

# 水热环境对不同紫色母岩崩解特性的影响<sup>\*</sup>

张 丹<sup>1</sup> 陈安强<sup>2</sup> 苏永波<sup>1</sup> 段红平<sup>1</sup> 刘刚才<sup>3†</sup>

(1 云南农业大学资源与环境学院, 昆明 650201)

(2 云南省农业科学院农业环境资源研究所, 昆明 650205)

(3 中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所, 成都 610041)

**摘 要** 为研究马头山组 ( $K_2m$ )、禄丰组 ( $J_1l$ ) 和妥甸组 ( $J_3t$ ) 紫色母岩在不同水热环境下的崩解特性, 综合考虑了水作用 (饱和泡水和表面浸水)、热作用 (自然昼夜温差和极端温差) 和水热相互作用, 设计了紫色母岩崩解的 5 种试验处理: 浸水极端温差、饱和极端温差、饱和自然温差、浸水自然温差和极端温差。结果表明母岩崩解速率的大小顺序为: 浸水极端温差 > 饱和极端温差 > 饱和自然温差 > 浸水自然温差 > 极端温差, 说明在温差较大时, 干湿交替处理比饱和泡水处理更利用崩解, 在温差不大时, 饱和泡水处理比干湿交替处理更利于母岩崩解, 纯粹的温度变化对母岩崩解的影响很小。三种紫色母岩的平均崩解速率大小依次为: 妥甸组 > 禄丰组 > 马头山组, 这与母岩的化学成分、矿物组成和微结构特征密切相关。不同试验处理下的崩解速率与干湿变化、冷热变化和循环次数呈较好的线性关系。妥甸组崩解速率与循环次数呈负相关, 其他两种母岩的崩解速率与循环次数、冷热变化和干湿变化均呈正相关。

**关键词** 紫色母岩; 水热环境; 崩解特性

**中图分类号** S151 **文献标识码** A

岩石风化不但影响土壤的形成过程<sup>[1]</sup>, 也影响地形地貌的演化<sup>[2]</sup>, 同时它也参与了短时间尺度和长时间尺度的全球碳循环<sup>[3]</sup>。由于岩石风化过程是一个长期的物理化学生物过程<sup>[4-6]</sup>, 对母岩成土、地貌演化和短时间尺度上的全球碳循环反应不灵敏<sup>[3]</sup>。但是对我国西南地区特有的土壤类型—紫色土来说, 作为一种初育土, 其成土母质具有高生产力性、快速风化性和强侵蚀性特点<sup>[7]</sup>, 强烈影响着这一区域土壤的形成和地貌的演化过程<sup>[8]</sup>, 同时在全球气候变化 (主要是水热变化<sup>[4]</sup>) 背景下, 研究水热环境变化下紫色母岩的风化过程对于正确理解全球气候变化下区域尺度的紫色母岩成土、地貌演化和岩石风化作用所导致的碳汇效应具有重要的理论意义。

紫色土是我国主要的一种土壤类型, 占我国土地面积的 2.2%, 也是西南地区最主要的土壤类型, 占该区土壤总面积的 14.7%, 是该区第一大土壤类型<sup>[7]</sup>。紫色土作为一种岩成土, 紫色母岩的存在和

状态是其最重要的成土条件, 紫色母岩以侏罗纪、白垩纪紫红色砂、泥岩为主, 由于其易于风化, 特别是紫色泥岩, 岩性较松软, 构造裂缝, 成岩裂缝和风化裂缝较发育, 在冷热和干湿变化条件下, 泥岩物理风化强烈, 极易成土。据研究, 紫色泥岩平均年风化厚度可以达到 2.46 mm<sup>[9]</sup>。由于紫色母岩的风化速度很快, 而且其风化产物即石粉具有肥力, 可直接作为土壤进行耕作, 故紫色母岩的成土研究便集中在了母岩风化崩解过程的研究。有学者在紫色土研究中提出了“母质肥力”的见解, 与土壤肥力等同重视<sup>[10]</sup>。

影响岩石风化的因素较多, 包括外在的水热变化和岩石本身的岩性条件<sup>[11-13]</sup>。其中, 水分、温度的变化是影响岩石物理风化的主要因素, 大部分研究者认为湿度变化是母岩物理风化的主要控制因素<sup>[14-15]</sup>, Gamble<sup>[16]</sup>认为岩石含水量的改变是引起岩石崩解的主要原因。Phienwej<sup>[17]</sup>认为崩解主要是在吸水条件下产生的, 而且认为岩石的崩解强度随吸

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金项目 (40971168) 资助

<sup>†</sup> 通讯作者: 刘刚才 (1967—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事土壤侵蚀与水文水资源研究。E-mail: liuge@imde.ac.cn

作者简介: 张 丹 (1980—), 女, 博士, 讲师, 主要从事土壤侵蚀和水土保持研究。E-mail: yidan33@163.com

收稿日期: 2012-03-22; 收到修改稿日期: 2013-02-24

水前岩石的干燥程度的增加而增加,同时随干湿交替次数的增加而增大。但是也有一些学者发现温度变化是影响母岩风化的主要影响因素<sup>[12]</sup>。至于单纯的热对岩石风化的影响研究,国外有学者通过室内试验得出结论,认为纯粹的热作用对岩石崩解的贡献很小<sup>[18]</sup>。只有在水热共同作用下,才会加速岩石的风化过程。White 和 Blum<sup>[19]</sup>认为温度对岩石风化的影响依赖于降水量,但温度升高,降水对风化作用的影响加剧,尤其在高温区,降水对流域的风化作用影响大于低温区。在低降水的盆地,温度造成的风化作用相当低。Erguler 和 Shakoor<sup>[20]</sup>研究了在自然条件下,泥岩在冷热、干湿和冻融作用下的崩解特性。除了外部条件影响岩石风化外,岩石的矿物成分,特别是蒙脱石、伊利石、高岭石、绿泥石等黏土矿物,及岩石裂隙、微裂隙、片理、面理的存在,是岩石崩解的内在主要因素<sup>[21]</sup>。水热变化只有作用于岩石内在的物质组成才能促进母岩的崩解,刘长武和陆良<sup>[22]</sup>从泥岩的微观结构及物质组成等方面入手,结合泥岩遇水后宏观物理力学性质的变化规律,全面阐述了泥岩遇水的崩解软化机制。谭罗荣<sup>[23]</sup>分析了国内大量工程的软岩崩解试验结果,认为膨胀性矿物含量对软岩崩解有直接影响。Newman<sup>[24]</sup>认为,由于水的溶蚀作用使得矿物颗粒间胶结物削弱,从而引起岩石的崩解。现阶段国内外研究岩石的崩解多是为了研究岩石工程强度变化特征,就成土规律来研究母岩的崩解特性未见报道<sup>[25-27]</sup>,而且对岩石崩解特性的研究,主要从水分条件以及岩石内部的矿物成分等方面入手,极少考虑到热的作用,更没有将水热环境综合作用于岩石崩解来一起进行研究。本文从水、热、水热相互作用三方面设计试验,分析不同试验处理下紫色母岩崩解特性以及各试验处理对崩解影响的差异,探讨各影响因素对紫色母岩崩解的作用规律。

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验材料

本次试验取样均为紫色泥岩,采样点分三处,均在云南省楚雄州境内。从北向南,第一处位于东部武定县, N25°38'5.5", E101°58'13.1", 海拔 2 040 m, 该地区地层为白垩系红层马头山组(K<sub>2</sub>m);第二处位于禄丰县, N 25°08'40.3", E102°02'55.3", 海拔 1 563 m, 地层为侏罗系红层下禄丰组(J<sub>1</sub>);第三处位于双柏县妥甸镇, N 24°41'50", E 101°37'14.7", 海

拔 1 928 m, 地层为侏罗系红层中的妥甸组(J<sub>3</sub>t)<sup>[8]</sup>。现场挖掘紫色泥岩,然后运至元谋干热河谷蚀崩塌观测站室内实验室,放置阴凉处风干。每种母岩的样品均从同一块风干母岩上用电动锯切割成尺寸相近的长方体,每种母岩分割为 15 块重复样,为了避免样品出现背景值的较大差异性,切割时尽量靠近母岩外表面,避开岩石内部未风化层,保证各块试验样品风化程度相近。

### 1.2 试验方法

地壳表层的岩石在外界因素的作用下所生成的一系列崩解和分解作用称为风化作用。风化作用分为物理风化、化学风化和生物风化三大类<sup>[8]</sup>。由于紫色母岩的物理风化作用最为剧烈。而物理风化中影响最大的因素就是水和热。因此本次试验从水作用、热作用、水热相互作用三个方面来设计试验方案。水的作用分为母岩饱和泡水处理和表面浸水处理,热作用主要分为自然昼夜温差处理和极端温差处理,极端温差处理主要模拟元谋历史地表最高温 75℃ 和最低温 -5℃ (元谋气象站 2003 年至 2010 年数据),自然温差变化主要根据试验时当地自然温差(18℃ ~ 35℃)变化为依据,根据水热相互作用的不同情况设计了 5 种试验处理(表 1),每种处理重复 3 次。试验中以母岩每次干湿交替为一个循环,每组母岩不同试验处理下均进行了 24 次循环。大部分学者认为紫色土实质上就是紫色石粉,这种岩石风化产物本身具备肥力<sup>[9]</sup>,也有学者认为紫色土颗粒直径 < 2 mm 即为成土, < 0.25 mm 为成泥,故本文认为紫色母岩崩解过程中颗粒 < 2 mm 就为成土标志<sup>[28]</sup>,每次循环后过 2mm 土壤筛,小于 2mm 的不再进入下次循环。因此成土速率 = 泥岩崩解后 < 2 mm 颗粒的质量/泥岩崩解前的质量 × 100%。

### 1.3 母岩理化指标、矿物成分及微观结构的测定

采用蜡封法测定母岩天然密度,烘干法测定母岩的含水量<sup>[29]</sup>。紫色母岩的化学组成指标:K<sub>2</sub>O、Na<sub>2</sub>O、CaO、MgO 和 MnO 均采用火焰原子吸收分光光度法测定;P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 采用磷钼蓝光度法测定;SiO<sub>2</sub> 采用聚环氧乙烷重量法测定;Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 采用氟化物取代络合滴定法测定;Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 采用重铬酸钾容量法测定;TiO<sub>2</sub> 采用过氧化氢光度法测定;土壤有机质含量采用油浴加热 - K<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub> 容量法测定<sup>[30]</sup>;紫色母岩矿物组成及黏土含量采用 X 射线衍射仪测定<sup>[31]</sup>。紫色母岩微结构采用扫描电子显微镜观测,SEM 照片采用 Matlab 软件处理,并提取母岩的微观结构信息,包括颗粒、孔隙等参数<sup>[32]</sup>。

表 1 试验处理

Table 1 Experimental treatments

处理 Treatment	详细描述 Detailed description
饱和自然温差 Soaking and natural temperature difference (SNTD)	先将母岩饱和泡水 12 h, 然后取出放置室外自然晾干。循环过程中的自然温差为 18 ~ 35℃ Parent rocks were first completely immersed in water for 12 h, and then placed outdoors to dry naturally, which formed a cycle of the treatment. The temperature fluctuated naturally within the range of 18 ~ 35℃ in the cycle
饱和极端温差 Soaking and extreme temperature difference (SETD)	母岩饱和泡水后, 连同烧杯一起放置 -5℃ 冰箱中 12 h 达到热平衡后, 随后再放置在 75℃ 的水中保温 12 h, 为一个循环处理 After parent rocks were soaked in water for 12h, the beakers together with water and rocks were placed in a refrigerator set at -5℃ for 12 h, and then moved into 75℃ water for 12 h, which formed a cycle of the treatment
极端温差 Extreme temperature difference (ETD)	先将母岩放置 -5℃ 的冰箱中 12 h, 再放置烘箱中, 烘箱的温度需调至 88 ~ 90℃, 保证岩石表面的温度达到 75℃, 放置时间为 12 h, 为一次循环 Parent rocks were first placed in a refrigerator set at -5℃ for 12 h, and then moved into an oven set at 88 ~ 90℃ for heating till the temperature on the surface of the rocks reached 75℃ for 12h, which formed a cycle of the treatment
浸水自然温差 Wetting and natural temperature difference (WNTD)	先用喷壶湿润母岩表面, 记下加水量。放置室外, 直至母岩自然晾干为一次循环。循环过程中的自然温差为 18 ~ 35℃ A sprinkler was used to wet the surface of the parent rocks (the amount of water used was recorded). Then the wet rocks were placed outdoors to dry naturally, which formed a cycle of the treatment. The temperature fluctuated naturally within the range of 18 ~ 35℃ in the cycle
浸水极端温差 Wetting and extreme temperature difference (WETD)	先用喷壶湿润母岩表面, 记下加水量。放置 -5℃ 的冰箱中 12 h, 再放置烘箱中 12 h, 烘箱的温度需调至 88 ~ 90℃, 保证岩石表面的温度达到 75℃, 为一次循环 A sprinkler was used to wet the surface of the parent rocks (the amount of water used was recorded). Then the samples were placed in a refrigerator set at -5℃ for 12 h, and then moved into an oven set at 88 ~ 90℃ for heating till the temperature on the surface of the rocks reached 75℃ for 12 h, which formed a cycle of the treatment

## 1.4 数据处理

采用 DPS7.05 对崩解速率进行方差分析, 采用 SPSS12.0 对崩解速率和影响因素进行回归分析。

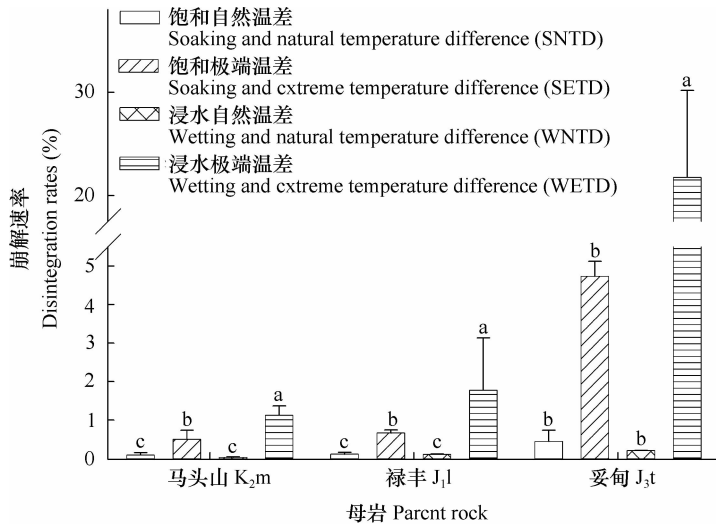
## 2 结 果

### 2.1 不同水热处理下紫色母岩的崩解速率

在 24 次循环处理中, 各种母岩在极端温差处理下均未出现明显崩解。表明在无水分参与情况下纯粹的温度变化对岩石崩解的贡献很小, 岩石除了在已有的节理处出现细微的变化外, 几乎无崩解现象发生。这一结论与 Yamaguchi 等人<sup>[18]</sup>研究结论相同。故在以下的分析中不再对极端温差组进行处理。

每次循环中小于 2 mm 的崩解量与该次循环的总重之比称为崩解速率(%)。就三种母岩不同处理的崩解速率来看(图 1), 各种处理的崩解速率顺序为: 浸水极端温差(WETD) > 饱和极端温差(SETD) > 饱和自然温差(SNTD) > 浸水自然温差(WNTD) > 极端温差(ETD)。且三种母岩的浸水极端温差处理与其他四种处理以及与马头山组和禄丰组的饱和极

端温差、饱和自然温差和浸水自然温差处理的崩解速率均存在显著差异。可以看出, 三种母岩在浸水极端温差处理下崩解要较其他处理快很多, 尤其是妥甸组, 在水的溶蚀作用下崩解较快, 再加上岩石的热胀冷缩和冰劈作用促进了裂缝发展, 加速了浸水极端温差处理的崩解, 说明在有冰劈作用参与下, 母岩的崩解速率可得到极大的提高。其次是饱和极端温差处理, 在温差大的情况下, 干湿交替较岩石一直泡于水中更利于岩石崩解。虽然饱和自然温差处理的崩解速率与浸水自然温差处理的差异不显著, 但是饱和自然温差处理仍大于浸水自然温差处理, 主要是因为泥岩在完全泡水时岩石很快就崩解成碎块, 有利于进一步成土。而浸水试验只是用水湿润母岩表面, 崩解是一层层从外到里剥离崩解, 每次崩解主要是在母岩表面进行, 相对而言崩解量要小。因此, 对三种母岩不同处理下崩解速率的比较来看, 在极端温差处理下, 冷热、干湿交替以及冰劈作用对三种母岩的共同影响使崩解速率大为提高, 说明水热综合作用较单纯的水作用或热作用更利于岩石崩解。



注: 不同小写字母表示差异显著 ( $p < 0.05$ ) Note: The different lowercase letters mean significant difference between the different treatments of the same parent rock ( $p < 0.05$ )

图 1 三种紫色母岩的崩解速率 (%) 及其差异性

Fig. 1 Disintegration rates of three purple parent rocks (%) and their differences

## 2.2 紫色母岩特性对崩解速率的影响

三种母岩为泥岩或砂泥岩,而且三种母岩所属地层均不一致,在相同试验处理下崩解过程也存在差异。从图 1 可以看出,三种母岩的平均崩解速率大小为:妥甸组 > 禄丰组 > 马头山组,而且三种母岩崩解速率,在  $p < 0.05$  上呈显著性差异 ( $F_{K_2m \& J_{1l}} = 4.429$ ,  $F_{K_2m \& J_{3t}} = 27.997$ ,  $F_{J_{1l} \& J_{3t}} = 30.294 > 3.891$ )。从表 2 可以看出妥甸组母岩为粉质泥岩,风化成熟度高,密度大,表面有细小的纹理,质地细腻致密,遇水出现整体溃散性崩解,崩解速度最快。禄丰组为页泥岩,其崩解特性为层层剥落,表现为先是层与层间胶结的泥岩出现裂缝,当裂缝发育到一定程度,两层之间出现剥离。马头山组母岩为砂质泥岩,  $SiO_2$  含量多,它是以复杂黏土矿物、原生硅酸盐矿物和游离氧化硅等的形态存在。

$SiO_2$  是石英的主要组成部分,从表 3 看出,马头山组的石英含量最多,其含量越多,岩石越坚硬,崩解越缓慢。其次是  $Al_2O_3$ ,  $Al_2O_3$  是黏土矿物复杂体的基本组成成分,马头山组、禄丰组和妥甸组含量分别为 154.6、132.3 和 156.1  $g \text{ kg}^{-1}$ 。禄丰组和妥甸组紫色母岩中 MgO 和 CaO 含量较多, MgO 是黏土矿物绿泥石的主要成分,氧化钙主要以碳酸盐的形式存在,遇水后生成  $Ca(OH)_2$ ,能够促进岩石的崩解。在紫色母岩中  $K_2O$  主要是以钾离子的形态存在,为黏土矿物吸附,是水云母和黏土云母的组成成分<sup>[23]</sup>,禄丰组和妥甸组紫色母岩中  $K_2O$  含量也较多,禄丰组含量为 24.248  $g \text{ kg}^{-1}$ ,妥甸组含量为 24.471  $g \text{ kg}^{-1}$ 。这些化学元素含量高有利于岩石的崩解。

表 2 三种紫色母岩的主要物理化学参数

Table 2 Main physicochemical parameters of the three purple parent rocks

母岩 Parent rock	有机质 Organic Matter	g kg <sup>-1</sup>											天然密度 Natural density (g cm <sup>-3</sup> )	自然含水量 Moisture content (%)
		SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	CaO	MgO	MnO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>			
马头山组 K <sub>2</sub> m	1.408	608.5	154.6	70.54	3.40	18.81	28.49	21.9	25.6	0.76	0.65	2.34	0.80	
禄丰组 J <sub>1</sub> l	0.756	525.7	132.3	50.56	6.46	24.25	14.83	114.3	38.7	0.67	1.40	2.69	1.22	
妥甸组 J <sub>3</sub> t	1.172	561.7	156.1	64.86	8.64	24.47	10.13	59.83	33.5	1.09	2.26	2.76	0.81	

母岩的成熟度是表征岩石崩解快慢的一项重要指标,紫色岩石的成熟度是指沉积物随着作用于它的形成过程而接近最终残余物的程度,紫色母岩中的氧化铝和氧化钠的比可作为成熟度的简单化学指数<sup>[9]</sup>。从表 2 看出,三种母岩的成熟度顺序为:妥甸组(15.42) > 禄丰组(8.92) > 马头山组(5.43)。由于成熟度是碎屑沉积物在它所经受风化成土过程中,更接近稳定的最终状态的度量,成熟度高的母岩一般崩解快。而且随着风化成土过程的进行,岩石的黏土矿物多转化为膨胀性伊利石/蒙脱石混层黏土矿物<sup>[8]</sup>。而伊利石蒙脱石等黏土矿物含量高的岩石一般遇水后,由于黏土矿物干缩湿胀的特性,能快速破坏母岩结构,加速母岩崩解。

黏土矿物特别是蒙脱石、伊利石和绿泥石等均具有较强的吸水膨胀失水收缩能力,膨胀收缩作用的持续进行,容易使泥岩颗粒软化崩解。构成三种紫色泥岩的黏土矿物主要是蒙脱石 M、伊利石 I 和绿泥石 C(表 3),其中马头山组黏土矿物主要是蒙脱石 M 和伊利石 I,占矿物含量的 40%,妥甸组和禄丰组的黏土矿物主要是蒙脱石 M、伊利石 I 和绿泥石 C,三种矿物含量之和分别占黏土矿物总含量的 60% 和 45%。可见,妥甸组和禄丰组的黏土矿物含量高于马头山组。由于黏粒有较强的亲水性,当水岩相互作用时,岩石中细小黏粒吸附的水膜增厚,引起岩石体积膨胀。由于体积膨胀的不均匀性,使得岩石内产生不均匀的应力,部分胶结物会被稀释、软化或溶蚀,最后导致岩石颗粒碎裂解体<sup>[33]</sup>。

表 3 三种紫色母岩的全岩分析

Table 3 Whole rock analysis of the three purple parent rocks

母岩 Parent rock	矿物含量 Mineral content(%)									
	蒙托石 Montmorillonite	伊利石 Illite	绿泥石 Chlorite	高龄石 Kaolinite	蛇纹石 Serpentine	石英 Quartz	长石 Feldspar	方解石 Calcite	石膏 Gypsum	黄铁矿 Pyrite
马头山组 K <sub>2</sub> m	15	25	3	0	3	28	10	15	0	1
禄丰组 J <sub>1</sub> l	6	26	13	5	0	24	14	10	0	2
妥甸组 J <sub>3</sub> t	2	43	15	5	0	16	7	8	1	3

用扫描电子显微镜对三种母岩在放大 250 倍数下进行扫描(图 2),从图 2 看出马头山泥岩微结构呈蜂窝状,而禄丰组泥岩微结构呈花瓣状,组成这两种岩石的基本单元是片状颗粒。片状颗粒主要以面-面接触和面-边接触,组成了较多颗粒,但颗粒体积小,在颗粒之间形成了大小不等的孔隙,分布均匀,两种结构均较紧密,其中马头山泥岩蜂窝状结构强度高于禄丰组的花瓣状结构。而妥甸组的微结构呈团粒状,泥岩的微结构单元体以团粒聚集

体为主,颗粒体积较大,但是颗粒数量较少,颗粒之间的接触以面-面为主,细小的黏粒散布在团粒的表面,聚集成团,起着团粒间的联结作用,团和团之间连接较弱,粉粒含量较少,存在大小不等的孔隙,孔隙不均匀地分布于颗粒团块间,结构疏松,强度较花瓣状结构低。三种泥岩特殊的微结构使得妥甸组的崩解速率明显高于禄丰组和马头山组,而且禄丰组和马头山组崩解时的碎屑物多成细小粉粒,而妥甸组崩解碎屑物多为小的颗粒。

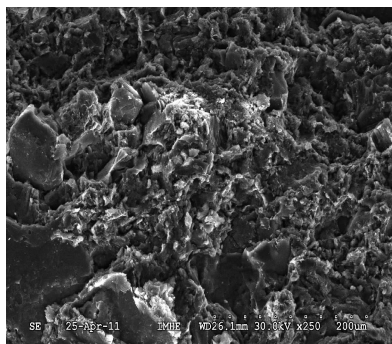
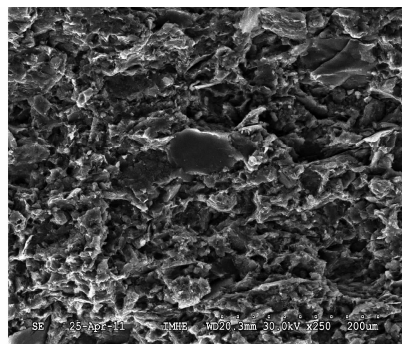
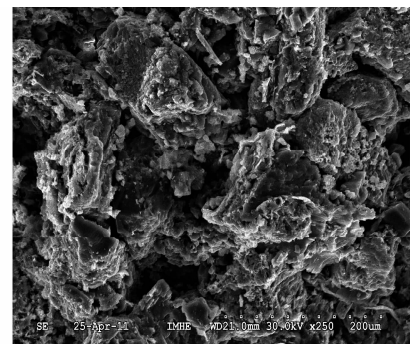
马头山组 K<sub>2</sub>m禄丰组 J<sub>1</sub>l妥甸组 J<sub>3</sub>t

图 2 三种紫色母岩微结构的 SEM 图像

Fig. 2 SEM (scanning electron microscope) images of the microstructures of the three purple parent rocks

用 Matlab 软件对图 2 中的 SEM 照片进行图像处理,提取三种母岩的颗粒、孔隙等结构参数见表 4。从表 4 三种泥岩的颗粒和孔隙参数分析得出,马头山组和禄丰组泥岩颗粒总面积大,孔隙面积

小,岩石更加致密坚硬,水分不易渗入,崩解速度较慢;而妥甸组,颗粒总面积较小,孔隙面积大,岩石较松软,使得水分容易进入岩石内部,有利于母岩崩解。

表 4 三种紫色母岩颗粒孔隙微结构特征

Table 4 Microstructure features of particles and pores of the three purple parent rocks

母岩 Parent rock		颗粒参数 Parameters of particles						
	样品数 Sample number	最大直径 Max diameter ( $\mu\text{m}$ )	平均直径 Average diameter ( $\mu\text{m}$ )	最大面积 Max area ( $\times 10^4 \mu\text{m}^2$ )	总面积 Total area ( $\times 10^4 \mu\text{m}^2$ )	平均面积 Average area ( $\mu\text{m}^2$ )	均值系数 Mean coefficient	
马头山	K <sub>2</sub> m	329	138.1	10.39	1.45	7.3	205.1	0.08
禄丰	J <sub>1</sub> l	346	87.63	10.89	0.6	6.7	211.0	0.12
妥甸	J <sub>3</sub> t	248	156.6	12.76	1.9	6.5	359.5	0.08

母岩 Parent rock		孔隙参数 Parameters of pores						
	样品数 Sample number	最大孔径 Max aperture ( $\mu\text{m}$ )	平均孔径 Average aperture ( $\mu\text{m}$ )	最小孔径 Min aperture ( $\mu\text{m}$ )	总面积 Total area ( $\times 10^5 \mu\text{m}^2$ )	平均周长 Average perimeter ( $\mu\text{m}$ )	均值系数 Mean coefficient	
马头山	K <sub>2</sub> m	43	496.6	11.42	3.39	1.9	202.6	0.02
禄丰	J <sub>1</sub> l	53	488.2	9.07	3.39	1.9	177.4	0.02
妥甸	J <sub>3</sub> t	93	461.5	12.82	3.39	1.9	104.3	0.03

### 2.3 紫色母岩崩解速率与其影响因素的关系

影响紫色母岩崩解的外部因素主要有水分、温度和循环次数,从不同试验处理下三种紫色母岩崩解速率与影响因素的相关分析看(表 5),马头山组和禄丰组不同处理下的崩解速率与循环次数呈正相关,其中马头山组为极显著正相关,禄丰组的 SETD 和 WETD 处理的崩解速率与循环次数呈显著相关,另外两种处理相关性不显著。主要是因为马头山组为砂质泥岩,在试验前期崩解缓慢,随着循环次数的增加,其崩解速率一直呈上升趋势,因此,两者为极显著正相关;禄丰组为页泥岩,在试验前期崩解速率随循环次数的增加而增加,至试验中后期,崩解速率达到最大,随后逐渐下降,因此,两者为显著正相关;而妥甸组在试验开始时,崩解速率较快,在试验中前期时,崩解速率已达到最大,之后随着试验次数的增加,崩解速率呈下降趋势,故二者呈负相关,这可能与妥甸组颗粒物质构成有关。从妥甸组泥岩的微结构可以看出,其构成主要以团粒聚集体为主,颗粒体积较大,开始阶段团聚体间的胶结物在水热作用下易软化破碎,形成小的颗粒。但这种小的团聚颗粒比较坚硬,在崩解后期难以再继续崩解成小的粉粒,因此,妥甸组随着循环

次数的增加,崩解速度变慢。三种母岩在不同处理下的崩解速率与水分和温差变化呈不同程度的正相关,表明三种母岩的崩解速率随着水分和温差的增加而逐渐增加。

表 5 不同处理下三种紫色母岩崩解速率与影响因素相关分析

Table 5 Correlation analysis of disintegration rates of the three purple parent rocks and their affecting factors as affected by difference treatment

母岩 Parent rock	处理 Treatment	次数 Times	水分 Moisture	温度 Temperature	
马头山组	K <sub>2</sub> m	SNTD	0.944 **	—	0.317
	SETD	0.887 **	—	—	
	WNTD	0.801 **	0.812 **	0.807 **	
	WETD	0.767 **	0.666 **	—	
禄丰组	J <sub>1</sub> l	SNTD	0.174	—	0.791 **
	SETD	0.601 *	—	—	
	WNTD	0.563 *	0.172	0.732 **	
	WETD	0.227	0.747 **	—	
妥甸组	J <sub>3</sub> t	SNTD	-0.826 **	—	0.072
	SETD	-0.202	—	—	
	WNTD	-0.092	0.623 *	0.601 *	
	WETD	-0.557	0.673 **	—	

注: \* 在  $p < 0.05$  水平下显著相关, \*\* 在  $p < 0.01$  水平下极显著相关 Note: \* Significant at  $p < 0.05$  level, \*\* extremely significant at  $p < 0.01$  level

为进一步分析崩解速率与各影响因素之间的定量关系,运用逐步回归分析方法对崩解速率( $Y$ )与循环次数( $X_1$ )、温差变化( $X_2$ )和水分含量( $X_3$ )之间进行逐步回归分析。由于崩解速率和各影响因素量纲不统一无法直接综合分析,本文对崩解速率及各影响因素采用极值化方法进行无量纲处理。从表 6 看出,崩解速率与各影响因素均呈较好的线性关系。对于 SETD,在水分和温差一定的情况下,崩解速率与循环次数马头山组呈线性变化,禄丰组和妥甸组呈一元二次函数变化。除了禄丰组的 SETD( $r = 0.633$ ,  $p = 0.005$ )和妥甸组的 WETD 的相关系数( $r = 0.689$ ,  $p = 0.001$ )较低外,其余的处

理相关系数  $r$  均在 0.78 以上( $p < 0.001$ ),表明运用回归方程能够较好地定量表达各因素对崩解速率的影响。从偏相关系数可以看出,妥甸组崩解速率与循环次数呈负相关,而禄丰组与马头山组呈正相关,另外三种母岩的崩解速率与温差变化与水分也呈正相关关系,这与崩解速率与影响因素之间相关分析结果一致。就各因素对崩解的影响程度看,首先是循环次数,其次是温度和水分,说明崩解速率随着循环次数的增加呈稳定的增加或减少趋势。此外,试验过程中,在水分参与情况下,温差的变化极大地促进了母岩崩解。

表 6 不同处理下三种紫色母岩崩解速率与影响因素的回归分析

Table 6 Regression analysis of disintegration rates of the three purple rocks and their affecting factors as affected by difference treatment

处理 Treatment	回归方程 Regression equation	相关系数 $r$ Correlation coefficient	偏相关系数 $r_x$ Multiple correlation coefficient
马头山组	SNTD $Y = -0.489 + 0.886X_1 + 0.614X_2$	0.969	$r_{x1} = 0.966; r_{x2} = 0.663;$
$K_2m$	SETD $Y = 0.127 + 0.722X_1$	0.887	-
禄丰组	WNTD $Y = -1.311 + 1.112X_2 + 0.974X_3$	0.853	$r_{x2} = 0.447; r_{x3} = 0.47$
	WETD $Y = 0.168 + 0.339X_1 + 0.603X_3$	0.816	$r_{x1} = 0.633; r_{x3} = 0.436$
妥甸组	SNTD $Y = -0.508 + 0.526X_1 + 0.978X_2$	0.854	$r_{x1} = 0.754; r_{x2} = 0.592$
	SETD $Y = -0.221X_1^2 + 0.4024X_1 + 0.6009$	0.633	-
	$J_1l$ WNTD $Y = 0.324 + 0.068X_1 + 0.663X_2$	0.869	$r_{x1} = 0.484; r_{x2} = 0.865$
$J_3t$	WETD $Y = -0.562 + 0.562X_1 + 0.835X_3$	0.862	$r_{x1} = 0.646; r_{x3} = 0.429$
	SNTD $Y = -0.055 - 0.969X_1 + 1.196X_2$	0.908	$r_{x1} = -0.907; r_{x2} = 0.669$
$J_3t$	SETD $Y = -0.6916 X_1^2 + 0.6728 X_1 + 0.7359$	0.755	-
	WNTD $Y = -0.913 - 0.276X_1 + 1.337X_2 + 0.551X_3$	0.789	$r_{x1} = -0.498; r_{x2} = 0.607; r_{x3} = 0.271$
	WETD $Y = 0.971 - 0.448X_1 + 0.772X_3$	0.689	$r_{x1} = -0.245; r_{x3} = 0.489$

注:  $Y$  为崩解速率;  $X_1$  为循环次数;  $X_2$  为温差变化;  $X_3$  为加水量 Note:  $Y$  stands for disintegration rates,  $X_1$  for number of cycles,  $X_2$  for fluctuation of temperature, and  $X_3$  for water used in wetting

### 3 结 论

研究结果表明紫色母岩在温差较大的情况下,干湿交替比饱和泡水更利于崩解。在温差不大的情况下,饱和泡水较干湿交替更利于母岩崩解。同时也说明在无水分参与情况下,纯粹的温度变化对紫色母岩崩解影响很小。三种紫色母岩崩解速率的差异与其化学成分、矿物组成和微结构特征密切相关。三种紫色母岩在不同处理下的崩解速率与水分和温差的变化呈不同程度的正相关关系,而且在水分参与的情况下,温差的变化极大地促进了母岩的崩解。马头山组和禄丰组的崩解速率与循环次数呈正相关,而妥甸组呈负相关,

说明崩解速率随着循环次数的增加呈稳定的增加或减少趋势。

### 参 考 文 献

- [1] Coombes M A. Rock warming and drying under simulated intertidal conditions, Part I: Experimental procedures and comparisons with field data. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2011, 36(15): 2114—2121
- [2] Elliott C. Influence of temperature and moisture availability on physical rock weathering along the Victoria Land coast, Antarctica. *Antarctic Science*, 2008, 20(1): 61—67
- [3] 邱冬生, 庄大方, 胡云锋, 等. 中国岩石风化作用所致的碳汇能力估算. *地球科学—中国地质大学学报*, 2004, 29(2): 177—190. Qiu D S, Zhuang D F, Hu Y F, et al. Estimation of carbon sink capacity caused by rock weathering in China (In Chinese). *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*

- ences, 2004, 29(2): 177—190
- [ 4 ] Hale P A, Shakoor A. A laboratory investigation of the effect of cyclic heating and cooling, wetting and drying, and freezing and thawing on the compressive strength of selected sandstones. *Environmental and Engineering Geoscience*, 2003, 9(2): 117—130
- [ 5 ] 刘铁庚, 叶霖, 王兴理, 等. 化学作用是干旱地区岩石风化的主要因素——蒸发和淋漓模拟实验. *中国地质*, 2007, 34(5): 815—821. Liu T G, Ye L, Wang X L, et al. Chemical action is an important factor for rock weathering in arid areas: Simulating experiments of evaporation and leaching (In Chinese). *Geology in China*, 2007, 34(5): 815—821
- [ 6 ] Kalin M, Harris B. Chemical precipitation within pyritic waste rock. *Hydrometallurgy*, 2005, 78(3/4): 209—225
- [ 7 ] 刘刚才. 紫色土侵蚀规律及其防治技术. 成都: 四川大学出版社, 2008. Liu G C. Purple soil erosion rules and its control technologies (In Chinese). Chengdu: Sichuan University Press, 2008
- [ 8 ] 何毓蓉. 中国紫色土(下篇). 北京: 科学出版社, 2003: 65—70. He Y R. Purple soil in China (Part II) (In Chinese). Beijing: Science Press, 2003: 65—70
- [ 9 ] 李仲明. 中国紫色土(上篇). 北京: 科学出版社, 1991. Li Z M. Purple soil in China (Part I) (In Chinese). Beijing: Science Press, 1991
- [ 10 ] 陈恩健. 中国之土壤与自然条件概论. 北京: 科学出版社, 1960. Chen E J. Generality of Chinese soil and natural conditions (In Chinese). Beijing: Science Press, 1960
- [ 11 ] Weiss C, Koch R, Gerlach I. Jurassic limestones used in the Al-maqah Temple of Sirwah, Northern Jemen-use, weathering, and source. *Zeitschrift Der Deutschen Gesellschaft Fur eowissenschaften*, 2007, 158(3): 571—592
- [ 12 ] Sumner P D, Hedding D W, Meiklejohn K I. Rock surface temperatures in southern Namibia and implications for thermally-driven physical weathering. *Zeitschrift Fur Geomorphologie*, 2007, 51(1): 133—147
- [ 13 ] 李兰, 周忠浩, 杜树汉, 等. 紫色土成土速率的估算与田间测定. *土壤学报*, 2010, 47(3): 393—400. Li L, Zhou Z H, Du S H, et al. Model-based estimation and field measurement of purple soil formation rate (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2010, 47(3): 393—400
- [ 14 ] Mol L, Viles H A. Geoelectric investigations into sandstone moisture regimes: Implications for rock weathering and the deterioration of San Rock Art in the Golden Gate Reserve, South Africa. *Geomorphology*, 2010, 118(3/4): 280—287
- [ 15 ] Saad A, Guedon S, Martineau F. Microstructural weathering of sedimentary rocks by freeze-thaw cycles; Experimental study of state and transfer parameters. *Comptes Rendus Geoscience*, 2010, 342(3): 197—203
- [ 16 ] Gamble J. Durability-plasticity classification of shales and other argillaceous rock. Urbana: Univ of Illinois, 1971
- [ 17 ] Phienweij N. Ground response and support performance in a sheared shale, Stillwater Tunnel. Urbana: Univ of Illinois, 1987: 125—163
- [ 18 ] Yamaguchi H, Yoshida K, Kuroshima I. Slaking and shear properties of mudstone. *ISRM International Symposium: International Society for Rock Mechanics*, 1998: 133—144
- [ 19 ] White A D, Blum A E. Effects of climate on chemical weathering in watersheds. *Geochimicaet Cosmochimica Acta*, 1995, 59(9): 1729—1747
- [ 20 ] Erguler Z A, Shakoor A. Relative contribution of various climatic processes in disintegration of clay-bearing rocks. *Engineering Geology*, 2009, 108(1/2): 36—42
- [ 21 ] 李斌汉. 广州地铁工程复合式盾构施工技术研究. 重庆: 重庆大学, 2006. Li B H. Study on composite shield construction technology of Guangzhou subway project (In Chinese). Chongqing: Chongqing University, 2006
- [ 22 ] 刘长武, 陆士良. 泥岩遇水崩解软化机理的研究. *岩土力学*, 2000, 21(1): 28—31. Liu C W, Lu S L. Research on mechanism of mudstone degradation and softening in water (In Chinese). *Rock and Soil Mechanics*, 2000, 21(1): 28—31
- [ 23 ] 谭罗荣. 关于粘土岩崩解、泥化机理的讨论. *岩土力学*, 2001, 22(1): 1—5. Tan L R. Discussion on mechanism of disintegration and argillitization of clay-rock (In Chinese). *Rock and Soil Mechanics*, 2001, 22(1): 1—5
- [ 24 ] Newman G. The effect of water chemistry on the laboratory compression and permeability characteristic of North Sea Chalks. *Journal of Petroleum Technology*, 1983, 35(5): 976—980
- [ 25 ] 吴益平, 余宏明, 胡艳新. 巴东新城区紫红色泥岩工程地质性质研究. *岩土力学*, 2006, 27(7): 1201—1203. Wu Y P, Yu H M, Hu Y X. Research on engineering geological characters of aubergine mudstone of Badong new city zone (In Chinese). *Rock and Soil Mechanics*, 2006, 27(7): 1201—1203
- [ 26 ] 冯启言, 韩宝平, 隋旺华. 鲁西南地区红层软岩水岩作用特征与工程应用. *工程地质学报*, 1999, 7(3): 266—271. Feng Q Y, Han B P, Sui W H. Characteristics of water-rock interaction of red-beds and its application to engineering in Southwestern Shandong (In Chinese). *Journal of Engineering Geology*, 1999, 7(3): 266—271
- [ 27 ] 曹运江, 黄润秋, 郑海君, 等. 岷江上游某水电站工程边坡软岩的崩解特性研究. *工程地质学报*, 2006, 14(1): 35—40. Cao Y J, Huang R Q, Zheng H J, et al. Slaking characteristics of soft rock of the engineering slope in a hydroelectric station in the southwest of China (In Chinese). *Journal of Engineering Geology*, 2006, 14(1): 35—40
- [ 28 ] 郭永明. 四川盆地紫色岩风化成土的研究. *西南农业大学学报*, 1991, 13(5): 527—531. Guo Y M. Research into soil formation from purple rock weathering in Sichuan Basic (In Chinese). *Journal of Southwest Agricultural University*, 1991, 13(5): 527—531
- [ 29 ] 赵希刚. 两种方法测定岩矿石密度的对比研究. *物探与化探*, 2003, 27(3): 202—205. Zhao X G. A comparison of two methods for determining densities of rocks and minerals (In Chinese). *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2003, 27(3): 202—205
- [ 30 ] 刘光崧. 土壤理化分析与剖面描述. 北京: 中国标准出版社, 1996. Liu G S. Soil physical and chemical analysis and description of soil profiles (In Chinese). Beijing: China Standards



Press, 1996

- [31] 张荣科, 范光. 粘土矿物 X 射线衍射相定量分析方法与实验. 铀矿地质, 2003, 19(3): 180—185. Zhang R K, Fan G. Quantitative analytic method and experiments of X-ray diffraction phase of clay minerals (In Chinese). Uranium Geology, 2003, 19(3): 180—185

- [32] 毛灵涛, 薛茹, 安里千. MATLAB 在微观结构 SEM 图像定量

分析中的应用. 电子显微学报, 2004, 23(5): 579—583. Mao L T, Xue R, An L Q. Quantitative analysis on SEM image of microstructure with MATLAB (In Chinese). Journal of Chinese Electron Microscopy Society, 2004, 23(5): 579—583

- [33] 任磊夫. 黏土矿物与黏土岩. 北京: 地质出版社, 1992. Ren L F. Clay minerals and clay rock (In Chinese). Beijing: Geology Press, 1992

## EFFECT OF HYDROTHERMAL ENVIRONMENT ON DISINTEGRATION OF DIFFERENT PURPLE PARENT ROCKS

Zhang Dan<sup>1</sup> Chen Anqiang<sup>2</sup> Su Yongbo<sup>1</sup> Duan Hongping<sup>1</sup> Liu Gangcai<sup>3\*</sup>

(1 College of Resources and Environment, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China)

(2 Institute of Agricultural Environment and Resources, Yunnan Academy of Agricultural Science, Kunming 650205, China)

(3 Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Science & Water Resources Ministry, Chengdu 610041, China)

**Abstract** To study characteristics of the disintegration of purple parent rocks of the Matoushan group ( $K_2m$ ), the Lufeng group ( $J_1l$ ) and the Tuodian group ( $J_3t$ ) as affected by water environment (soaking in water or wetting the surface), heat environment (natural diurnal temperature difference or extreme temperature difference), and their interaction, an experiment, designed to have five treatments, i. e. wetting and extreme temperature difference (WETD), soaking and extreme temperature difference (SETD), soaking and natural diurnal temperature difference (SNTD), wetting and natural temperature difference (WNTD) and extreme temperature difference (ETD), were carried out. Results show that the five treatments followed the order of WETD > SETD > SNTD > WNTD and ETD in terms of rock integration rate, which suggests that in the case of big temperature difference, the parent rocks are more likely to disintegrate when getting wet and dry alternately than when being soaked all the time, while in the case of small temperature difference, it is the other way round. The factor of temperature alone does not have much effect on disintegration of the parent rocks. In terms of mean disintegration rate, the 3 parent rocks follow the order of  $J_3t > J_1l > K_2m$ , which is closely related to their chemical constitution, mineral compositions and microstructures. The experiment shows that disintegration rate has a good positive linear relationship with temperature variation, moisture alteration and/or number of treatment cycles in all the rocks except for  $J_3t$ , of which the integration rate is negatively correlated with the number of treatment cycles.

**Key words** Purple parent rock; Hydrothermal environment; Disintegration characteristics

(责任编辑:檀满枝)