

红壤中无定形氧化铁-高岭石胶结体系的结构和抗剪强度

吕义豪, 许梦瑶, 杨茂进, 郑勤敏, 林金石, 蒋芳市, 黄炎和, 张越
(福建农林大学 资源与环境学院, 福建 福州 350002)

摘要: [目的] 从微观层面分析无定形氧化铁调控崩岗土体力学性能的关键机制, 为崩岗侵蚀防治提供理论基础。[方法] 以福建省典型崩岗区土壤中主要黏土矿物为研究对象, 通过向高岭土中添加不同浓度无定形氧化铁(1, 2, 3, 10 g/kg), 并结合 X 射线衍射(XRD)、扫描电镜(SEM)及直剪试验, 分析其对土体微观结构及抗剪强度参数的调控作用。[结果] XRD 分析表明无定形氧化铁未与高岭土发生化学反应, 主要通过物理包覆作用改变矿物特征。无定形氧化铁浓度对不同粒径胶结体的分布具有显著影响, 其对 2~250 μm 粒径胶结体的形成具有显著调控作用; 微观结构参数中, 仅颗粒长轴和圆度发生显著变化, 3 g/kg 处理的样品颗粒长轴缩短了 22%; 2 g/kg 处理的样品圆度降低了 25%, 其余参数的变异系数均小于 15%。添加 3 g/kg 的处理在各围压水平下均表现出最高抗剪强度, 试样抗剪强度的提升与微观结构的变化密切相关。3 g/kg 处理组黏聚力提升最显著, 较纯高岭土提高 24.82%; 而内摩擦角变动幅度小于 5.30%。[结论] 无定形氧化铁通过胶结包裹作用优化土壤结构, 进而增强抗剪性能。

关键词: 崩岗; 微观结构; 胶结作用; 黏聚力; 内摩擦角

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2026)02-0014-09

中图分类号: S152.4

文献参数: 吕义豪, 许梦瑶, 杨茂进, 等. 红壤中无定形氧化铁-高岭石胶结体系的结构和抗剪强度[J]. 水土保持通报, 2026, 46(2): 14-22. Lü Yihao, Xu Mengyao, Yang Maojin, et al. Structure and shear strength of amorphous iron oxide-kaolinite cementation system in red soil [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2026, 46(2): 14-22.

DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2026.02.038

CSTR: 32312.14.stbctb.2026.02.038

Structure and shear strength of amorphous iron oxide-kaolinite cementation system in red soil

Lü Yihao, Xu Mengyao, Yang Maojin, Zheng Qinmin, Lin Jinshi, Jiang Fangshi, Huang Yanhe, Zhang Yue
(College of Resources and Environmental Sciences, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou, Fujian 350002, China)

Abstract: [Objective] The key mechanisms by which amorphous iron oxide regulates the mechanical properties of Benggang soil were analyzed from a microscopic perspective in order to provide a theoretical basis for the prevention and control of Benggang erosion. [Methods] Kaolinite, the dominant clay mineral in soil from a typical Benggang area of Fujian Province, was selected as the research object. By incorporating amorphous iron oxide at different concentrations (1, 2, 3, and 10 g/kg) into kaolinite and utilizing X-ray diffraction (XRD), scanning electron microscopy (SEM), and direct shear tests, this study analyzed its regulatory effects on soil microstructure and shear strength parameters. [Results] XRD analysis revealed that amorphous iron oxide did not undergo a chemical reaction with kaolinite but primarily altered mineral characteristics through physical coating. The concentration of amorphous iron oxide significantly influenced the distribution of cemented aggregates across different particle sizes, demonstrating a pronounced regulatory role in the formation of aggregates within the 2—250 μm range. Among microstructural parameters, only particle long-axis and roundness exhibited significant

收稿日期: 2025-07-08

修回日期: 2025-11-06

采用日期: 2025-11-09

资助项目: 福建省水利科技项目“崩岗崩壁防塌生态治理技术研发与示范”(KJG21009A; MSK202217); 水利部重大科技项目(SKS-2022073)

第一作者: 吕义豪(2001—), 男(汉族), 硕士研究生, 研究方向为土壤侵蚀。Email: 18715501400@163.com。

通信作者: 张越(1990—), 男(汉族), 副教授, 硕士生导师, 主要从事土壤侵蚀研究。Email: zhangyue@fafu.edu.cn。

changes. The long-axis decreased by 22% in samples with the 3 g/kg treatment, while roundness was reduced by 25% in samples with the 2 g/kg treatment. The coefficients of variation for all other parameters remained below 15%. The treatment with 3 g/kg consistently exhibited the highest shear strength across all confining pressure levels. The enhancement in shear strength was closely associated with the observed microstructural alterations. Further analysis indicated that the 3 g/kg treatment resulted in the most substantial improvement in cohesion, which increased by 24.82% compared to pure kaolinite. In contrast, the internal friction angle varied by less than 5.30%. [Conclusion] Amorphous iron oxide enhances soil shear strength by optimizing soil structure through cementation and encapsulation.

Keywords: Benggang; microstructure; cementation; cohesion; internal friction angle

花岗岩风化红壤广泛分布于热带与亚热带地区,其含有较多粗颗粒,工程性质与一般土壤差异显著,是一种具有不均匀性、各向异性和遇水易软化崩解的特殊土壤^[1-2],其特殊性主要表现为高收缩率、低压缩性以及极强的水敏感性^[3]。尽管花岗岩风化红壤在成分上与一般黏性土相似,但由于未经历搬运分选,母岩的节理结构在风化过程中被部分保留,导致其土壤力学性质较差^[4-6]。崩岗是一种由水力和重力共同作用下,厚层风化壳坍塌并侵蚀而形成的特殊侵蚀地貌,主要表现为“崩口”和冲沟^[7],其形成伴随着显著的水土流失和地表形态变化,是花岗岩风化红壤丘陵区典型的生态退化现象。崩岗的发生与土体抗剪强度密切相关,当土体抗剪强度低于外界剪切应力时,便会引起土体失稳,进而导致崩塌与侵蚀过程发展^[8-9]。因此,深入研究花岗岩风化红壤的力学性质,对于南方红壤区崩岗的预警与防治至关重要。

抗剪强度是表征土体稳定性的重要指标,而氧化铁作为一种关键胶结物质,对土壤抗剪强度具有重要调控作用^[10]。氧化铁通常以“桥”、薄膜或单晶颗粒形式与黏土矿物胶结,从而促进土壤胶结体的形成^[10]。Zhang Xianwei等^[10-11]通过研究湛江黏土和龙门红壤中的氧化铁的微观结构特征,发现随着氧化铁含量的降低,水稳性胶结体结构随之破坏,导致土壤抗剪强度下降。进一步通过研究天然粘土的物理化学和力学特性,发现随着游离铁氧化物含量的降低,土壤的抗剪强度也随之降低。以上结果说明,氧化铁在维持土壤结构稳定性和力学强度方面具有重要作用。

土壤中的氧化铁主要以晶质形态(如赤铁矿、磁铁矿)和无定形态2种形式存在^[12]。晶质氧化铁因晶体结构稳定,通过物理填充作用增强颗粒接触强度;而无定形氧化铁因其高活性胶体特性,更易通过化学吸附与颗粒表面羟基发生键合,形成具有黏结效应的胶膜结构,从而显著增强土体的黏结性能。因此,无定形氧化铁在对土体力学性质的作用中占主

导地位^[12]。苏玲等^[13]研究发现,干湿交替显著影响氧化铁的形态转化,淹水条件下晶质氧化铁含量下降,而无定形氧化铁显著升高。何群等^[14]通过培育试验发现不同的脱水程度对土壤中无定形氧化铁的含量及其活性产生显著影响。随着脱水程度的加深,无定形氧化铁的含量显著减少,导致土壤收缩率增加,进而破坏土壤结构的稳定性。同时,非崩岗地区的花岗岩红壤中氧化铁含量显著高于崩岗侵蚀区,氧化铁含量是影响崩岗土壤力学性质的重要因素^[15]。目前,针铁矿和赤铁矿等晶质氧化铁对崩岗土壤力学性质的影响已有较多研究^[16-17]。然而,关于无定形氧化铁对崩岗土壤结构重组与抗剪强度的影响机制尚未明晰,亟待深入探讨。

本研究选取福建省典型崩岗区红壤中黏土矿物作为研究对象,通过在高岭土中梯度添加无定形氧化铁,结合扫描电镜(SEM)及X射线衍射(XRD)等微观表征技术,研究无定形氧化铁浓度对土粒接触面积、孔隙结构及胶结体分布等参数的影响,以及对土壤黏聚力与内摩擦角的作用规律,揭示无定形氧化铁调控崩岗土体力学性能的关键机制,为崩岗侵蚀防治提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 供试材料

鉴于红壤的主要黏土矿物为高岭石,试验选用市售纯高岭土(上海麦克林生化科技有限公司,化学纯,高温煅烧制备,高岭石含量 $\geq 99\%$)与实验室自制的无定形氧化铁按不同比例混合,制备成不同浓度的改性土样。

1.2 研究方法

1.2.1 无定形氧化铁的制备

称取 162.5 g 三氯化铁($\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$)和 120 g 氢氧化钠(NaOH),在低温去离子水中剧烈搅拌混合(pH值为8~9,温度为0~5℃);随后用温热蒸馏水反复洗涤以去除可溶性盐分,离心后在真空条件下(10 Pa以下)冷冻干燥24 h,即得无定形氧化铁^[18]。

1.2.2 土样制备

将一定量高岭土置于桶中,另取 50 g 高岭土与对量无定形氧化铁在自封袋中充分混合后倒入桶中,再加入 450 g 去离子水,使混合物含水率达到 45%,并搅拌均匀。混合后取 1 000 g 样品过 2 mm 筛,装入自封袋静置 24 小时。不同浓度土样中,无定形氧化铁的添加量分别为 0, 1, 2, 3, 10 g/kg。制备好的土样压制为环刀试样(高度 20 mm, 直径 61.8 mm), 目标容重 0.83 g/cm³, 含水率 45%。随后使用胶头滴管将试样含水率调至 55%, 密封后置于 25 °C 培养箱中培养。剪切试验在培养 3 d 后进行, 试样剪切时的含水率保持在 45%。

1.2.3 微观结构研究方法

使用荷兰产 Pro-X 飞纳台式扫描电镜(SEM)进行微观表征,其背散射电子图像(BSE)和二次电子图像(SE)分辨率均为 8 nm,工作加速电压为 5~15 kV,可根据样品特性调整以获得最佳成像效果。图像处理采用 Image Pro-Plus 6.0 软件,流程包括:①图像预处理:降噪及对比度增强;②基于阈值法的图像分割;③二值化处理,以量化高岭土颗粒与氧化铁的分布特征。

胶结体径粒分布研究采用激光粒度仪(BT-9300ST, 中国辽宁贝特氏仪器有限公司)测定。水稳定胶结体采用湿筛法分离^[19]:取 10.00 g 风干土样,置于孔径 0.5 cm 筛子中,在水下振荡 50 次(2 min 内完成),收集 >0.5 cm 组分后转移至 0.25 cm 筛重复操作;测定 <0.25 cm 组分的粒径分布。

1.2.4 微观定量参数测定

(1) 表观孔隙率。指研究对象图像平面孔隙面积与研究区面积比值。

(2) 丰度(C)。指研究对象中土颗粒短轴(B)平均值与土颗粒长轴(L)平均值之比。计算其公式为

$$C = B/L \quad (1)$$

(3) 圆度(R_0)。圆度是指土颗粒趋向于圆形的程度。计算公式为

$$R_0 = 4\pi S/L^2 \quad (2)$$

式中: S 为土颗粒的平均面积; L 为土颗粒平均周长。 R_0 越大,土颗粒越趋于圆形。

(4) 分形维数(D_V)。反映土壤颗粒的分布密度和复杂性,计算公式为

$$D_V = -\lim_{r \rightarrow 0} \frac{\ln N(r)}{\ln r} \quad (3)$$

式中: r 为盒子的边长; $N(r)$ 为盒子数。 D_V 越小,表示土壤颗粒分布越分散,密度越低。

(5) 接触面积测定。将 SEM 图像的灰度值(0~255)转化为三维结构的高度信息,建立空间直角坐标系。采用微积分,将图像分割为无数薄层(本研究中 $dz=2$ 灰度单位),孔隙总体积公式为

$$V_k = \int_1^m A_k dz \quad (4)$$

三维图像总体积公式为

$$V = AZ_m \quad (5)$$

图像孔隙率为

$$n = \frac{V_k}{V} \quad (6)$$

式中: m 为灰度分割的最大层数; A_k 为分割灰度值为 k 时的图像孔隙面积; dz 为上下两个分割灰度相减值; A 为平面下图像的总面积; Z_m 为最后确定的分割灰度即阈值。通过实测孔隙率(如 0.681)与三维孔隙率(n)对比,确定最佳灰度阈值范围。以添加 3 g/kg 无定形氧化铁的试样为例,当 $n=0.678$ 时(对应灰度值 $Z_m=230$),选取 Z_{m-1} , Z_m , Z_{m+1} 3 个阈值进行验证。根据确定的阈值对 SEM 图像进行分割,将孔隙和颗粒接触区域分离。通过二值化处理(白色为接触区域,黑色为孔隙),提取接触面积参数。每个试样随机选取 3 个点位,每个点位计算 3 个阈值下的接触面积,取平均值作为最终结果^[20]。

1.2.5 土壤抗剪强度测定

采用四联直剪仪(TKA-DDS-4A, 南京泰克奥科技有限公司, 南京, 中国)对土体抗剪强度进行分析。试验前对土样进行预处理:将风干土的含水率调至 15%, 均匀揉搓后静置 24 h, 随后将土样压制为环刀试样(高度 20 mm, 直径 61.8 mm, 容重 0.83 g/cm³)。依据《土工试验方法标准》(GB/T50123-2019)^[21], 剪切垂直压力(σ)分别设置为 50, 100 和 150 kPa, 进行不排水快剪试验, 剪切速率为 0.8 mm/min, 最大剪切位移为 6 mm, 以模拟土体在不同压力条件下的剪强度特性^[22]。

根据摩尔-库伦强度准则^[23]计算土壤抗剪强度的相关指标,其表达式如下:

$$\tau = c + \sigma \tan \varphi \quad (7)$$

式中: τ 为土壤抗剪强度(kPa); σ 为土壤所受垂直载荷(kPa); c 为土壤黏聚力(kPa); φ 为土壤内摩擦角(°)。

1.3 其他参数测定

图像处理方法。采用 image pro-plus 软件默认算法加人工矫正方法进行分割,将图像的颗粒与孔隙分割开来(图 1)。

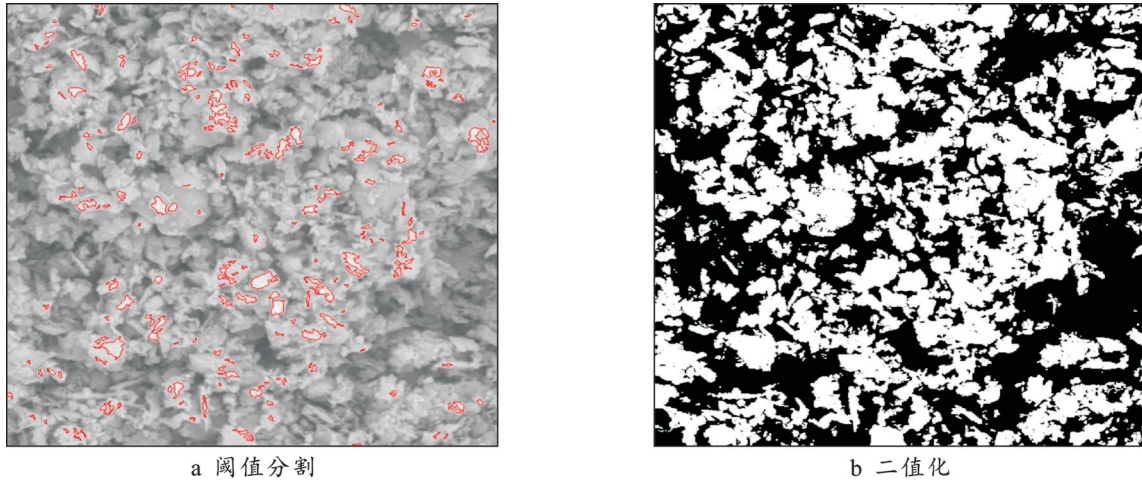


图 1 微观定量参数获取示意图
Fig.1 Schematic diagrams of acquisition of microscopic quantitative parameters

1.4 数据处理分析

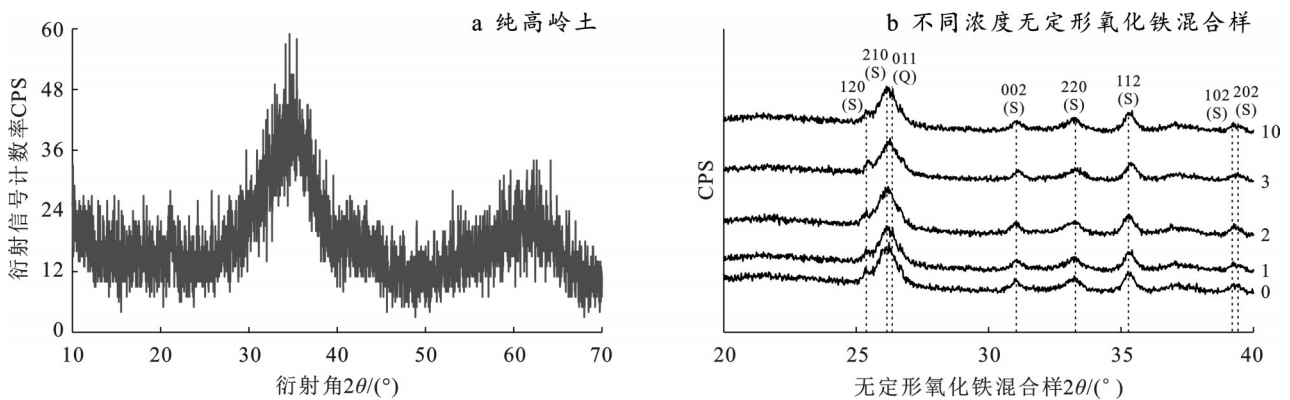
本研究采用 Excel 2016 软件进行数据整理与相关数据分析图件绘制;采用 SPSS 18.0 软件进行单因素方差分析和相关性分析;不同处理间的多重比较采用 Duncan 方法,显著性水平为 $P < 0.05$;采用 Origin 21 绘制图表。

2 结果与分析

2.1 无定形氧化铁-高岭石混合试样物质分析

XRD 分析结果显示,无定形氧化铁本身未呈现出显著的衍射峰(图 2a),表明其缺乏长程有序的晶体结构,难以通过 XRD 检测。向高岭土中添加不同

浓度的无定形氧化铁后,其 XRD 图谱中主要矿物的特征峰逐渐减弱(图 2b)。这一变化可能源于无定形氧化铁对高岭土颗粒表面的包覆作用,部分遮蔽了晶体结构的衍射信号,从而导致衍射峰模糊或减弱。尽管添加浓度较低,但其表面包覆效应已足以显著改变高岭土的 XRD 响应特征。同时,各处理下的 XRD 图谱中均未观察到新的衍射峰,说明无定形氧化铁未发生晶质转变,也未与高岭土发生显著的化学反应或形成新矿物。据此推测,无定形氧化铁与高岭土形成了以高岭土为核心、表面被其包覆的复合体系,且包覆效应随添加量的增加而增强,从而引起矿物衍射峰持续减弱。



注:图中 Q 代表石英相, S 代表硅酸盐/黏土矿物相,括号外数字为对应晶面。

图 2 无定形氧化铁与混合试样 XRD 图谱
Fig.2 XRD patterns of amorphous iron oxide and mixed samples

2.2 无定形氧化铁-高岭石胶结体粒径分布特征

不同粒径层级的胶结体对无定形氧化铁添加浓度的响应存在显著差异(图 3)。在 $< 2 \mu\text{m}$ 粒径范围内, 2 g/kg 处理组胶结体占比最高,虽与纯高岭土对照无显著差异,但显著高于其他处理组($p < 0.05$)。2~20 μm 粒径的胶结体分布呈相似规律,其中 2 g/kg 处理组占比为 10 g/kg 处理组的 2.2 倍,表明低浓度无定形氧化铁更

有利于该粒径胶结体的形成。20~250 μm 粒径的占比随添加量增加呈“V”型变化,其中 10 g/kg 处理组占比最高,为最小值(2 g/kg 处理组)的 2.13 倍。250~500 μm 粒径在 3 g/kg 处理组达到峰值,占比为最小值的 1.46 倍。对于 $> 500 \mu\text{m}$ 的大胶结体,除 2 g/kg 处理组略有下降外,其余处理浓度均随添加量增加而显著升高,10 g/kg 处理组占比最高,为 2 g/kg 处理组的 1.87 倍。

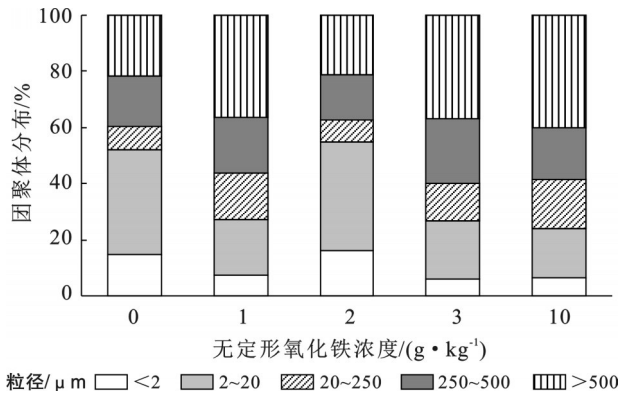


图3 不同浓度无定形氧化铁试样的土壤胶结体分布
Fig.3 Distribution of soil cemented aggregates in samples with different concentrations of amorphous iron oxide

2.3 无定形氧化铁-高岭石胶结体微观结构特征

SEM 分析结果(图 4a—4e)表明,高浓度无定形氧化铁处理组呈现明显的微观结构重组特征。这些特征主要包括如下方面。①片状高岭土颗粒与较大粒径的氧化铁颗粒被微细无定形氧化铁包覆并胶结,形成稳定的复合胶结体结构;②颗粒间通过“抱团”效应发生二次聚集,构建出更大尺度的结构单元。

研究结果表明,添加不同浓度无定形氧化铁对混

合试样微观结构参数的影响具有显著差异(图 5)。颗粒接触面积随添加浓度的增加呈先上升后趋于稳定的趋势,在 3 g/kg 时达到峰值,其变化规律与黏聚力高度一致。其他微观参数未表现显著差异(表 1),分形维数在 1.20~1.22 之间波动极小,表明颗粒表面复杂度变化有限;表观孔隙率在 0.51~0.54 之间波动,较对照(0 g/kg)组下降 12%,但二者并没有显著差异;丰度(0.60~0.62)和颗粒短轴(0.058~0.074 μm)的窄幅变化进一步说明颗粒分布特征基本保持稳定。添加不同浓度无定形氧化铁后,颗粒长轴和圆度表现出显著变化($p < 0.05$)。3 g/kg 处理组颗粒长轴最小,较最大值下降 22%,表明在该浓度下颗粒发生明显各向异性收缩。2 g/kg 处理组颗粒圆度显著降低,较 1 g/kg 和 10 g/kg 处理组分别下降 25% 和 23%,呈现典型表面不规则性增强特征。与纯高岭土相比,添加组分形维数和颗粒短轴有所增加,而表观孔隙率和颗粒长轴略有下降,说明无定形氧化铁对高岭土颗粒形态具有浓度依赖性,且在特定浓度下表现出显著定向改变。因此,尽管无定形氧化铁添加在某些参数上引起颗粒尺度和形态的局部变化,但整体微观结构改变有限,表明其对高岭土微观结构的调控作用较为温和,主要表现为局部胶结和颗粒聚集。

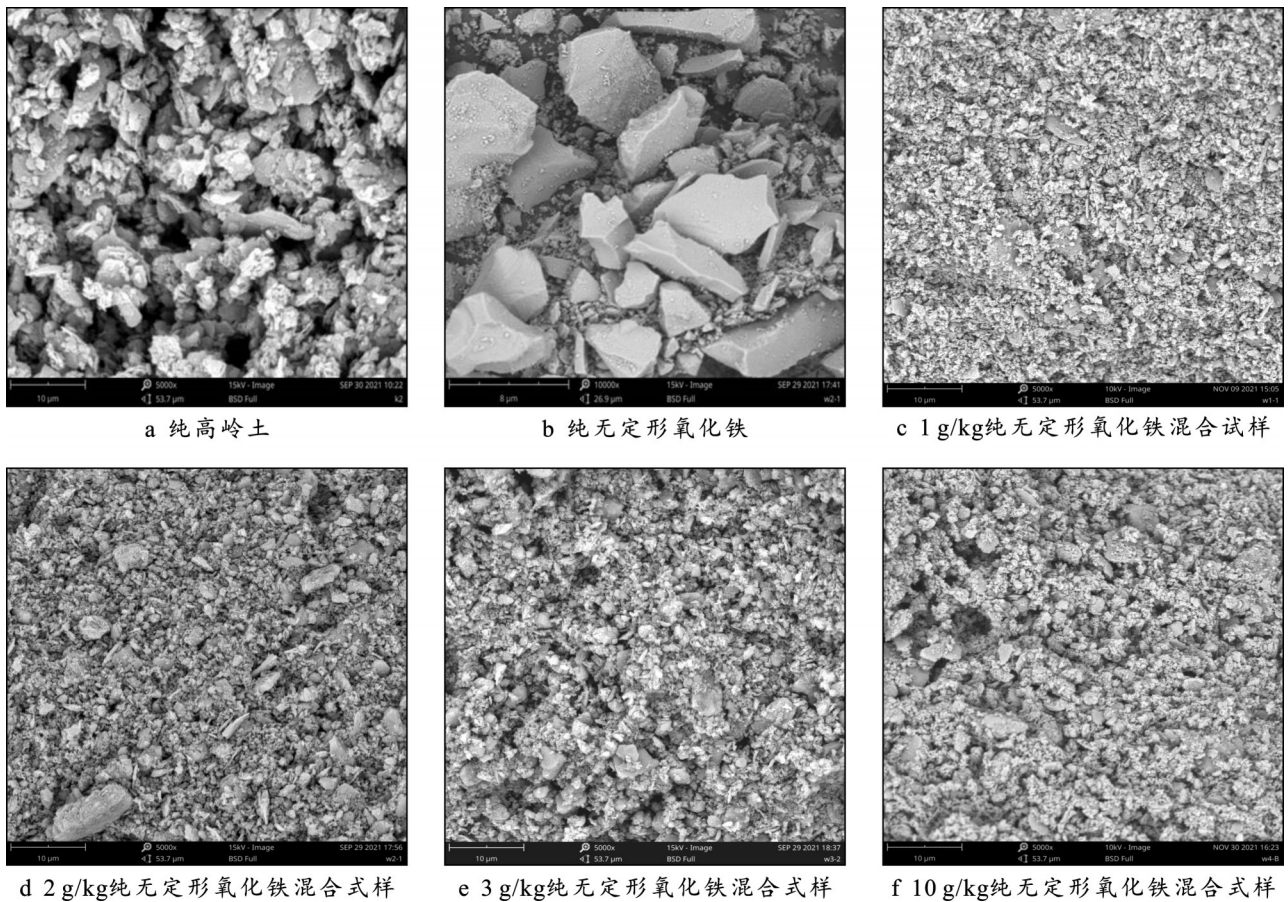


图 4 各试样的微观结构
Fig.4 Microscopic structure of different samples

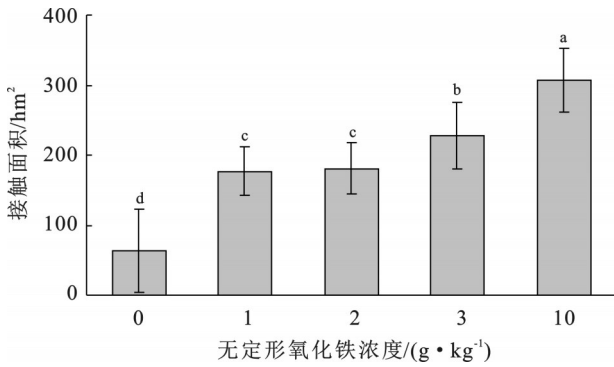


图 5 不同无定形氧化铁浓度梯度下的接触面积变化

Fig.5 Changes in contact area under different concentration gradients of amorphous iron oxide

2.4 无定形氧化铁对土壤力学参数的影响

在不同围压条件下,无定形氧化铁与高岭土混合试样表现出明显的抗剪强度差异(图 6)。低围压下,不同添加浓度试样的抗剪强度差异显著($p < 0.05$),表明此时材料间胶结作用及微观结构特征对抗剪性能的控制作用较强。随着围压增大,试样间抗剪强度差异逐渐减小,显示高围压对结构差异影响具有弱化效应。值得注意的是,3 g/kg 处理组在各围压水平下均表现出最高抗剪强度,表明该浓度对增强高岭土力学性能具有最优效果。

在黏聚力方面,混合试样呈现先缓慢上升、后快速增长,最终趋于平稳的变化趋势(图 7a)。当添加浓度为 3 g/kg 时,黏聚力达到最大值;添加浓度增加至 10 g/kg 时,黏聚力略有下降,呈现典型的饱和响

应,表明无定形氧化铁在增强土体胶结性过程中存在浓度阈值,超过该临界浓度后增强效果趋于稳定。与纯高岭土相比,所有处理组黏聚力均有所提高,其中 3 g/kg 和 10 g/kg 处理组分别提高 24.82% 和 17.57%,进一步验证了无定形氧化铁在提升土壤结构胶结性与抗剪强度方面的显著作用。相比之下,内摩擦角变化幅度较小(图 7b),范围为 32.70°~34.12°,所有处理组较纯高岭土略有下降,其中 3 g/kg 处理组降幅最大(下降 5.30%)。说明无定形氧化铁虽能显著增强黏聚力,但对内摩擦角影响有限。摩擦角的轻微下降可能源于氧化铁包覆作用,减少了颗粒间直接接触和粗糙摩擦。因此,无定形氧化铁主要通过胶结作用而非影响内摩擦角改善土体力学性能。

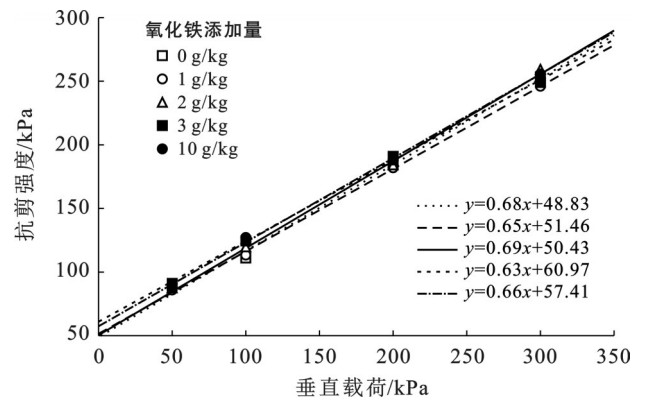


图 6 梯度添加无定形氧化铁后土壤抗剪强度的变化

Fig.6 Changes in soil shear strength after gradient addition of amorphous iron oxide

表 1 梯度添加无定形氧化铁后土壤微观定量参数差异对比分析

Table 1 Comparative analysis of differences in soil microscopic quantitative parameters after gradient addition of amorphous iron oxide

项目	添加浓度/(g·kg ⁻¹)	分形维数	表观孔隙率	圆度	丰度	颗粒长轴/ μm	颗粒短轴/ μm
形添加无定氧化铁	1	1.22±0.00 ^a	0.51±0.01 ^b	5.76±0.12 ^a	0.61±0.01 ^a	1.28±0.01 ^a	0.057±0.004 ^a
	2	1.20±0.01 ^{bc}	0.54±0.02 ^b	4.33±0.03 ^b	0.60±0.01 ^a	1.12±0.01 ^b	0.059±0.004 ^a
	3	1.21±0.00 ^{ab}	0.52±0.02 ^b	5.09±0.14 ^{ab}	0.62±0.01 ^a	1.32±0.04 ^a	0.074±0.005 ^a
	10	1.21±0.00 ^{ab}	0.52±0.02 ^b	5.63±0.14 ^a	0.61±0.00 ^a	1.36±0.04 ^a	0.058±0.012 ^a
纯高岭土	0	1.19±0.01 ^c	0.58±0.004 ^a	5.01±0.37 ^{ab}	0.61±0.00 ^a	1.34±0.05 ^a	0.02±0.006 ^b

注:同列不同小写字母表示处理之间差异显著($p < 0.05$)。

3 讨论

随着无定形氧化铁含量增加,土壤微观结构发生显著变化,主要表现为胶结物质增多、孔隙度降低以及颗粒间包被效应增强。SEM 和 XRD 分析显示,氧化铁胶结物主要分布于土壤颗粒表面及接触部位,形成致密的胶结层,从而降低孔隙度并增强土壤结构的紧密性。该现象与马琳等^[24]在添加低浓度无定形氧化铁(4~9 g/kg)培养的原状土试样的 SEM 分

析结果一致。从矿物学角度看,无定形氧化铁在到达饱和浓度之前,可能通过离子交换或嵌入作用部分替代高岭石中的铝氧八面体片,形成“铁氧八面体”结构,从而增强氧化铁-高岭石复合体系的稳定性与胶结强度^[25]。接触面积在 3 g/kg 处出现峰值,而颗粒长轴、圆度和表观孔隙率在不同低剂量范围内表现出显著变化。这可以归因于无定形氧化铁在低-中等添加量下优先以包被与桥联方式吸附于黏土颗粒表面,增加颗粒间接触并填充微孔,从而使接触面积和

孔隙率发生显著变化;而随着无定形氧化铁浓度进一步提高,新增的无定形氧化铁主要参与团聚体外生长或表面重构,接触面积因此趋平^[26]。分形维数、颗粒丰度及短轴等指标未显著变化,可能是因为这些指标反映的是更大尺度或结构刚性的属性,局部表面包被/微量胶结不足以改变其整体尺度自相似性与统计分布^[27]。与此同时,氧化铁还能通过形成铁质胶膜进一步强化结构稳定性。在碱性或强蒸

发环境中, Ca^{2+} 与 HCO_3^- 反应生成的 CaCO_3 可沉积于颗粒间形成无机胶结体;二氧化硅凝胶聚合、硫酸钙等盐类结晶,以及 Al^{3+} 、 Fe^{3+} 等金属离子的水解产物与有机-无机复合胶体的生成,也可能协同增强土壤结构的胶结作用^[14]。综上所述,随着无定形氧化铁浓度的增加,土壤结构胶结作用愈发显著,各类物理-化学过程的协同效应促使土壤孔隙度持续下降,团聚效应增强,整体结构趋于致密化。

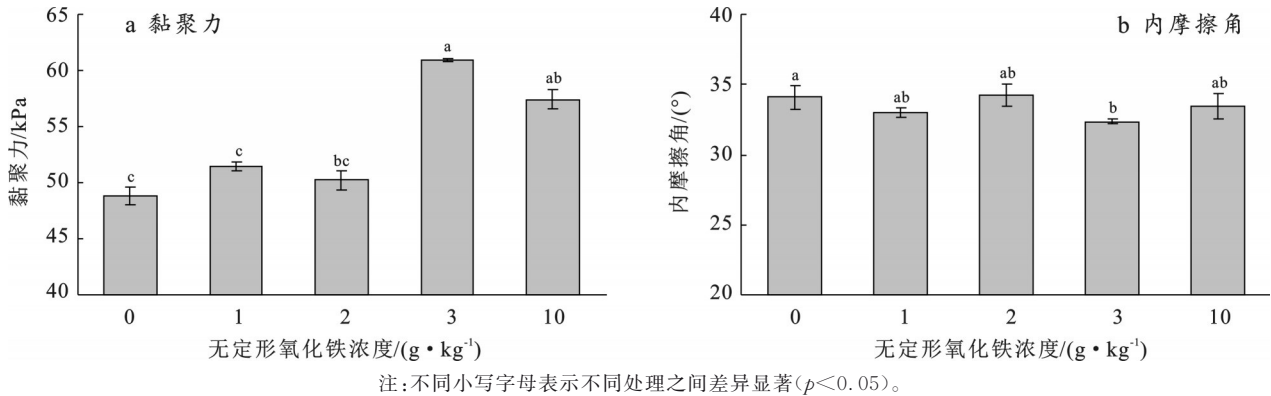


图7 梯度添加无定形氧化铁后土壤抗剪强度参数的变化

Fig.7 Changes in soil shear strength parameters after gradient addition of amorphous iron oxide

在力学性能方面,添加无定形氧化铁显著提高了土体抗剪强度,尤其在低压条件下效果更为明显。锥亿平等^[28]的研究表明,偏高岭土基地聚物添加了赤铁矿(0.2%~0.6%)后,其抗剪强度显著增加。Yan Hualing等^[29]的研究表明,向土壤中添加无定形氧化铁、赤铁矿和针铁矿(10 g/kg)均可改变土壤微观结构及剪切强度。不同形态的氧化铁通过促进颗粒胶结,调控颗粒接触面积、粒径分布及微孔结构,从而影响黏聚力、内摩擦角和抗剪强度,处理后抗剪强度表现为:针铁矿处理 > 无定形氧化铁处理 > 赤铁矿处理 > 纯高岭土^[29]。同时,无定形氧化铁对黏聚力的增强具有明显浓度效应。当添加浓度为3 g/kg时,黏聚力达到最大值,比纯高岭土提高24.82%,主要归因于铁胶质物质在颗粒间形成连续的胶结网络,增强土体整体结构与内聚力^[14]。当浓度超过3 g/kg后,黏聚力增长幅度明显趋缓,呈现典型的饱和效应,表明胶结作用已接近结构承载与反应位点的临界水平。其机理在于,无定形氧化铁主要通过黏土矿物颗粒间的接触点形成胶结桥接而增强黏聚力。当添加浓度超过临界值(3 g/kg)后,土矿物颗粒间的间隙已被填满,几乎没有有效的接触点与新增的氧化铁形成有效胶结网络,因此黏聚力的提升趋于平缓^[26]。但是,无定形氧化铁浓度与土壤黏聚力的定量关系还需进一步研究,特别是在3 g/kg左右。相

比之下,无定形氧化铁对内摩擦角影响有限,变化范围仅为 $32.70^\circ \sim 34.12^\circ$,其主要原因在于无定形氧化铁以胶体状或亚微米级颗粒形式存在,粒径远小于高岭土,表面光滑且无棱角,难以有效增强颗粒间的骨架支撑或增强机械嵌锁作用^[30]。因此,无定形氧化铁主要通过增强黏聚力而非摩擦阻力提升土体抗剪强度,在特定水文地质条件下能有效提高土体稳定性,具有重要工程应用潜力。

本研究从微观机制层面深化了对土壤胶结行为及其力学效应的理解,为崩岗灾害防治提供了理论依据。

4 结论

本研究围绕无定形氧化铁对高岭土结构特征与抗剪性能的影响机制展开,系统分析了不同浓度无定形氧化铁处理下的微观形貌及力学响应。

(1) 无定形氧化铁浓度对胶结体粒径分布具有调控作用,其中中等浓度(2 g/kg)处理在促进中等粒径范围胶结体形成方面表现最为突出,其占比显著高于高浓度(10 g/kg)处理。微观结构分析表明,3 g/kg处理的样品接触面积达到峰值后趋于平缓,样品颗粒长轴缩短了22%;2 g/kg处理的样品圆度降低了25%;1 g/kg处理的样品表观孔隙率下降12%;其余参数的变异系数均小于15%,未呈现显著差异。

(2) 无定形氧化铁通过增强颗粒间胶结作用,调控微观结构布局,有效地提升了高岭土体系的抗剪性能。低围压条件下各处理组间差异较为明显,随围压升高,组间差异逐渐减小。黏聚力随无定形氧化铁浓度增加呈现先增强后趋于饱和的变化趋势,在中等浓度条件下达到最大值;内摩擦角在整个处理范围内波动较小,表明其受无定形氧化铁影响不显著。

参考文献 (References)

- [1] Chen Xin, Wang Jianxun, Wei Yujie, et al. Geospatial variation of granitic soil erodibility along a hydrothermal gradient in the gully region [J]. *Catena*, 2024, 245: 108343.
- [2] Liao Dalan, Deng Yusong, Duan Xiaoqian, et al. Variations in weathering characteristics of soil profiles and response of the Atterberg limits in the granite hilly area of South China [J]. *Catena*, 2022, 215: 106325.
- [3] An Ran, Zhang Xianwei, Kong Lingwei, et al. Drying-wetting impacts on granite residual soil: A multi-scale study from macroscopic to microscopic investigations [J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2022, 81(10): 447.
- [4] An Ran, Wang Yixian, Zhang Xianwei, et al. Quantitative characterization of drying-induced cracks and permeability of granite residual soil using micron-sized X-ray computed tomography [J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 876: 163213.
- [5] Li Chengsheng, Kong Lingwei, Zhang Bingxin, et al. Determination of damage evolution characteristics in granite residual soil shear bands by micro-CT-based advanced digital volume correlation [J]. *Engineering Geology*, 2024, 333: 107505.
- [6] Liu Weiping, Cui Yunwei, Ouyang Guoquan, et al. An experimental study on influence of grain-size composition on collapsing erosion of granite residual soil [J]. *Catena*, 2023, 223: 106949.
- [7] 韩杰欣, 邓芷慧, 王旌靡, 等. 干湿交替条件下花岗岩崩岗区土壤裂隙发育规律 [J]. *水土保持学报*, 2024, 38(5): 262-271.
- Han Jiexin, Deng Zhihui, Wang Jingmi, et al. Development of soil cracks in granite Benggang area under wetting-drying cycles [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2024, 38(5): 262-271.
- [8] 成辉, 钟小剑, 李智广, 等. 崩岗治理碳汇作用与碳汇能力评估 [J]. *中国水土保持科学*, 2024, 22(2): 146-153.
- Cheng Hui, Zhong Xiaojian, Li Zhiguang, et al. Assessment on the role and capacity of carbon sink in managed Benggang [J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2024, 22(2): 146-153.
- [9] 肖胜生, 王聪, 郭利平, 等. 南方红壤丘陵区水土保持生态服务功能提升研究进展: 以江西省兴国县塘背河小流域为例 [J]. *水土保持通报*, 2019, 39(6): 289-294.
- Xiao Shengsheng, Wang Cong, Guo Liping, et al. Progress of researches on enhancing soil erosion control and ecological services in red soil hilly region of south China: A case study at Tangbei River watershed of Xingguo County, Jiangxi Province [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2019, 39(6): 289-294.
- [10] Zhang X W, Kong L W, Cui X L, et al. Occurrence characteristics of free iron oxides in soil microstructure: Evidence from XRD, SEM and EDS [J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2016, 75(4): 1493-1503.
- [11] Zhang Xianwei, Liu Xinyu, Kong Lingwei, et al. Role of free iron oxides in the physicochemical and mechanical properties of natural clay [J]. *Engineering Geology*, 2022, 303: 106665.
- [12] 张蕾, 张凤荣, 靳东升, 等. 黄土高原淋溶土黏粒、氧化铁与颜色的关系及发生学解释: 以山西土系调查的31个黏化层为例 [J]. *土壤学报*, 2021, 58(4): 876-886.
- Zhang Lei, Zhang Fengrong, Jin Dongsheng, et al. The correlation of soil color relative to clay and iron oxides in alfisol of the Loess Plateau and its genetic explanation: A case study of the 31 argillic horizons covered in the soil series survey of Shanxi Province [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2021, 58(4): 876-886.
- [13] 苏玲, 章永松, 林咸永. 干湿交替过程中水稻土铁形态和磷吸附解吸的变化 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2001, 7(4): 410-415.
- Su Ling, Zhang Yongsong, Lin Xianyong. Changes of iron oxides and phosphorus adsorption-desorption in paddy soils under alternating flooded and dried conditions [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2001, 7(4): 410-415.
- [14] 何群, 陈家坊, 许祖诒. 土壤中氧化铁的转化及其对土壤结构的影响 [J]. *土壤学报*, 1981, 18(4): 326-334.
- He Qun, Chen Jiafang, Xu Zuyi. Influence of transformation of iron oxides on soil structure [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1981, 18(4): 326-334.
- [15] 郑勤敏, 王祖梅, 黄奕铭, 等. 东南崩岗侵蚀区崩壁土壤岩土特性的空间分异特征 [J]. *森林与环境学报*, 2022, 42(1): 53-62.
- Zheng Qinmin, Wang Zumei, Huang Yiming, et al. Spatial differentiation of geotechnical characteristics of soil in a Benggang gully wall in southeast China [J]. *Journal of Forest and Environment*, 2022, 42(1): 53-62.
- [16] Chen Jialin, Zhou Man, Lin Jinshi, et al. Comparison

- of soil physicochemical properties and mineralogical compositions between noncollapsible soils and collapsed gullies [J]. *Geoderma*, 2018, 317:56-66.
- [17] 魏世勇, 刘茜, 刘凡, 等. Fe(II)存在条件下氧化铁-高岭石复合物的形成与转化[J]. *土壤学报*, 2010, 47(6): 1134-1143.
- Wei Shiyong, Liu Qian, Liu Fan, et al. Formation and transformation of iron oxide-kaolinite association in the presence of Fe(II) [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2010, 47(6):1134-1143.
- [18] 冯金良, 赵泽三, 高国瑞. 无定形态游离氧化铁脱水老化对黏性土物理性质的影响[J]. *工程地质学报*, 1993, 1(2):85-92.
- Feng Jinliang, Zhao Zesan, Gao Guorui. The effect of amorphous free ferric oxide on the physical properties of clay soil in the process of dehydration [J]. *Journal of Engineering Geology*, 1993, 1(2):85-92.
- [19] 白雪, 杨扬, 黄婷婷, 等. 激光衍射法与湿筛-吸管法测定中国 3 种典型土壤粒径分布的差异分析[J]. *水土保持研究*, 2021, 28(4):84-90.
- Bai Xue, Yang Yang, Huang Tingting, et al. Comparison of particle size distributions measured by laser diffraction method and sieve-pipette method of three typical soils in China [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2021, 28(4):84-90.
- [20] 徐日庆, 徐丽阳, 邓祎文, 等. 基于 SEM 和 IPP 测定软黏土接触面积的试验[J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2015, 49(8):1417-1425.
- Xu Riqing, Xu Liyang, Deng Yiwen, et al. Experimental study on soft clay contact area based on SEM and IPP [J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2015, 49(8):1417-1425.
- [21] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB/T 50123—2019 土工试验方法标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 2019.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. GB/T 50123—2019 Standard for geotechnical testing method [S]. Beijing: China Planning Press, 2019.
- [22] 高彦斌, 姚天骄, 杨正园. 饱和黏性土的总强度与基坑工程水土合算土压力分析方法[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2020, 48(9):1296-1304.
- Gao Yanbin, Yao Tianjiao, Yang Zhengyuan. Total strength of saturated clay and earth pressure in excavation by total stress analysis method [J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2020, 48(9): 1296-1304.
- [23] 张国军, 张勇. 基于摩尔-库伦准则的岩石材料加(卸)载分区破坏特征[J]. *煤炭学报*, 2019, 44(4): 1049-1058.
- Zhang Guojun, Zhang Yong. Partition failure characteristics of rock material loading and unloading based on Mohr-Coulomb criterion [J]. *Journal of China Coal Society*, 2019, 44(4):1049-1058.
- [24] 马琳, 王清, 原国红. 红土中游离氧化铁胶结作用的微观研究[J]. *河北工程大学学报(自然科学版)*, 2007, 24(1):27-31.
- Ma Lin, Wang Qing, Yuan Guohong. Study on the microstructure of cementation function of free iron oxide in red soil [J]. *Journal of Hebei University of Engineering (Natural Science Edition)*, 2007, 24(1):27-31.
- [25] 宋旭昕, 刘同旭. 土壤铁矿物形态转化影响有机碳固定研究进展[J]. *生态学报*, 2021, 41(20):7928-7938.
- Song Xuxin, Liu Tongxu. Effects of soil iron mineral transformation on organic carbon sequestration: A review [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(20):7928-7938.
- [26] 姚远, 余光辉, 滕辉. 土壤铁氧化物-亚铁的相互作用及其环境影响研究进展[J]. *土壤*, 2023, 55(4):718-728.
- Yao Yuan, Yu Guanghui, Teng Hui. Soil iron oxide-ferrous interaction and its environmental effects: A review [J]. *Soils*, 2023, 55(4):718-728.
- [27] 刘亚龙, 王萍, 汪景宽. 土壤团聚体的形成和稳定机制: 研究进展与展望[J]. *土壤学报*, 2023, 60(3):627-643.
- Liu Yalong, Wang Ping, Wang Jingkuan. Formation and stability mechanism of soil aggregates: Progress and prospect [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2023, 60(3): 627-643.
- [28] 雒亿平, 邢美光, 王德法, 等. 赤铁矿对偏高岭土基聚物力学性能及反应机理的影响[J]. *材料导报*, 2025, 39(8):108-115.
- Luo Yiping, Xing Meiguang, Wang Defa, et al. Effect of hematite on mechanical properties and reaction mechanism of metakaolin-based geopolymers [J]. *Materials Reports*, 2025, 39(8):108-115.
- [29] Yan Hualing, Cen Nanbo, Zheng Qinmin, et al. Analysis of the shear strength of iron oxide-kaolinite cementing materials in granite red soil [J]. *Minerals*, 2024, 15(1):16.
- [30] 刘莉, 颜荣涛, 牛富俊, 等. 游离氧化铁对红黏土力学特性的影响[J]. *桂林理工大学学报*, 2021, 41(4): 810-816.
- Liu Li, Yan Rongtao, Niu Fujun, et al. Effect of free iron oxide on the strength and deformation characteristics of red clay [J]. *Journal of Guilin University of Technology*, 2021, 41(4):810-816.