

文章编号: 1007-2993(2024)01-0101-05

富里酸污染红黏土抗剪强度试验研究

蒙剑坪¹ 李善梅¹ 廖勇彬² 张浩¹ 李骏武¹

(1. 桂林理工大学, 广西桂林 541004; 2. 广西壮族自治区三〇七核地质大队, 广西贵港 537100)

【摘要】 通过在红黏土中掺入不同含量富里酸粉末制样, 并对试样采用蒸馏水饱和浸泡, 对浸泡龄期为 7 d、14 d 和 28 d 的试样进行直剪试验, 分析不同富里酸掺入量和浸泡时间对红黏土试样抗剪强度的影响。试验结果表明, 富里酸的掺入会降低土样的抗剪强度, 土样的黏聚力随富里酸掺入量增加而提高, 内摩擦角则随富里酸含量的增加而逐渐降低, 相同富里酸掺入量下, 浸泡时间越长, 黏聚力越大, 内摩擦角则越小。富里酸分子的羧基、羟基、羰基、甲氧基等活性官能团与土体矿物表面形成吸附作用, 使得富里酸包裹在土颗粒表面, 对土颗粒间形成联结作用, 从而影响土体的抗剪强度指标。

【关键词】 抗剪强度; 富里酸; 红黏土

【中图分类号】 TU446; TU411

【文献标识码】 A

doi: 10.3969/j.issn.1007-2993.2024.01.018

Experimental Study on Shear Strength of Fulvic Acid-Contaminated Red Clay

Meng Jianping¹ Li Shanmei¹ Liao Yongbin² Zhang Hao¹ Li Junwu¹

(1. Guilin University of Technology, Guilin 541004, Guangxi, China; 2. Guangxi Zhuang Autonomous Region 307 Nuclear Geological Brigade, Guigang 537100, Guangxi, China)

【Abstract】 To investigate the effect of fulvic acid on the shear strength of red clay, the red clay was mixed with different contents of fulvic acid powder to prepare samples and saturated with distilled water. Direct shear tests were carried out on the samples with soaking ages of 7 d, 14 d, and 28 d to analyze the effects of different dosages of fulvic acid and soaking time on the shear strength of red clay samples. The test results show that the addition of fulvic acid will reduce the shear strength of the soil samples. With the increase of fulvic acid incorporation, the shear strength of the samples increases and the internal friction angle decreases, respectively. With the same amount of fulvic acid, the longer the soaking time, the greater the cohesion and the smaller the internal friction angles. The active functional groups of the fulvic acid, such as carboxyl groups, hydroxyl groups, carbonyl groups, and methoxyl groups adsorbed on the surface of soil minerals, wrapping on the surface of soil particles and forming a bonding effect between the soil particles, thus affecting the shear strength indexes of the soil.

【Key words】 shear strength; fulvic acid; red clay

0 引言

红黏土是碳酸盐岩在炎热湿润气候条件下经过物理化学风化、红土化和淋溶作用而形成的一种区域性特殊土^[1-3], 在我国主要分布于广西、贵州、云南、湖南等省份, 其中在南方各省出露面积达 2.0×10^5 km²^[4]。抗剪强度作为土体重要的力学性质指标之一, 与土体类型、成因、成分和结构等因素有关^[5]。许多学者对土体抗剪强度进行了深入研究, 并取得了一定成果。孔令伟等^[6]研究发现, 渗水作用会引起红黏土中氧化铁流失, 减弱土体的胶结作用, 从而降低土体

的抗剪强度。黄亮亮等^[7]通过对比试验研究了固结快剪、快剪和慢剪三种试验条件下红黏土抗剪强度指标, 发现三种试验方法所得到的抗剪强度指标差异较大, 也总结分析了各种方法的影响因素。朱春鹏等^[8]通过对受不同浓度酸碱溶液污染淤泥质黏土进行强度特性试验, 发现随酸碱溶液浓度增加, 污染土黏聚力增加, 内摩擦角呈震荡式减小趋势。潘泰等^[9]将室内配制的不同浓度的盐酸和氢氧化钠溶液作为污染源, 研究了不同浓度的酸碱溶液对红黏土抗剪强度的影响, 发现随着酸碱溶液浓度的增加, 红黏土抗剪

基金项目: 国家自然科学基金(52268055); 广西高校中青年教師科研基础能力提升项目(2019KY0277; 2020KY06028)

作者简介: 蒙剑坪, 男, 1984 年生, 汉族, 广西藤县人, 硕士, 实验师。研究方向: 环境岩土工程。E-mail: mjp@glut.edu.cn

强度逐渐减小。陈 筠等^[10]通过室内试验模拟碱溶液对红黏土抗剪强度特性影响,发现红黏土黏聚力随碱溶液质量分数增加先增加后减小,内摩擦角先减小后增加的规律,并通过微观测试分析了碱溶液污染土体的机制。

腐殖质是动植物残体经微生物分解、转化而成的一种呈棕黑色、亲水、无定形有机物质,广泛分布于土壤中,其成分主要为腐殖酸、富里酸和胡敏酸三类^[11]。曹 净等^[12]通过试验发现不同胡敏酸添加量和不同浓度的富里酸对泥炭土无侧限抗压强度具有深刻影响,胡敏酸浓度的添加,试样无侧限抗压强度降低;当胡敏酸添加量小于10%时,富里酸对土样的无侧向抗压强度提高明显。刘宝臣等^[13]利用人工制备土样的方法探讨了有机质污染红黏土的物理力学性质,得到了随着有机质含量的增加,试样的抗剪强度不断减小的结论。还有学者通过开展有机质对水泥土强度影响室内试验,发现水泥土强度随有机质含量增加而降低^[14-15]。

综上所述,目前针对污染红黏土抗剪强度的研究主要集中于污染源为无机酸碱溶液的情形,且取得了较为可观的研究成果。富里酸和无机酸性质具有

明显的差异性,但关于富里酸对红黏土抗剪强度特性影响的研究报道甚少,同时相关研究表明酸碱污染土的强度特性的变化与其结构变化密切相关^[16-17]。因此,有必要对富里酸溶液污染红黏土的抗剪强度进行探讨,对其微观结构演化机制进行研究,以期进一步加强酸碱污染红黏土的力学性质的认识。鉴于此,以桂林红黏土作为试验土样,根据桂林红黏土中有机质的占比,室内将富里酸粉末与红黏土按照不同的质量比人工压制成一定干密度试样,并浸泡在蒸馏水中,然后分别进行直接剪切试验和扫描电镜试验,探讨污染红黏土抗剪强度及其微观结构的演化机制。

1 试验方案

1.1 原材料

试验所用红黏土取自广西桂林旅游学院雁山校区某工地,取样深度约2.0~4.5 m。原状红黏土呈红褐色—深红色,硬塑—可塑状态,稍湿。根据《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019),室内进行红黏土试样基本物理性质指标测试,试验结果如表1所示。有机质试验结果显示试样有机质含量为31.6 g/kg。红黏土矿物成分鉴定结果如表2所示,化学成分分析结果如表3所示。

表1 红黏土基本物理性质

含水率 w/%	密度 $\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	相对密度 G_s	液限 $w_L/\%$	塑限 $w_p/\%$	比表面积 $S/(\text{m}^2\cdot\text{g}^{-1})$	颗粒组成/%		
						砂粒	粉粒	黏粒
						2~0.075 mm	0.075~0.005 mm	<0.005 mm
34	1.85	2.72	54.1	25.7	95.42	8.57	54.29	37.14

注:液限值取圆锥下沉深度17 mm对应的含水率。

表2 红黏土矿物成分

全岩成分占比/%			黏土矿物占比/%			
石英	针铁矿	黏土矿物	高岭石	伊利石	蛭石	伊蛭混层
59	3	38	61	15	13	11

表3 红黏土氧化物成分及各成分质量分数

化学成分/%									
Al_2O_3	SiO_2	Fe_2O_3	CaO	K_2O	Na_2O	MnO	P_2O_5	MgO	TiO_2
30.26	33.78	25.17	1.06	1.26	0.54	0.12	0.08	0.39	3.17

富里酸粉末为棕褐色粉末状。室内采用便捷式pH计(Starter 300)测得富里酸水溶液(富里酸与水的质量比 $m_F:m_W$ 为1:20)的pH值为5.6。试验用水均为室内烧制的蒸馏水,pH值约为6.5。

1.2 试样制备

已有研究表明,桂林红黏土有机质含量为

0%~8%^[13]。因此,本试验设计掺加的富里酸粉末与红黏土质量比($m_F/m_{\text{土}}$)分别为2%、4%和6%。根据《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019),试验用红黏土采取室内风干,捶碎后过5 mm土壤筛,测定风干土样含水率。试验试样干密度设定为1.6 g/cm³,分别称量富里酸粉末和红黏土质量,以控制试样高度

为标准,采用压样法制样。根据试验要求,不同质量比、不同浸泡天数的土样分别压制4个试样,共压制36个试样。以每个质量比的每个设定浸泡时间为一组,对试样依次编号,利用叠式饱和器安放试样,进行真空蒸馏水饱和,每个质量比的土样浸泡时间分别为7 d、14 d和21 d。

1.3 试验过程

本次直剪试验采用应变控制式直剪仪。红黏土与富里酸粉末混合试样经蒸馏水浸泡后,取出试样按照《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019)进行快剪试验。待试样安装完毕后,分别施加100 kPa、200 kPa、300 kPa、400kPa法向应力后,进行剪切速率为0.8 mm/min的剪切试验。剪切结束后,取出试样,沿剪切面把试样分成两部分。为了研究剪切面土体非扰动结构,将取出的试样进行空气风干,利用透明胶布剥取剪切面表面土体,将剥落土体进行液氮冷冻、真空干燥后进行扫描电镜测试。

2 试验结果

直剪试验一般通过测定4个试样在4个不同的法向应力作用下的剪应力-剪切位移关系曲线,得到的最大剪应力则为抗剪强度。理论上各个法向应力及其所对应的抗剪强度符合库仑方程,即

$$\tau = \sigma \tan \varphi + c \quad (1)$$

式中: τ 为抗剪强度; σ 为破坏面上的法向应力; c 为黏聚力; φ 为内摩擦角。

待红黏土和富里酸粉末混合试样达到设定浸泡时间(7 d、14 d和21 d)后,取出并进行固结快剪试验,所得抗剪强度-法向应力关系曲线如图1所示。由图1可知,富里酸对红黏土的抗剪强度具有显著影响。与无富里酸粉末试样($m_F/m_{\text{红}}=0\%$)相比,红黏土与富里酸粉末混合,经蒸馏水浸泡后,试样的抗剪强度出现了降低趋势。相同富里酸含量条件下,浸泡时间越长,抗剪强度降低程度越大。根据图1,进一步分析土样经蒸馏水浸泡不同时间后的抗剪强度指标 c 、 φ 与富里酸浓度的关系,所得结果如图2、图3所示。

由图2可知,与无富里酸试样($m_F/m_{\text{红}}=0\%$)相比,红黏土与富里酸粉末混合试样的黏聚力随富里酸含量的增加呈逐渐增加的变化规律;相同富里酸含量条件下,试样黏聚力随浸泡时间增加而增加。由图3可知,相对于无富里酸粉末($m_F/m_{\text{红}}=0\%$)的红黏土试样,试样内摩擦角随富里酸含量的增加而逐渐降低。相同浸泡时间下,试样内摩擦角随富里酸含量的增加

而降低。这与刘海桃等^[18]探讨腐殖酸对水泥改良红黏土力学特性影响所得到的规律相似。

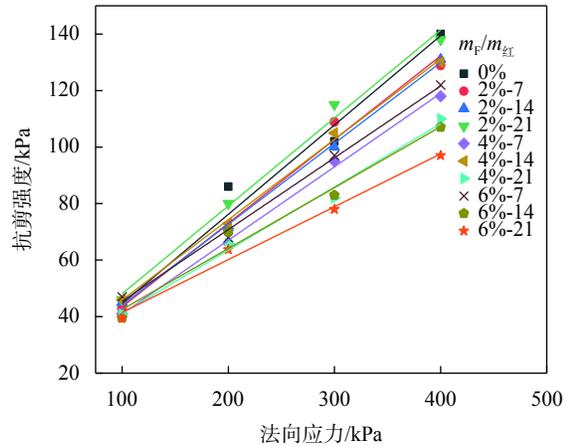


图1 富里酸污染红黏土直剪试验强度曲线

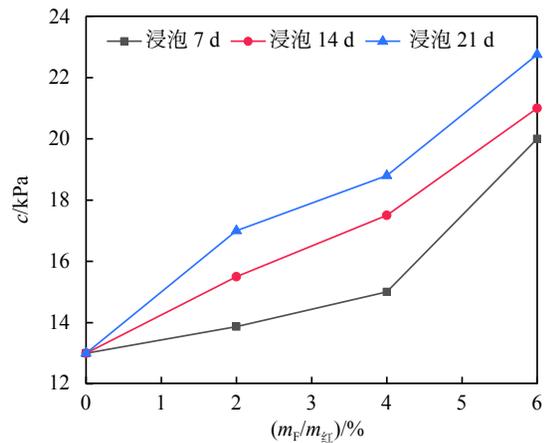


图2 富里酸污染红黏土黏聚力与富里酸含量关系

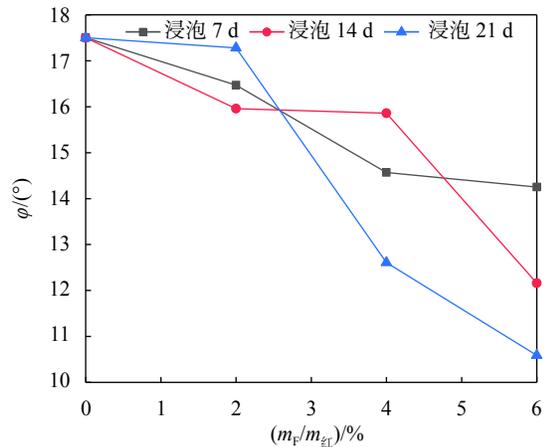


图3 富里酸污染红黏土内摩擦角与富里酸含量关系

3 机理分析

本试验所用红黏土的氧化物成分测试结果表明,所用红黏土主要含有铝/硅/铁氧化物,黏土矿物以高岭石为主。这些氧化物及其水合物、高岭石通常带正电荷^[19]。富里酸是土壤腐殖质主要成分之一,是一种含有大量羧基、羟基、羰基、甲氧基等活性官能团

的芳香环结构天然有机高分子化合物,常常由于羧基(-COOH)、酚羟基(-OH)酸性官能团解离而呈现弱酸性^[12,20-21]。富里酸溶液与铝/铁氧化物通过静电作用和配位体交换作用发生相互作用形成复合体;高岭石黏土矿物通过氢键、疏水作用,以及借助阳离子桥接作用与富里酸溶液形成吸附作用而吸附包裹在土颗粒表面^[12,19]。同时,富里酸是亲水性胶体类物质^[21]。当红黏土与富里酸粉末充分混合,浸泡于蒸馏水中时,富里酸溶于水形成胶体。通过吸附作用与吸附在土颗粒体中各种矿物颗粒结合形成复合胶体。所形成的复合胶体可以作为充填物充填在土颗粒孔隙中,也可以作为连接胶体在土颗粒之间形成胶体连接^[12]。上述土颗粒与富里酸的各种相互作用,提高了土颗粒间结合,增强土颗粒间的黏聚力。为了研究试样剪切面形貌,直剪试验结束后,利用扫描电子显微镜对试样剪切面进行微观结构观测。限于篇幅,本文仅展示富里酸与红黏土质量比($m_F/m_{\text{红}}$)为0%、2%、4%、6%、

蒸馏水饱和浸泡 21 d 的试样在 8000 倍下的 SEM 照片(见图 4)。由图 4 可以看出,红黏土没有掺合富里酸粉末时,土体颗粒骨架比较清晰,大多数颗粒呈片状结构,颗粒间接触形式多为面-面接触;掺合富里酸粉末并蒸馏水饱和浸泡后,土体颗粒骨架变得比较模糊多样化,土颗粒间接触多为边-面接触和面-面接触;与无富里酸试样相比,土颗粒形貌特征不明显,土样形成团聚体。随着富里酸含量的增加,红黏土和富里酸混合试样蒸馏水浸泡液的 pH 值降低,富里酸的羧基(-COOH)、酚羟基(-OH)等酸性官能团去质子化降低,富里酸分子与土体矿物间的静电排斥力降低,有助于富里酸在土颗粒表面的吸附作用,富里酸吸附量随 pH 值降低而增大^[12,19,22]。富里酸的吸附作用增强了土颗粒间的联结使试样黏聚力增加,但土颗粒表面的富里酸分子层削弱了土颗粒间的内摩擦角。

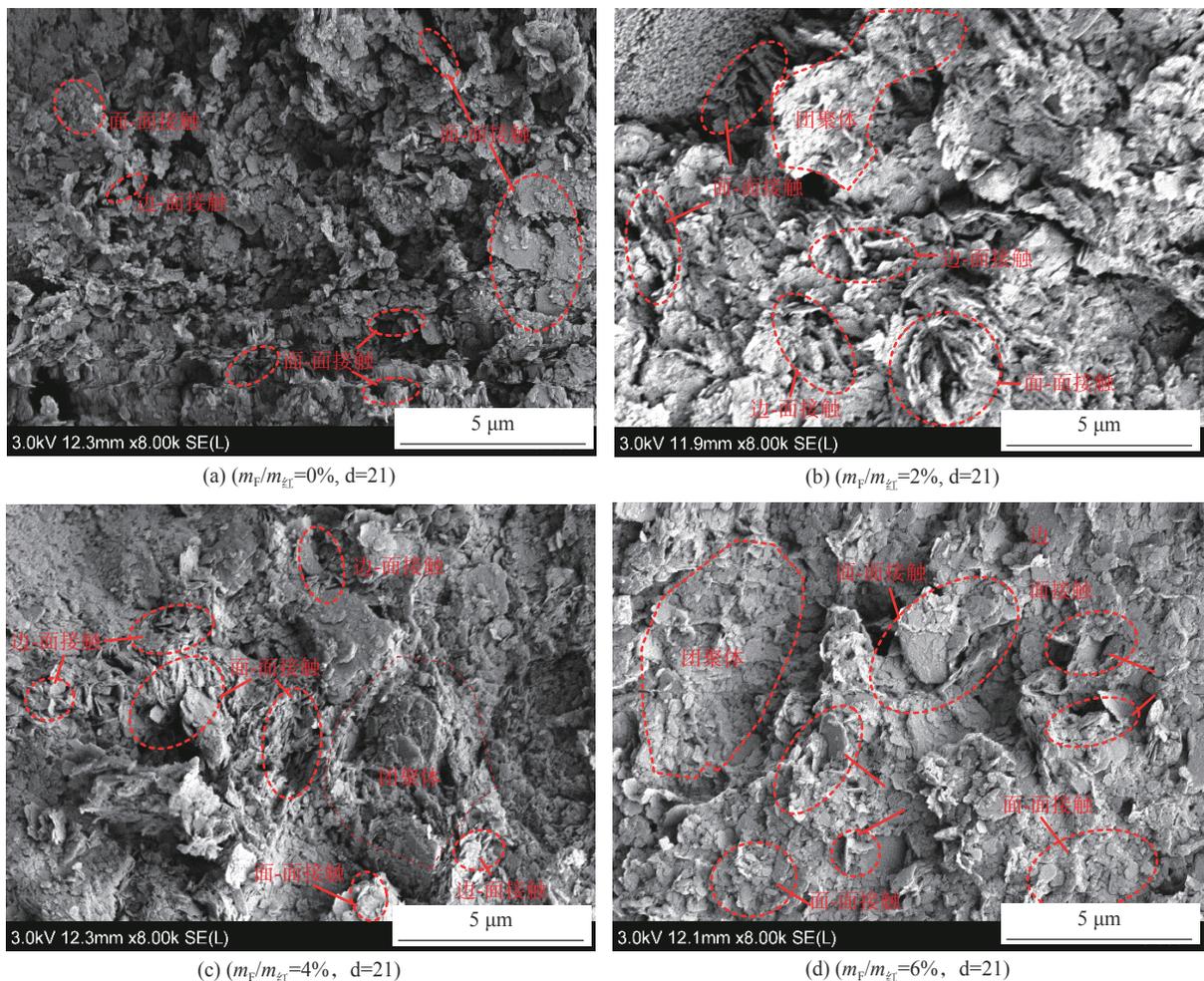


图 4 富里酸污染红黏土剪切面 SEM 图

4 结论

(1)富里酸对红黏土抗剪强度有显著影响,随着

富里酸含量的增加,试样抗剪强度降低。

(2)试样黏聚力随富里酸含量增加而提高。相同

富里酸含量条件下, 试样黏聚力随试样浸泡时间的增加而提高; 试样内摩擦角随富里酸含量的增加而降低。

(3)富里酸通过分子结构上的羧基、羟基、羰基、甲氧基等活性官能团与土体矿物发生吸附作用, 从而影响土体的抗剪强度指标。

参 考 文 献

- [1] 赵蕊, 左双英, 孙志强. 贵阳红黏土的应力-应变软化模型及参数研究[J]. 地下空间与工程学报, 2018, 14(5): 1258-1265.
- [2] 常红帅, 刘丽, 季春生, 等. 桂林、柳州两种红黏土的土-水特征曲线[J]. 桂林理工大学学报, 2015, 35(4): 855-859.
- [3] 蒙高磊, 刘之葵, 雷轶. 红黏土的研究现状和展望[J]. 路基工程, 2014, (4): 7-11.
- [4] 陈佳雨, 刘之葵. 原状与重塑红黏土强度变化机理[J]. 河南科技大学学报(自然科学版), 2019, 40(3): 53-59,65.
- [5] 赵成刚, 白冰, 王运霞. 土力学原理[M]. 北京: 北京交通大学出版社, 2006.
- [6] 孔令伟, 罗鸿禧. 游离氧化铁形态转化对红黏土工程性质的影响[J]. 岩土力学, 1993, 14(4): 25-39.
- [7] 王亮亮, 杨果林. 红黏土抗剪强度与影响因子作用机理分析[J]. 铁道科学与工程学报, 2009, 16(6): 44-48.
- [8] 朱春鹏, 刘汉龙, 沈扬. 酸碱污染土强度特性的室内试验研究[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(7): 1146-1152.
- [9] 潘泰, 赵贵涛, 黄英. pH值对云南红黏土力学特性及微观结构的影响[J]. 硅酸盐通报, 2021, 40(10): 3427-3434.
- [10] 陈筠, 赵鹏, 何维, 等. 碱污染红黏土抗剪强度特性室内试验研究[J]. 长江科学院院报, 2017, 34(12): 94-100.
- [11] 李会杰. 腐殖酸和富里酸的提取与表征研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2012.
- [12] 曹静, 孔程, 李松坡. 腐殖酸对泥炭土强度的影响及其机理分析[J]. 安全与环境学报, 2022, 22(5): 2493-2499.
- [13] 刘宝臣, 唐黔, 张晨富, 等. 有机质污染下红黏土物理力学特性变化规律分析[J]. 路基工程, 2014, (3): 12-16.
- [14] 储诚富, 邵俐, 刘松玉, 等. 有机质含量对水泥土强度影响的室内定量研究[J]. 岩土力学, 2006, 27(9): 1613-1616.
- [15] 范昭平, 朱伟, 张春雷. 有机质含量对淤泥固化效果影响的试验研究[J]. 岩土力学, 2005, 26(8): 1327-1334.
- [16] 刘宽, 叶万军, 刘海军, 等. 酸碱污染黄土抗剪强度演化规律及微观机制[J]. 岩土力学, 2022, 43(S1): 1-12.
- [17] MITCHELL J K, SOGA K. Fundamentals of Soil Behavior (Third Edition)[M]. New York: John Wiley & Sons, Inc. 2005.
- [18] 刘海桃, 徐志豪, 邵朝阳. 有机质对水泥改良红黏土的力学特性影响及微观机理分析[J]. 土工基础, 2021, 35(5): 645-648.
- [19] 魏世勇, 谭文峰, 刘凡. 土壤腐殖质-矿物质交互作用的机制及研究进展[J]. 中国土壤与肥料, 2009, (1): 1-6.
- [20] 潘晓莹, 时仁勇, 洪志能, 等. 富里酸对红壤酸度的改良及酸化阻控效果[J]. 土壤, 2020, 52(4): 685-690.
- [21] 曹净, 余再西, 刘海明, 等. 富里酸对红黏土水泥土复合体的侵蚀性试验研究[J]. 昆明理工大学学报(自然科学版), 2015, 40(1): 35-38,83.
- [22] 李爱民, 冉炜, 代静玉, 等. 天然有机质与矿物间的吸附及其环境效应的研究进展[J]. 岩石矿物学杂志, 2005, (6): 671-680.

收稿日期: 2022-12-07