

增强硅灰石风化对两种酸性红壤固碳效应及养分有效性的影响

贾容翔^{1,2,3}

¹云南师范大学地理学部, 云南 昆明

²高原地理过程与环境变化云南省重点实验室, 云南 昆明

³西南联合研究生院, 云南 昆明

收稿日期: 2026年3月30日; 录用日期: 2026年5月1日; 发布日期: 2026年7月2日

摘要

为了明确硅灰石粉末施用对两种不同类型酸性红壤(山原红壤与耕作土)改良效果、养分有效性及碳固存能力的影响。本文设置不施硅灰石(CK), 低施用量(5 kg/m²)和高施用量(10 kg/m²) 3个处理开展盆栽实验, 实验结束后测定土壤化学指标及碳指标。结果表明: 1) 低施用量下土壤总碳(TC)减少, 高施用量下增加; 土壤无机碳(TIC)随施用量增加显著提升。2) 土壤pH显著提高, 提升幅度随施用量增加而增大。3) 山原红壤中Ca²⁺和Mg²⁺含量减少; 耕作土中, 低施用量使Ca²⁺和Mg²⁺增加, 高施用量使二者分别减少。4) 山原红壤中AP和NO₃⁻增加; 耕作土中, 低施用量使AP增加但NO₃⁻减少, 高施用量使AP减少但NO₃⁻增加。因此, 施用硅灰石能显著提升酸性红壤pH, 促进无机碳积累, 表现出良好的固碳潜力。推广应用增强硅灰石风化技术的需根据土壤类型和酸化程度优化施用量。

关键词

增强硅灰石风化, 酸性红壤, 土壤改良, 碳固存, 养分有效性

Effects of Enhanced Wollastonite Weathering on Carbon Sequestration and Nutrient Availability in Two Acidic Red Soils

Rongxiang Jia^{1,2,3}

¹Faculty of Geography, Yunnan Normal University, Kunming Yunnan

²Yunnan Key Laboratory of Plateau Geographical Processes and Environmental Change, Kunming Yunnan

³Southwest United Graduate School, Kunming Yunnan

Received: March 30, 2026; accepted: May 1, 2026; published: July 2, 2026

Abstract

To clarify the effects of wollastonite powder application on the improvement, nutrient availability, and carbon sequestration capacity of two different types of acidic red soils (plateau red soils and cultivated soils). This study established three treatments: no wollastonite application (CK), low application rate (5 kg/m²), and high application rate (10 kg/m²) to conduct pot experiments. Soil chemical and carbon indicators were measured after the experiment. The results showed that: 1) Under low application rate, TC decreased, while it increased under high application rate; TIC significantly increased with increasing application rate. 2) Soil pH was significantly improved, with the magnitude of improvement increasing with application rate. 3) In plateau red soils, Ca²⁺ and Mg²⁺ contents decreased; in cultivated soils, low application rate increased Ca²⁺ and Mg²⁺, while high application rate decreased both. 4) In plateau red soils, AP and NO₃⁻ increased; in cultivated soils, low application rate increased AP but decreased NO₃⁻, while high application rate decreased AP but increased NO₃⁻. Therefore, wollastonite application can significantly improve the pH of acidic red soils, promote inorganic carbon accumulation, and demonstrate good carbon sequestration potential. The promotion and application of enhanced wollastonite weathering technology requires optimization of application rates based on soil type and acidification degree.

Keywords

Enhanced Wollastonite Weathering, Acidic Red Soils, Soil Amelioration, Carbon Sequestration, Nutrient Availability

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

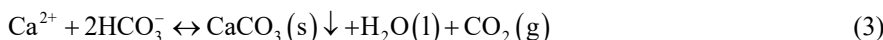
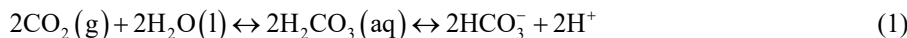
1. 引言

土壤酸化严重威胁耕地生产力与生态安全[1]-[3],我国南方红壤区酸化问题尤为突出。酸化导致的 pH 降低能直接毒害根系[4]、抑制微生物[5],同时降低钙、镁、磷有效性[6],制约作物生长,成为粮食安全的关键阻碍,亟需开发兼顾酸度改良与环境增益的可持续技术[7]-[9]。

增强硅酸盐风化(Enhanced Rock Weathering, ERW)作为一种新兴的负排放技术,通过向土壤中播撒粉碎的硅酸盐矿物,加速矿物与 CO₂ 反应,将大气 CO₂ 转化为碳酸盐矿物,同时释放碱性阳离子提高土壤 pH,具有碳移除和土壤改良的双重效益[10][11]。硅灰石(CaSiO₃)因其钙含量高、溶解速率快、不含高风险重金属,成为 ERW 研究的理想材料[12]。已有研究表明,增强硅灰石风化能够有效提高土壤 pH,促进土壤无机碳(TIC)积累,固碳量可达 0.3~2.99 g/kg [13]。然而,增强硅灰石风化对土壤有机碳(TOC)的影响仍存在争议:部分研究发现施用硅灰石可促进 TOC 的增加[14]。Xu 等人[15]通过研究森林土壤发现,施用硅灰石促进了 TIC 增加。Yan 等人[16]通过对比 12 种不同土地利用类型发现,施用硅灰石会促进土壤有机碳矿化。此外,ERW 的 CO₂ 封存潜力受土壤类型、岩石类型、施用量和粒径等多因素影响[17]。实验室与大田条件下的风化速率也存在明显差异,大田的碳固定效率普遍高于实验室[18]。

ERW 通过在农田施加硅酸盐岩粉加速其化学风化,将 CO₂ 以稳定碳酸盐形式固定于土壤。以硅灰石风化为例,其反应过程如下:大气 CO₂ 通过水合作用形成 H₂CO₃,随后电离生成 HCO₃⁻ 和 H⁺,如化学方

程式(1)所示[13] [19], 硅灰石与 H^+ 反应释放 Ca^{2+} , 如化学方程式(2)所示, H^+ 减少就会加速方程式(1)中 CO_2 的溶解。生成的 Ca^{2+} 与环境中的 HCO_3^- 反应, 生成次生碳酸盐沉淀[13] [19], 如化学方程式(3)所示, 从而实现 CO_2 的固定。



然而, 理论固碳潜力与实际田间实践之间仍需克服诸多科学不确定性: 1) 硅酸盐矿物的风化速率与效应受土壤理化性质(例如 pH、土壤团聚体)的调控[16] [20] [21]; 2) 硅灰石对土壤养分循环存在复杂的影响机制, 硅酸盐风化释放的 Ca^{2+} 能改善土壤结构, 促进养分吸收, 同时 pH 的提高也可能导致磷、铝、铁等元素有效性及形态发生变化[17] [21] [22]; 3) 施用量是影响 ERW 效果的关键因素, 施用量过低可能效果不显著, 过高则可能导致养分失衡或次生矿物沉淀等问题[23] [24], 但目前针对我国南方红壤的最佳施用量研究尚不充分; 4) 不同土壤类型对 ERW 的响应存在差异。施用硅灰石粉末对森林土壤和农田土壤的矿物结合有机碳形成机制存在明显差异[25], 这强调了对比不同土壤类型的重要性。5) 不同酸化程度和管理历史的土壤, 其缓冲体系、微生物群落及养分循环过程迥异, 可能对硅酸盐岩粉末输入的响应模式产生根本性差异[17] [26]。

云南昆明松茂水库流域地处我国典型红壤分布区, 由玄武岩发育的山原红壤和耕作土因为利用方式不同, 性质差异显著: 山原红壤代表自然生态系统下的弱酸性红壤, 有机质含量较高但速效养分缺乏; 耕作土代表长期农业利用下的强酸性红壤, 粘粒含量高、盐基离子淋失严重、酸化问题突出。对比这两类土壤, 既能揭示 ERW 对自然生态功能的影响, 也为农田土壤改良提供直接参考。

本研究选取云南昆明同一母质发育的山原红壤(弱酸性, 代表自然土壤)和耕作土(强酸性, 代表农业土壤), 通过盆栽实验设置两种施用量(5 kg/m^2 和 10 kg/m^2), 探究硅灰石风化对土壤碳库(TC、TOC、TIC)和化学性质(pH、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、AP、 NO_3^-)的影响, 旨在揭示不同红壤对增强风化的响应机制, 为红壤区土壤改良与碳汇管理提供理论依据。

2. 材料与方法

2.1. 实验地概况

本研究盆栽实验设置于云南省元谋县农科院热区生态农业研究所($25^{\circ}84'N$, $101^{\circ}83'E$), 该区海拔约为 1210 m, 属于南亚热带干热季风气候, 年均日照时数为 2670.4 小时, 年均温 $21.9^{\circ}C$, 年均降水 634 mm, 干湿季分明, 具有光热资源丰富, 作物生长周期短的特点, 适宜开展盆栽实验。

2.2. 实验材料

供试土壤(基本理化性质如表 1)均采自昆明市呈贡区松茂水库流域($24^{\circ}51'N$, $102^{\circ}53'E$), 母质类型为玄武岩, 选取区域典型植被下发育的山原红壤(采自次生林地 0~20 cm 的土壤)以及区域内长期进行耕作的耕作土(采自长期耕作的农田 0~20 cm 的土壤)作为盆栽试验的土壤。山原红壤有机质含量较低, 速效养分普遍缺乏, 持水能力和养分供应能力显著下降[27]-[29], 耕作土由于长期被耕作加剧土壤酸化, 粘粒含量高导致通气性差[30]。由于山原红壤有机质含量较低, Fe、Al 氧化物含量较高, N、P 等有效养分含量较低, 持水能力和养分供应能力较弱, 在一定程度上代表森林土壤。耕作红壤由于长期的人为干预, 土壤中有机质含量相对较高, 但同时也存在着养分流失和土壤酸化的风险, 需要合理施肥以维持土壤肥力。

Table 1. Basic physicochemical properties of soil**表 1.** 土壤基本理化性质

| 土壤类型 | pH | 有机质 (g/kg) | 阳离子交换量 (cmol/kg) | 黏粒含量 (%) | 交换性 Ca ²⁺ (g/kg) | 交换性 Mg ²⁺ (g/kg) |
|------|------|---------------|---------------------|-------------|--------------------------------|--------------------------------|
| 山原红壤 | 6.29 | 13.71 | 12.30 | 35.00 | 1.026 | 0.199 |
| 耕作土 | 4.90 | 9.74 | 8.70 | 42.00 | 0.832 | 0.116 |

本实验选取硅灰石作为实验材料, 各元素含量如表 2, 其中 Ca 元素含量占比约为 68.64%, Mg 元素含量占比约为 0.3%。硅灰石相较于玄武岩与橄榄石, 选择硅灰石进行实验具有以下优点: 1) 不含高风险重金属, 可直接用于敏感区域(如近水源农田), 无需额外污染控制成本; 2) 钙含量高(CaO > 40%), 化学风化溶解速率快, 固碳潜力高; 3) 可调节土壤 pH 并释放植物所需养分。

Table 2. Elemental composition of the materials**表 2.** 实验材料中元素含量

| 元素 | Ca | Si | Fe | Ar | K | Mg | Cl | Al | Ti | S | Mn | Ni | Cu | Cr | Co | V |
|-------|-------|------|------|------|-----|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 占比(%) | 68.64 | 2.66 | 1.12 | 0.61 | 0.4 | 0.3 | 0.21 | 0.15 | 0.12 | 0.08 | 0.07 | 0.06 | 0.04 | 0.03 | 0.03 | 0.03 |

2.3. 实验设置与测定方法

实验设 3 个处理: 对照(CK, 不施用硅灰石)、低施用量(5 kg/m², 50 t/ha)、高施用量(10 kg/m², 约 100 t/ha), 每个处理 3 次重复。将硅灰石粉末与土壤充分混匀后装入塑料盆(口径 37.5 cm, 高 39.5 cm, 底径 29.5 cm), 每盆装土约 20 kg。静置一周后移栽已经培育好的同一批玉米幼苗(品种为“会单 4 号”), 每盆 3 株。生育期内每周定期浇水, 保持土壤含水量为田间持水量的 60%左右。实验于 2024 年 5 月开始, 8 月下旬玉米成熟后采集土壤样品, 取样深度 5~20 cm, 风干后测定各项指标。

参照 GB/T 7849-1987 中的方法, 利用便携式 pH 计测定土壤样品的 pH; 采用电感耦合等离子体发射光谱法(ICP-AES)测定土壤样品中的交换性钙(Ca²⁺)、镁(Mg²⁺)含量; 采用 LY/T 1232-2015 中的比色法测定土壤中有效磷的含量; 采用 GB/T 32737-2016 中的紫外分光光度法测定土壤中硝态氮的含量。

利用元素分析仪进行土壤碳的测定, 将土壤样品在 80℃的条件下进行干燥, 称取 50 mg 干燥后的样品, 放入专用容器中。将样品在高温下燃烧, 使样品中的 C 全部转化为 CO₂, 燃烧产生的气体经过净化后, 进入红外检测池测定 CO₂ 的含量, 计算出 TC 的含量, 然后取 50 mg 干燥未处理的样品进行酸化, 去除样品中的 TIC 测定 TOC, TC 和 TOC 之差即为 TIC。

3. 结果与分析

3.1. 土壤碳组分

硅灰石施用对两种土壤 TC 含量的影响存在差异(图 1)。山原红壤中, CK 处理 TC 为 13.79 g/kg, 低施用量处理(5 kg/m²)降至 11.59 g/kg (减少 16.0%), 高施用量处理(10 kg/m²)升至 13.94 g/kg (增加 1.1%)。耕作土中, CK 处理 TC 为 9.77 g/kg, 低施用量降至 8.86 g/kg (减少 9.3%), 高施用量升至 10.68 g/kg (增加 9.3%)。表明低施用量导致两种土壤 TC 下降, 而高施用量使 TC 增加。

TIC 对硅灰石施用的响应更为显著(图 2)。山原红壤中, CK 处理 TIC 仅 0.08 g/kg (占 TC 的 0.6%), 低施用量升至 0.33 g/kg (增加 3.1 倍), 高施用量升至 1.05 g/kg (增加 12.1 倍)。耕作土中, CK 处理 TIC 为 0.03 g/kg (占 TC 的 0.3%), 低施用量升至 0.06 g/kg (增加 1 倍), 高施用量升至 1.21 g/kg (增加 39.3 倍)。

两种土壤 TIC 均随施用量增加而显著提升, 高施用量下耕作土 TIC 增幅更大。

TOC 变化趋势与 TC 一致。两种土壤中低施用量均导致 TOC 下降, 高施用量下略有回升但总体接近 CK。这表明低施用量可能激发了土壤有机碳的矿化分解(正激发效应), 而高施用量下 TIC 的大幅增加抵消了 TOC 的损失, 使 TC 回升。

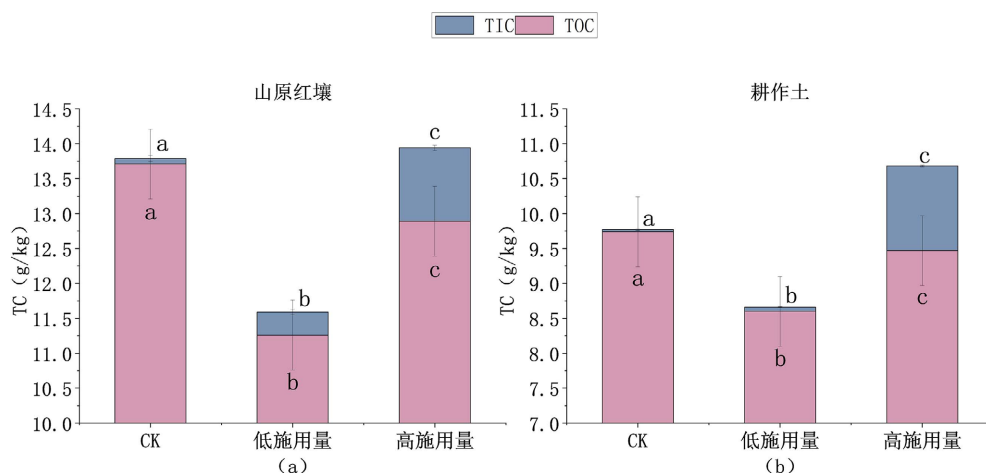


Figure 1. Effects of different wollastonite application rates on TC in different soil types
图 1. 不同硅灰石施用量对不同土壤类型总碳(TC)的影响

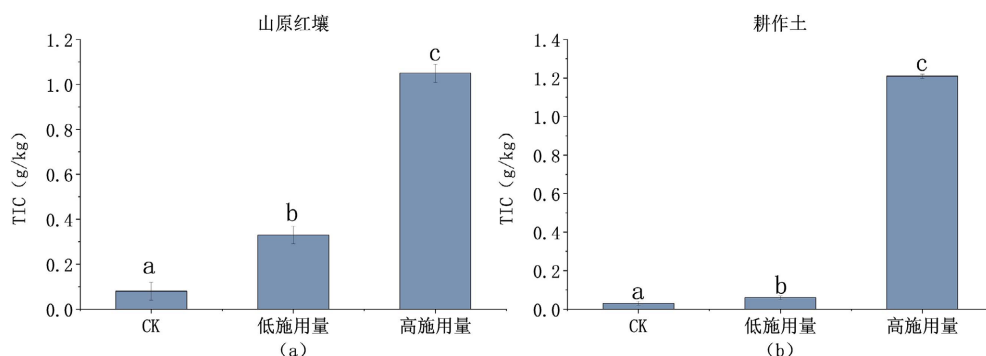


Figure 2. Effects of different wollastonite application rates on TIC in different soil types
图 2. 不同硅灰石施用量对不同土壤类型总无机碳(TIC)的影响

3.2. 土壤化学性质

两种土壤 pH 均随硅灰石施用量增加而升高(图 3)。山原红壤 CK pH 6.29, 低施用量升至 7.09, 高施用量升至 7.55; 耕作土 CK pH 4.90, 低施用量升至 7.44, 高施用量升至 7.55。耕作土的 pH 提升幅度更大(最大升高 2.65 个单位), 说明硅灰石对强酸性土壤的改良效果更为显著。

交换性 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 的对硅灰石施用的响应因土壤类型变化而差异明显(图 4)。山原红壤中, 低、高施用量均使 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 含量低于 CK: Ca^{2+} 从 1.026 g/kg 分别降至 0.998 g/kg 和 0.961 g/kg; Mg^{2+} 从 0.199 g/kg 分别降至 0.136 g/kg 和 0.129 g/kg。耕作土中, 低施用量使 Ca^{2+} 从 0.832 g/kg 升至 1.508 g/kg (增加 81.3%), Mg^{2+} 从 0.116 g/kg 升至 0.170 g/kg (增加 31.8%); 而高施用量使 Ca^{2+} 降至 0.526 g/kg (减少 36.8%), Mg^{2+} 降至 0.088 g/kg (减少 24.1%)。这表明耕作土对硅灰石输入的反应更敏感, 低施用量可补充盐基离子, 但高施用量反而导致离子损失。

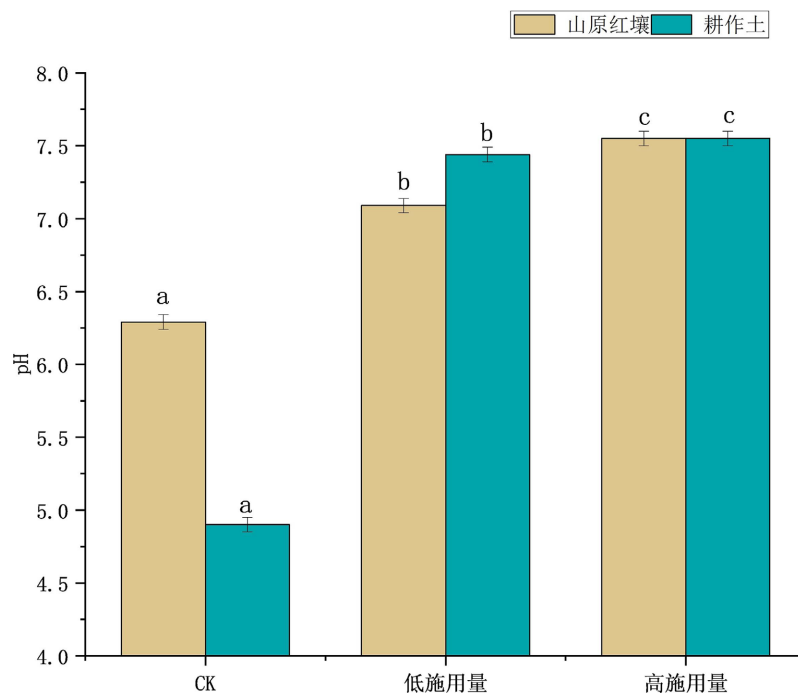


Figure 3. Effects of different wollastonite application rates on soil pH across different soil types

图 3. 不同硅灰石施用量对不同土壤类型 pH 值的影响

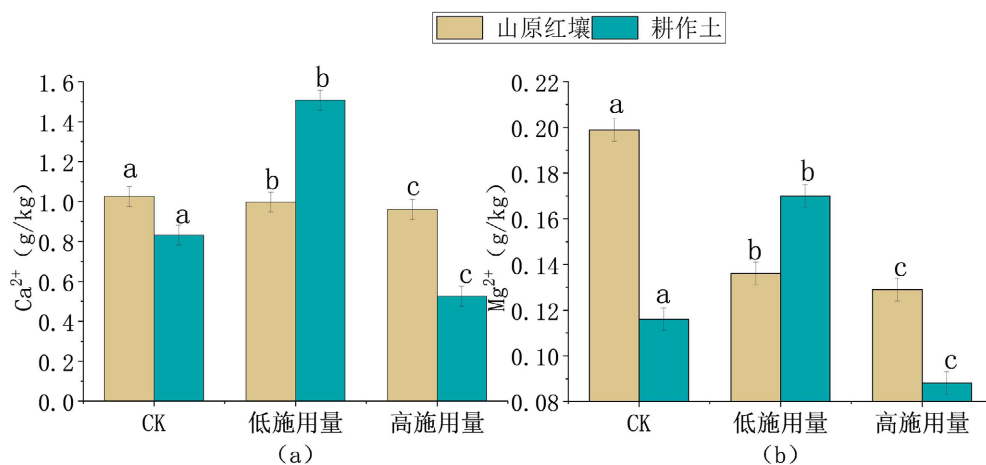


Figure 4. Effects of different wollastonite application rates on Ca²⁺ (a) and Mg²⁺ (b) contents in different soil types

图 4. 不同硅灰石施用量对不同土壤类型 Ca²⁺ (a)、Mg²⁺ (b)的影响

两种土壤有效磷(AP)对硅灰石施用的响应存在差异(图 5)。山原红壤中, AP 从 CK 的 0.027 mg/kg 分别增至低施用量的 0.072 mg/kg (+166.7%)和高施用量的 0.030 mg/kg (+11.1%), 低施用量促进效果更显著。耕作土中, AP 在低施用量时从 1.353 mg/kg 升至 1.422 mg/kg (+4.9%), 高施用量时降至 0.941 mg/kg (-30.1%), 表现为低施用量促进, 高施用量抑制。

两种土壤硝态氮(NO₃⁻)对硅灰石施用的响应存在差异(图 5)。山原红壤中, NO₃⁻从 CK 的 6.54 g/kg 分别增至 23.525 g/kg (+259.7%)和 22.595 g/kg (+245.5%)。两施用量均显著促进 NO₃⁻ 积累。耕作土中, NO₃⁻

在低施用量时从 11.112 g/kg 降至 6.726 g/kg (-39.5%)，高施用量时升至 28.700 g/kg (+158.3%)，表现出低施用量抑制、高施用量促进的相反趋势。

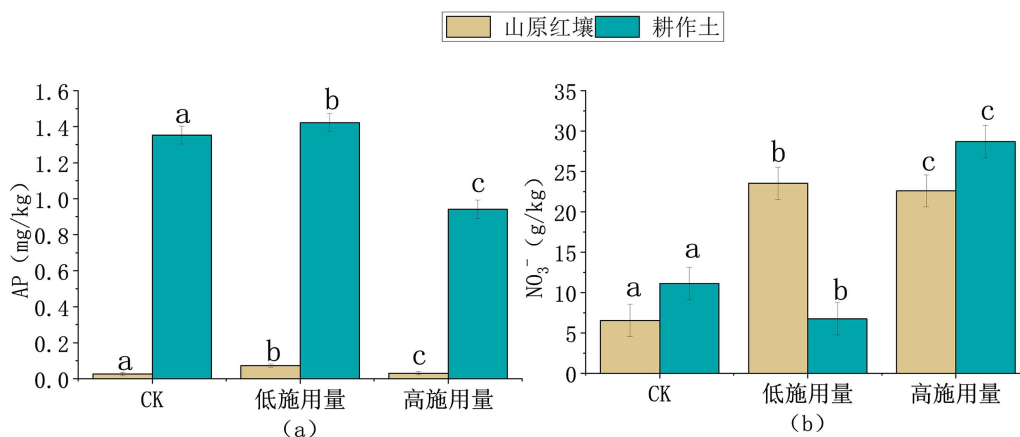


Figure 5. Effects of different wollastonite application rates on AP (a) and NO_3^- (b) in different soil types

图 5. 不同硅灰石施用量对不同土壤类型有效磷(AP) (a)、硝态氮(NO_3^-) (b)的影响

4. 讨论

4.1. 增强硅灰石风化对土壤碳库的影响

硅灰石施用对土壤碳库组分的影响因施用量而异。本研究中，两种土壤的 TIC 含量均随硅灰石施用量增加而显著提升，高施用量(10 kg/m^2)下山原红壤和耕作土的 TIC 分别增加 12.1 倍和 39.3 倍。这是由于硅灰石在酸性环境中溶解释放 Ca^{2+} ，同时消耗 H^+ 提高土壤 pH；随 pH 升高， HCO_3^- 浓度增加，促进 Ca^{2+} 与 HCO_3^- 反应生成 CaCO_3 沉淀，从而实现无机碳的积累[13][19]。本实验 TIC 固定量为 0.03~1.21 g/kg，与 Haque 等[13] (0.30~2.99 g/kg)及 Xu 等[15] (0.34~1.71 g/kg)相比处于较低水平，可能与实验周期较短及土壤初始性质差异有关。

TOC 的变化趋势与 TIC 相反，低、高施用量均导致两种土壤 TOC 含量降低。这一现象很可能是因为正激发效应，即外源物质输入加速了原有土壤有机碳的矿化分解[31]。硅灰石施用通过提高 pH 和改变养分有效性，激活土壤微生物活性，促使微生物调整分解策略，加速原有有机质分解；同时，微生物分泌的胞外酶可能促进难分解有机质的矿化，提高土壤呼吸速率[31][32]。正激发效应导致的碳损失与 ERW 同时促进的植物碳输入增加、矿物-有机质结合形成稳定碳等固碳过程会存在竞争关系，土壤有机碳的净变化取决于这些过程的平衡。本实验中，低施用量下 TOC 损失未被补偿，导致 TC 下降；高施用量下 TIC 的大幅积累抵消了 TOC 的损失，使 TC 回升。

值得注意的是，pH 变化对 TOC 的影响存在双重效应：一方面，pH 升高可促进负电荷有机分子的溶解和淋溶，导致 TOC 降低[33]；另一方面，当 pH 升至 7.5 左右时，较高的 pH 抑制微生物活性，减缓 TOC 分解速率，使 TOC 趋于稳定或略有回升。本实验中高施用量处理下 TC 含量增加，主要归因于 TIC 的大幅积累以及 TOC 分解速率减缓的共同作用。

4.2. 硅灰石风化对土壤化学性质的影响

4.2.1. pH 提高效果与盐基离子变化

硅灰石施用显著提高了两种土壤的 pH，这是由于硅灰石与土壤中 H^+ 反应，同时释放 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 等

碱性阳离子, 消耗质子并提高土壤 pH [19][23][34]。本实验中, 土壤 pH 提升幅度为 1.26~2.65, 高于 Xu 等[14]统计的 0.57, 表明硅灰石对酸性红壤具有显著的改良效果, 尤其对强酸性耕作土的改良作用更为突出。

在山原红壤中, 低、高施用量处理下土壤交换性 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 含量均低于 CK (图 4(a), 图 4(b))。 Mg^{2+} 含量降低可能与作物吸收有关, 因硅灰石中 Mg 含量仅为 0.3%, 不足以补偿作物吸收和淋溶损失。交换性 Ca^{2+} 含量降低可能归因于以下机制: 1) 化学固定与吸附: 硅灰石释放 Ca^{2+} 与 HCO_3^- 反应生成 CaCO_3 沉淀[13], 同时硅灰石表面羟基通过静电吸附或配体交换固定 Ca^{2+} [35]。 Buckingham 等人[36]通过土柱实验发现约 15%~20%的 Ca^{2+} 被土壤有机质或黏土矿物吸附; 2) Fe、Al 氧化物的专性吸附: pH 升高促使 Fe^{3+} 、 Al^{3+} 水解生成羟基氧化物胶体, 通过专性吸附固定 Ca^{2+} [37]。 3) 微生物固定: 硅灰石风化会促进硅酸盐细菌的繁殖, 其分泌的有机酸会将部分 Ca^{2+} 整合到胞外聚合物中[38]。本实验中, 硅灰石 Ca 含量高达 68.64%, 大量 Ca^{2+} 被释放会加快 Ca^{2+} 与 HCO_3^- 反应生成 CaCO_3 沉淀, 结合最终 pH 为 7.09~7.55 的土壤环境条件, 推测化学固定是导致本实验 Ca^{2+} 含量减少的主导机制。

在耕作土中, 低施用量处理下 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 含量高于 CK, 而高施用量处理下低于 CK。这种剂量效应的差异可能与土壤性质及阳离子竞争吸附有关。低施用量下, 硅灰石风化释放的 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 足以补偿作物吸收和淋溶损失, 表现为盐基离子净增加; 高施用量下, 过量硅灰石风化释放的 Si^{4+} 可能与 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 在黏土矿物表面形成竞争吸附, 同时高 pH 条件下 Ca^{2+} 与 HCO_3^- 反应生成 CaCO_3 沉淀, 共同导致交换性 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 下降[16]。

4.2.2. 对有效磷与硝态氮的影响

土壤 pH 对磷有效性具有重要影响: 酸性条件下磷易被 Fe、Al 氧化物固定, 弱碱性条件下有效性最高, 但当 $\text{pH} > 7.5$ 时可能形成钙磷酸盐沉淀[39]。本实验中, 山原红壤 AP 在低施用量下大幅增加(pH 7.09), 高施用量下增幅减小(pH 7.55), 与上述规律一致。耕作土 AP 在低施用量下略有增加(pH 7.44), 高施用量下显著下降(pH 7.55)。AP 下降的可能机制包括: 1) 高 pH 条件下 Ca^{2+} 充足时生成难溶性磷酸钙或结晶态磷酸钙[13]; 2) 过高 pH 促进 CaSiO_3 胶体形成, 其表面羟基通过配体交换吸附 PO_4^{3-} [35]。Guo 等[39]的研究也证实, AP 与 pH 呈显著正相关($r=0.62, p<0.01$), 但当 pH 超过一定阈值时, AP 随 pH 升高而下降。

土壤 pH 升高可促进硝化细菌活性, 提高 NO_3^- 含量。Guo 等[39]发现土壤 pH 每升高 1 个单位, 硝化速率增加 1.8~2.3 倍($p<0.01$)。本实验中, 山原红壤 NO_3^- 含量在硅灰石施用后增加 2.5 倍以上, 与上述规律相符。然而, 耕作土中 NO_3^- 的响应呈现剂量效应: 低施用量下 NO_3^- 减少, 高施用量下增加。这可能与 pH 变化对反硝化作用的影响有关。研究表明, pH 从 5.5 升至 6.5 时 NO_3^- 增加 35%~40%, 但当 $\text{pH} > 6.5$ 时反硝化酶活性受抑制, 反硝化速率降低[16]; Haque 等[13]的同位素实验也证实, pH 6.5~7.0 条件下反硝化速率较 pH 5.5 时降低 45%~50%。此外, 硅灰石释放的 Ca^{2+} 可与土壤有机质结合, 进一步抑制反硝化过程[40]。耕作土低施用量处理下 pH 升至 7.44, NO_3^- 减少可能与反硝化作用增强有关; 高施用量处理下 pH 升至 7.55, 反硝化作用受抑制, NO_3^- 积累增加。

4.3. 不同土壤类型对增强硅灰石风化的响应差异

本研究所用两种土壤虽母质相同, 但由于利用方式不同, 性质差异显著: 山原红壤有机质较高、黏粒含量较低、弱酸性; 耕作土有机质较低、黏粒含量较高、强酸性, 这些差异导致二者对增强硅灰石风化的响应不同。耕作土 pH 增幅更大, 是因为其初始 pH 低, 消耗 H^+ 潜力大。山原红壤中 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 都减少, 可能与较强的吸附固定能力有关; 耕作土低施用量 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 增加, 高施用量减少, 可能与黏粒

对 Si^{4+} 的吸附竞争有关。山原红壤中 AP 和 NO_3^- 都增加, 而耕作土中则呈现复杂的剂量效应, 可能与黏粒含量高、缓冲性能差异有关。这些结果强调了在推广 ERW 技术时, 必须考虑土壤类型和初始性质, 因地制宜优化施用量。

4.4. 研究局限与展望

本研究为红壤区 ERW 应用提供了基础数据, 证明了硅灰石在改良土壤酸性和固碳方面的潜力, 同时揭示了不同土壤类型对 ERW 响应的差异, 对制定差异化方案具有参考价值。然而, 本研究存在以下局限性: 1) 实验周期为一个生长季, 无法评估长期效应和碳稳定性; 2) 未测定作物生物量, 无法量化对作物产量的影响; 3) 未检测土壤渗滤液, 无法评估风化产物的迁移和潜在环境风险; 4) 未检测微生物指标, 无法进一步解释养分转化机制。未来可以开展长期实验, 结合同位素示踪和微生物学, 全面评估增强风化的农学和环境效应。

5. 结论

1) 施用硅灰石显著提高了两种酸性红壤的 pH, 对强酸性耕作土的改良效果尤为突出。

2) 增强硅灰石风化促进了土壤无机碳的积累, 高施用量下山原红壤和耕作土的 TIC 分别增加 12.1 倍和 39.3 倍, 固碳效果显著; 但低施用量下总碳下降, 可能与有机碳的正激发效应有关。

3) 增强硅灰石风化对土壤养分的影响因土壤类型和施用量而异。山原红壤中, 两个施用量均导致交换性 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 减少, 而 AP 和 NO_3^- 增加。耕作土中, 低施用量使交换性 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和 AP 增加, 但 NO_3^- 减少; 高施用量则使交换性 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和 AP 减少, NO_3^- 增加。耕作土中 NO_3^- 的剂量效应与 pH 变化对硝化与反硝化作用的调控有关。

4) 增强硅灰石风化兼具土壤改良和碳固存双重效益, 但施用量需根据土壤性质优化, 避免高施用量带来的养分失衡风险, 同时本研究结果是基于短期盆栽实验, 其对田间长期实验的指示意义有限。

参考文献

- [1] 徐影, 于镇华, 李彦生, 等. 土壤酸化成因及其对农田土壤-微生物-作物系统影响的研究进展[J]. 土壤通报, 2024, 55(2): 562-572.
- [2] 王代长, 蒋新, 卞永荣, 等. 酸沉降下加速土壤酸化的影响因素[J]. 土壤与环境, 2002(2): 152-157.
- [3] Meng, C., Tian, D., Zeng, H., Li, Z., Yi, C. and Niu, S. (2019) Global Soil Acidification Impacts on Belowground Processes. *Environmental Research Letters*, **14**, Article 074003. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab239c>
- [4] Kocjan, A., Kwasniewska, J. and Szurman-Zubrzycka, M. (2024) Understanding Plant Tolerance to Aluminum: Exploring Mechanisms and Perspectives. *Plant and Soil*, **507**, 195-219. <https://doi.org/10.1007/s11104-024-06745-0>
- [5] 洪丕征, 刘世荣, 于浩龙, 等. 模拟氮沉降对红椎人工幼龄林土壤微生物生物量和微生物群落结构的影响[J]. 山东大学学报(理学版), 2016, 51(5): 18-28.
- [6] 徐明岗, 段英华, 白珊珊, 等. 基于长期定位试验的土壤健康研究与展望[J]. 植物营养与肥料学报, 2024, 30(7): 1253-1261.
- [7] 徐仁扣. 土壤酸化及其调控研究进展[J]. 土壤, 2015, 47(2): 238-244.
- [8] 戎秋涛, 杨春茂, 徐文彬. 土壤酸化研究进展[J]. 地球科学进展, 1996, 11(4): 396-401.
- [9] 查宇璇, 冉茂, 周鑫斌. 烟田土壤酸化原因及调控技术研究进展[J]. 土壤, 2022, 54(2): 211-218.
- [10] Strefler, J., Amann, T., Bauer, N., Kriegler, E. and Hartmann, J. (2018) Potential and Costs of Carbon Dioxide Removal by Enhanced Weathering of Rocks. *Environmental Research Letters*, **13**, Article 034010. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aaa9c4>
- [11] Beerling, D.J., Kantzas, E.P., Lomas, M.R., Wade, P., Eufrazio, R.M., Renforth, P., et al. (2020) Potential for Large-Scale CO_2 Removal via Enhanced Rock Weathering with Croplands. *Nature*, **583**, 242-248. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2448-9>

- [12] te Pas, E.E.E.M., Hagens, M. and Comans, R.N.J. (2023) Assessment of the Enhanced Weathering Potential of Different Silicate Minerals to Improve Soil Quality and Sequester CO₂. *Frontiers in Climate*, **4**, Article ID: 954064.
- [13] Haque, F., Santos, R.M. and Chiang, Y.W. (2020) CO₂ Sequestration by Wollastonite-Amended Agricultural Soils—An Ontario Field Study. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, **97**, Article 103017. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2020.103017>
- [14] Xu, T., Li, H., Vicca, S., Goll, D.S., Beerling, D.J., Chen, Q., *et al.* (2025) Enhanced Rock Weathering Promotes Soil Organic Carbon Accumulation: A Global Meta-Analysis Based on Experimental Evidence. *Global Change Biology*, **31**, e70483. <https://doi.org/10.1111/gcb.70483>
- [15] Xu, T., Yuan, Z., Vicca, S., Goll, D.S., Li, G., Lin, L., *et al.* (2024) Enhanced Silicate Weathering Accelerates Forest Carbon Sequestration by Stimulating the Soil Mineral Carbon Pump. *Global Change Biology*, **30**, e17464. <https://doi.org/10.1111/gcb.17464>
- [16] Yan, Y., Dong, X., Li, R., Zhang, Y., Yan, S., Guan, X., *et al.* (2023) Wollastonite Addition Stimulates Soil Organic Carbon Mineralization: Evidences from 12 Land-Use Types in Subtropical China. *CATENA*, **225**, Article 107031. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2023.107031>
- [17] Cong, L., Lu, S., Jiang, P., Zheng, T., Yu, Z. and Lü, X. (2024) CO₂ Sequestration and Soil Improvement in Enhanced Rock Weathering: A Review from an Experimental Perspective. *Greenhouse Gases: Science and Technology*, **14**, 1122-1138. <https://doi.org/10.1002/ghg.2313>
- [18] Li, Z., Li, G., Adams, J.M., Guan, D., Zhao, L., Bian, R., *et al.* (2025) Atmospheric CO₂ Removal Efficiency through Enhanced Silicate Weathering in Croplands: A Review with Emphasis on the Contribution of Fungi. *Journal of Earth Science*, **36**, 197-211. <https://doi.org/10.1007/s12583-024-0101-5>
- [19] Haque, F., Santos, R.M., Dutta, A., Thimmanagari, M. and Chiang, Y.W. (2019) Co-Benefits of Wollastonite Weathering in Agriculture: CO₂ Sequestration and Promoted Plant Growth. *ACS Omega*, **4**, 1425-1433. <https://doi.org/10.1021/acsomega.8b02477>
- [20] Haque, F., Khalidy, R., Chiang, Y.W. and Santos, R.M. (2023) Constraining the Capacity of Global Croplands to CO₂ Drawdown via Mineral Weathering. *ACS Earth and Space Chemistry*, **7**, 1294-1305. <https://doi.org/10.1021/acsearthspacechem.2c00374>
- [21] Deng, H., Sonnenthal, E., Arora, B., Breunig, H., Brodie, E., Kleber, M., *et al.* (2023) The Environmental Controls on Efficiency of Enhanced Rock Weathering in Soils. *Scientific Reports*, **13**, Article No. 9765. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-36113-4>
- [22] Kantola, I.B., Masters, M.D., Beerling, D.J., Long, S.P. and DeLucia, E.H. (2017) Potential of Global Croplands and Bioenergy Crops for Climate Change Mitigation through Deployment for Enhanced Weathering. *Biology Letters*, **13**, Article 20160714. <https://doi.org/10.1098/rsbl.2016.0714>
- [23] Dietzen, C., Harrison, R. and Michelsen-Correa, S. (2018) Effectiveness of Enhanced Mineral Weathering as a Carbon Sequestration Tool and Alternative to Agricultural Lime: An Incubation Experiment. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, **74**, 251-258. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2018.05.007>
- [24] Holzer, I.O., Nocco, M.A. and Houlton, B.Z. (2023) Direct Evidence for Atmospheric Carbon Dioxide Removal via Enhanced Weathering in Cropland Soil. *Environmental Research Communications*, **5**, Article 101004. <https://doi.org/10.1088/2515-7620/acfd89>
- [25] Yan, Y., Yin, L., Yan, S., Fang, Y., Wang, A., Zhu, F., *et al.* (2025) Similar Mineral-Associated Organic Carbon Formation but Distinct Efficiencies by Powdered Wollastonite Addition between Two Soils. *Soil Biology and Biochemistry*, **211**, Article 109979. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2025.109979>
- [26] Sokol, N.W., Sohng, J., Moreland, K., Slessarev, E., Goertzen, H., Schmidt, R., *et al.* (2024) Reduced Accrual of Mineral-Associated Organic Matter after Two Years of Enhanced Rock Weathering in Cropland Soils, though No Net Losses of Soil Organic Carbon. *Biogeochemistry*, **167**, 989-1005. <https://doi.org/10.1007/s10533-024-01160-0>
- [27] 许路艳, 王家文, 王嘉学, 等. 喀斯特山原红壤退化过程中的速效养分变异[J]. 西南农业学报, 2016, 29(1): 120-125.
- [28] 许路艳, 王嘉学, 余洁芳, 等. 滇东山原红壤退化过程中的土壤剖面有机质与养分变异[J]. 土壤, 2015, 47(5): 947-952.
- [29] 程燕芳, 王嘉学, 许路艳, 等. 云南高原喀斯特山原红壤退化中的表层土壤水分变异[J]. 江苏农业科学, 2015, 43(11): 433-437.
- [30] 刘志鹏, 史东梅, 金慧芳, 等. 红壤坡耕地耕层土壤质量特征及障碍因素研究[J]. 中国土壤与肥料, 2018(3): 7-13+41.
- [31] 郭复兴. 增强玄武岩风化在农田的碳固持潜力与调控机制[D]: [博士学位论文]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2024.
- [32] 魏圆云, 崔丽娟, 张曼胤, 等. 土壤有机碳矿化激发效应的微生物机制研究进展[J]. 生态学杂志, 2019, 38(4):

1202-1211.

- [33] Anderson, C.R., Peterson, M.E., Frampton, R.A., Bulman, S.R., Keenan, S. and Curtin, D. (2018) Rapid Increases in Soil Ph Solubilise Organic Matter, Dramatically Increase Denitrification Potential and Strongly Stimulate Microorganisms from the *Firmicutes* Phylum. *PeerJ*, **6**, e6090. <https://doi.org/10.7717/peerj.6090>
- [34] Kelland, M.E., Wade, P.W., Lewis, A.L., Taylor, L.L., Sarkar, B., Andrews, M.G., *et al.* (2020) Increased Yield and CO₂ Sequestration Potential with the C₄ Cereal *sorghum Bicolor* Cultivated in Basaltic Rock Dust-Amended Agricultural Soil. *Global Change Biology*, **26**, 3658-3676. <https://doi.org/10.1111/gcb.15089>
- [35] Wood, C., Harrison, A.L. and Power, I.M. (2023) Impacts of Dissolved Phosphorus and Soil-Mineral-Fluid Interactions on CO₂ Removal through Enhanced Weathering of Wollastonite in Soils. *Applied Geochemistry*, **148**, Article 105511. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2022.105511>
- [36] Buckingham, F. (2022) The Potential of Enhanced Weathering as a CO₂ Removal Technique in UK Agricultural Soils. Ph.D. Thesis, University of Oxford.
- [37] Guo, J.H., Liu, X.J., Zhang, Y., Shen, J.L., Han, W.X., Zhang, W.F., *et al.* (2010) Significant Acidification in Major Chinese Croplands. *Science*, **327**, 1008-1010. <https://doi.org/10.1126/science.1182570>
- [38] Ribeiro, I.D.A., Volpiano, C.G., Vargas, L.K., Granada, C.E., Lisboa, B.B. and Passaglia, L.M.P. (2020) Use of Mineral Weathering Bacteria to Enhance Nutrient Availability in Crops: A Review. *Frontiers in Plant Science*, **11**, Article ID: 590774. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.590774>
- [39] Guo, F., Wang, Y., Zhu, H., Zhang, C., Sun, H., Fang, Z., *et al.* (2023) Crop Productivity and Soil Inorganic Carbon Change Mediated by Enhanced Rock Weathering in Farmland: A Comparative Field Analysis of Multi-Agroclimatic Regions in Central China. *Agricultural Systems*, **210**, Article 103691. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2023.103691>
- [40] Feng, D. and Hicks, A. (2023) Environmental, Human Health, and CO₂ Payback Estimation and Comparison of Enhanced Weathering for Carbon Capture Using Wollastonite. *Journal of Cleaner Production*, **414**, Article 137625. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.137625>