

酸土修复材料在漠沙酸化坡耕地玉米产能提升中的示范应用

朱选成¹, 刀正良², 丁建文¹, 普海芳¹

¹新平彝族傣族自治县漠沙镇农业农村发展服务中心, 云南 新平

²新平彝族傣族自治县种植业发展服务中心, 云南 新平

收稿日期: 2026年6月7日; 录用日期: 2026年7月8日; 发布日期: 2026年7月15日

摘 要

为探明酸土修复材料对滇南酸化坡耕地玉米产能的提升效果, 2025年在新平彝族傣族自治县漠沙镇胜利村开展田间示范试验。以先正达901为供试品种, 设常规种植(CK)、商品酸土调理剂(T1)和自主研发酸土修复材料(T2)3个处理, 比较各处理对土壤理化性状、玉米农艺性状及产量的影响。结果表明: T2处理折亩产581.82 kg, 较CK增产5.72%, 土壤pH由4.62提升至4.94, 速效磷含量显著提高; T1处理折亩产497.17 kg, 较CK减产9.67%, 土壤改良效果亦不理想。自主研发酸土修复材料在本地区酸化坡耕地上具有较好的适应性和增产效果, 具有推广应用价值。

关键词

土壤酸化, 酸土修复材料, 产能提升, 玉米, 坡耕地

Demonstration Application of Acid Soil Remediation Materials for Improving Maize Productivity on Acidified Sloping Farmland in Mosa Town

Xuancheng Zhu¹, Zhengliang Dao², Jianwen Ding¹, Haifang Pu¹

¹Agricultural and Rural Development Service Center of Mosa Town, Xinping Yi and Dai Autonomous County, Xinping Yunnan

²Crop Production Development Service Center of Xinping Yi and Dai Autonomous County, Xinping Yunnan

Received: June 7, 2026; accepted: July 8, 2026; published: July 15, 2026

文章引用: 朱选成, 刀正良, 丁建文, 普海芳. 酸土修复材料在漠沙酸化坡耕地玉米产能提升中的示范应用[J]. 农业科学, 2026, 16(7): 1041-1046. DOI: 10.12677/hjas.2026.167126

Abstract

To investigate the effects of acid soil remediation materials on improving maize productivity in acidified sloping farmland in southern Yunnan, a field demonstration experiment was conducted in Shengli Village, Mosa Town, Xiping Yi and Dai Autonomous County, in 2025. The maize variety Syngenta 901 was used as the test material. Three treatments were established: conventional cultivation (CK), a commercial acid soil conditioner (T1), and a self-developed acid soil remediation material (T2). The effects of different treatments on soil physicochemical properties, maize agronomic traits, and yield were compared. The results showed that the yield of T2 reached 581.82 kg per mu, representing an increase of 5.72% compared with CK. Soil pH increased from 4.62 to 4.94, and available phosphorus content was significantly improved. In contrast, the yield of T1 was 497.17 kg per mu, which was 9.67% lower than that of CK, and its soil improvement effect was also unsatisfactory. The self-developed acid soil remediation material showed good adaptability and yield-increasing effects on acidified sloping farmland in this region, indicating its potential for further extension and application.

Keywords

Soil Acidification, Acid Soil Remediation Material, Productivity Improvement, Maize, Sloping Farmland

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

土壤酸化是全球性的耕地退化问题,在我国南方红壤区尤为突出。受高温多雨的强烈淋溶与长期过量施用氮肥的共同驱动,土壤盐基离子大量淋失、活性铝锰毒性增强、pH 持续下降,已成为制约粮食生产、威胁土壤健康的重要障碍因子[1];若氮肥投入维持现有增速,我国主要粮田 pH 可能再下降约 1 个单位,导致相对产量损失增加 4%~24% [2]。西南丘陵山地作为我国第三大玉米产区,区域内坡耕地受成土母质、强烈淋溶与偏施氮肥的叠加影响,酸化尤为严峻,红壤 pH 多降至 4.5~6.0,其中偏施氮肥与强烈淋溶为主控因素、土壤钙与黏粒含量是关键影响因子,Ca 的贡献率可达 79% [3]。土壤酸化加剧活性铝对根系的毒害,当 pH 降至 5.0 以下时玉米出苗率与根系生长明显受抑[3],直接威胁滇南酸化坡耕地的玉米产能;因此,筛选高效、适配的酸化阻控材料对保障区域玉米生产具有重要意义。

针对酸化耕地治理,国内外已系统研究了石灰、生物炭、有机肥等多种改良材料及其作用机制[4]。施用石灰是最常用的降酸措施,其碱性组分可迅速中和 H^+ 、补充交换性钙镁、降低交换性铝,但大量或长期施用易破坏土壤结构、造成板结甚至引发“复酸化” [4];生物炭因富含碳酸盐、无机碱与含氧官能团,可直接中和 H^+ 并通过提高土壤 pH 缓冲容量和阳离子交换量实现持久降酸,同时将毒性最强的交换性 Al^{3+} 向低毒羟基铝转化以缓解铝毒、改善微生物群落与养分有效性[4] [5]。多项田间与 Meta 分析研究证实,石灰、生物炭和有机肥对酸化土壤 pH 提升与作物增产总体有效,并呈现石灰见效最快、生物炭最稳定、有机肥兼具培肥功能的特征,其改良效果随土壤初始酸度、质地、气候及施用量、施用方式的不同而差异显著[6] [7];就玉米而言,方煜等在云南德宏酸性土壤上配施石灰与生物炭显著提升了土壤 pH 与籽粒产量[8],代新俊等亦证实生物炭配施石灰可降低红壤交换性铝、促进玉米氮素吸收[9]。然而,已

有研究在区域、土壤类型与施用方式上覆盖并不均衡：田间研究多集中于黄壤、水稻土及砖红壤，针对滇南强酸性红壤坡耕地、在示范尺度下开展的玉米产能提升研究相对薄弱；尤其是不同来源商品酸土调理剂在本地土壤条件下的适配性仍缺乏系统田间验证，盲目引进推广存在改良失效甚至减产的风险。

基于此，本研究依托国家重点研发计划项目，在新平彝族傣族自治县漠沙镇酸化坡耕地开展玉米田间示范试验，比较商品酸土调理剂与自主研发酸土修复材料对土壤理化性状及玉米产量的改良效果，旨在筛选适宜本地推广的酸化阻控产品，为滇南同类中低产田改良与玉米产能提升提供科学依据。

2. 材料与方法

2.1. 试验地点与土壤基本情况

试验地点位于云南省新平彝族傣族自治县漠沙镇胜利村委会利居小组，海拔 1672 m~1681 m，属南亚热带季风气候，年均气温 21℃~23℃，年降雨量约 1100 mm。供试地块为典型坡耕地，坡度约 10°，土壤类型为红壤，土层厚 40 cm~60 cm，耕层土壤 pH 为 4.57~4.63 (强酸性)，有机质含量 19.72~31.27 g/kg，容重 1.19 g/cm³，土壤保肥能力较弱，代表漠沙镇玉米产区酸化耕地的典型状况。

2.2. 供试品种与改良材料

供试玉米品种为先正达 901，该品种耐密性较强，适应性广，为当地主栽品种。

供试改良材料共两类。一是贵州商品酸土调理剂(T1 处理)，由贵阳开磷化肥有限公司生产，登记证号：农肥(2018)准字 8745 号，产品主要成分为：氧化钙(CaO)≥40.0%、氧化镁(MgO)≥2.0%、二氧化硅(SiO₂)≥25.0%，产品 pH 值 8.5~10.5，施用量为 50 kg/亩。二是自主研发的酸土修复材料(T2 处理)，产品 pH 值 8.0~11，主要含碳、硅、钙、镁、钼等活性成分(配方已申请专利保护)，施用量为 100 kg/亩。两种材料均于播种前 7~10 d 均匀撒施并翻耕混合入耕层。

2.3. 试验设计

试验设 3 个处理：常规种植(CK)、商品酸土调理剂(T1)、自主研发酸土修复材料(T2)。各处理测产小区面积：CK 为 105.29 m²，T1 为 114.66 m²，T2 为 109.39 m²。各处理在同一地块连续布置，土壤基础条件基本一致，播种前(始)及收获后(末)各采集耕层土样进行理化指标检测。

2.4. 栽培管理

各处理栽培管理措施统一，示范田于 2025 年 5 月 22 日播种，采用等行距规格化种植，株行距 40 cm × 80 cm，种植密度 4000 株/亩，每穴留苗 2 株。施肥方案：底肥施复合肥(N-P₂O₅-K₂O = 15-15-15) 40 kg/亩，提苗期追施尿素 10 kg/亩，穗肥追施尿素 20 kg/亩，全生育期亩施纯氮 20 kg。病虫害防治于 5 叶期、8 叶期、12 叶期用戊唑醇、丙环唑、甲维盐、高效氯氟氰菊酯等药剂进行统防统治。

2.5. 调查项目与测产方法

主要调查项目包括：播种前后耕层土壤理化指标(pH、有机质、容重、水解氮、速效磷、速效钾)；物候期(播种期、出苗期、抽雄期、吐丝期、成熟期及生育天数)；主要农艺性状(株高、穗位高、穗长、穗粗、秃尖长、穗行数、百粒重、出籽率)，各指标均取 10 株均值。2025 年 11 月 6 日，由新平县农业农村局组织专家组实地测产验收，按照云南省农业技术推广总站印发的《云南省主要粮油作物测产工作方案》执行，每处理选取代表性田块各 2 块，每块测产面积 50 m²，实收计重后折算亩产量(含水量 14% 标准)。

3. 结果与分析

3.1. 不同处理对土壤理化性状的影响

各处理播种前后土壤理化指标见表 1。由表 1 可见, 3 个处理播种前土壤 pH 均处于强酸性水平 (4.57~4.63), 收获后各处理 pH 均有不同程度提升。CK 末 pH 为 4.97, 提升 0.34 个单位; T2 末 pH 为 4.94, 提升 0.32 个单位, 与 CK 相近; T1 末 pH 仅为 4.80, 提升幅度最小(0.23 个单位), 说明商品酸土调理剂在本地区对土壤 pH 的改良效果不及预期。有机质方面, T2 (28.52 g/kg)高于 T1 (19.72 g/kg), 但低于 CK (31.27 g/kg)。速效磷方面, T2 (123.1 mg/kg)显著高于 CK (67.3 mg/kg)和 T1 (80.9 mg/kg), 说明 T2 处理的钙、硅等成分有助于改善土壤磷素有效性。容重方面, T2 (1.13 g/cm³)略低于 CK 和 T1 (均为 1.19 g/cm³), 表明 T2 处理对改善土壤物理结构有一定作用。

Table 1. Soil physicochemical properties before and after sowing under different treatments
表 1. 各处理播种前后土壤理化指标

处理	始 pH	末 pH	pH 变化	容重(g/cm ³)	有机质(g/kg)	水解氮(mg/kg)	速效磷(mg/kg)	速效钾(mg/kg)
CK	4.63	4.97	+0.34	1.19	31.27	138	67.3	139.5
T1	4.57	4.80	+0.23	1.19	19.72	106	80.9	84.7
T2	4.62	4.94	+0.32	1.13	28.52	143	123.1	62.7

注: 各指标数值为播种前后 2 次采样均值; pH 变化 = 末 pH - 始 pH。

3.2. 不同处理玉米产量比较

各处理实收测产结果见表 2。由表 2 可见, T2 折亩产 581.82 kg, 较 CK (550.34 kg)增产 31.48 kg, 增幅 5.72%; T1 折亩产仅 497.17 kg, 较 CK 减产 53.17 kg, 减幅 9.67%, 产量表现最差, 说明商品酸土调理剂在本地区土壤条件下适应性不佳, 产生了明显负效应。

Table 2. Measured maize yield under different treatments
表 2. 不同处理玉米实收测产结果

处理	测产面积(m ²)	实收产量(kg)	折亩产(kg)	较 CK 增减(kg)	增减幅(%)
CK	105.29	87.05	550.34	—	—
T1	114.66	85.50	497.17	-53.17	-9.67
T2	109.39	95.35	581.82	+31.48	+5.72

3.3. 主要农艺性状表现

Table 3. Main agronomic and ear traits of maize under different treatments
表 3. 各处理玉米主要农艺性状及穗部性状

处理	株高(cm)	穗位高(cm)	穗长(cm)	穗粗(cm)	秃尖(cm)	穗行数(行)	百粒重(g)	出籽率(%)
CK	217.6	87.2	16.84	4.90	0.60	14.9	31.37	80.49
T1	216.0	82.8	17.66	4.98	1.21	14.7	29.50	80.64
T2	221.7	94.2	20.00	4.78	1.34	14.0	30.23	81.87

各处理主要农艺性状及穗部性状见表 3。从植株性状看，T2 处理株高(221.7 cm)和穗位高(94.2 cm)均高于 CK (217.6 cm、87.2 cm)和 T1 (216.0 cm、82.8 cm)，说明自主研发酸土修复材料对植株营养生长有一定促进作用。从穗部性状看，T2 穗长最长(20.00 cm)，较 CK 增加 3.16 cm；T1 穗长(17.66 cm)略高于 CK (16.84 cm)。秃尖长 CK 最短(0.60 cm)，T1 (1.21 cm)和 T2 (1.34 cm)均有所增加。百粒重 CK 最高(31.37 g)，T2 为 30.23 g，T1 最低(29.50 g)；出籽率 T2 最高(81.87%)，T1 (80.64%)与 CK (80.49%)相近。综合来看，T2 在穗长和出籽率上表现最优，T1 各项穗部指标整体偏弱，与其产量结果相互印证。

3.4. 生育期记载

各处理玉米生育期记载见表 4。三个处理生育进程完全一致，全生育期均为 141 d，属中晚熟类型，与先正达 901 品种常年表现相符，说明不同改良材料的施用未对玉米物候期产生明显影响。

Table 4. Growth stages of maize under different treatments
表 4. 各处理玉米生育期

处理	播种期	出苗期	抽雄期	吐丝期	成熟期	生育期(天)
CK	22/5	28/5	6/8	11/8	20/10	141
T1	22/5	28/5	6/8	11/8	20/10	141
T2	22/5	28/5	6/8	11/8	20/10	141

4. 讨论

将本研究自主研发酸土修复材料(T2，施用量 100 kg/亩，约 1500 kg/hm²)的改良效果置于同类研究中横向比较，可更客观地评价其作用强度。pH 提升方面，T2 使土壤 pH 由 4.62 升至 4.94，提升 0.32 个单位(约 6.9%)，按相对幅度计与生物炭类改良剂的 Meta 均值(夏良文等 4.20% [6]、曾琪等 4.4% [7])相当，但低于石灰类的平均水平(14.30% [6]、9.1% [7])。若以 pH 绝对升幅计，差距更为明显：方煜等在云南德宏同类酸性土壤大田上配施石灰与生物炭，pH 提升达 1.13~1.44 个单位[8]，代新俊等盆栽配施使红壤 pH 提升 0.43~1.60 个单位[9]，均显著高于本研究 T2。

产量效应方面，T2 较 CK 增产 5.72%，处于偏温和水平。与初始 pH 接近(4.68)、同为云南大田玉米的方煜等研究相比，其石灰与生物炭配施处理增产达 18.13%~39.31% [8]；夏良文等 Meta 分析中石灰、有机肥的平均增产率亦分别高达 29.34%和 24.17% [6]。代新俊等与方书琴等的盆栽试验虽未测定籽粒产量，但分别显示配施处理可使玉米氮素吸收总量提高 116.39% [9]、小麦地上部生物量与养分吸收显著增加[10]，提示改良材料的增产潜力需配合适宜施用量与配施措施方能充分释放。

本研究 T2 改良效果相对温和，主要可从三方面解释：其一，施用量偏低，文献中效果显著者施用量普遍较大，如方煜等石灰 4500 kg/hm² 加生物炭 15,000~30,000 kg/hm² [8]、代新俊等生物炭达 2%~6%质量分数[9]，均为本研究 T2 (约 1500 kg/hm²)的数倍乃至十余倍；其二，技术路线单一，T2 为单一化学调理剂，而增产显著的研究多采用石灰、生物炭与有机肥的协同配施[6][8][9]，多措施叠加方能兼顾降酸、培肥与结构改善；其三，供试土壤初始 pH 仅 4.62、酸化程度深，且本试验为单季示范，强酸性红壤缓冲容量大，pH 与产量在单季内的响应尚不充分，曾琪等亦指出碱性物料的降酸效应在施用初期(≤0.25 年)虽最强，但石灰对微生物量碳和多样性的提升需 1 年以上乃至长期施用才趋于显著[7]。上述限制提示，不宜据单季数据高估材料的长期改良潜力。

商品酸土调理剂(T1)处理 pH 仅提升 0.23 个单位、并较 CK 减产 9.67%，这一结果与改良材料效果高度依赖土壤类型和本地适配性的普遍规律一致。文献反复表明，改良剂的降酸增产效果随土壤初始 pH、

质地、气候及施用条件不同而差异显著[6][7], 外来商品材料若未经本地化田间验证而直接推广, 易因配方与本地红壤矿物组成、缓冲容量不匹配而引发 pH 局部骤升、磷素固定加重或微量元素失衡等负面效应。因此, 本研究结果进一步印证: 在引进和推广外来商品酸土调理剂前, 必须开展充分的本地化田间适应性试验, 不可盲目套用。

5. 结论

(1) 自主研发酸土修复材料(T2)对漠沙镇酸化坡耕地具有较好的改良效果, 施用后土壤 pH 由 4.62 提升至 4.94, 速效磷含量显著提高, 容重有所降低, 玉米折亩产 581.82 kg, 较常规种植(CK)增产 5.72%, 具有较好的区域适应性, 建议在漠沙镇及滇南同类酸化坡耕地进一步推广。

(2) 商品酸土调理剂(T1)在本地区土壤条件下产生了明显减产效应(-9.67%), 土壤 pH 提升幅度仅为 0.23 个单位, 有机质、水解氮和速效钾含量均低于 CK, 说明该产品与本地红壤适配性较差, 不宜在本地区直接推广应用。

(3) 3 个处理全生育期均为 141 d, 物候期完全一致, 说明酸土修复材料的施用未对玉米生育进程产生影响, 处理间产量差异主要源于土壤改良效果对植株营养吸收和籽粒灌浆充实的影响。

参考文献

- [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.
- [2] Zhu, Q., Liu, X., Hao, T., Zeng, M., Shen, J., Zhang, F., *et al.* (2020) Cropland Acidification Increases Risk of Yield Losses and Food Insecurity in China. *Environmental Pollution*, **256**, Article ID: 113145. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.113145>
- [3] 刘禹池, 杨勤, 岳丽杰, 等. 西南丘陵山地玉米农田土壤障碍研究进展[J]. 耕作与栽培, 2022, 42(4): 54-60.
- [4] 胡仁, 龙巧玲, 王力敏, 等. 生物炭对酸性土壤改良效果及机制的研究进展[J]. 华中农业大学学报, 2025, 44(4): 11-21.
- [5] 黄宝源, 邓兰生, 邓丽芳, 等. 生物炭调理酸化土壤的作用机制[J]. 土壤与作物, 2024, 13(1): 74-84.
- [6] 夏良文, 李丹丹, 李建华, 等. 生物炭、石灰和有机肥对土壤酸化的防控效果及其适宜条件的 Meta 分析[J]. 植物营养与肥料学报, 2025, 31(12): 2383-2398.
- [7] 曾琪, 李丹丹, 蔡泽江, 等. 石灰和生物炭对酸化土壤 pH 与微生物性质影响的 Meta 分析[J]. 应用生态学报, 2026, 37(1): 103-114.
- [8] 方煜, 黄凯, 杨京民, 等. 石灰、生物炭对酸性土壤改良及玉米生长的影响[J]. 江西农业学报, 2022, 34(4): 80-87.
- [9] 代新俊, 张琳枝, 包雨婷, 等. 生物炭配施石灰对红壤酸度特征及玉米氮素吸收的影响[J]. 云南农业大学学报(自然科学), 2026, 41(2): 166-175.
- [10] 方书琴, 卜爱爱, 胡娟欣, 等. 石灰单施与生物炭配施对复耕土壤质量和小麦生长的影响[J]. 安徽农学通报, 2024, 30(21): 1-7.