

DOI:10.13870/j.cnki.stbcbx.2026.01.009 CSTR:32310.14.stbcbx.2026.01.009

张育铜,伍铁牛.亚热带丘陵区水温-母质耦合效应对红壤崩解特性的影响[J].水土保持学报,2026,40(1):208-218.

ZHANG Yutong, WU Tieniu. Influence of water temperature-parent material coupling effect on disintegration characteristics of red soils in subtropical hilly regions[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2026, 40(1):208-218.

## 亚热带丘陵区水温-母质耦合效应对红壤崩解特性的影响

张育铜<sup>1,2</sup>, 伍铁牛<sup>1,2</sup>

(1.华中师范大学地理过程分析与模拟湖北省重点实验室,武汉430079;2.华中师范大学城市与环境科学学院,武汉430079)

**摘要:** [目的] 为研究母质类型和水温耦合作用对红壤崩解的影响。[方法] 以亚热带丘陵区页岩、粉砂岩、泥质瘤状灰岩、泥质灰岩和第四纪红黏土发育的土壤为研究对象,对原状土壤进行室内崩解试验,分析不同水温条件下红壤的崩解特性,并结合土壤孔隙结构和黏土矿物组成,探究母质-水温耦合效应对红壤崩解的影响机制。[结果] 水温是影响红壤崩解的关键环境因素,5~45℃条件下,水温升高显著增强红壤崩解性,其中泥质瘤状灰岩和第四纪红黏土发育的土壤崩解率分别增加13.70%、23.20%,主要与孔隙气体压力增大、胶结物溶解、颗粒间作用力减弱及热梯度驱动的质量迁移等过程有关。25℃条件下,不同母质红壤的抗崩解性由弱至强依次为第四纪红黏土<页岩<粉砂岩<泥质瘤状灰岩<泥质灰岩。相关性分析显示,孔隙结构、黏土矿物体积分数、土壤有机质及结构稳定性是影响其抗崩解能力的关键因素;冗余分析表明,黏土矿物体积分数是调控母质-水温耦合效应的关键因子,贡献率高达90.2%,其中黏土矿物体积分数高的泥质瘤状灰岩土壤崩解特性对水温变化较为敏感,而第四纪红黏土高崩解率和敏感性则是由于特殊的成土过程和风成沉积特征引起的。[结论] 研究结果揭示母质类型和水温耦合作用下红壤崩解的关键机制,为红壤地区构建适应气候变化的水土保持策略提供理论基础。

**关键词:** 土壤母质; 水温; 土壤崩解; 孔隙结构; 黏土矿物

中图分类号:S157.1 文献标识码:A 文章编号:1009-2242(2026)01-0208-11

## Influence of Water Temperature-Parent Material Coupling Effect on Disintegration Characteristics of Red Soils in Subtropical Hilly Regions

ZHANG Yutong<sup>1,2</sup>, WU Tieniu<sup>1,2</sup>

(1.Key Laboratory of Geographical Process Analysis and Simulation of Hubei Province, Central China Normal University, Wuhan 430079, China; 2.College of Urban and Environmental Sciences, Central China Normal University, Wuhan 430079, China)

**Abstract:** [Objective] To investigate the influence of the coupling effects of parent material types and water temperature on red soil disintegration. [Methods] Soils developed from shale, siltstone, argillaceous nodular limestone, argillaceous limestone, and Quaternary red clay in a subtropical hilly region were selected as research objects. Laboratory disintegration experiments were conducted on undisturbed soils to analyze the disintegration characteristics of red soils under different water temperature conditions. Combined with soil pore structure and clay mineral composition, the influence mechanisms of parent material-water temperature coupling effect on red soil disintegration were explored. [Results] Water temperature was a key environmental factor influencing red soil disintegration. Increasing water temperature from 5 to 45 °C significantly enhanced red soil disintegration. The disintegration rates of soils developed from argillaceous nodular limestone and quaternary red clay increased by 13.70% and 23.20%, respectively. These changes were mainly related to processes such as increased pore gas pressure, dissolution of cementing materials, weakening of inter-particle forces, and mass transfer driven by thermal gradients. At 25 °C, the resistance to disintegration of red soils from different parent materials ranked from

收稿日期:2025-05-26 修回日期:2025-06-26 录用日期:2025-07-20 网络首发日期(www.cnki.net):2025-10-10

资助项目:国家自然科学基金项目(41701323)

第一作者:张育铜(1999—),男,硕士研究生,主要从事土壤物理与土壤侵蚀研究。E-mail:zhangyutong1212@mails.ccn.edu.cn

通信作者:伍铁牛(1983—),男,副教授,博士,硕士生导师,主要从事土壤物理与土壤侵蚀研究。E-mail:wutieniu01@ccnu.edu.cn

http://stbcbx.alljournal.com.cn

weak to strong as Quaternary red clay < shale < siltstone < argillaceous nodular limestone < argillaceous limestone. Correlation analysis showed that pore structure, clay mineral volume fraction, soil organic matter, and structural stability were key factors influencing resistance to disintegration. Redundancy analysis indicated that clay mineral volume fraction was the key factor regulating the parent material-water temperature coupling effect, with a contribution rate as high as 90.2%. Soils developed from argillaceous nodular limestone with high clay mineral content were more sensitive to water temperature changes. Among them, the disintegration characteristics of soils from argillaceous nodular limestone with high clay mineral volume fraction were more sensitive to water temperature variations. The high disintegration rate and sensitivity of Quaternary red clay were attributed to its unique soil formation processes and aeolian deposition characteristics. [Conclusion] The findings reveal the key mechanisms of red soil disintegration under the coupling effect of parent material type and water temperature, providing a theoretical basis for developing soil and water conservation strategies in response to climate change in red soil regions.

**Keywords:** soil parent material; water temperature; soil disintegration; pore structure; clay mineral

**Received:** 2025-05-26

**Revised:** 2025-06-26

**Accepted:** 2025-07-20

**Online**(www.cnki.net): 2025-10-10

土壤侵蚀是全球可持续发展面临的严峻挑战,尤其是在人为扰动强烈的区域,土地利用不当导致生态系统退化、水土流失和土壤质量下降等问题日益突出<sup>[1]</sup>。中国亚热带丘陵区兼具高温多雨的气候特征,夏季持续强降雨易加剧地表径流的产生,使得该区域土壤侵蚀问题尤为严重<sup>[2]</sup>。土壤崩解作为土壤侵蚀的首要环节,是土壤结构在水力作用下失稳破坏的关键过程,其作用机制的深入解析对区域水土保持策略制定至关重要<sup>[3]</sup>。以中国南方为例,自2000年以来,水土保持监测中心共报告23.9万条崩岗侵蚀沟壑,广泛分布于湖北、江西等7省<sup>[4]</sup>,凸显了深化土壤崩解机理研究的迫切需求。

土壤崩解是一个受多重因素复杂调控的过程,当前研究<sup>[5]</sup>主要聚焦于土壤初始水分体积分数、体积质量和温度等因素的影响。以广西红黏土为例,水分体积分数被认为是控制自然气候条件下土壤崩解的主要因素,土壤崩解率通常随土壤水分增加而降低。李敬王等<sup>[3]</sup>研究表明,土壤水分和体积质量共同调节紫色土的崩解过程。此外,温度也被认为是重要因素,它影响固-液界面,进而改变土壤的水力特性;ZHANG等<sup>[6]</sup>对紫色泥页岩发育土壤的崩解试验表明,温度升高导致保水能力降低,导水率增加,崩解速率加快;谷天峰等<sup>[7]</sup>则将较高水温下崩解速率的加快,部分归因于水分子运动的加速及黏土矿物的膨胀和软化。值得注意的是,受成土母质影响的土壤矿物组成也显著影响崩解过程,铁铝氧化物和黏土矿物能够增强土壤颗粒的胶结力,优化土壤结构,降低崩解速率<sup>[8]</sup>。然而,以往研究多侧重于单一因素对土壤崩解的影响,忽略环境因素与土壤内在属性的耦合作用,以及孔隙结构在其中的调控作用。

孔隙结构作为连接环境因子与土壤属性的关键介质,直接决定水分和气体的迁移路径,进而影响着红壤的崩解过程。已有研究<sup>[9]</sup>表明,孔隙气体压力是红壤崩解的主要因素。而土壤孔隙网络(尤其是大孔隙连通性),直接控制水分渗透路径与土壤内部气体的排除效率<sup>[10]</sup>。当水进入封闭的孔隙时,孔隙内的空气无法排出而被压缩,将对周围的土壤颗粒产生压应力,加剧土壤崩解过程<sup>[11]</sup>。

亚热带丘陵区具有独特的气候和地质背景。该区域气候类型复杂,降雨温度年内变化显著,冬季降雨温度可低至几度,而夏季雨水温度可升高至30多度。在全球气候变暖和极端干旱事件的背景下,亚热带丘陵区降雨温度可能呈升高趋势。同时,该区域地质条件复杂,成土母质类型多样,直接影响着土壤的孔隙结构发育和矿物组成<sup>[12]</sup>,进而导致不同母质土壤崩解特性对水温变化的敏感性存在显著差异。基于此,本研究将聚焦亚热带丘陵区,选择不同母质发育的红壤作为研究对象,旨在系统探讨水温与母质类型对红壤崩解的耦合影响,并深入解析孔隙结构和矿物组成在此过程中的调控机制,以期为该区域的水土保持和生态环境保护提供更精细化的科学依据和实践指导。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于湖北省武汉市(29°58'~31°22'N, 113°41'~115°05'E)和咸宁市(29°02'~30°19'N, 113°32'~114°58'E)(图1)。该区属于亚热带季风气候,夏季温暖湿润,冬季寒冷干燥。年平均气温为15.8~17.5℃,年平均降水量为1269mm。研究区地质条件较为复杂,地形以低山丘陵为主,母质类型多样,

红壤分布广泛<sup>[13]</sup>。地带性植被为中亚热带典型常绿阔叶林。武汉市江夏区采样点的地理坐标为 30°21'10"N, 114°20'29"E, 海拔 57~60 m, 主要植被有香樟 [*Cinnamomum camphora* (L.) Presl.]、马尾松 (*Pinus massoniana* Lamb.) 等。武汉市新洲区采样点的地理坐标为 30°41'31"N, 114°36'09" E, 海拔 41 m, 主要植被有构树 [*Broussonetia papyrifera* (L.) L'Hér. ex Vent.] 和狗尾草 [*Setaria viridis* (L.) P. Beauv.] 等。咸宁市通山县采样点的地理坐标为 29°38'47" N, 114°37'57" E, 海拔 45~48 m, 主要植被有小蓬草 (*Erigeron canadensis* L.)、毛牵牛 [*Ipomoea biflora* (L.) Pers.] 和竹节菜 (*Commelina diffusa* N. L. Burm.) 等。

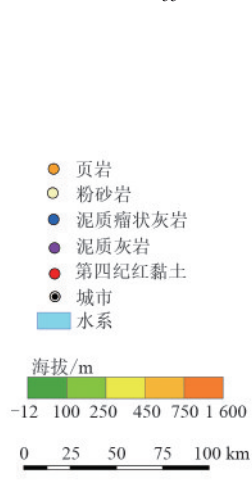


图 1 采样点分布

Fig. 1 Distribution of sampling sites

## 1.2 样品采集和土壤基本理化性质测定

为最大程度地减少其他成土因素的干扰,本研究选取武汉市江夏区页岩(SH)和粉砂岩(ST)发育的红壤、新洲区第四纪红黏土(QRC)发育的红壤、咸宁市通山县泥质瘤状灰岩(ANL)和泥质灰岩(AL)发育的红壤为研究对象(图 1)。采样点均位于气候、地形、植被和成土时间等条件相近的区域,以确保成土母质是影响土壤性质的主要因素。为保证研究可靠性,选取母质类型单一、人为扰动较小的原生林地或天然次生林地作为土壤样品采集地点。

本研究采样与试验在 2023 年 6—12 月进行,且野外工作在晴天或阴天进行,取样前 5 d 无降水,以避免雨水作用对土壤性质的影响。考虑到本研究侧重于母质类型对土壤性质的影响,在采样前需去除枯枝落叶层和腐殖质层。针对野外土壤剖面的淋溶-淀积特征及细沟侵蚀主要发生在表层土壤的实际情况,为探究母质对土壤崩解的影响,每个采样点选取 0~20、20~40 cm 土层深度,重复采集 4~6 个土壤样品,并带回实验室进行后续分析。测定土壤体积质量

和导水性等指标的原状土样品,使用 100 cm<sup>3</sup>环刀采集;用于崩解试验的原状土样品,使用 60 cm<sup>3</sup>(直径 6.18 cm、高 2 cm)的环刀采集;用于 CT 扫描以测定土壤孔隙结构的原状土样品,使用内径 10.4 cm、高 12 cm 的 PVC 管采集。与此同时,使用自封袋装取相应母质土壤的扰动样品,带回实验室风干过筛后,用于测定土壤的基本理化性质。土壤质地采用马尔文粒度仪(Mastersizer 3000)进行分析;土壤有机质采用重铬酸钾加热法测定;土壤饱和导水率采用定水头法测定<sup>[14]</sup>;土壤 pH 采用 pH 计在 1:2.5 的水土比下进行测定;土壤体积质量( $\rho_b$ )采用环刀法测定;阳离子交换容量(CEC)采用 BaCl<sub>2</sub>-MgSO<sub>4</sub> 强迫交换法测定<sup>[15]</sup>;土壤黏土矿物组分采用 X 射线衍射分析和电子显微镜技术测定。

## 1.3 土壤大孔隙结构和结构稳定性测定

为研究不同母质发育的土壤间土壤大孔隙结构特征的差异,本试验通过对不同母质土壤原状土进行土壤样品采集及 CT 扫描,通过图像分析和三维孔隙模型构建对土壤大孔隙结构进行量化。在每个剖面,分别对 0~20、20~40 cm 土层进行原状土采集,每种母质每个土层采集 4 个土柱作为重复。为避免采样过程对土壤孔隙结构的影响,先将土壤削成略大于 PVC 管(内径 10.4 cm,高 12 cm)的土柱,再缓慢向下推进并消除四周土壤的方法进行采样,采完样品用记号笔编号并标记上下方向,用防震泡沫板垫在两端并用胶带固定,以防运输过程对土壤孔隙结构的破坏和扰动。

扫描过程在武汉市第一医院进行,对原状土柱进行 CT 扫描(AS+,德国西门子公司)。峰值电压调整为 130 V,电流为 350 mA,调整垂直和水平的分辨率为 0.6 mm。土柱的横截面从土壤表面一直扫描到底部,每个土柱共生成约 200 幅图像。

为减少可能的干扰造成的误差,在图像分析时去除土柱两端 20 mm 区域并选取特定尺寸的圆柱体样本进行孔隙度分析,以消除边界效应对孔隙分析的影响。利用 Image J 软件中对图像进行处理,首先将 32 位灰度扫描图转化为 8 位,利用圆形工具选择土柱中心目标区域进行分析,对图像进行二值分割,利用 Analysis Particle 工具通过连续的二维图像计算出大孔隙占比。使用 Image J 插件 Bone J 评估土壤孔隙网络的分形维数(FD),该值随着土壤结构复杂度的增加而增加。孔隙空间的连通性使用 Image J 中 Bone J 的连通性插件进行定量表征,其连通性指数( $\chi_n$ )随着孔隙结构连通性的增加而增加<sup>[16]</sup>。根据 BEVEN 等<sup>[17]</sup>给出的大孔隙定义,CT 扫描仪识别出的所有孔隙(直径 $\geq 0.6$  mm)都被视为大孔隙。

土壤结构稳定性指数(soil structural stability index, SSI)根据 PIERI<sup>[18]</sup>提出的公式计算:

$$SSI = \frac{SOM}{Clay + Silt} \times 100\% \quad (1)$$

式中: SOM 为土壤有机质质量分数, %; Clay 和 Silt 分别为土壤黏粒和粉粒占比, %。当  $SSI \leq 5\%$  时, 表明土壤因有机质的严重流失而导致土壤结构退化; 当  $5\% < SSI \leq 7\%$  时, 表示土壤结构存在退化的风险; 当  $SSI > 9\%$  时, 土壤结构没有结构退化的直接风险<sup>[18]</sup>。

#### 1.4 崩解装置与试验方法

土壤崩解采用自制试验装置测定。该装置主要由拉力计(分辨率 0.01 N)、崩解槽、崩解金属网、金属细线、支架等部分组成(图 2)。金属网网孔大小为 1 cm × 1 cm, 崩解金属网为 10 cm × 10 cm, 崩解金属网与拉力计通过细线进行连接, 金属网不接触崩解槽。

为研究水温对土壤崩解速率的影响, 试验前应

控制崩解土样初始水分一致, 因为土壤初始水分体积分数对土壤的崩解速率产生重要的影响<sup>[7]</sup>。已有研究<sup>[19]</sup>表明, 中国南方红壤在自然状态下土壤表层的平均体积含水率约为 20%。因此, 根据公式(2)计算需水量, 用喷壶将配置初始体积含水率所需水量均匀喷洒在土样上, 并置于恒温恒湿箱中静置 24 h, 控制崩解土样体积含水率为 20%。崩解试验前, 将容器内注入一定量的水, 将水温加热或冷却至设定温度, 并用温度计进行检查。调整金属网的位置, 让金属网浸入水中, 并与崩解槽底部保持一定的距离, 待水体静止且拉力计读数稳定之后, 将拉力计读数归零。试验过程中, 将给定初始含水量的样品进入不同温度的水中后立即记录平衡读数  $m_0$ , 然后每隔 30 s 记录时间  $t$  的读数  $m_t$ 。崩解后的土壤通过金属网掉落在崩解槽底部, 待拉力计读数不再变化后认定崩解已经完成, 停止记录, 保存数据, 试验终止, 每个处理重复 3~4 次。用公式(3)~公式(4)分别对崩解比和崩解速率进行定量研究。

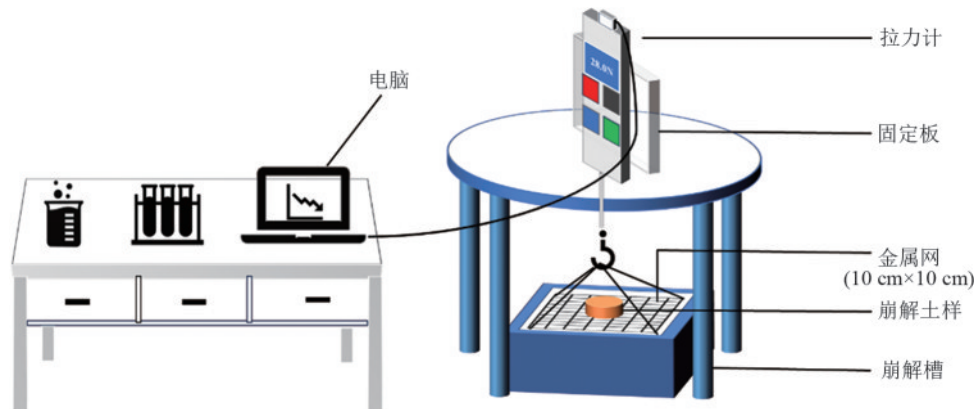


图 2 崩解装置

Fig. 2 Disintegration apparatus

根据所需含水率, 制备土样所需的加水量计算公式为:

$$m_{\text{水}} = \frac{m_{\text{风干}}}{1 + \omega_{\text{风干}}} \times (\omega_{\text{目标}} - \omega_{\text{风干}}) \quad (2)$$

式中:  $m_{\text{水}}$  为制备试样所需加水量, g;  $m_{\text{风干}}$  为风干土质量, g;  $\omega_{\text{风干}}$  为风干土含水率, %;  $\omega_{\text{目标}}$  为目标土样含水率, %。

土壤崩解比计算公式为:

$$A_t = \frac{m_0 - m_t}{m_0} \quad (3)$$

式中:  $A_t$  为  $t$  时的样品崩解率, %;  $m_0$  为测试开始时的瞬时拉力计的读数, g;  $m_t$  为  $t$  时刻拉力计的读数, g。

土壤崩解速率的计算公式为:

$$V = \frac{A_T}{T} \quad (4)$$

式中:  $V$  为崩解速率, %/min;  $A_T$  为完全崩解量, %;  $T$

为完全崩解时间, min。

#### 1.5 数据处理

采用 Microsoft Excel 2010 软件进行数据整理与分析, 并使用 Origin 2022 软件完成相关制图; 采用 IBM SPSS Statistics 24 软件中的单因素方差分析, 比较不同母质土壤性质的差异; 采用 Person 相关性分析土壤性质对土壤崩解特性的影响; 利用 Canoco 5 软件进行冗余分析(RDA), 以探究影响不同母质土壤崩解特性敏感性的关键驱动因子。

## 2 结果与分析

### 2.1 基本理化性质和矿物组成

由不同母质形成的土壤在体积质量、土壤质地和饱和导水率等物理性质方面存在显著差异( $p < 0.05$ )。由表 1 可知, 土壤体积质量由大到小依次为 QRC (1.71 g/cm<sup>3</sup>)、SH (1.45 g/cm<sup>3</sup>), ANL (1.38 g/cm<sup>3</sup>)、

ST (1.30 g/cm<sup>3</sup>) 和 AL (1.19 g/cm<sup>3</sup>), 变化范围为 1.12~1.75 g/cm<sup>3</sup>。5 种土壤的体积质量均随土层深度增加而增大, 主要是根系作用和上层土压实造成。其中, AL 黏粒占比最高 (39.02%), 砂粒占比最低 (1.57%); ST 粉粒占比最高 (87.49%), 黏粒占比最低 (5.11%)。SH、ST 和 QRC 表层土壤的黏粒占比

高于底层土壤, 而 ANL 和 AL 在 20~40 cm 土层中的黏粒占比较高, 尤其是 ANL, 其黏粒占比是表层土壤的 1.22 倍。在 2 个土层中, ANL 的饱和导水率 ( $K_s$ ) 最高 (表 1), 平均为 1.38 cm/d, 其次是 ST (1.20 cm/d), 而 QRC 的  $K_s$  值最低, 平均仅为 0.016 cm/d, 仅为最大值的 1.16%。

表 1 土壤基本理化性质

Table 1 Basic physical and chemical properties of soil

| 土层               | 体积质量/<br>(g·cm <sup>-3</sup> ) | 土壤颗粒组成/%    |             |            | pH         | 饱和导水率/<br>(cm·d <sup>-1</sup> ) | 有机质/<br>(g·kg <sup>-1</sup> ) | CEC/<br>(cmol·kg <sup>-1</sup> ) |
|------------------|--------------------------------|-------------|-------------|------------|------------|---------------------------------|-------------------------------|----------------------------------|
|                  |                                | 黏粒          | 粉粒          | 砂粒         |            |                                 |                               |                                  |
| SH <sub>1</sub>  | 1.41±0.01B                     | 19.95±0.84D | 70.05±0.82B | 9.99±1.31A | 5.12±0.05E | 0.41±0.02B                      | 22.98±1.51C                   | 5.77±0.14D                       |
| SH <sub>2</sub>  | 1.48±0.02B                     | 14.91±0.44C | 75.95±1.27B | 9.14±0.94A | 4.85±0.01E | 0.20±0.09B                      | 18.38±0.65C                   | 5.18±0.04E                       |
| ST <sub>1</sub>  | 1.26±0.08C                     | 5.68±1.84E  | 88.95±1.59A | 5.37±0.58B | 5.73±0.02C | 1.31±0.20A                      | 21.65±0.49C                   | 8.04±0.09C                       |
| ST <sub>2</sub>  | 1.33±0.04C                     | 4.54±0.23D  | 86.02±0.34A | 9.44±0.18A | 5.40±0.01C | 1.10±0.19A                      | 15.02±0.97D                   | 6.13±0.24D                       |
| ANL <sub>1</sub> | 1.28±0.06C                     | 33.43±0.42B | 60.65±0.34C | 5.91±0.76B | 7.54±0.03A | 1.51±0.23A                      | 29.72±0.57A                   | 13.52±0.20A                      |
| ANL <sub>2</sub> | 1.47±0.09B                     | 40.65±1.03A | 55.09±0.70C | 4.26±0.80B | 7.74±0.01A | 1.25±0.02A                      | 27.22±0.23A                   | 12.40±0.58A                      |
| AL <sub>1</sub>  | 1.12±0.07D                     | 36.51±0.01A | 62.17±0.04C | 1.33±0.04C | 5.56±0.07D | 0.35±0.01B                      | 26.75±0.62B                   | 11.28±0.21B                      |
| AL <sub>2</sub>  | 1.26±0.07C                     | 41.53±0.11A | 56.66±0.19C | 1.81±0.30C | 5.33±0.01D | 0.12±0.01B                      | 17.21±0.63B                   | 8.54±0.22C                       |
| QRC <sub>1</sub> | 1.67±0.04A                     | 26.64±1.38C | 71.81±1.30B | 1.55±0.52C | 6.92±0.05B | 0.03±0.01B                      | 3.72±1.50D                    | 11.15±0.16B                      |
| QRC <sub>2</sub> | 1.75±0.02A                     | 20.54±0.06B | 77.22±0.01B | 2.24±0.05C | 6.78±0.08B | 0.01±0.0B                       | 3.72±0.42E                    | 10.93±0.31B                      |

注: SH、ST、ANL、AL、QRC 分别为页岩、粉砂岩、泥质瘤状灰岩、泥质灰岩和第四纪红黏土发育的土壤; 下标 1、2 分别为 0~20、20~40 cm 土层; 表中数据为平均值±标准差; 同列不同大写字母表示不同母质同一土层土壤理化性质差异显著 ( $p < 0.05$ )。下同。

不同母质土壤化学性质也有显著差异 ( $p < 0.05$ ) (表 1)。由于受到土壤母质的影响, pH 为 4.99~7.75, 其中 ANL 的 pH 最高 (7.64), 其次是 QRC (6.85), SH 的 pH 最低 (4.99)。5 种母质发育的土壤中, ANL 的有机质质量分数最高 (29.72 g/kg), 而 QRC 的有机质质量分数最低 (3.72 g/kg), 最高值约为最低值的 7.99 倍。除 QRC 外, 其他土壤表层土壤的有机质质量分数均明显高于底层土壤。其中, AL 土壤的有机质质量分数下降幅度最大, 下降 35.67%。总体来看, ANL 的有机质质量分数、阳离子交换量、导水率和 pH 最高; QRC 的有机质质量分数和导水率最低, 体积质量最大, 土壤质地黏重。阳离子交换量的均值依次为 ANL (12.96 cmol/kg) > QRC (11.04 cmol/kg) > AL (9.91 cmol/kg) > ST (7.09 cmol/kg) > SH (5.48 cmol/kg), 范围在 5.18~12.40 cmol/kg。

X 射线衍射 (XRD) 分析 (表 2) 表明, 不同母质发育土壤的矿物组成以石英和长石为主, 但黏土矿物及赤铁矿分布表现出母质依赖性。石英体积分数为 43%~81%, 其中 QRC 体积分数最高 (80.50%), ANL 体积分数最低 (44.5%)。长石类矿物 (包括微斜长石和钠长石) 占比相对稳定, 分别为 7%~11% 和 2%~7%。其中 SH 微斜长石体积分数最高, 而钠长石在 ANL 中体积分数最低 (平均 3.5%)。相比之下, 不同母质土壤黏土矿物组成差异显著: ANL 黏土矿物总量最高 (37%), 以伊利石 (11%~12%)、绿泥

石 (10%~11%) 和高岭石 (15%~16%) 为主, 且为唯一含赤铁矿的母质类型。AL 黏土矿物总量次之 (24%), 其中高岭石体积分数占比大。相比之下, SH、ST 和 QRC 黏土矿物体积分数较低 (<10%), 且以伊利石和绿泥石或伊利石与高岭石组合为主。综上, ANL 富含黏土矿物及赤铁矿, 土壤颗粒的胶结作用较强; 而 QRC 高石英和低黏土矿物的特性可能导致土壤稳定性较差。

## 2.2 土壤大孔隙结构和结构稳定性特征

不同母质土壤的孔隙结构特性及结构稳定性指数 (SSI) 存在显著差异 (表 3)。孔隙度为 2.07%~9.30%, 其中 AL 孔隙度显著 ( $p < 0.05$ ) 最高 (7.22%), 而 QRC 孔隙度显著 ( $p < 0.05$ ) 最低 (2.26%)。分形维数 (FD) 能够反映土壤孔隙结构的复杂性, 其值为 1.89~2.41, ST、ANL 和 AL 的分形维数较高 (2.27~2.41), 而 QRC 的 FD 值显著最低 (1.89~1.90) ( $p < 0.05$ )。连通性指数呈相似趋势, AL 的连通性最高 (9.87), 而 QRC 的连通性最低 (0.38), 仅为 AL 的 3.85%。土壤结构稳定性指数 (SSI) 进一步量化孔隙特征与力学性能的关联, ANL (30.14) 和 AL (22.42) 的 SSI 值显著最高 ( $p < 0.05$ ), 表明其高孔隙复杂度和连通性有效增强土壤的结构稳定性; 而 QRC 的 SSI 值极低 (3.41), 土壤结构严重退化, 与其低孔隙度和弱连通性直接相关。值得注意的是, 同一母质土壤的不同层次间土壤孔隙参数

多存在显著差异,表明土壤层次对孔隙结构具有重要影响。总体而言,粉砂岩、泥质瘤状灰岩和泥质灰岩发育的土壤表现出更优越的结构稳定性特征,而第四纪红黏土的结构稳定性相对较差。

表 2 不同母质土壤矿物组成

Table 2 Mineral composition of soils from different parent materials

| 母质类型 | 土层深度/cm | 石英/% | 微斜长石/% | 钠长石/% | 伊利石/% | 绿泥石/% | 高岭石/% | 赤铁矿/% |
|------|---------|------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|
| SH   | 0~20    | 73   | 11     | 7     | 5     | 4     | —     | —     |
|      | 20~40   | 76   | 8      | 5     | 4     | 7     | —     | —     |
| ST   | 0~20    | 78   | 9      | 4     | 5     | 4     | —     | —     |
|      | 20~40   | 76   | 8      | 6     | 5     | 5     | —     | —     |
| ANL  | 0~20    | 43   | 9      | 2     | 12    | 11    | 16    | 7     |
|      | 20~40   | 46   | 8      | 5     | 10    | 10    | 15    | 6     |
| AL   | 0~20    | 49   | 7      | 5     | 7     | 9     | 12    | —     |
|      | 20~40   | 66   | 11     | 3     | 6     | 4     | 10    | —     |
| QRC  | 0~20    | 80   | 8      | 2     | 5     | —     | 5     | —     |
|      | 20~40   | 81   | 7      | 4     | 5     | —     | 3     | —     |

注:—代表未检出。

表 3 不同母质土壤孔隙结构特性

Table 3 Pore structure characteristics of soils from different parent materials

| 土层               | 孔隙度(P)/%    | 分形维数(FD)   | 连通性指数( $\chi_n$ ) | 土壤结构稳定性指数(SSI) |
|------------------|-------------|------------|-------------------|----------------|
| SH <sub>1</sub>  | 4.41±1.15B  | 2.28±0.12B | 5.52±3.25A        | 24.72±0.99C    |
| SH <sub>2</sub>  | 3.36±0.35B  | 2.18±0.06A | 1.43±0.16B        | 19.95±0.43B    |
| ST <sub>1</sub>  | 7.55±0.60A  | 2.39±0.03A | 8.11±1.89A        | 22.62±0.43C    |
| ST <sub>2</sub>  | 6.34±1.29A  | 2.32±0.02A | 4.09±2.18A        | 16.90±1.04C    |
| ANL <sub>1</sub> | 8.57±0.71A  | 2.41±0.04A | 11.72±5.31A       | 31.80±0.70A    |
| ANL <sub>2</sub> | 5.55±1.71AB | 2.27±0.08A | 5.64±3.60A        | 28.47±0.10A    |
| AL <sub>1</sub>  | 9.30±0.88A  | 2.40±0.02A | 14.70±3.30A       | 27.06±0.72B    |
| AL <sub>2</sub>  | 5.15±0.45AB | 2.28±0.06A | 5.03±2.15A        | 17.78±0.54C    |
| QRC <sub>1</sub> | 2.45±0.98B  | 1.90±0.16C | 0.48±0.37B        | 3.41±0.30D     |
| QRC <sub>2</sub> | 2.07±0.56C  | 1.89±0.13B | 0.28±0.18C        | 3.41±0.28D     |

2.3 水温对不同母质土壤崩解特性的影响

由图 3 和图 4 对比分析结果表明,不同母质土壤的崩解特性在水温梯度条件下呈显著差异,具体表现在崩解量、水温敏感性及完全崩解历时等关键参数上。在表层土壤(0~20 cm)中(图 4),5 种母质土壤平均崩解量表现为第四纪红黏土(48.09%)>页岩(10.39%)>泥质瘤状灰岩(9.96%)>粉砂岩(9.40%)>泥质灰岩(7.89%),表明第四纪红黏土抗崩解能力显著弱于其他母质类型,而泥质灰岩发育土壤表现出最优的抗崩解特性。进一步分析显示,所有供试土壤的最终崩解量(崩解试验结束时测得的崩解百分比)均随着水温升高而增加。更为重要的是,随着水温从 5℃升高到 45℃,QRC 最终崩解率增幅(即 45℃水温条件下最终崩解量与 5℃水温条件下最终崩解量差值)最为明显( $\Delta 26.54\%$ ),其次是 ANL( $\Delta 15.18\%$ ),而 SH 的响应最弱( $\Delta 5.09\%$ ),表明水温对第四纪红黏土的影响最大,对页岩发育的土壤影响最小。值得注意的是,水温变化对崩解动力学过程的影响具有非线性特征:当水温从 5℃升至 25℃时,完全崩解所需时间由 630 s 延长至 870 s

(+38.1%);然而当水温继续升高至 45℃时,崩解历时反而缩短至 750 s(-13.8%),可能与温水环境增强胶体稳定性有关。表明土壤崩解动力学不仅受热力学因素调控,更与特定温度阈值下的微观结构响应密切相关。

对于下层土壤(20~40 cm),不同母质发育土壤的崩解特性在水温梯度下的响应趋势与表层(0~20 cm)总体相似,但存在显著层次性差异(图 4)。最终平均崩解率表现为第四纪红黏土(34.42%)>页岩(9.79%)>泥质灰岩(8.13%)>粉砂岩(7.68%)>泥质瘤状灰岩(7.49%),表明 QRC 抗崩解能力最弱,而 ANL 抗崩解能力最强。进一步分析表明,水温升高显著加速崩解进程,其中 QRC 的崩解率增幅最大( $\Delta 19.86\%$ ),ANL 次之( $\Delta 12.22\%$ ),SH 响应最弱( $\Delta 5.32\%$ )。值得注意的是,完全崩解历时随水温变化呈非单调性特征:25℃时崩解历时最长(870 s),较 5℃(750 s)延长 16.0%;但当水温升至 45℃时,历时缩短至 780 s(较 25℃减少 10.3%)。此现象与表层土壤的观测结果一致(图 3),表明水温对土壤崩解动力学的调控机制在不同土壤层间具有普适性。

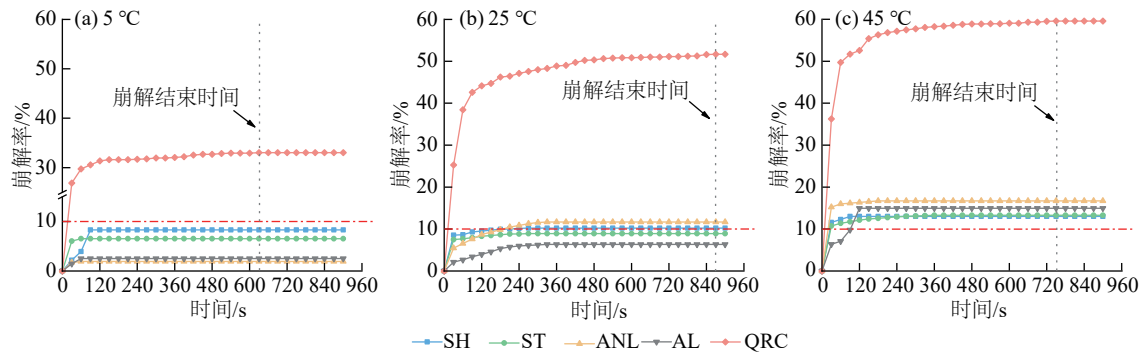


图 3 0~20 cm 土层不同母质土壤崩解曲线

Fig. 3 Disintegration curves of soils from different parent materials in the 0—20 cm soil layer

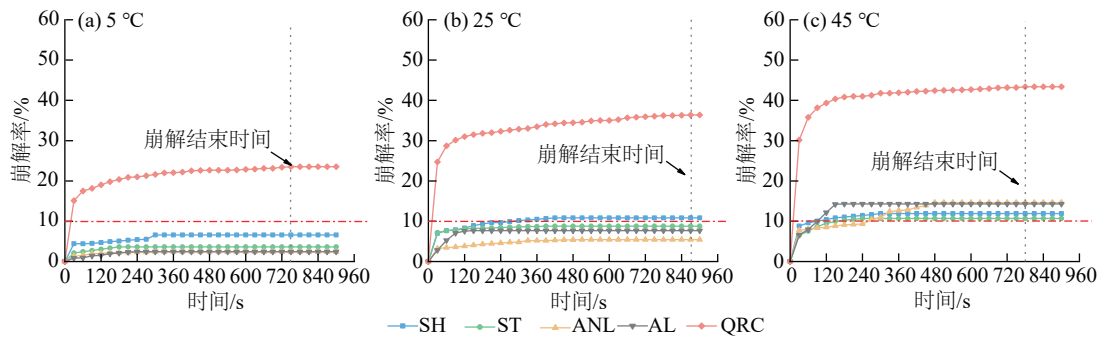


图 4 20~40 cm 土层不同母质土壤崩解曲线

Fig. 4 Disintegration curves of soils from different parent materials in the 20—40 cm soil layer

由图 5 可知,不同母质发育土壤的崩解速率随水温升高呈显著递增趋势,但其响应模式存在明显的表层-下层分异。在表层土壤(0~20 cm,图 5a)中,水温从 5℃升至 25℃时崩解速率增幅较小;而当水温升至 45℃时,崩解速率急剧上升,其中 QRC 增幅达 146.32%,明显高于其他母质类型(图 5a)。相比之下,下层土壤(20~40 cm,图 5b)对水温的响应较为平

缓,除 ANL 在高温段(25~45℃)崩解速率显著增加(Δ386.57%)外,其余母质增幅均低于 40%。表层土壤的崩解速率普遍高于下层(如 QRC 在 45℃时表层速率较下层高 1.8 倍),可能与表层低体积质量和高孔隙度加速土壤崩解有关。值得注意的是,ANL 下层在高温段的异常响应可能是由于黏土矿物热膨胀造成的。

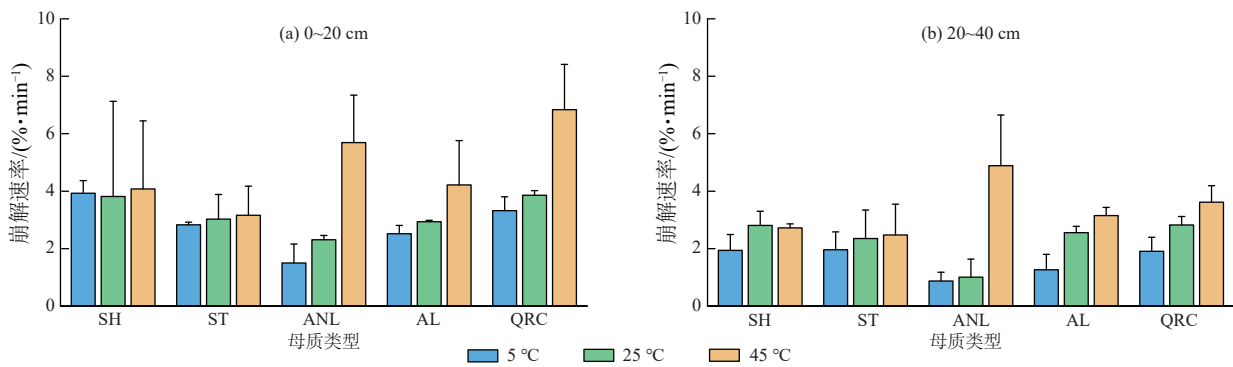


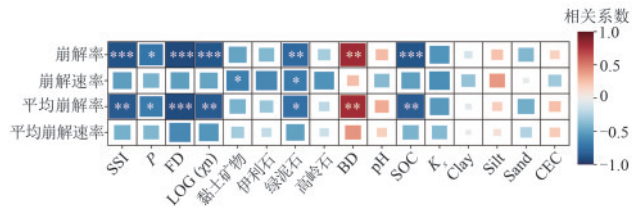
图 5 不同母质土壤崩解速率

Fig. 5 Disintegration rates of soils from different parent materials

### 2.4 母质类型对土壤崩解特性的影响机制

相关性分析(图 6)显示,土壤母质通过调控土壤结构稳定性(SSI)、孔隙结构( $P$ 、 $FD$ 、 $\chi_n$ )、黏土矿物体积分数、土壤体积质量(BD)及有机质(SOC)等因素对土壤崩解特性产生影响。其中,BD与土壤崩解率和平均崩解率均呈极显著正相关( $p < 0.01$ ),而孔隙结构参数( $P$ 、 $FD$ 、 $\chi_n$ )则与土壤崩解率和平均崩解率呈极显著负

相关( $p < 0.01$ ),表明高土壤体积质量通过降低孔隙连通性、增大孔隙气体产生的压力加剧土壤崩解。黏土矿物体积质量与崩解率和崩解特性呈显著负相关( $p < 0.05$ ),可能与绿泥石、伊利石等的胶结作用密切相关。SSI和SOC与土壤崩解率和平均崩解率呈极显著负相关( $p < 0.01$ ),有机质质量分数较高的土壤其结构稳定性越强,能够显著抑制土壤崩解。



注:崩解率与崩解速率数据基于标准温度[(25±1)℃]条件下测定;平均崩解率和崩解速率为5、25、45℃水温梯度下的算术平均值(n=9);\*表示 p<0.05;\*\*表示 p<0.01;\*\*\*表示 p<0.001。下同。

图 6 土壤性质与土壤崩解特性相关性

Fig. 6 Correlation analysis between soil properties and soil disintegration characteristics

### 2.5 母质-水温耦合效应对土壤崩解特性的影响机制

由图 7 冗余分析表明,土壤崩解敏感性指标(以单位温度变化下的崩解率增量及崩解速率增量表征)与黏土矿物体积分数和有机质质量分数呈显著正相关( $p<0.05$ ),而与土壤体积质量呈显著负相关( $p<0.05$ ),其中黏土矿物体积分数贡献率最高(90.2%),土壤体积质量(5.3%)和有机质质量分数(2.5%)次之,而大孔隙结构(1.5%)和导水率(0.5%)的影响相对较低。由图 6 可知,黏土矿物对崩解特性呈双重影响机制,一方面通过胶结作用显著抑制土壤崩解;另一方面,在温度梯度下,通过黏土矿物的热膨胀效应增加土壤表面颗粒的分离趋势,导致崩解率和崩解速率随温度的增加而增加。因此,黏土矿物作为母质-水温耦合作用的关键因子,通过胶结-热膨胀双向效应影响土壤崩解特性的温度敏感性分异。

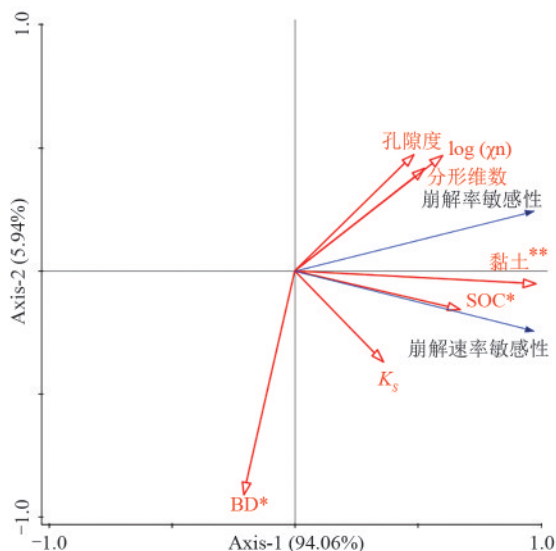


图 7 基于冗余分析的土壤崩解敏感性关键驱动因子

Fig. 7 Analysis of key driving factors for soil disintegration sensitivity based on redundancy analysis

## 3 讨论

### 3.1 水温对土壤崩解特性的影响

温度作为重要的外界环境因素,直接影响土壤崩解特性<sup>[20]</sup>。本研究发现,随水温增加(5~45℃),土壤崩解率和崩解速率均呈增加趋势,与谷天峰等<sup>[7]</sup>研究结果相一致。CONSTANTZ<sup>[21]</sup>研究认为,压力是土体崩解的主要原因,干燥土壤浸水后,孔隙中的气体受压膨胀,在土体内部形成裂隙,随着裂隙压力上升,土体结构沿薄弱面破裂并逐渐崩解。水温升高加速离子的热运动,增加水在土体中的渗透速率,缩短吸水时间,并产生大量气泡。同时,水温升高还降低水的密度和黏滞系数,有利于水分的快速入渗,加速气泡从土壤表面逸出,从而促进裂缝的扩展。与本研究水密度、黏滞系数和表面张力与土壤崩解率和崩解速率分别呈显著( $p<0.05$ )和极显著( $p<0.01$ )负相关的结论(表 4)相似。温度升高也为化学键的断裂提供能量,加速土壤中不稳定有机质的分解,降低土壤颗粒间的黏结力,进而导致团聚体稳定性下降<sup>[20]</sup>。SACHS 等<sup>[22]</sup>研究表明,“热泳”(thermosmosis)作为热梯度驱动的质量流,当水温与土壤表面温度相差较大时,“热泳”降低土壤团聚体稳定性,增加土壤可侵蚀性,此观点也得到 ZHANG 等<sup>[23]</sup>研究支持。因此,水温主要通过改变土壤内部的物理和化学环境,加速土壤崩解过程。

表 4 土壤崩解量和崩解速率与水密度、黏滞系数和水表面张力的相关性

Table 4 Correlation of soil disintegration amount and disintegration rate with water density, viscosity coefficient, and water surface tension

| 项目   | 水密度      | 水黏滞系数    | 水表面张力    |
|------|----------|----------|----------|
| 崩解率  | -0.372*  | -0.370*  | -0.377*  |
| 崩解速率 | -0.573** | -0.525** | -0.554** |

注:\*表示  $p<0.05$ ; \*\*表示  $p<0.01$ 。

### 3.2 母质类型对土壤崩解特性的影响

土壤母质是土壤形成的物质基础,不仅决定土壤的矿物组成和化学特性,还通过其物理结构和化学成分深刻影响着土壤的物理性质、化学性质及生物活性<sup>[12]</sup>。以往对土壤崩解因素的研究<sup>[24]</sup>多集中于黄土、紫色土及花岗岩发育的土壤,对红壤的关注相对不足,更忽视母质类型在其中的作用。本研究发现,不同母质发育的红壤在崩解特性上存在显著差异(图 3~图 5)。在 25℃条件下,各土壤抗崩解能力表现为第四纪红黏土<页岩<粉砂岩<泥质瘤状灰岩<泥质灰岩。此差异与土壤结构稳定性指数(SSI)、大孔隙结构、黏土矿物体积分数、有机质质量

分数(SOC)及土壤体积质量(BD)等因素密切相关(图6)。相关性分析表明,土壤崩解率和平均崩解率与SSI、大孔隙度( $P$ )、分形维数(FD)、连通性指数( $\chi_n$ )、黏土矿物体积质量及SOC均呈显著( $p < 0.05$ )负相关;而与BD呈极显著( $p < 0.01$ )正相关。对于红壤的崩解机制而言,孔隙气体压力被认为是关键因素<sup>[8]</sup>。在吸力不平衡情况下,水分优先进入土壤的小孔隙,导致孔隙中的空气无法充分排出,空气体积被压缩,孔隙压力增大,当孔隙压力超过有效应力时,土体便发生崩解<sup>[8]</sup>。高体积质量土壤因压实而导致孔隙率较低,孔隙连通性较差,土壤气体不易排除,从而导致土壤孔隙压力增大,易发生崩解。相反,高孔隙度( $P$ )和高连通性( $\chi_n$ )的土壤能够更快地排除孔隙中的气体,减少孔隙气压累积时间,从而降低崩解率,与张思靖等<sup>[25]</sup>研究结果一致。根系能够改变土壤的入渗率和孔隙结构,降低大孔隙内孔隙压力,减少水分对土壤结构的破坏。值得注意的是,SUN等<sup>[8]</sup>研究发现,土壤崩解速度与土壤有效孔隙率呈指数关系,与本研究结果存在一定差异。此差异可能源于SUN等的研究主要关注孔隙度而忽略孔隙连通性的影响。本研究中土壤有机质质量分数较高(表1),其胶结作用可增强土壤结构稳定性,从而能够抑制土壤崩解。孔隙结构的复杂性(FD)能够进一步增强土壤结构稳定性,提高土壤抗崩解能力。因此,土壤大孔隙度越高、孔隙结构越复杂、孔隙连通性越强,土壤结构越稳定,抗崩解能力也越强。黏土矿物作为影响土壤结构的重要因素之一,其组合深受母质类型的影响,直接影响土壤孔隙连通性及其尺寸分布<sup>[26]</sup>。一般来说,黏土矿物体积质量越高,土壤致密性越好,强度越高,颗粒间胶结键就越强,土壤遇水不易崩解。泥质灰岩和泥质瘤状灰岩发育的土壤中黏土矿物体积质量较高,遇水不易崩解;而第四纪红黏土和页岩发育的土壤黏土矿物体积质量较低,孔隙结构较差,土壤遇水易发生崩解。因此,母质主要通过影响土壤的矿物组成、结构特征等方式影响土壤的抗崩解能力。

### 3.3 水温-母质耦合效应对土壤崩解特性的影响

红壤作为三相多孔疏松介质,其复杂结构的崩解过程往往受到外部诱发因素(水、温度等)和内部敏感因素(矿物成分、结构特征等)的综合影响<sup>[8]</sup>。以往研究在探讨土壤崩解时,局限于单一变量(温度、含水量、矿物组成)和特定土壤类型(黑土、黄土和红黏土),未能充分考虑多因素耦合及土壤类型的多样性。曾庆建等<sup>[5]</sup>研究虽然认识到水温对红黏土崩解的影响,但忽略其他因素与水温和母质耦合作用。土壤

崩解并非简单的线性过程,其崩解特性与红壤的物理性质,特别是受母质类型影响的黏土矿物体积质量,存在直接关联<sup>[8]</sup>。本研究通过RDA分析(图7)发现,黏土矿物体积质量是母质-水温耦合效应中的关键因子,显著影响不同母质红壤的崩解特性对水温的敏感性。已有研究<sup>[27]</sup>表明,土壤中的黏土矿物(如高岭石、蒙脱石、伊利石等)遇水易发生膨胀、软化和分散滑动,导致土壤结构不稳定,进而发生崩解。水温升高能够增大内能,加快水分子运动速度,从而加速土壤中黏土矿物的膨胀和软化,增加黏土矿物表面流动分子的“分子轰击强度”<sup>[17]</sup>。同时,水温的升高还导致土壤颗粒的不均匀膨胀,减弱矿物颗粒间胶结作用<sup>[28]</sup>,并增加膨胀性黏土矿物中滞留的气泡和膨胀的压差,以上因素共同作用进一步加剧土壤结构的坍塌,降低团聚体稳定性<sup>[29]</sup>。因此,黏土矿物的类型和体积质量是调控水温-母质耦合作用的主导因素。也能解释为什么在本研究中,泥质瘤状灰岩发育的土壤崩解率和崩解速率对水温的变化最为敏感,而页岩和粉砂岩由于黏土矿物体积分数较低,其崩解率和崩解速率对水温变化则不敏感。

需要指出的是,在本研究中,由第四纪红黏土发育的土壤其崩解率和崩解率的温度敏感性显著高于其他母质土壤,而黏土矿物体积质量却相对较低,该反常现象与其独特的成土过程密切相关。第四纪红黏土通常形成于地下水波动频繁的地区,土壤团聚体在干燥时收缩,从而有利于裂缝的形成和团聚体稳定性的降低<sup>[30]</sup>。胶体物质的迁移流失进一步降低土壤黏聚力,破坏其整体结构,进而影响其力学强度和抗崩解能力<sup>[26]</sup>。除成土过程外,母质差异也是导致其崩解率显著较高的另一重要因素。已有研究<sup>[31]</sup>表明,亚热带地区的第四纪红黏土多为风成沉积,其粒度组成均匀,富集基本粉尘组分。WU等<sup>[32]</sup>通过端元分析进一步证实,武汉第四纪红黏土为风成沉积。与基岩发育的土壤相比,风成沉积形成的土壤有机质质量分数较低<sup>[33]</sup>,不利于土壤颗粒间的胶结<sup>[34]</sup>。本研究也发现,第四纪红黏土中有机质质量分数显著最低(表1),可能是其易于崩解的原因之一。风成沉积物常具有湿陷性,遇水后易发生沉降和塌陷<sup>[35]</sup>。因此,受母质影响的矿物成分和结构特征的差异是造成红壤崩解的重要内在因素。值得强调的是,本研究为理解全球气候变化背景下红壤的崩解机制提供重要支撑。在未来全球气候变暖加剧的背景下,亟须进一步探究水热耦合效应对红壤崩解的关键阈值和敏感区域,以便为构建适应气候变化的红壤区水土保持策略提供更精确的科学依据。针对不同母

质类型红壤的特性,应采取差异化的水土保持措施。例如,在坡耕地治理中,应注重增施有机肥以提高土壤团聚体稳定性,种植根系发达的植被以改善土壤孔隙结构。尤其是在第四纪红黏土分布区,应加强对土壤有机质的保护和管理,提高土壤的抗崩解能力,从而有效应对全球气候变化带来的挑战,保障红壤地区生态安全和农业可持续发展。

## 4 结论

1)水温主要通过改变土壤内部的物理化学环境,加速土壤的崩解过程。水温升高能够降低水密度和黏滞系数,促进水分快速入渗,并加速土壤内部气泡溢出和裂隙的发育。水温升高还能加速土壤颗粒间胶结物的溶解速率,增强“热泳”效应,从而促进土壤崩解。

2)土壤母质通过决定土壤的矿物组成和结构特征,显著影响土壤的抗崩解能力。在25℃水温条件下,不同母质红壤的抗崩解性由弱至强依次为第四纪红黏土<页岩<粉砂岩<泥质瘤状灰岩<泥质灰岩。一般而言,土壤黏土矿物体积分数越高、孔隙结构越复杂,土壤结构越稳定,抗崩解能力也越强。

3)黏土矿物的类型和体积分数是调控水温-母质耦合作用的主导因素。泥质瘤状灰岩发育的土壤因黏土矿物体积分数最高,其崩解率和崩解速率对水温变化表现出极高的敏感性。相比之下,页岩和粉砂岩由于黏土矿物体积分数较低,其崩解率和崩解速率对水温变化并不敏感。

4)由于独特的成土过程和风成沉积特征,第四纪红黏土发育的土壤表现出极高的崩解率,是红壤侵蚀防治的关键区域。在全球气候变暖加剧的背景下,有必要针对不同母质类型红壤的特性,采取差异化的水土保持措施。特别是对于第四纪红黏土分布区,应采取“培肥与固土”相结合的策略,以提升土壤的抗侵蚀能力。

### 参考文献:

[1] DUAN L X, HUANG M B, ZHANG L D. Differences in hydrological responses for different vegetation types on a steep slope on the Loess Plateau, China[J]. *Journal of Hydrology*, 2016, 537: 356-366.

[2] 钱婧,张丽萍,王文艳.红壤坡面土壤团聚体特性与侵蚀泥沙的相关性[J]. *生态学报*, 2018, 38(5): 1590-1599.

QIAN J, ZHANG L P, WANG W Y. The relationship between soil aggregates and eroded sediments from sloping vegetated red soils of south China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(5): 1590-1599.

[3] 李敬王,陈林,史东梅,等.紫色土崩解特性对容重和含

水率的响应特征[J]. *水土保持学报*, 2019, 33(2): 68-72.

LI J W, CHEN L, SHI D M, et al. Response characteristics of purple soil disintegrating characteristics to bulk densities and water contents[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2019, 33(2): 68-72.

- [4] DENG Y S, XIA D, CAI C F, et al. Effects of land uses on soil physic-chemical properties and erodibility in collapsing-gully alluvial fan of Anxi County, China[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2016, 15(8): 1863-1873.
- [5] 曾庆建,刘宝臣,张炳晖,等.红黏土崩解特性试验研究[J]. *水文地质工程地质*, 2018, 45(3): 93-97.
- ZENG Q J, LIU B C, ZHANG B H, et al. An experimental study of the disintegration characteristics of red clay[J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 2018, 45(3): 93-97.
- [6] ZHANG D, CHEN A Q, LIU G C. Laboratory investigation of disintegration characteristics of purple mudstone under different hydrothermal conditions [J]. *Journal of Mountain Science*, 2012, 9(1): 127-136.
- [7] 谷天峰,袁亮,胡炜,等.黑方台黄土崩解性试验研究[J]. *水文地质工程地质*, 2017, 44(4): 62-70.
- GU T F, YUAN L, HU W, et al. Experimental research on disintegration of the Heifangtai loess [J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 2017, 44(4): 62-70.
- [8] SUN Y L, TANG L S, XIE J B. Relationship between disintegration characteristics and intergranular suction in red soil[J]. *Sustainability*, 2022, 14(21): e14234.
- [9] 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.
- [10] MCCARTER C P R, REZANEZHAD F, QUINTON W L, et al. Pore-scale controls on hydrological and geochemical processes in peat: Implications on interacting processes[J]. *Earth-Science Reviews*, 2020, 207: e103227.
- [11] LIAO L P, YI D M, TAN Y H, et al. Effect of pore air escape and cement dissolution on granite residual soil disintegration, southeast China[J]. *Scientific Reports*, 2025, 15(1): e10422.
- [12] WILSON M J. The importance of parent material in soil classification: A review in a historical context[J]. *Catena*, 2019, 182: e104131.
- [13] CAI Z J, YANG C F, DU X Y, et al. Parent material and altitude influence red soil acidification after converted rice paddy to upland in a hilly region of southern China[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2023, 23(4): 1628-1640.
- [14] FODOR N, SÁNDOR R, ORFANUS T, et al. Evaluation method dependency of measured saturated hydraulic conductivity[J]. *Geoderma*, 2011, 165(1): 60-68.
- [15] GILLMAN G P, SUMPTER E A. Modification to the

- compulsive exchange method for measuring exchange characteristics of soils[J].*Soil Research*, 1986, 24(1): 61-66.
- [16] ZHAO D, XU M X, LIU G B, et al. Quantification of soil aggregate microstructure on abandoned cropland during vegetative succession using synchrotron radiation-based micro-computed tomography[J].*Soil and Tillage Research*, 2017, 165: 239-246.
- [17] BEVEN K, GERMANN P. Macropores and water flow in soils revisited[J].*Water Resources Research*, 2013, 49(6): 3071-3092.
- [18] PIERI C J. Fertility of soils: A future for farming in the West African Savannah[M].*Spring-Verlag: Springer Science and Business Media*, 2012.
- [19] XIA D, ZHAO B Q, LIU D X, et al. Effect of soil moisture on soil disintegration characteristics of different weathering profiles of collapsing gully in the hilly granitic region, south China[J].*PLoS One*, 2018, 13(12): e0209427.
- [20] LUO X Y, GAO H, HE P, et al. Experimental investigation of dry density, initial moisture content, and temperature for granite residual soil disintegration[J].*Arabian Journal of Geosciences*, 2021, 14(11): e1060.
- [21] CONSTANTZ J. Temperature dependence of unsaturated hydraulic conductivity of two soils[J].*Soil Science Society of America Journal*, 1982, 46(3): 466-470.
- [22] SACHS E, SARAH P. Combined effect of rain temperature and antecedent soil moisture on runoff and erosion on loess[J].*Catena*, 2017, 158: 213-218.
- [23] ZHANG Y T, WU T N. Effects of water temperature on soil aggregate stability between soils developed from different parent materials in the subtropical hilly area of China[J].*Catena*, 2024, 241: e108080.
- [24] 保锐琴, 和贵祥, 黄广杰, 等. 土壤崩解研究进展[J]. *贵州农业科学*, 2022, 50(1): 30-41.  
BAO R Q, HE G X, HUANG G J, et al. Research progress on soil disintegration[J].*Guizhou Agricultural Sciences*, 2022, 50(1): 30-41.
- [25] 张思靖, 马建业, 李占斌, 等. 黄土丘陵区沟壑区粉砂壤土崩解性能变化及其影响因子试验研究: 以王茂沟小流域为例[J]. *生态学报*, 2025, 45(1): 91-102.  
ZHANG S J, MA J Y, LI Z B, et al. Experimental study on the change and influencing factors of the disintegration performance of silty loam soil in loess hilly and gully region: A case study of Wangmaogou small watershed[J].*Acta Ecologica Sinica*, 2025, 45(1): 91-102.
- [26] MIRABELLA A, EGLI M, CARNICELLI S, et al. Influence of parent material on clay minerals formation in Podzols of Trentino, Italy[J].*Clay Minerals*, 2002, 37(4): 699-707.
- [27] 李建新, 陈秋南, 赵柳, 等. 南岳地区全风化花岗岩崩解特性试验研究[J]. *湖南科技大学学报(自然科学版)*, 2015, 30(4): 59-63.  
LI J X, CHEN Q N, ZHAO L, et al. Experimental research on disintegration characteristics of weathered granite in Nanyue[J].*Journal of Hunan University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2015, 30(4): 59-63.
- [28] 刘长武, 陆士良. 泥岩遇水崩解软化机理的研究[J]. *岩土力学*, 2000, 21(1): 28-31.  
LIU Z W, LU S L. Research on mechanism of mudstone degradation and softening in water[J].*Rock and Soil Mechanics*, 2000, 21(1): 28-31.
- [29] YANG S, WEN G C, YAN F Z, et al. Swelling characteristics and permeability evolution of anthracite coal containing expansive clay under water-saturated conditions[J].*Fuel*, 2020, 279: e118501.
- [30] PIRES L F, COOPER M, CÁSSARO F A M, et al. Micromorphological analysis to characterize structure modifications of soil samples submitted to wetting and drying cycles[J].*Catena*, 2008, 72(2): 297-304.
- [31] HU X F, WEI J, DU Y, et al. Regional distribution of the Quaternary Red Clay with aeolian dust characteristics in subtropical China and its paleoclimatic implications[J].*Geoderma*, 2010, 159(3/4): 317-334.
- [32] WU T N, ZHANG Y T, WANG Y W, et al. Factors affecting the stability of soil aggregates of plinthosols in the middle reaches of the Yangtze River[J].*Catena*, 2023, 228: e107159.
- [33] ZHENGHU D, HONGLANG X, ZHIBAO D, et al. Morphological, physical and chemical properties of aeolian sandy soils in northern China[J].*Journal of Arid Environments*, 2007, 68(1): 66-76.
- [34] SMALLEY I J, MARKOVIĆ B. Loessification and hydroconsolidation: There is a connection[J].*Catena*, 2014, 117: 94-99.
- [35] SIX J, BOSSUYT H, DEGRYZE S, et al. A history of research on the link between (micro) aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics[J].*Soil and Tillage Research*, 2004, 79(1): 7-31.