

DOI: 10.11766/trxb202007300287

张越, 赵冬峰, 郑勤敏, 林金石, 蒋芳市, 黄碧妃, 葛宏力, 黄炎和. 花岗岩红壤丘陵区崩岗土体界限含水量的温度效应研究[J]. 土壤学报, 2022, 59 (1): 118–128.

ZHANG Yue, ZHAO Dongfeng, ZHENG Qinmin, LIN Jinshi, JIANG Fangshi, HUANG Bifei, GE Hongli, HUANG Yanhe. Effects of Temperature on Soil Atterberg Limit in Soil of Collapsing Gully Wall in the Hilly Granitic Region of South China[J]. Acta Pedologica Sinica, 2022, 59 (1): 118–128.

## 花岗岩红壤丘陵区崩岗土体界限含水量的温度效应研究\*

张 越, 赵冬峰, 郑勤敏, 林金石, 蒋芳市, 黄碧妃, 葛宏力,  
黄炎和<sup>†</sup>

(福建农林大学资源与环境学院, 福州 350002)

**摘 要:** 水分和温度会显著影响花岗岩红壤的力学状态, 是崩岗发生和发展的两大驱动因素。本研究以崩壁三个土层土壤: 红土层、砂土层和碎屑层为研究对象, 在 15、25、40 和 60℃ 温度条件下对三个土层土壤的液塑限和结合水含量开展研究。结果表明: 红土层的液限、塑限和塑性指数均高于砂土层和碎屑层, 碎屑层土壤的液塑限最小。崩岗土壤的液塑限与细黏粒、有机质和氧化铁的含量呈线性正相关。温度从 15℃ 升高至 40℃ 时, 三个土层土壤的液限和塑限均显著降低, 同时土壤的结合水含量均降低。温度从 40℃ 升高至 60℃, 红土层、碎屑层土壤塑限和红土层、砂土层土壤液限有所上升。温度对土壤结合水含量的影响规律与土壤液塑限的变化趋势一致。碎屑层土壤的液限接近饱和含水量, 且液限随温度升高逐渐降低。在夏季高温多雨的情况下, 碎屑层土壤最容易发生流动变形, 可能是导致崩壁崩塌的主要原因之一。

**关键词:** 崩岗; 结合水; 颗粒分布; 液塑限

**中图分类号:** S157.1      **文献标志码:** A

## Effects of Temperature on Soil Atterberg Limit in Soil of Collapsing Gully Wall in the Hilly Granitic Region of South China

ZHANG Yue, ZHAO Dongfeng, ZHENG Qinmin, LIN Jinshi, JIANG Fangshi, HUANG Bifei, GE Hongli, HUANG Yanhe<sup>†</sup>

(College of Resources and Environment, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China)

**Abstract:** [Objective] Collapsing gully, one of the most serious soil erosion problems in the tropical and subtropical areas of South China, occurs mainly in the hilly red soil regions as triggered off by the interaction of runoff and gravity. A collapsing gully generally consists of five parts: an upper catchment, a collapsing wall, a colluvial deposit, a scour channel, and an alluvial fan. Stability of a collapsing gully wall determines the scale of the collapsing gully and the volume of the colluvial deposit. Rainfall and temperature not only determine weathering rate of soils, but also affect the mechanical state of granite red soils. Liquid and

\* 国家自然科学基金项目 (41907043) 资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 41907043)

<sup>†</sup> 通讯作者 Corresponding author, E-mail: yanhehuang@163.com

作者简介: 张 越 (1990—), 男, 安徽无为, 博士, 副教授, 主要从事土壤侵蚀与治理研究。E-mail: zhangyue@fafu.edu.cn

收稿日期: 2020-07-30; 收到修改稿日期: 2020-09-17; 网络首发日期 (www.cnki.net): 2020-11-17

plastic limits are the most commonly tested mechanical indices. However, few studies have been reported about investigation of the effects of temperature on soil Atterberg limits in collapsing gullies. 【 Method 】 In this study, soil samples were collected from the three soil layers in a soil profile, i.e. red soil layer, sandy soil layer and detritus layer, of a typical collapsing gully located in Anxi County, Fujian Province. The soil profile was subdivided into three soil layers in the light of their colors and structures. Four levels of temperature (15, 25, 40 and 60℃) were set to investigate their effects on soil liquid and plastic limits and soil bound water content. 【 Result 】 The red soil layer was found to be the highest in soil liquid limit, plastic limit and plastic index and followed by the sandy soil layer and the detritus layer. Liquid and plastic limits positively and linearly related to contents of fine clay, organic matter and iron oxide. When temperature rose from 15℃ to 40℃, soil liquid and plastic limits in the three soil layers all decreased, as well as the soil bound water content. When temperature rose from 40℃ to 60℃, soil plastic limit increased in the red soil layer and the detritus layer, and soil liquid limit increased in the red soil layer and sandy soil layer. The effect of temperature on soil bound water content was consistent with the changes in soil liquid and plastic limits. 【 Conclusion 】 The soil liquid limit of the detritus layer is approximate to its saturated water content, and decreases gradually with the rising soil temperature. In the case of high temperature and heavy rain in summer in this region, flow deformation is the most likely to occur in the detritus layer, which might be one of the main reasons causing the collapse of a collapsing gully wall.

**Key words:** Collapsing gully; Soil bound water; Soil particle size distribution; Liquid and plastic limits

地表径流造成的沟谷侵蚀在红壤丘陵区普遍存在, 是全世界共同关注的环境问题之一, 被认为是造成土地退化的主要原因<sup>[1-2]</sup>。崩岗是一种特殊的沟谷侵蚀类型, 是由强烈径流冲刷和重力侵蚀共同作用下的边坡崩塌引起的<sup>[3-4]</sup>。夏季连续强降雨作用下, 花岗岩红壤丘陵区会发生崩岗侵蚀<sup>[5-6]</sup>。根据中国水土保持监测中心 2005 年的调查数据, 中国南方花岗岩红壤丘陵区约有 23.91 万个崩岗<sup>[5, 7]</sup>。崩岗地区的年平均侵蚀量为 59 000 T·km<sup>-2</sup>, 是平缓坡地水力侵蚀量的 50 多倍<sup>[8]</sup>。崩岗是一种危害性极强的水土流失现象, 其危害主要包括: 破坏土地资源, 威胁生命财产安全、水库库容下降、引发洪涝灾害等<sup>[7]</sup>。因此, 崩岗严重危害了华南红壤丘陵区的生态环境, 有必要对崩岗的发生和发展进行控制和预防。

Xu<sup>[9]</sup>较早对崩岗的侵蚀因素进行研究, 发现崩岗残积土的抗剪强度随着含水率的增加而迅速下降。张晓明等<sup>[10]</sup>对湖北省东南地区崩岗开展研究, 表明随水分含量的增加, 花岗岩发育红土的黏聚力和内摩擦角呈非线性衰减趋势, 土壤含水率达到 13% 左右时, 对应的抗剪强度指标出现峰值。林敬兰等<sup>[11]</sup>研究表明, 崩岗土体红土层和砂土层的黏聚力随含水量的增加先增大后减小, 不同土层的内摩擦角均随含水量的增加而减小。刘希林等<sup>[12]</sup>研究发现崩壁不同层位土体浸水后, 水呈非均衡态进入土体孔隙, 粒间斥力超过吸力, 使土体结构受到破坏。

由此可见, 水分是崩岗发生的重要影响因素, 会对崩岗土壤的物理力学性质产生显著影响, 进而影响崩壁的稳定性。

土壤的液塑限是土壤力学性质的直观反映指标之一<sup>[13-14]</sup>, 因此, 液塑限的变化必然会引起崩壁稳定性的变化。土壤液限和塑限即界限含水量, 分别是土壤处于塑性状态时的上限含水量和下限含水量, 与土壤的侵蚀强度、滑坡以及地基的承载力密切相关<sup>[13, 15]</sup>。谢炎敏<sup>[16]</sup>探究了长汀崩岗崩壁不同深度土层土壤的液塑限特征及其影响因子, 发现界限含水率受土壤粒径分布与有机质含量的共同影响, 随着黏粒含量与有机质含量的增加, 土壤液限和塑限变大。花可可等<sup>[15]</sup>对紫色土和水稻土进行研究, 发现土壤液限与有机质和黏粒含量呈线性正相关, 有机质的作用更为显著。庄雅婷等<sup>[17]</sup>研究了崩岗红土层的颗粒组成与有机质含量对土壤液塑限的影响, 发现有机质、黏粒和粉粒含量与土壤液塑限值呈正相关关系。朱慧鑫等<sup>[18]</sup>研究发现花岗岩崩岗土壤的液限主要受土壤黏粒和氧化铁含量的影响, 黏粒和游离氧化铁的含量越高, 土壤保水蓄水能力越强, 液限值越高。当前, 在全球变暖和气候异常事件多发的大背景下, 探究土壤界限含水率时应该考虑温度的影响。温度作为一个基本物理场, 对土壤的水文、力学性质会产生重要影响。朱晨光等<sup>[19]</sup>通过实验测定结合模型拟合分析, 发现对于高含水量

的土体, 高温对边坡稳定性具有负面作用。邵玉娟等<sup>[20]</sup>研究发现温度升高时, 黏性土液限减小, 塑限变化很小, 液塑限的变化主要是由吸附结合水含量的变化引起的。但是, 目前有关崩壁土壤液塑限的研究忽视了温度效应。南方地区夏季高温炎热, 部分地区地表温度会高达 70℃<sup>[21]</sup>。因此, 亟待进一步探究高温下崩壁不同土层土壤液塑限的变化规律。

本研究分析崩岗剖面三个土层土壤的液塑限特征, 并探究温度因子对土壤液塑限的影响。采用液塑限联合测定仪, 测定不同温度下三个土层土壤的液塑限, 结合土壤的粒径分布、有机质、氧化铁、结合水含量等指标, 深入分析温度对土壤液塑限的作用, 该研究可为崩岗的发生提供新的理解途径。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区域

研究区位于福建省安溪县龙门镇(118°05'E, 24°57'N)。安溪县是典型的崩岗侵蚀区, 该地区为丘陵山地, 气候类型为亚热带季风性气候, 年平均气温和降水量分别为 18℃和 1 800 mm, 降雨主要集中在 5 月至 9 月。研究区土壤类型主要为铁铝土, 是华南地区广泛分布的土壤类型。土壤由酸性花岗岩发育形成, 黏土矿物组成以高岭石为主。

### 1.2 试验方法

根据土壤的颜色和结构特征, 研究区土壤剖面可划分为红土层、砂土层和碎屑层 3 个土层(图 1): 红土层呈红色, 颜色较均一, 土体细腻且有黏着性; 砂土层呈黄色, 混有白色点状物, 土体易松散; 碎屑层呈灰白色, 混有红色、黑色点状物, 粗颗粒较多, 土体易松散。在崩壁上不同高度处自下而上分别采集碎屑层、砂土层和红土层 3 个混合土壤样品 2 kg 左右, 带回室内风干过筛以后用于液塑限和基本理化性质的测定。同时用环刀采集红土层、砂土层和碎屑层的原状土壤样品用于土壤容重的测定。土壤液塑限值采用液塑限联合测定仪(Shanghai Luda Experimental Instrumental Company, Shanghai, China)进行分析, 试验方法根据《土工试验方法标准》(GB/T 50123-2019)进行: 试验土壤过 0.5 mm 筛后, 取 100 g 土样加定量纯水, 调制 3 种不同含水量的试样, 制备的土样需充分调拌均匀, 分层填

入试样杯中, 填样时不应留有空隙。对于较干的土膏应充分搓揉, 用调土刀反复压实, 使空气逸出。试杯装满后, 刮成与杯边齐平。将试样杯用保鲜膜包好防止水分散失, 土壤样品需要在恒温培养箱密封保存 8 h, 保证液塑限的测定在特定土壤温度下进行。由于夏季晴热条件下, 南方红壤地表实测温度可接近 60℃, 所以本试验土壤温度设定为 15、25、40 和 60℃四个梯度。试样准备好后, 采用电磁落锥法, 分别测圆锥自重沉入试样的深度, 3 个含水量水平下圆锥入土深度分别在 3~4、7~9 和 15~17 mm 范围内。每次试样的测定时间保持在 20 s 以内, 以防止测定过程中温度的显著变化。重复以上的步骤, 完成 4 个温度条件下土壤样品液塑限的测定, 每个样品重复 4 次。按标准规定: 锥入深度 17 mm 所对应的含水量为土壤液限, 锥入 2 mm 所对应的含水量为土壤塑限。

土壤颗粒组成采用激光粒度仪(BT-9300ST, Bettersize Instruments Ltd., Liaoning Province, China)测定; 土壤有机质采用重铬酸钾外加热法测定; 游离氧化铁含量采用连二亚硫酸钠-柠檬酸钠-重碳酸钠(DCB 法)测定; 土壤 pH 采用 pH 计(STARTER 2100, OHAUS Instruments Co., Ltd., Shanghai, China)测定, 土液比为 1: 2.5<sup>[22]</sup>。试验土样的基本理化性质表 1 所示。根据中国土壤质地分级, 将试验土样的颗粒组成进一步进行划分, 如表 2 所示。土壤矿物组成使用 X-射线衍射仪(Ultima IV, Rigaku Corporation, Tokyo, Japan)测定, 发现三个土层土壤中石英的含量均超过 85%, 进一步提取每个土层土壤中的黏粒部分, 使用 X-射线衍射仪测定黏土矿物的衍射图谱, 根据各矿物主要特征峰的峰强与基底值的差值之比进行半定量分析<sup>[23]</sup>。分析结果如表 3 所示, 试验土样的黏土矿物组成以高岭石为主, 还含有少量针铁矿、三水铝石和伊利石。

采用容量法进行吸附结合水测量<sup>[24]</sup>: 取红土层、砂土层和碎屑层土样(<0.5 mm)各 8.00 g, 烘干后缓缓注入装有溶液的 250 mL 特制容量瓶中, 记录凹液面刻度; 放入温度恒定(15、25、40 和 60℃)的培养箱, 保持在设定温度下 24 h, 待容量瓶凹液面刻度不变时结束试验并记录相应刻度。根据式(3)计算吸附结合水量。

### 1.3 数据分析

土壤塑性指数( $I_p$ , %)的计算:

$$I_p = w_L - w_p \quad (1)$$

式中,  $w_L$  为土壤液限, %;  $w_p$  为土壤塑限, %。

土壤分形维数 ( $D$ ) 的计算<sup>[25]</sup>:

$$D = 3 - \lg \left[ \frac{w_{(d < \bar{d}_i)}}{w_0} \right] / \lg \frac{\bar{d}_i}{\bar{d}_{\max}} \quad (2)$$

式中,  $\bar{d}_i$  为粒径  $i$  的平均直径, mm;  $\bar{d}_{\max}$  为平均直径最大的粒径, mm;  $w_{(d < \bar{d}_i)}$  为粒径小于  $\bar{d}_i$  的土壤颗粒总质量, g;  $w_0$  为土壤总质量, g。

土壤结合水含量的计算:

$$\omega = \frac{\Delta V (\rho_e \rho_T)}{m_S (\rho_e - \rho_T)} \quad (3)$$

式中,  $\rho_e$  为吸附结合水平均密度, 试验中取值  $1.3 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ;  $\rho_T$  为温度  $T$  时自由水密度,  $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ , 按表 4 取值;  $\Delta V$  为自由水转化为结合水时水体积变化量,

$\text{cm}^3$ ;  $m_S$  为土壤质量, g。

#### 1.4 数据处理

采用 Excel 2010 软件进行数据整理与绘图, 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  $P < 0.05$ , 相关性分析采用 Pearson 双侧检验。



图 1 采样区典型崩岗侵蚀土壤剖面

Fig. 1 Soil profile of a typical collapsing gully in this study

表 1 试验土样的基本理化性质

Table 1 Physical and chemical properties of the soil relative to soil layer in the collapsing gully

土层 Soil layers	有机质 Organic matter / (g·kg <sup>-1</sup> )	游离氧化铁 Free iron oxide / (g·kg <sup>-1</sup> )	饱和含水量 Saturated water content /%		pH	容重 Bulk density / (g·cm <sup>-3</sup> )	机械组成 Soil mechanical composition /%		
							砂粒 Sand 0.05~2 mm	粉粒 Silt 0.05~0.002 mm	黏粒 Clay <0.002 mm
红土层 Red soil	7.79	34.36	42.02	5.88	1.45	30.00	52.88	17.12	
砂土层 Sandy soil	1.96	13.01	40.77	5.56	1.55	43.74	47.29	8.97	
碎屑层 Detritus	1.05	4.83	39.58	5.59	1.55	67.79	29.47	2.74	

表 2 液塑限分析土样的颗粒分布

Table 2 Particle size distribution of the soil samples for liquid and plastic limit test

土层 Soil layers	颗粒分布 Soil particle size/%						
	细黏粒 Fine clay <0.001 mm	粗黏粒 Coarse clay 0.001~0.002 mm	细粉粒 Fine silt 0.002~0.005 mm	中粉粒 Medium silt 0.005~0.01 mm	粗粉粒 Coarse silt 0.01~0.05 mm	细砂粒 Fine sand 0.05~0.25 mm	粗砂粒 Coarse sand 0.25~0.5 mm
红土层 Red soil	11.60	9.90	23.03	19.20	24.17	6.27	5.83
砂土层 Sandy soil	4.54	7.36	18.19	16.18	28.36	17.22	8.15
碎屑层 Detritus	1.81	2.58	7.30	9.38	30.50	29.83	18.60

表 3 试验土样黏土矿物的半定量分析

Table 3 Semi-quantitative analysis of clay compositions in the tested soil relative to soil layer

土层 Soil layers	高岭石 Kaolinite/%	针铁矿 Goethite/%	三水铝石 Gibbsite/%	伊利石 Illite/%
红土层 Red soil	77.3	11.1	5.25	6.42
砂土层 Sandy soil	92.1	—	—	7.87
碎屑层 Detritus	80.4	—	8.81	10.8

注：—：未检出 Note：—：Undetected

表 4 试验温度下水的密度

Table 4 Water density under the experimental temperature

温度 Temperature	15℃	25℃	40℃	60℃
密度 $\rho_T$ ( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )	0.999	0.997	0.992	0.983

## 2 结果

### 2.1 不同土层液塑限特征

25℃条件下，三个土层土壤的液塑限差异显著（图 2）。整体上，红土层土壤液限、塑限和塑性指数显著高于砂土层和碎屑层，碎屑层土壤的液塑限最小。根据《土的工程分类标准》（GB/T 50145-2007），红土层土壤属于高液限粉土，砂土层土壤属于低液限粉土，碎屑层土壤属于粉土质砂。红土层的液限显著高于饱和含水量，碎屑层的液限则接近饱和含水量。说明在相同含水量变化范围内，水分对红土层土体状态的影响较小，当遇到降雨冲刷时，红土层土体状态不易转变为流动状态；相反，水分变化对碎屑层土体的状态影响很大，一旦遇到长时间降雨，土体含水量很容易达到液限，从固体状态转变为流动状态，非常容易发生崩塌。

### 2.2 土壤液塑限的影响因素

崩岗土壤的液塑限与其基本理化性质的相关性分析表明（表 5），花岗岩风化土壤的液塑限与粗粉粒、细砂粒和粗砂粒的含量呈负相关，与分形维数、pH、细黏粒、粗黏粒、细粉粒、中粉粒、有机质、游离氧化铁的含量呈正相关。由于本研究数据较少，与土壤液塑限相关性达到显著水平（ $P < 0.05$ ）的土壤性质只有细黏粒、粗粉粒、有机质和游离氧化铁含量。对土壤液塑限与细黏粒、粗粉粒、有机质和游离氧化铁含量进行曲线拟合，可以发现土壤液塑限与细黏粒、粗粉粒、有机质

和游离氧化铁含量呈线性关系，决定系数均高于 0.95。

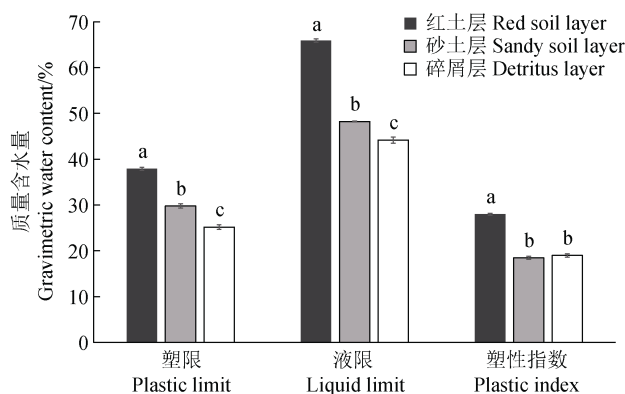


图 2 崩壁三个土层土壤的液塑限差异

Fig. 2 Differences in liquid and plastic limits between the three soil layers in the collapsing gully wall

### 2.3 温度对土壤塑限的影响

图 4 表明，红土层土壤的塑限首先随温度升高而下降，当温度从 40℃ 升高至 60℃ 时，土壤塑限从 36.66% 增加至 39.58%。碎屑层土壤塑限随温度变化的规律与红土层相似，也是先减小后增加，在 40℃ 条件下表现出最小值，较 15℃ 和 60℃ 条件下分别降低 12.25% 和 10.32%。温度升高，砂土层土壤的塑限有降低的趋势，当温度从 15℃ 升高至 60℃ 时，土壤塑限降低了 9.07%。

### 2.4 温度对土壤液限的影响

图 5 表明，红土层土壤的液限与温度的变化关系与塑限变化规律相似，均是先降低后增加，在 40℃ 条件下表现出最小值，较 60℃ 条件下降低了 4.14%。砂土层土壤液限随温度的变化关系与红土层相似，40℃ 下土壤液限较 15℃ 下降了 6.98%。碎屑层土壤液限随温度的升高逐渐降低，温度从 25℃ 升高至 60℃ 时，液限降低了 6.44%。

## 2.5 温度对土壤结合水含量的影响

由图 6 可知, 低温 (<25℃) 条件下, 红土层的结合水含量显著高于砂土层和碎屑层, 砂土层和碎屑层的结合水含量差异不大。整体上, 低温区的土壤结合水含量高于高温区。温度对红土层土壤的结合水含量的影响最为显著, 温度大于 25℃ 下, 红土

层结合水含量显著降低。温度从 15℃ 升高至 40℃, 砂土层和碎屑层的土壤结合水含量有降低的趋势, 40℃ 后又会出现小幅度升高, 但整体变化并不显著。不同温度下崩壁土壤结合水的变化规律与液塑限的变化规律相似, 说明温度改变土壤吸附结合水的含量有可能引起崩壁土壤液塑限的变化。

表 5 土壤液塑限与基本理化性质的相关性

Table 5 Correlation analysis of soil liquid limits with basic physical and chemical properties

分形维数 Fractal dimension	细黏粒 Fine clay	粗黏粒 Coarse clay	细粉粒 Fine silt	中粉粒 Medium silt	粗粉粒 Coarse silt	细砂粒 Fine sand	粗砂粒 Coarse sand	有机质 Organic matter	氧化铁 Free iron oxide	pH	
塑限 <sup>①</sup>	0.953	0.998*	0.936	0.920	0.920	-1.000**	-0.975	-0.859	0.977	0.998*	0.911
液限 <sup>②</sup>	0.920	1.000*	0.898	0.878	0.878	-0.996	-0.949	-0.807	0.993	1.000*	0.946
塑性指数 <sup>③</sup>	0.870	0.990	0.844	0.820	0.819	-0.979	-0.908	-0.736	1.000*	0.990	0.977

①Plastic limit; ②Liquid limit; ③Plastic index. 注: \*和\*\*分别表示在 0.05 和 0.01 水平上显著。Note: \*and\*\* denotes significant correlation at 0.05 and 0.01 levels, respectively.

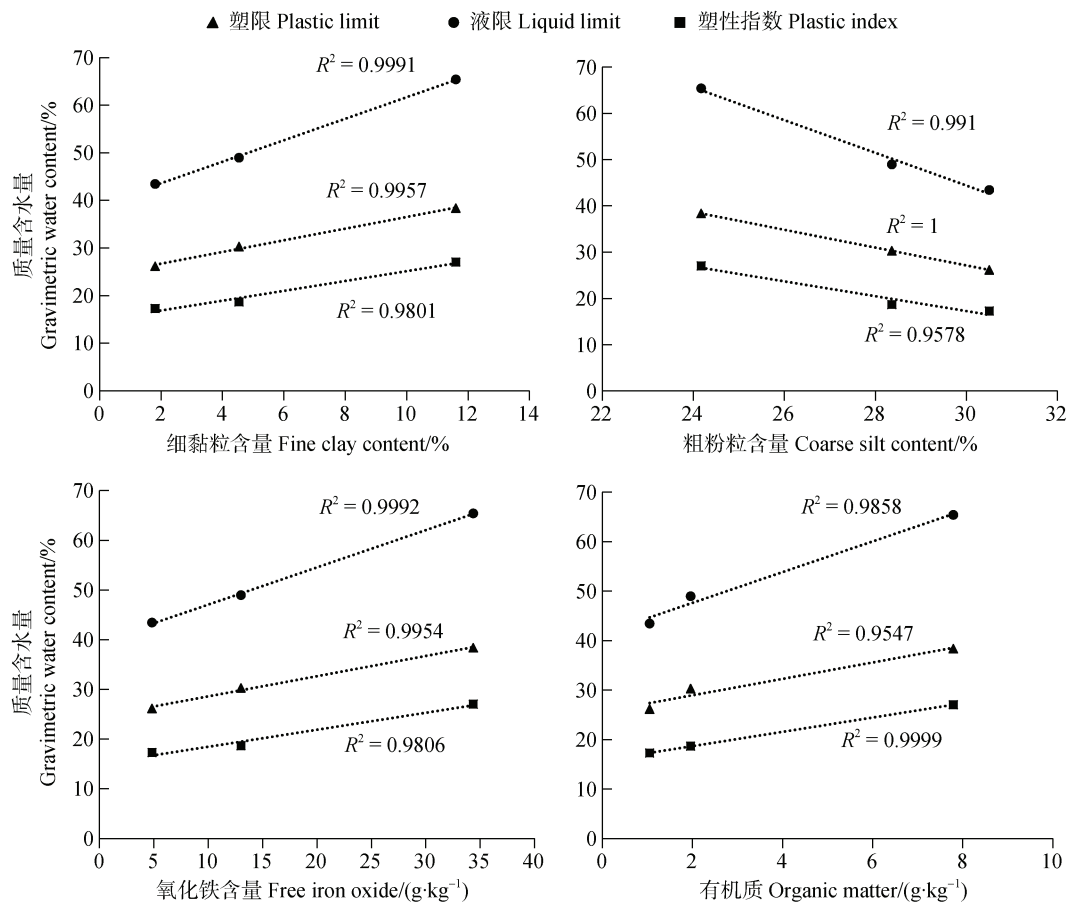


图 3 土壤液塑限与基本理化性质的关系

Fig. 3 Relationship of soil liquid and plastic limits with physical and chemical properties



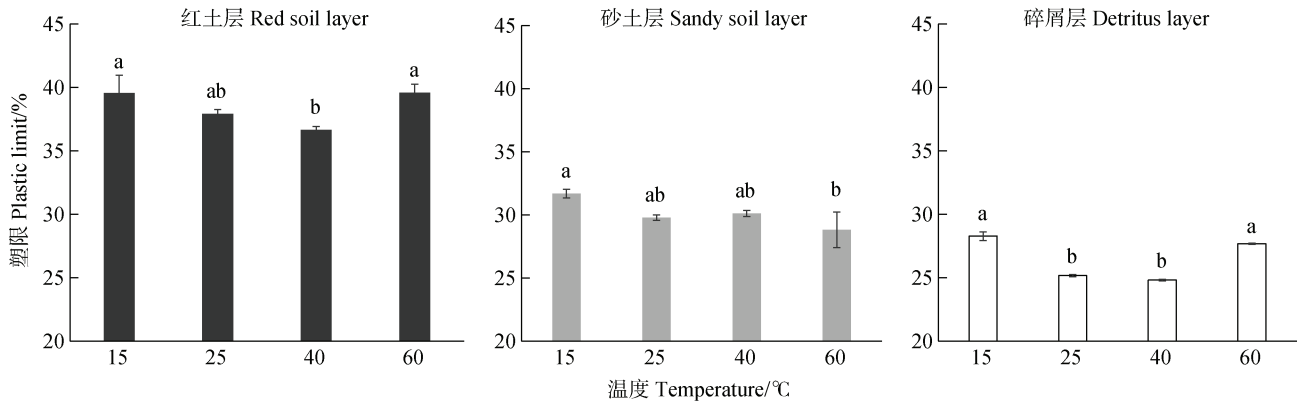


图4 不同温度下崩岗土壤塑限的差异

Fig. 4 Effects of temperature on soil plastic limit in the collapsing gully wall

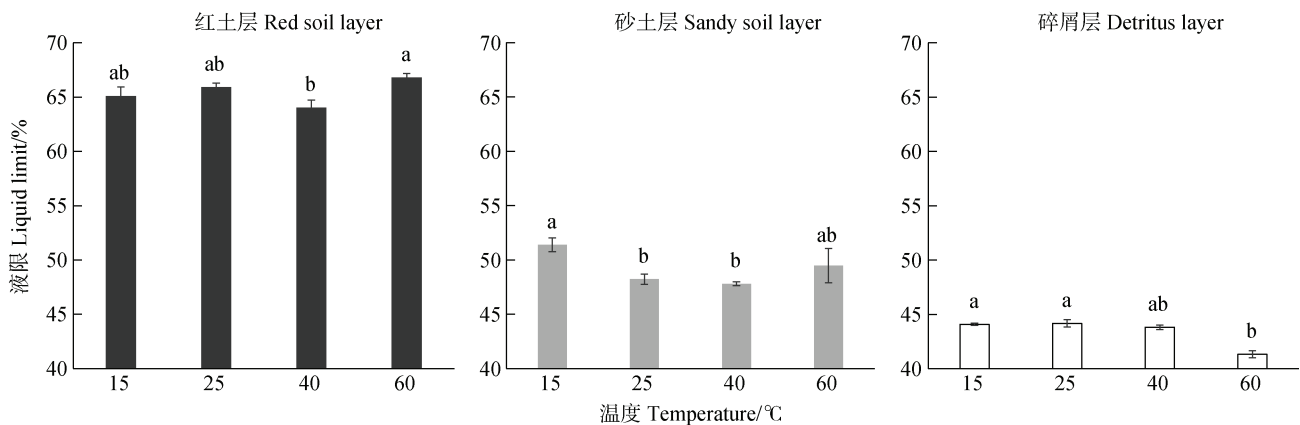


图5 不同温度下崩岗土壤液限的差异

Fig. 5 Effects of temperature on soil liquid limit in the collapsing gully wall

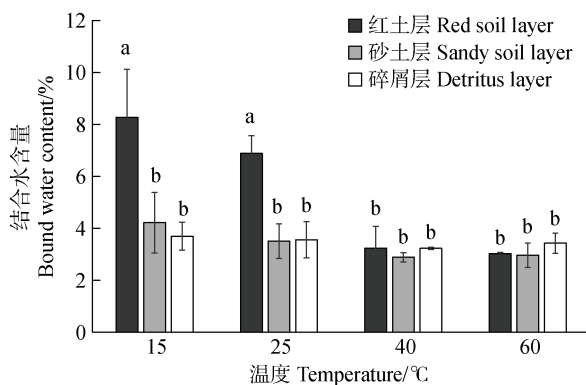


图6 不同温度下崩岗土壤结合水含量的差异

Fig. 6 Effects of temperature on soil bound water content in the collapsing gully wall

### 3 讨论

#### 3.1 崩壁不同土层液塑限的差异

崩壁三个土层土壤液塑限的大小顺序为：红土

层大于砂土层大于碎屑层，这与 Deng 等<sup>[13]</sup>研究结果相一致。崩岗土壤的液塑限与细黏粒含量、游离氧化铁和有机质含量呈线性正相关，与粗粉粒含量呈线性负相关。通常情况下，土壤中的黏粒含量、亲水矿物和有机质的含量是影响土壤界限含水率大小的主要因素<sup>[14]</sup>。黏粒作为土粒中最细的部分，其比表面积很大，具有很强的吸附能力，巨大的吸附作用形成较厚的吸附水膜，进而影响土壤的液塑限特性<sup>[20, 26]</sup>。土壤中的有机质组分比表面积巨大，表现很强的胶体特性，对水的吸附能力很强，会使界限含水率增加<sup>[27]</sup>。此外，有机质含量的增加，使土壤颗粒间的胶结作用加强、土壤的强度增加<sup>[28]</sup>。因此，红土层土壤的液塑限显著大于砂土层和碎屑层的原因也与红土层有机质含量较高有关。但是，在花岗岩风化红壤中，游离氧化铁也会显著影响液塑限的大小。游离氧化铁是红壤中重要的胶结物质，

氧化铁含量越高，土壤的结构稳定性越好，因此会增加土壤的液塑限<sup>[29-30]</sup>。本研究中，红土层土壤黏粒、游离氧化铁和有机质均显著高于砂土层和碎屑层，所以红土层的液塑限最高。砂土层和碎屑层的液限接近土壤的饱和含水量，在降雨较多的季节，一旦水分渗透红土层而进入砂土层或者碎屑层，或者雨水沿着崩壁壁面进入砂土层或者碎屑层，可能会造成砂土层和碎屑层水分达到液限，引起崩壁底部强度变弱，导致整体稳定性降低。

### 3.2 温度对崩壁不同土层土壤吸附结合水含量的影响

崩壁三个土层土壤的结合水含量均较低，特别是砂土层和碎屑层土壤。一方面，本研究区土壤中的黏土矿物以高岭石为主（表 3），高岭石的亲水性相对较弱<sup>[20]</sup>；另一方面，砂土层和碎屑层土壤的黏粒含量低（表 1）。因此，崩壁三个土层土壤结合水含量均较小。土壤中的有机质也会影响土壤对水分子的吸附作用。当有机质含量低于 10% 时，其吸水作用占主导作用<sup>[27]</sup>。由于红土层土壤的黏粒和有机质含量显著高于砂土层和碎屑层。因此，常温下红土层土壤的结合水含量显著高于砂土层和碎屑层。本研究区发现温度从 15℃ 升至 40℃ 时，崩壁红土层土壤吸附结合水含量显著降低，砂土层和碎屑层土壤的结合水含量也有降低的趋势。通常情况下，温度升高时，吸附结合水中的水分子摆脱黏土矿物表面的吸引力，由吸附结合水变为弱结合水和自由水，导致吸附结合水量减少<sup>[31]</sup>。但是，部分学者认为土壤胶体双电层厚度与结合水含量呈正相关，土壤结合水含量随温度的升高而增加<sup>[32]</sup>。根据 van Olphen<sup>[33]</sup>提出的土壤胶体双电层厚度的理论计算公式，双电层的厚度与温度呈正相关。但是，温度本身也会影响土壤溶液的介电常数，温度越高介电常数越低，也会导致双电层厚度降低。一般认为 0~60℃ 温度和介电常数变化的总效应对双电层厚度的影响较小<sup>[32]</sup>。这与本研究中观察到砂土层和碎屑层土壤的结合水含量在不同温度下无显著变化的结果相一致。

### 3.3 温度对崩壁不同土层土壤液塑限的影响

温度对各土层土壤的液塑限均有影响，温度低于 40℃ 时，随着温度的升高，三个土层土壤的液塑限均呈现降低的趋势。在 60℃ 条件下，红土层土壤的液塑限和碎屑层土壤的塑限显著增大，说明崩岗

区土壤的液塑限随温度的变化规律并不是连续的。黏土矿物的组成显著影响其液塑限与温度的关系。高触变膨润土的液塑限通常随温度的升高而增加，而以高岭石为主的土壤，其液塑限随温度的变化并不具有一致性<sup>[14]</sup>。本研究的崩岗位于红壤丘陵区，黏土矿物组成以高岭石为主（表 3），因此崩岗区土壤的液塑限随温度的变化规律比较复杂。宏观上土壤的液塑限是由其微观土水关系决定的，土壤的液塑限与土壤吸附结合水含量呈正相关关系<sup>[20]</sup>。本研究区发现温度从 15℃ 升至 40℃ 时，崩岗红土层、砂土层和碎屑层土壤的结合水含量均降低。此外，土壤液塑限的大小还与土壤孔隙水的性质有关<sup>[14, 34]</sup>。温度升高，孔隙水的黏滞系数降低，也会导致液塑限降低。因此，温度从 15℃ 升至 40℃ 时，崩岗三个土层土壤的液塑限均显著降低。但是在 60℃ 条件下，土壤矿物可能会发生不同程度的膨胀，导致土壤颗粒之间空隙变小，结构更加紧实，土壤强度增加，由固态转化为塑态和流动状态的含水量增加<sup>[35]</sup>。另有研究表明，温度升高还会导致土壤颗粒的凝聚或者结构重排，以及土壤有机质活化能增大、吸附能力增强，这些均会增加土壤的强度<sup>[14, 36]</sup>。此外，本研究区土壤为花岗岩发育形成的红壤，盐基离子大量淋失，主要以钾离子为主<sup>[37-38]</sup>。温度升高时，溶液中钾离子的活度会增加，进而导致弱结合水的厚度增加<sup>[39]</sup>。所以，60℃ 条件下红土层土壤的液塑限和碎屑层土壤的塑限有所增大。总体可以看出，温度对土壤液塑限的影响很复杂，土壤液塑限随温度的变化关系由矿物学特性、颗粒组成、孔隙水性质、有机质等多种因素共同决定。

在夏季高温条件下，土壤含水量与表层土壤温度成反比<sup>[40]</sup>。土壤水分状态高于塑限时，含水量已较高，土壤温度上升有限（远远小于 60℃），在此范围内温度升高，将导致崩壁三个土层土壤的液塑限均降低。由于砂土层和碎屑层的土壤比较松散，崩壁的稳定性的主要因素由砂土层和碎屑层的土壤力学状态决定。崩壁三个土层中，碎屑层的液塑限显著低于红土层和砂土层，且碎屑层的液限与饱和含水量接近。温度升高时，碎屑层的土壤液限会进一步降低。因此，在高温多雨的季节，水分和温度的双重因素有可能导致碎屑层的土壤含水量达到液限，碎屑层土壤由可塑态转化为流动态，进而引起崩壁底部失稳崩塌。



## 4 结 论

本研究通过测定不同温度下崩岗土壤的液塑限和结合水含量,发现崩岗土壤三个土层液塑限差异显著,红土层土壤的液塑限明显高于砂土层和碎屑层,随着风化程度的增加,土壤的液塑限增加。在一定温度范围内(小于40℃),三个土层的液塑限均随着温度的升高而降低,但是在60℃条件下红土层的液塑限出现增加的现象,土壤结合水含量随温度的变化规律与液塑限相似,温度影响土壤液塑限的原因之一是土壤结合水含量的变化。在崩岗发生地区,碎屑层的土壤液限较低,且接近于饱和含水量,在夏季高温多雨的情况下更容易发生流动变形,导致崩壁崩塌。未来可以进一步在野外条件研究自然状态下崩壁土壤水-热动态对土体力学状态的影响。

### 参考文献 (References)

- [ 1 ] Valentin C, Poesen J, Li Y. Gully erosion: Impacts, factors and control[J]. *Catena*, 2005, 63( 2/3 ): 132—153.
- [ 2 ] Lin J S, Huang Y H, Wang M K, et al. Assessing the sources of sediment transported in gully systems using a fingerprinting approach: An example from South—east China[J]. *Catena*, 2015, 129: 9—17.
- [ 3 ] DiCenzo P D, Luk S H. Gully erosion and sediment transport in a small subtropical catchment, South China[J]. *Catena*, 1997, 29 ( 2 ): 161—176.
- [ 4 ] Xia D, Deng Y S, Wang S L, et al. Fractal features of soil particle-size distribution of different weathering profiles of the collapsing gullies in the hilly granitic region, South China[J]. *Natural Hazards*, 2015, 79 ( 1 ): 455—478.
- [ 5 ] Jiang F S, Huang Y H, Wang M K, et al. Effects of rainfall intensity and slope gradient on steep colluvial deposit erosion in southeast China[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2014, 78 ( 5 ): 1741—1752.
- [ 6 ] Xia J W, Cai C F, Wei Y J, et al. Granite residual soil properties in collapsing gullies of South China: Spatial variations and effects on collapsing gully erosion[J]. *Catena*, 2019, 174: 469—477.
- [ 7 ] Deng Y S, Duan X Q, Ding S W, et al. Suction stress characteristics in granite red soils and their relationship with the collapsing gully in South China[J]. *Catena*, 2018, 171: 505—522.
- [ 8 ] Zhong B L, Peng S Y, Zhang Q, et al. Using an ecological economics approach to support the restoration of collapsing gullies in Southern China[J]. *Land Use Policy*, 2013, 32: 119—124.
- [ 9 ] Xu J X. Benggang erosion: The influencing factors[J]. *Catena*, 1996, 27 ( 3/4 ): 249—263.
- [ 10 ] Zhang X M, Ding S W, Cai C F. Effects of drying and wetting on nonlinear decay of soil shear strength in slope disintegration erosion area[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28 ( 5 ): 241—245. [张晓明, 丁树文, 蔡崇法. 干湿效应下崩岗区岩土抗剪强度衰减非线性分析[J]. *农业工程学报*, 2012, 28 ( 5 ): 241—245.]
- [ 11 ] Lin J L, Huang Y H, Zhang D B, et al. Influence of soil moisture content on shear characteristics of Benggang[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2013, 27 ( 3 ): 55—58. [林敬兰, 黄炎和, 张德斌, 等. 水分对崩岗土体抗剪切特性的影响[J]. *水土保持学报*, 2013, 27 ( 3 ): 55—58.]
- [ 12 ] Liu X L, Qiu J N, Zhang D L. Analysis of soil wetting mechanism and influencing factors on the headwall of collapsing hill and erosional gully[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2016, 30 ( 4 ): 80—84. [刘希林, 邱锦安, 张大林. 崩岗侵蚀区崩壁土体湿化机理及影响因素分析[J]. *水土保持学报*, 2016, 30 ( 4 ): 80—84.]
- [ 13 ] Deng Y S, Cai C F, Xia D, et al. Soil Atterberg limits of different weathering profiles of the collapsing gullies in the hilly granitic region of Southern China[J]. *Solid Earth*, 2016, 8 ( 2 ): 499—513.
- [ 14 ] Jefferson I, Foss Rogers C D. Liquid limit and the temperature sensitivity of clays[J]. *Engineering Geology*, 1998, 49 ( 2 ): 95—109.
- [ 15 ] Hua K K, Wei C F, Ren Z J. Characters and effects of soil liquid limit and shear strength in purple hilly-mountainous region[J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2011, 33 ( 6 ): 105—110. [花可可, 魏朝富, 任镇江. 土壤液限和抗剪强度特征值及其影响因素研究——基于紫色土区[J]. *农机化研究*, 2011, 33 ( 6 ): 105—110.]
- [ 16 ] Xie Y M. Study on characteristics and influencing factors of soil Atterberg limits in collapsing wall[J]. *Pearl River*, 2017, 38 ( 12 ): 96—99. [谢炎敏. 崩壁土壤界限含水率特征及影响因子研究[J]. *人民珠江*, 2017, 38 ( 12 ): 96—99.]
- [ 17 ] Zhuang Y T, Huang Y H, Lin J S, et al. Study on liquid limit and plastic limit characteristics and factors of Benggang in red soil layer[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2014, 21 ( 3 ): 208—211, 216. [庄雅婷, 黄炎和, 林金石, 等. 崩岗红土层土壤液塑限特性及影响因素研究[J]. *水土保持研究*, 2014, 21 ( 3 ): 208—211, 216.]
- [ 18 ] Zhu H X, Deng Y S, Xia Z G, et al. Liquid and plastic limits and influencing factors for the profiles of collapse slope in Southeast of Hubei Province[J]. *Science of Water and Soil Conservation*, 2016, 14 ( 5 ): 1—7. [朱慧鑫, 邓羽松, 夏振刚, 等. 鄂东南花岗岩崩岗剖面土壤液塑

- 限特征及影响因子分析[J]. 中国水土保持科学, 2016, 14 (5): 1—7.]
- [ 19 ] Zhu C G, Liu C, Shi B, et al. Numerical simulation of the influence of temperature field on slope stability[J]. Geological Journal of China Universities, 2018, 24 (1): 122—127.[朱晨光, 刘春, 施斌, 等. 边坡稳定性温度效应数值模拟研究[J]. 高校地质学报, 2018, 24 (1): 122—127.]
- [ 20 ] Shao Y X, Shi B, Liu C, et al. Temperature effect on hydro-physical properties of clayey soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33 (10): 1576—1582.[邵玉娴, 施斌, 刘春, 等. 黏性土水理性质温度效应研究[J]. 岩土工程学报, 2011, 33 (10): 1576—1582.]
- [ 21 ] Huang Z P, Sun J L, Cao Y B, et al. Temperature effect on strength evolution of saturated granite residual soil[J]. Nonferrous Metals ( Mining Section ), 2017, 69 (2): 54—60.[黄真萍, 孙加梁, 曹洋兵, 等. 饱和花岗岩残积土强度演化的温度效应研究[J]. 有色金属 ( 矿山部分 ), 2017, 69 (2): 54—60.]
- [ 22 ] Bao S D. Soil and agricultural chemistry analysis[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000.[鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.]
- [ 23 ] Chen J L, Zhou M, Lin J S, et al. Comparison of soil physicochemical properties and mineralogical compositions between noncollapsible soils and collapsed gullies[J]. Geoderma, 2018, 317: 56—66.
- [ 24 ] Wu F C. The adsorbed bound water content measurement and some characteristics of seepage [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1984, 6 (6): 84—93.[吴凤彩. 粘性土的吸附结合水测量和渗流的某些特点[J]. 岩土工程学报, 1984, 6 (6): 84—93.]
- [ 25 ] Liu X, Zhang G C, Heathman G C, et al. Fractal features of soil particle-size distribution as affected by plant communities in the forested region of Mountain Yimeng, China[J]. Geoderma, 2009, 154 (1/2): 123—130.
- [ 26 ] Dong J G, Ji C S. Discussion on influence of particle size on liquid and plastic limit and its influence mechanism[J]. Engineering Construction, 2017, 49 (3): 13—17.[董均贵, 季春生. 粒径对液塑限的影响及影响机理研究[J]. 工程建设, 2017, 49 (3): 13—17.]
- [ 27 ] Husein Malkawi A I, Alawneh A S, Abu-Safaqah O T. Effects of organic matter on the physical and the physicochemical properties of an illitic soil[J]. Applied Clay Science, 1999, 14 (5/6): 257—278.
- [ 28 ] Lü Y, Nie L, Xu Y, et al. The mechanism of organic matter effect on physical and mechanical properties of turfy soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33 (4): 655—660.[吕岩, 俚磊, 徐燕, 等. 有机质对草炭土物理力学性质影响的机理分析[J]. 岩土工程学报, 2011, 33 (4): 655—660.]
- [ 29 ] Zhang X W, Kong L W. Interaction between iron oxide colloids and clay minerals and its effect on properties of caly[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36 (1): 65—74.[张先伟, 孔令伟. 氧化铁胶体与黏土矿物的交互作用及其对黏土土性影响[J]. 岩土工程学报, 2014, 36 (1): 65—74.]
- [ 30 ] He Q, Chen J F, Xu Z Y. Influence of transformation of iron oxides on soil structure[J]. Acta Pedologica Sinica, 1981, 18 (4): 326—334.[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.]
- [ 31 ] Passwell R E. Temperature effects on clay soil consolidation[J]. Journal of the Soil Mechanics & Foundations Division, 1967, 93 (3): 9—21.
- [ 32 ] Morin R, Silva A J. The effects of high pressure and high temperature on some physical properties of ocean sediments[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 1984, 89 (B1): 511—526.
- [ 33 ] van Olphen H. An Introduction to Clay Colloid Chemistry. New York: John Wiley, 1977.
- [ 34 ] Youssef M S, Sabry A, Ramli A H EI. Temperature changes and their effects on some physical properties of soils[J]. Proceedings of the 5th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Paris, 1961, 1: 419—421.
- [ 35 ] Bai B, Zhao C G. Temperature effects on mechanical characteristics of clay soils[J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, 24 (4): 533—537.[白冰, 赵成刚. 温度对粘性土介质力学特性的影响[J]. 岩土力学, 2003, 24 (4): 533—537.]
- [ 36 ] Ågren G I, Wetterstedt J Å M. What determines the temperature response of soil organic matter decomposition?[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2007, 39 (7): 1794—1798.
- [ 37 ] Lu J Q, Chen D X, Li S L. The status of exchangeable potassium, calcium and magnesium in the major Fujian soil great groups and their distributions[J]. Journal of Fujian Agricultural College, 1985, 14 (2): 134—142.[陆集卿, 陈大勋, 李双霖. 福建省主要土类代换性钾、钙、镁含量及其分布规律的研究[J]. 福建农学院学报, 1985, 14 (2): 134—142.]
- [ 38 ] Li S Y, Lan P L, Xu S G, et al. Effects of desulphurisation byproducts on leguminosae crop growth in acid soils[J]. Ecology and Environment, 2003, 12 (3): 263—268.[李淑仪, 蓝佩玲, 徐胜光, 等. 燃煤烟气脱硫副产物在酸性土壤上施用的效果—以豆科作物为例[J]. 生态环境, 2003, 12 (3): 263—268.]
- [ 39 ] Meng G L, Chen Y F, Wang G W, et al. Study on the effect of water-soil interaction on the engineering property of remodeling red clay in Guilin[J]. Science Technology and Engineering, 2017, 17 (10): 265—271.[蒙高磊, 陈逸方, 王根伟, 等. 水土作用对桂林重塑红黏土工程性质试验研究[J]. 科学技术与工程, 2017,

- 17 ( 10 ): 265—271.]
- [ 40 ] Dong X, Tian J, Wu H, et al. Application of the emissivity method considering the effects of soil moisture for retrieving land surface temperature[J]. Resources Science, 2017, 39 ( 8 ): 1592—1604. [董雪, 田静, 吴骅, 等. 考虑土壤水分影响的比辐射率方法在地表温度反演中的应用[J]. 资源科学, 2017, 39 ( 8 ): 1592—1604.]

(责任编辑: 檀满枝)