0.05$),土壤交换性酸含量分别显著降低 9.26%、20.60% 和 22.42% ($P < 0.05$)。与 S0L2 处理相比,S2L2 处理、S4L2 处理和 S6L2 处理土壤交换性铝含量分别显著降低 30.83%、53.69% 和 82.91% ($P < 0.05$),土壤交换性酸含量分别显著降低 17.93%、23.75% 和 49.63% ($P < 0.05$)。表明施用秸秆可以



CK:未施用玉米秸秆和石灰(对照);S0L2:施用 2 g/kg 石灰;S2L0:施用 2% 玉米秸秆;S2L2:施用 2% 玉米秸秆+2 g/kg 石灰;S4L0:施用 4% 玉米秸秆;S4L2:施用 4% 玉米秸秆+2 g/kg 石灰;S6L0:施用 6% 玉米秸秆;S6L2:施用 6% 玉米秸秆+2 g/kg 石灰。各处理玉米秸秆和石灰施用量均按照风干土质量百分比计算。图柱上不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。

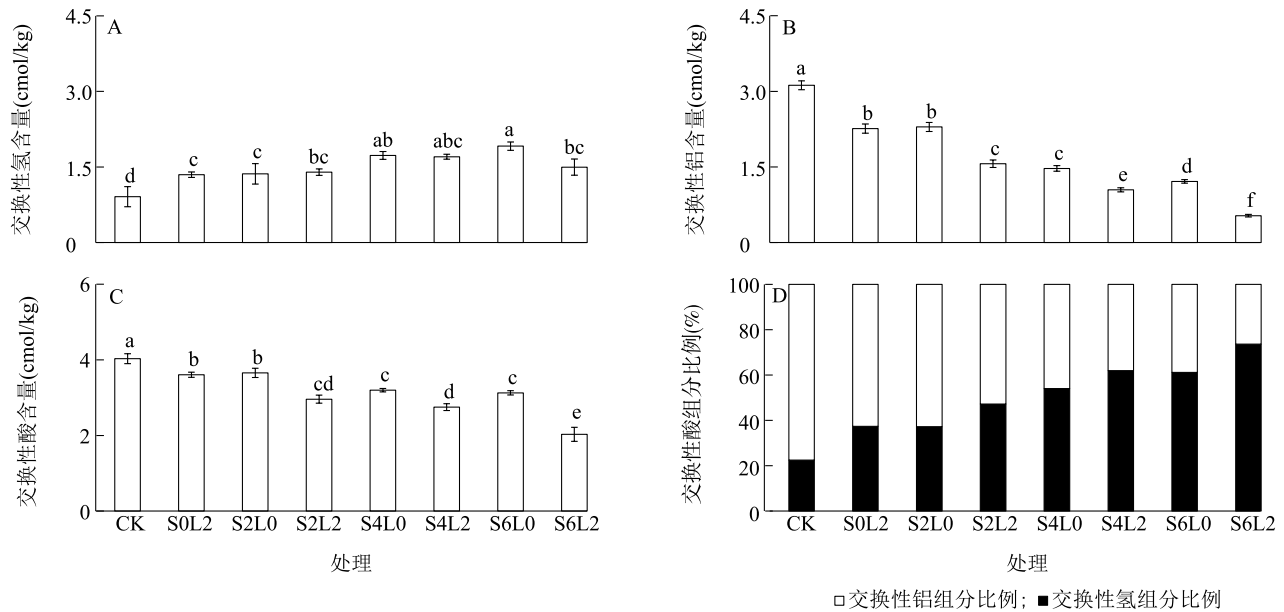
图 1 不同处理土壤 pH 值

Fig.1 Soil pH values under different treatments

降低土壤交换性铝和土壤交换性酸含量。CK 土壤交换性铝含量显著高于 S0L2 处理($P < 0.05$),S2L0 处理土壤交换性铝含量显著高于 S2L2 处理($P < 0.05$),S4L0 处理土壤交换性铝含量显著高于 S4L2 处理($P < 0.05$),S6L0 处理土壤交换性铝含量显著高于 S6L2 处理($P < 0.05$)。CK 土壤交换性酸含量显著高于 S0L2 处理($P < 0.05$),S2L0 处理土壤交换性酸含量显著高于 S2L2 处理($P < 0.05$),S4L0 处理土壤交换性酸含量显著高于 S4L2 处理($P < 0.05$),S6L0 处理土壤交换性酸含量显著高于 S6L2 处理($P < 0.05$)。表明添加石灰能显著降低土壤交换性酸含量。当石灰施用量相同时,随秸秆施用量的升高,土壤交换性铝占比降低,土壤交换性氢占比升高。如图 3 所示,随着土壤 pH 值的升高,土壤交换性铝含量显著降低($P < 0.05$)。

2.3 秸秆与石灰配施对土壤养分含量的影响

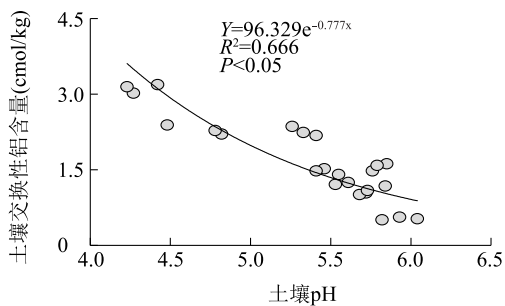
如图 4 所示,与 CK 相比,S4L2 处理土壤全氮含量显著提高 26.13% ($P < 0.05$)。S4L2 处理土壤有机质含量显著高于 S4L0 处理($P < 0.05$)。S0L2 处理土壤硝态氮含量显著高于 CK ($P < 0.05$)。S0L2 处理土壤铵态氮含量显著低于 CK ($P < 0.05$),S2L2 处理土壤铵态氮含量显著低于 S2L0 处理($P < 0.05$),S4L2 处理土壤铵态氮含量显著低于 S4L0 处理($P < 0.05$),S6L2 处理土壤铵态氮含量分别显著低于 S6L0 处理($P < 0.05$)。S0L2 处理、S2L0 处理、S2L2 处理、S4L0 处理、S4L2 处理、S6L0 处理、S6L2



CK: 未施用玉米秸秆和石灰(对照); S0L2: 施用 2 g/kg 石灰; S2L0: 施用 2% 玉米秸秆; S2L2: 施用 2% 玉米秸秆+2 g/kg 石灰; S4L0: 施用 4% 玉米秸秆; S4L2: 施用 4% 玉米秸秆+2 g/kg 石灰; S6L0: 施用 6% 玉米秸秆; S6L2: 施用 6% 玉米秸秆+2 g/kg 石灰。各处理玉米秸秆和石灰施用量均按照风干土质量百分比计算。图柱上不同小写字母表示差异显著($P < 0.05$)。

图 2 不同处理土壤交换性酸含量

Fig.2 Soil exchangeable acid content under different treatments



e 为指数拟合公式里的底数。

图 3 土壤交换性铝含量与土壤 pH 的线性关系

Fig.3 Linear relationship between soil exchangeable aluminum content and soil pH

处理土壤有效磷含量和速效钾含量无显著差异($P > 0.05$)。

2.4 秸秆与石灰配施对土壤酶活性的影响

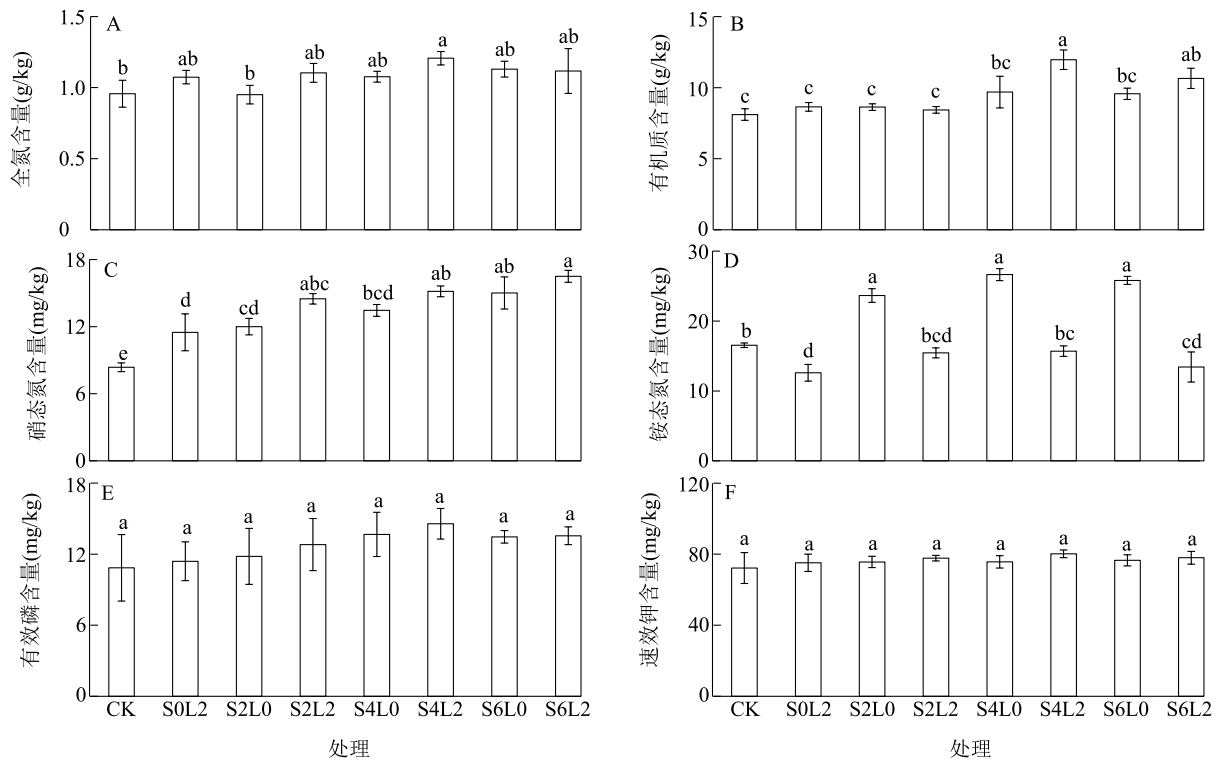
如图 5 所示, S4L0 处理、S4L2 处理、S6L0 处理、S6L2 处理土壤脲酶活性、蔗糖酶活性、酸性磷酸酶活性均显著高于 CK ($P < 0.05$)。与 CK 相比, S4L2 处理的土壤脲酶、蔗糖酶和酸性磷酸酶活性分别显著提高 108.33%、145.82% 和 130.01% ($P < 0.05$)。

2.5 秸秆与石灰配施对玉米生长和氮素吸收利用的影响

如图 6 所示, S0L2 处理玉米株高显著高于 CK ($P < 0.05$), S2L2 处理玉米株高显著高于 S2L0 处理 ($P < 0.05$), S4L2 处理玉米株高显著高于 S4L0 处理 ($P < 0.05$), S6L2 处理玉米株高显著高于 S6L0 处理 ($P < 0.05$)。S4L2 处理玉米株高、地下部干重显著高于 CK、S0L2 处理、S2L0 处理、S2L2 处理、S4L0 处理、S6L0 处理 ($P < 0.05$)。S4L2 处理玉米地上部干重和植株总干重显著高于 CK、S0L2 处理、S2L0 处理、S2L2 处理、S4L0 处理、S6L0 处理、S6L2 处理 ($P < 0.05$)。与 CK 相比, S4L2 处理玉米株高、地下部干重、地上部干重和植株总干重分别显著提高 38.42%、74.86%、96.78% 和 95.58% ($P < 0.05$)。如图 7 所示, S4L2 处理地下部氮素吸收量、地上部氮素吸收量和植株氮素吸收总量显著高于 CK ($P < 0.05$)。与 CK 相比, S4L2 处理植株氮素吸收总量显著提高 157.52% ($P < 0.05$)。

2.6 石灰和秸秆施用量对土壤酸度特征、养分含量和土壤酶活性的影响

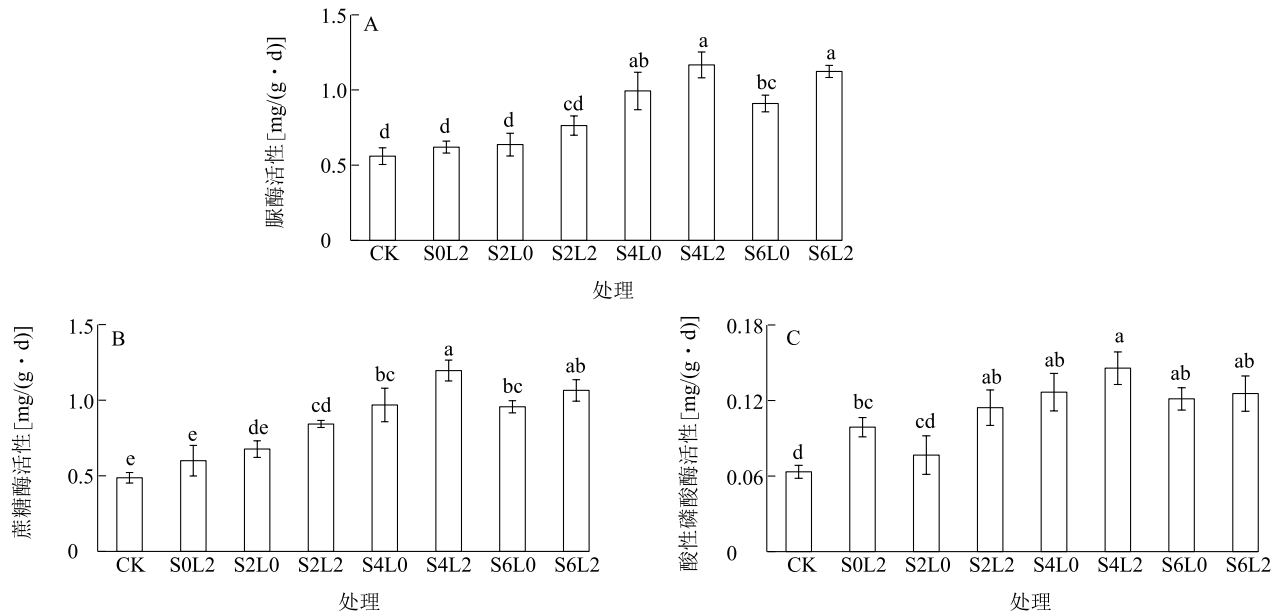
如表 1 所示, 秸秆施用量和石灰施用量分别



CK: 未施用玉米秸秆和石灰(对照); S0L2: 施用 2 g/kg 石灰; S2L0: 施用 2% 玉米秸秆; S2L2: 施用 2% 玉米秸秆+2 g/kg 石灰; S4L0: 施用 4% 玉米秸秆; S4L2: 施用 4% 玉米秸秆+2 g/kg 石灰; S6L0: 施用 6% 玉米秸秆; S6L2: 施用 6% 玉米秸秆+2 g/kg 石灰。各处理玉米秸秆和石灰施用量均按照风干土质量百分比计算。图柱上不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。

图 4 不同处理土壤养分含量

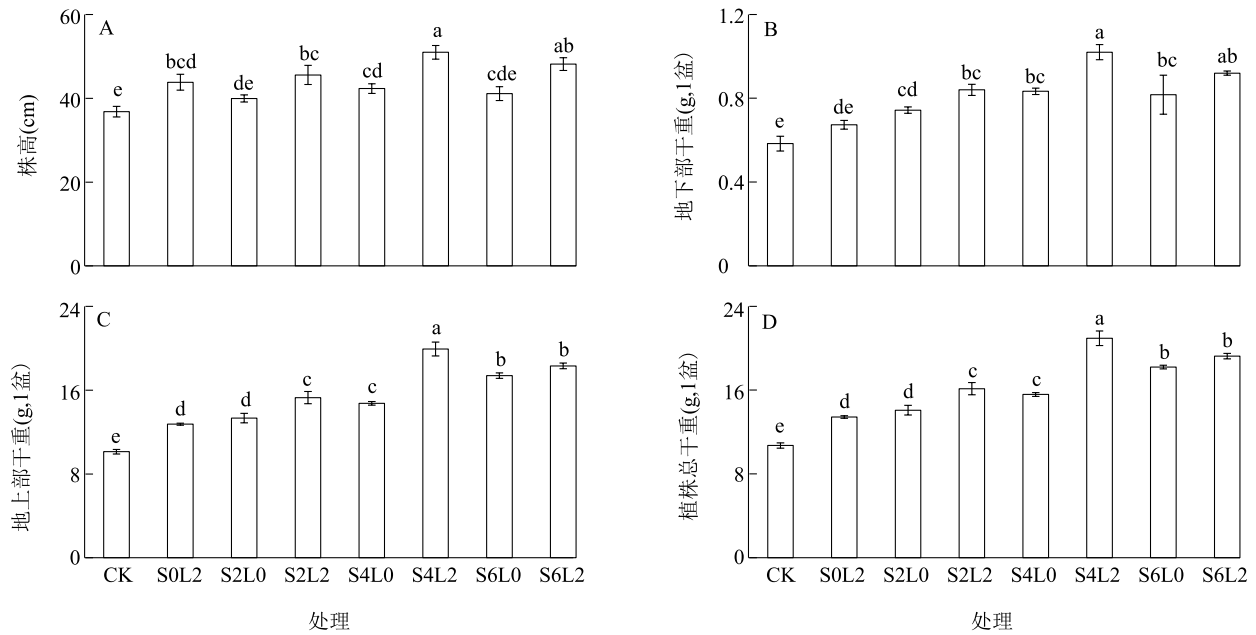
Fig.4 Soil nutrient contents under different treatments



CK: 未施用玉米秸秆和石灰(对照); S0L2: 施用 2 g/kg 石灰; S2L0: 施用 2% 玉米秸秆; S2L2: 施用 2% 玉米秸秆+2 g/kg 石灰; S4L0: 施用 4% 玉米秸秆; S4L2: 施用 4% 玉米秸秆+2 g/kg 石灰; S6L0: 施用 6% 玉米秸秆; S6L2: 施用 6% 玉米秸秆+2 g/kg 石灰。各处理玉米秸秆和石灰施用量均按照风干土质量百分比计算。图柱上不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。

图 5 不同处理土壤酶活性

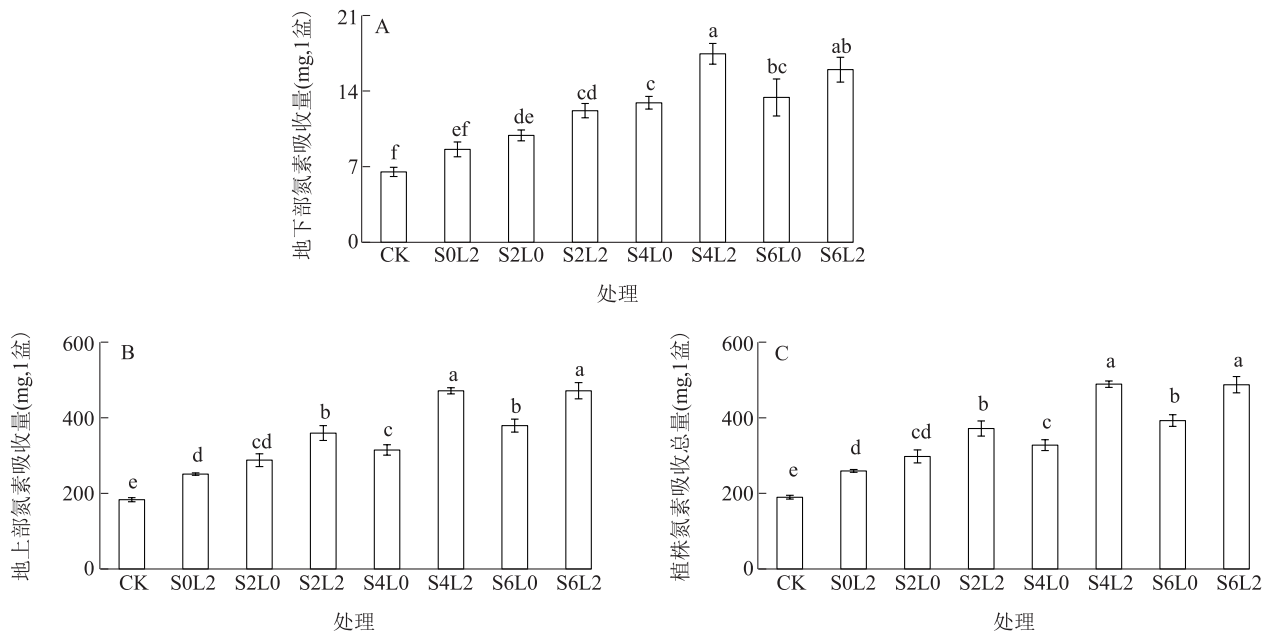
Fig.5 Soil enzyme activities under different treatments



CK:未施用玉米秸秆和石灰(对照);S0L2:施用2 g/kg 石灰;S2L0:施用2%玉米秸秆;S2L2:施用2%玉米秸秆+2 g/kg 石灰;S4L0:施用4%玉米秸秆;S4L2:施用4%玉米秸秆+2 g/kg 石灰;S6L0:施用6%玉米秸秆;S6L2:施用6%玉米秸秆+2 g/kg 石灰。各处理玉米秸秆和石灰施用量均按照风干土质量百分比计算。图柱上不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)。

图6 不同处理玉米生长发育情况

Fig.6 Growth and development of maize under different treatments



CK:未施用玉米秸秆和石灰(对照);S0L2:施用2 g/kg 石灰;S2L0:施用2%玉米秸秆;S2L2:施用2%玉米秸秆+2 g/kg 石灰;S4L0:施用4%玉米秸秆;S4L2:施用4%玉米秸秆+2 g/kg 石灰;S6L0:施用6%玉米秸秆;S6L2:施用6%玉米秸秆+2 g/kg 石灰。各处理玉米秸秆和石灰施用量均按照风干土质量百分比计算。图柱上不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)。

图7 不同处理玉米氮素吸收利用情况

Fig.7 Nitrogen uptake and utilization of maize under different treatments

对土壤 pH、交换性酸含量和土壤交换性铝含量有极显著影响 ($P < 0.01$)。秸秆施用量对土壤全氮含量有显著影响 ($P < 0.05$), 石灰施用量对土壤全氮含量有极显著影响 ($P < 0.01$)。秸秆施用量和石灰施用量分别对脲酶活性、蔗糖酶活性和酸性磷酸酶活性有极显著影响 ($P < 0.01$)。秸秆施用量和石灰施用量分别对土壤有机质含量、土壤硝态氮含量、土壤铵态氮含量有极显著影响 ($P < 0.01$)。秸秆施用量与石灰施用量的交互效应对土壤 pH 值、交换性酸含量、交换性铝含量、交换性氢含量、铵态氮含量有极显著影响 ($P < 0.01$), 对土壤有机质含量有显著影响 ($P < 0.05$)。

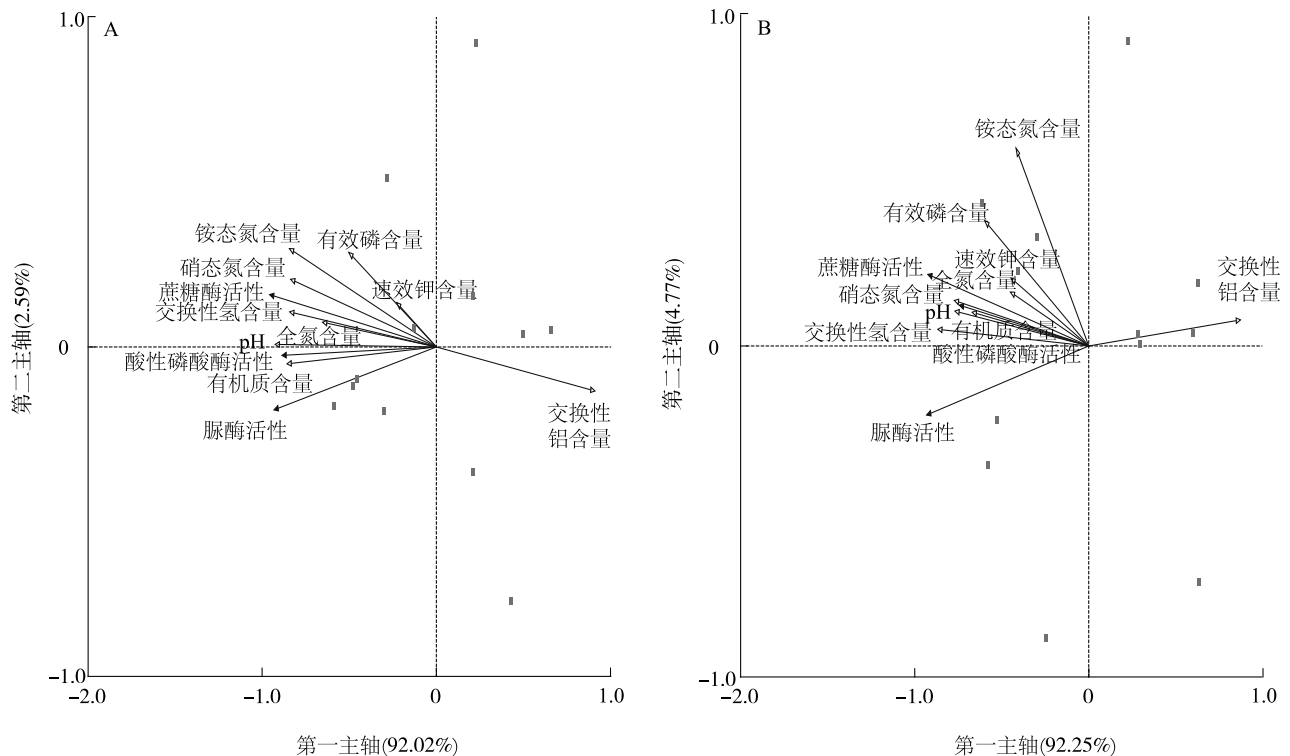
对土壤理化性质与土壤酶活性进行冗余分析。如图 8 所示, 土壤交换性铝含量与土壤酶活性及土壤养分含量呈负相关。未施用石灰时, 土壤 pH 值与土壤脲酶、蔗糖酶和酸性磷酸酶活性的相关性最强; 施用石灰时, 有机质含量与土壤脲酶、蔗糖酶和酸性磷酸酶活性的相关性最强。

表 1 石灰和秸秆施用量对土壤酸度特征、养分含量和土壤酶活性影响的双因素方差分析

Table 1 Two-way analysis of variance on the effects of lime and straw application rates on soil acidity characteristics, nutrient contents and soil enzyme activities

指标	主效应		交互效应
	秸秆施用量	石灰施用量	秸秆施用量×石灰施用量
土壤 pH 值	**	**	**
土壤交换性酸含量	**	**	**
土壤交换性铝含量	**	**	**
土壤交换性氢含量	NS	**	**
土壤全氮含量	*	**	NS
土壤有机质含量	**	**	*
土壤硝态氮含量	**	**	NS
土壤铵态氮含量	**	**	**
土壤有效磷含量	*	NS	NS
土壤速效钾含量	NS	NS	NS
土壤脲酶活性	**	**	NS
土壤蔗糖酶活性	**	**	NS
土壤酸性磷酸酶活性	**	**	NS

* 表示影响显著 ($P < 0.05$); ** 表示影响极显著 ($P < 0.01$); NS 表示无显著影响 ($P > 0.05$)。



A: 未施用石灰; B: 施用石灰。

图 8 土壤理化指标与土壤酶活性的冗余分析

Fig.8 Redundancy analysis of soil physical and chemical indices and soil enzyme activities

3 讨论

3.1 秸秆与石灰配施对红壤理化性质的影响

土壤交换性铝是土壤交换性酸的主要组分,当土壤 pH 值 <5.5 时,铝离子会释放到土壤中,对植物根系产生毒性,当土壤 pH 值 >5.5 ,土壤中铝离子含量保持在较低水平^[16-17]。本研究发现,S2L2 处理、S4L0 处理、S4L2 处理、S6L0 处理、S6L2 处理土壤 pH 值 >5.5 ,其土壤交换性铝含量显著低于 CK、S0L2 处理、S2L0 处理($P<0.05$)。表明石灰能够中和土壤酸性物质,降低土壤酸度^[18]。当石灰施用量相同,随秸秆施用量的升高,土壤交换性铝含量显著降低($P<0.05$),土壤交换性铝占比显著降低($P<0.05$),而土壤交换性氢占比显著升高($P<0.05$)。这是因为秸秆分解过程中会释放盐基离子(K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+}),盐基离子与红壤胶体表面的交换性酸(H^+ 、 Al^+)发生离子交换,促使交换性铝游离出来并与秸秆中的碱性物质发生酸碱中和反应,从而进一步降低土壤酸度^[19]。值得注意的是,秸秆施用量相同时,秸秆配施石灰处理土壤交换性铝含量、交换性酸含量均显著低于单独施用秸秆处理($P<0.05$),表明秸秆与石灰的配施具有协同效应。双因素方差分析结果表明,秸秆施用量与石灰施用量的交互效应对土壤 pH 值、交换性酸含量、交换性铝含量、交换性氢含量、铵态氮含量有极显著影响($P<0.01$)。

当石灰施用量相同,随着秸秆施用量的增加,土壤有机质含量和土壤酶活性整体上呈上升趋势。这可能是因为秸秆在分解过程中,产生有机质,增强微生物活性,而微生物活性的增强又进一步加速了养分的矿化,形成良性循环^[20-23]。值得注意的是,秸秆施用量相同时,秸秆配施石灰处理土壤铵态氮含量显著低于单独施用秸秆处理($P<0.05$),这可能是由于 pH 值升高促进了硝化微生物的活性,使 NH_4^+ 转化为 NO_3^- ^[24]。

3.2 秸秆与石灰配施对玉米生长和氮素吸收的影响

本研究结果表明,S2L2 处理、S4L0 处理、S4L2 处理、S6L0 处理、S6L2 处理土壤 pH 值 >5.5 ,其土壤交换性铝含量显著低于 CK、S0L2 处理、S2L0 处理($P<0.05$),玉米植株总干重显著高于 CK、S0L2 处理、S2L0 处理($P<0.05$),植株氮素总吸收量显著高于 CK、S0L2 处理、S2L0 处理($P<0.05$)。冗余分析结果表明,土壤交换性铝含量与土壤酶活性及土壤

养分含量呈负相关。值得注意的是,秸秆施用量相同时,秸秆配施石灰处理玉米株高和植株氮素吸收总量均显著高于单独施用秸秆处理($P<0.05$),表明秸秆与石灰的配施具有协同效应。这种协同效应可能源于:石灰快速中和土壤酸度,减轻交换性铝对植物的毒害作用;秸秆分解提供有机碳和盐基离子,改善土壤环境;秸秆与石灰协同提升硝化菌群活性,加速有机氮矿化和硝态氮供应。

4 结论

本研究基于盆栽试验,系统探究了秸秆与石灰配施对土壤理化性质和玉米生长发育的影响。结果表明,S4L2 处理(施用 4%玉米秸秆+2 g/kg 石灰)效果最好,不仅能够提高土壤 pH 值,使土壤交换性铝含量降低,从而避免铝离子对玉米根系的毒害作用,还能促进玉米生长及其对氮素的吸收利用。鉴于盆栽条件与大田环境存在温度、水分及微生物群落等差异,后续应开展田间试验进一步验证并优化该配施方案。

参考文献:

- [1] 李庆远. 中国红壤[M]. 北京:科学出版社,1983.
- [2] 徐仁扣. 土壤酸化及其调控研究进展[J]. 土壤,2015,47(2): 238-244.
- [3] BROWN T T, KOENIG R T, HUGGINS D R, et al. Lime effects on soil acidity, crop yield, and aluminum chemistry in direct-seeded cropping systems[J]. Soil Science Society of America Journal, 2008, 72(3): 634-640.
- [4] 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.
- [5] LITVINOVICH A, LAVRISHCHEV A, BURE V M. Comparative study of fertilization value and neutralizing power of lime materials of carbonate and silicate natures on plants of the families Gramineae, Brassicaceae, and Leguminosae [J]. Sustainability, 2024, 16(17): 7717.
- [6] 刘芳禧,方畅宇,庾振宇,等. 绿肥、秸秆和石灰联用对红壤性水稻土酸度特征和水稻产量的影响[J]. 土壤学报,2024,61(6): 1616-1627.
- [7] REGASA A, HAILE W, ABERA G. Effects of lime and vermicompost application on soil physicochemical properties and phosphorus availability in acidic soils[J]. Scientific Reports, 2025, 15: 25544.
- [8] CAI Z J, WANG B R, ZHANG L, et al. Striking a balance between N sources: mitigating soil acidification and accumulation of phosphorous and heavy metals from manure[J]. Science of the Total Environment, 2021, 754: 142189.
- [9] 丁志峰. 浙西橘园土壤酸化、石灰需求量及石灰施用改良效果

- 研究[D]. 杭州:浙江大学,2023.
- [10] 杨金婕. 外源物质添加对山西太岳山油松林土壤微生物群落结构及其功能的调控作用[D]. 北京:北京林业大学,2023.
- [11] 刘娇娟,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.
- [12] 赵其国,黄国勤,马艳芹. 中国南方红壤生态系统面临的问题及对策[J]. 生态学报,2013,33(24):7615-7622.
- [13] XIE L, WANG X J. Effects of equivalent substitution of chemical nitrogen fertilizer with straw-derived nitrogen on water consumption characteristics of maize stages[J]. *Agronomy-Basel*,2025,15(3):527.
- [14] 孔培君,郑 洁,栾 璐,等. 不同秸秆还田方式对旱地红壤细菌群落、有机碳矿化及玉米产量的影响[J]. 环境科学,2021,42(12):6047-6057.
- [15] 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.
- [16] VON UEXKÜLL H R, MUTERT E. Global extent, development and economic impact of acid soils[J]. *Plant and Soil*,1995,171(1):1-15.
- [17] CHEN R F, ZHANG F L, ZHANG Q M, et al. Aluminium-phosphorus interactions in plants growing on acid soils: does phosphorus always alleviate aluminium toxicity? [J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*,2012,92(5):995-1000.
- [18] 易 琼,杨少海,黄巧义,等. 改良剂对反酸田土壤性质与水稻产量的影响[J]. 土壤学报,2014,51(1):176-183.
- [19] WANG H X, XU J L, LIU X J, et al. Effects of long-term application of organic fertilizer on improving organic matter content and retarding acidity in red soil from China [J]. *Soil and Tillage Research*,2019,195:104382.
- [20] 王理德,王方琳,郭春秀,等. 土壤酶学研究进展[J]. 土壤,2016,48(1):12-21.
- [21] 季诗域. 稻麦轮作制度下不同比例秸秆化肥配施对土壤碳库、土壤酶活性和小麦产量的影响[D]. 杭州:浙江农林大学,2021.
- [22] 卢 闯. 玉米秸秆隔层对土壤溶液盐浓度与离子运动的影响[D]. 北京:中国农业科学院,2017.
- [23] 张廷光,王达群,严 洪,等. 秸秆还田化肥减量对水稻产量及土壤肥力的影响[J]. 耕作与栽培,2015,35(6):38-40.
- [24] 陈诗轩. 生物炭对石灰性农田土壤反硝化过程 N_2O 排放的影响[D]. 太原:太原理工大学,2021.

(责任编辑:成纾寒)