

重庆紫色土抗侵蚀能力的粒组效应研究*

薛乐¹ 汪时机^{1†} 李贤^{1,2} 胡东旭³ 沈泰宇¹ 江胜华¹

(1 西南大学工程技术学院, 重庆 400715)

(2 College of Physical Sciences & Engineering, Cardiff University, CF24 3AA, UK)

(3 金堂县城乡建设局, 成都 610400)

摘要 严重的水土流失导致不同粒径的土壤颗粒流失, 改变了土壤的抗侵蚀能力。为研究粒组缺失对土壤抗侵蚀能力的影响, 以重庆地区紫色土为对象, 采用去掉某一粒组颗粒后的土壤作为试验用土, 重塑制样进行控制围压与吸力的三轴试验。基于试验所得黏聚力 c 、内摩擦角 ϕ 等强度指标, 分析土壤侵蚀机理。结果表明: (1) 相对于无粒组缺失的试样, 缺失较大粒径(0.25 mm以上)的试样内部颗粒间表面摩擦力和咬合力更大, 缺失较小粒径(0.25 mm以下)的土壤颗粒间表面摩擦力和咬合力较低; (2) 随着围压的增大, 土壤抗侵蚀能力均得到显著提高, 缺失较大粒径(0.25 mm以上)的试样级配良好, 压实性好, 抗侵蚀能力提高的比例更大; 缺失较小粒径(0.25 mm以下)的试样级配不良, 不易被压实, 抗侵蚀能力提高的比例相对较小; (3) 颗粒级配不同的土体在固结剪切中会形成悬浮-密实结构、骨架-密实结构和骨架-孔隙结构, 且抗侵蚀能力大小排序为骨架-密实结构>悬浮-密实结构>骨架-孔隙结构, 且当黏聚力大于10 kPa时, 影响土壤抗侵蚀能力的主要是土壤的内摩擦角; (4) 通过灰色关联法分析发现, 中值粒径 d_{30} 与黏聚力 c 、内摩擦角 ϕ 值关联度较大, 有效粒径 d_{10} 与 c 、 ϕ 值关联度较小, 并且不均匀系数 C_u 、曲率系数 C_c 、限定粒径 d_{60} 、 d_{30} 、 d_{10} 均对土壤抗侵蚀能力有显著影响。研究结果可以为重庆紫色土地区浅层滑坡和水土流失发生机理的研究提供试验数据和科学依据。

关键词 紫色土; 粒组缺失; 围压; 抗剪强度; 灰色关联分析

中图分类号 TU443 **文献标识码** A

紫色土主要分布在四川盆地, 是重庆市分布最广的土, 是一种土质较好、性质较优, 但又易蚀、易退化的土壤^[1]。重庆全年降雨充沛, 辖区内18个区县处于三峡库区, 占三峡库区总面积的80%^[2], 是水土流失最严重的地区之一, 且紫色土相对于其他土体最容易发生水土流失^[3]。

降雨对土体的侵蚀是导致水土流失的主要原

因之一^[4]。侵蚀初期, 雨滴破坏表层土的结构, 使土颗粒剥离并向四周移动, 堵塞住雨水下渗的通道, 此时地表的抗侵蚀能力会得到短暂的提高^[5]。当降雨强度大于入渗速度时, 土体发生径流, 土体中细颗粒被径流搬运。随着侵蚀继续发展, 松散的土粒层中较粗的颗粒在雨滴的作用下以跃移或滚动的方式被搬运^[6]。陈晓燕等^[7]对降雨

* 国家自然科学基金项目 (11572262)、中央高校基本业务费专项资金项目 (XDJK2018AB003) 资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 11572262), and Fundamental Research Funds for the Central Universities (No. XDJK2018AB003)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: shjwang@swu.edu.cn

作者简介: 薛乐 (1991—), 男, 河北沧州人, 硕士研究生, 主要从事土力学及边坡护理等方面的研究。E-mail: 1105249975@qq.com

收稿日期: 2018-07-06; 收到修改稿日期: 2018-11-28; 优先数字出版日期 (www.cnki.net): 2018-12-27

前后紫色土陡坡地的土壤颗粒分布研究发现, 上坡位置黏粒和粉粒含量减少, 砂粒的含量增加; 中坡黏粒和粉粒的含量增加, 砂粒含量减少; 下坡黏粒和砂粒的含量增加, 粉粒含量减少。而且各组分含量随着降雨强度的变化表现出不同程度的增加或减少。

降雨强度的大小导致不同粒径的土颗粒缺失, 改变了土体的颗粒级配, 从而影响了土体的抗剪强度。葛莎等^[8]指出, 雨水对滑坡体的冲刷, 带走了土体中的细小颗粒, 使土体结构疏松, 降低了土体的抗剪强度, 导致滑坡体不稳定。李振林^[9]对汶川震区形成的滑坡堆积体进行研究指出, 堆积体上坡多为细小颗粒, 下坡多为大粒径碎石, 极易发生新生水土流失, 继而导致滑坡灾害的再次发生。王云琦等^[10]对重庆缙云山土壤研究发现, 往细颗粒较多的土壤中添加粗颗粒, 可提高土体的抗剪强度并增加土体的抗侵蚀能力。钟小燕^[11]通过直剪试验测得, 随着土壤细颗粒的增多, 崩岗红土层土壤抗剪强度不断变大, 崩岗砂土层则相反。可以看出, 土壤的抗剪强度与颗粒级配有密切的关系。

国内外学者做了大量研究表明土壤的抗剪强度越大, 其抗侵蚀能力越强。Cruse和Larson^[12]认为土颗粒间的剪力, 决定着土壤受到雨滴溅击表面时土粒是否被分散。陈安强等^[13]指出土壤的抗冲指数(ANS)和抗剪强度有较好的线性关系, 且ANS随着抗剪强度指标 c 值和 ϕ 值的增大呈对数

函数增加, 但当 $c > 10$ kPa后, c 值的变化对ANS增长速度影响效应减小。湛芸等^[14]通过对种植四种植物篱的紫色土进行土壤抗剪强度和抗冲指数试验, 数据表明土壤抗剪强度大的区域其抗冲指数也大。

就现有文献资料来看, 国内外学者的研究主要围绕土壤水蚀机理、抗剪强度、抗剪强度与抗侵蚀能力相关性等方面进行研究。但是, 关于侵蚀造成的不同粒径级土壤单粒缺失对抗剪强度及抗侵蚀能力的影响方面还未见报道。

基于此, 本文以重庆地区紫色土为研究对象, 通过筛除某一粒径级土壤单粒来模拟水土流失造成的粒组缺失, 进行抗剪强度试验, 探讨不同粒组土壤单粒缺失对抗侵蚀能力的影响规律, 为从不同角度研究重庆地区土壤侵蚀提供参考, 以期为该层滑坡和水土流失发生机理的研究提供试验数据和科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验用土

试验用土选自重庆市北碚区某边坡, 土壤粒径范围在2 mm以下, 各粒径质量百分比见表1, 天然物理性质见表2, 颗粒级配曲线(筛分法和移液管法测定)见图1。根据国际制土壤质地分级标准划分, 试验用土属壤质砂土。

表1 天然重庆紫色土各粒径颗粒质量百分比

Table 1 Particle-size composition of the natural purple soil in Chongqing (in percentage)

粒径范围 Particle size range /mm	2 ~ 1	1 ~ 0.5	0.5 ~ 0.25	0.25 ~ 0.075	0.075 ~ 0.05	0.05 ~ 0.01	0.01 ~ 0.005	<0.005
含量Content /%	8.65	18.85	15.22	36.82	4.06	12.5	2.6	1.30

表2 天然重庆紫色土物理性质

Table 2 Physical properties of the natural purple soil in Chongqing

含水率 Water content /%	湿密度 Wet density/ (g·cm ⁻³)	比重 Specific gravity	塑性指数 Plasticity index	液性指数 Liquidity index
20.78	1.68	2.69	14.80	0.09

1.2 试样制备

将试验用土摊开自然风干, 放在橡皮板上用木棒碾压, 使土壤结构充分分散^[15], 放入110 °C烘

箱中, 烘干10 h后套袋密封置于室温中冷却, 然后采用标准土壤筛(筛口径分别为: 2 mm、1 mm、0.5 mm、0.25 mm、0.075 mm)进行筛分, 分别抽

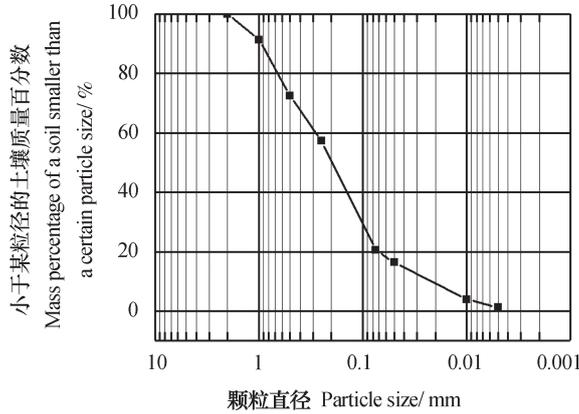


图1 粒组未流失的天然紫色土粒径级配曲线

Fig. 1 Particle size distribution curve of the original purple soil

取其中一层作为缺失粒组，其余层均匀混合，模拟水土流失导致粒组缺失的土体。将筛分好的土体均匀喷洒相应质量的水至含水率为18%，浸润12 h后制备试样。

试验共制备6组试样，每组3个，共18个，试样编号见表3。试样为直径 $d=61.8$ mm，高度 $h=125$ mm的圆柱样，各组供试土壤颗粒粒径参数见表4。

制样过程采用课题组设计加工的千斤顶压实装置，先将第一层的土倒入模型中，用千斤顶压实，表面刮毛后倒入第二层，以此类推，试样分五层压实，每层高25 mm，压实完成后去除底座，再用千斤顶将土体从模具中慢慢压出。较三瓣模饱和器击实法制样更标准、试验误差更小、更易操作。每个试样质量708.9 g、干密度 1.60 g·cm⁻³。

表3 试样编号

Table 3 Code of soil samples

编号 No.	I	II	III	IV	V	VI
缺失粒组 Missing particle group	无缺失	2 ~ 1 mm	1 ~ 0.5 mm	0.5 ~ 0.25 mm	0.25 ~ 0.075 mm	0.075 mm以下

表4 各组供试土壤颗粒粒径参数

Table 4 Soil particle size parameters of each treatment

编号 No.	限定粒径 Limited particle size d_{60}/mm	中值粒径 Median particle size d_{30}/mm	有效粒径 Effective particle size d_{10}/mm	不均匀系数 Uneven coefficient Cu	曲率系数 Curvature coefficient Cc	备注 Remarks
I	0.28	0.10	0.02	12.94	1.70	级配良好
II	0.23	0.09	0.02	11.78	1.97	级配良好
III	0.19	0.09	0.02	11.07	2.27	级配良好
IV	0.20	0.09	0.02	11.23	2.14	级配良好
V	0.54	0.06	0.01	39.79	0.57	级配不良
VI	0.41	0.16	0.10	4.23	0.67	级配不良

1.3 试验方法

试验采用FLSY30-1型应力应变控制式非饱和土三轴仪。进行三轴固结排水剪切试验，净围压控

制为100、200、300 kPa，吸力控制50 kPa。

先将试样在三轴仪内安装稳定，进行固结。待试样固结完成后，直接进行剪切试验。试样固结标准为体积变化每2 h不超过0.063 cm³，排水量每2 h不超过0.012 cm³ [16]。剪切速率控制为0.08 mm·min⁻¹。

1.4 分析方法

为定量研究土壤粒径级配参数与土壤抗侵蚀能力之间的关联程度，本文引入灰色关联法。灰色关联分析即充分利用数量不多的数据和信息来比较分析曲线间几何的形状，几何形状越接近，其发展变化趋势越接近，关联程度越大；反之则越小 [17-18]。

2 结果与讨论

2.1 抗剪强度指标计算

试验发现试样应力-应变曲线属应力强化型，取规定的轴向应变值15%所对应的偏差应力作为最大偏应力（最大、最小主应力的差值）。18个试样的三轴固结排水剪切试验结果见表5。土壤的抗剪强度指标包括内摩擦角φ和黏聚力c。内摩擦角φ代表的是土壤的内摩擦力，包括土壤颗粒之间的表面摩擦力和由于土粒之间的嵌入作用而产生的咬合力。黏聚力c取决土壤颗粒间的各种物理化学作用，包括库仑力（静电力）、范德华力和胶结作用。

表5 最大偏应力值

Table 5 Maximum deviator stress/kPa

围压 Confining pressure /kPa	试样编号Sample No.					
	I	II	III	IV	V	VI
100	230.5	242.8	247.9	252.0	203.6	214.5
200	370.4	392.2	407.7	412.7	294.8	320.6
300	437.1	491.7	509.9	535.5	364.4	414.9

根据莫尔-库伦破坏准则，每组试样的围压与大主应力具有较好的线性关系，如图2a。本试验结果适用杨同等 [19] 和崔洁等 [20] 根据包络线定理，通过求解三轴试验应力圆包络线，得到内摩擦角φ和黏聚力c的计算公式，即满足如下

方程：

$$\sigma_1 = \sigma_c + K\sigma_3$$

式中，σ₁为试样轴向最大主应力，σ₃为围压，σ_c为拟合直线在σ₁轴上的截距，K表示直线的斜率，图2b是以 I 号试样为例拟合的σ₁-σ₃关系图。

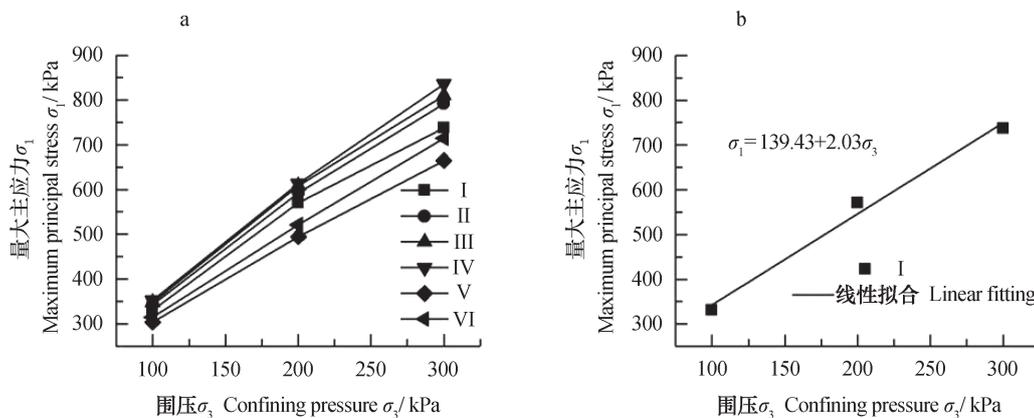


图2 试样σ₁-σ₃关系

Fig. 2 Relationship between σ₁-σ₃

同理计算出其他五组试样的c值和φ值，见表6。

可以发现，试样中缺失粗砂（0.5 mm < d ≤ 2 mm）及中砂（0.25 mm < d ≤ 0.5 mm）粒组的试

样，随着缺失颗粒尺寸的减小， c 值减小， ϕ 值增大；缺失细砂（ $0.075\text{ mm} < d \leq 0.25\text{ mm}$ ）及细粒

（ $d \leq 0.075\text{ mm}$ ）粒组的试样，随着缺失颗粒尺寸的减小， c 值减小， ϕ 值增大。

表6 c 、 ϕ 值计算

Table 6 Calculation of c and ϕ

编号 No.	I	II	III	IV	V	VI
黏聚力Cohesion c/kPa	48.93	42.31	41.60	37.45	27.27	10.26
内摩擦角Internal friction angle $\phi/^\circ$	19.87	22.51	22.92	24.07	16.62	18.92

2.2 围压对土壤抗侵蚀能力的影响

图3a、b、c分别表示围压为100、200、300 kPa时的偏应力-轴向应变曲线。当 $\sigma_3=100\text{ kPa}$ 时，试样剪切破坏的偏应力集中在203.6~251.6 kPa之间；当 $\sigma_3=200\text{ kPa}$ 时，试样剪切破坏的偏应力集中在294.8~412.7 kPa之间，I~VI号试样的偏应力分别提高了60.7%、61.5%、64.4%、63.8%、44.5%、49.5%，得到明显提高。当 $\sigma_3=300\text{ kPa}$ 时，试样剪切破坏的偏应力集中在364.4~535.5 kPa之间，I~VI号试样的偏应力分别提高了89.6%、

102.5%、105.7%、112.5%、79%、93.3%，得到显著提高。

可以看出，应力-应变曲线呈硬化型，无明显峰值，且曲线可分为两段，第一段是初始屈服阶段，第二段为硬化阶段。初始屈服阶段主要表现为试样的压密，切线模量基本相同，随着围压的增大，切线模量减小，屈服点的应变增大。硬化阶段的硬化模量明显小于初始屈服阶段，随着围压的增大，硬化模量增大，缺失不同粒组的试样其硬化程度不同。

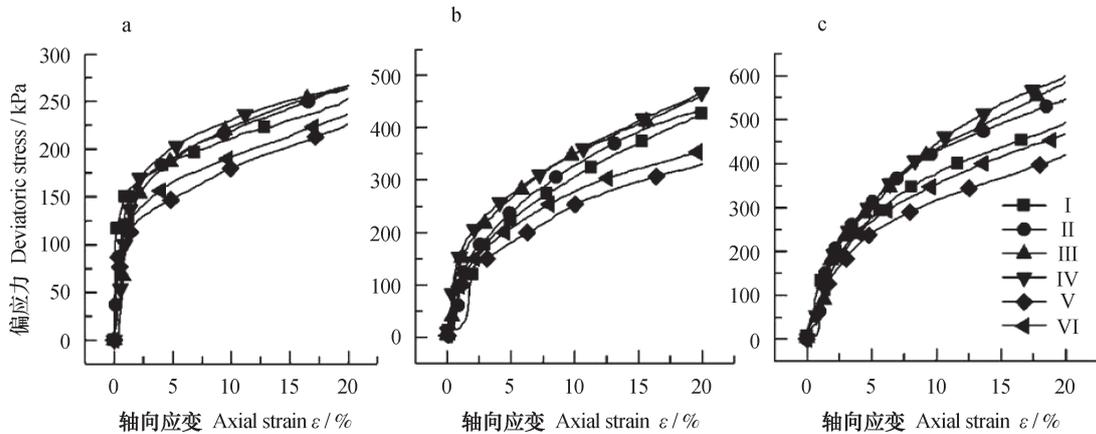


图3 偏应力-轴向应变曲线

Fig. 3 Deviatoric stress and axial strain curve

固结剪切过程中控制基质吸力相同，随着围压的增大，土体内部的颗粒间应力链增加，颗粒重新排布，土体被进一步压实。不仅增加了颗粒间接触面的正压力，即提高了颗粒间移动所需克服的摩擦力，也增大了颗粒间的填充，增强了土壤颗粒抵抗径流冲刷破坏的能力，即增大了颗粒间的咬合力。在物质聚集态中范德华力是一种较弱的吸引力，作

用能大小在每摩尔几千焦至几十千焦，被压密实的土体由于未改变其化学物质组成，所以对其颗粒间的库仑力、胶结作用及范德华力影响较小。

工程实践证明，当土体不均匀系数 $Cu \geq 5$ ，且曲率系数 $Cc=1 \sim 3$ 时级配良好，若不同时满足这两个条件即为级配不良。由表4可知，I、II、III、IV号试样土体级配良好，更易被压密实；V、VI号

试样土体级配不良, 不易被压实。因此级配良好的 I、II、III、IV 号试样较级配不良的 V、VI 号试样, 土体抗剪强度提高的比例更大, 这与钟茫^[21]研究结论相符。同样, 级配良好的土壤其抗侵蚀能力也较强, 且随着围压的增大, 其抗侵蚀能力增加的比例更大。

2.3 粒组缺失对土壤抗侵蚀能力的影响

试验结果特点如下: II、III、IV 号试样相对于 I 号试样, 抗剪强度得到明显提高, V、VI 号试样的抗剪强度相对于 I 号试样明显下降。其中 IV 号试样的抗剪强度最大, V 号试样抗剪强度最小, 见表 5。

土体中的细颗粒比表面积大, 吸附能力强, 常吸附在粗颗粒表面的水层, 颗粒间不是直接接触, 所以主要表现出黏聚效应而摩擦效应较小; 而粗颗粒主要是靠颗粒间直接接触产生较强的摩擦效应反之产生黏聚效应较小。由表 5 和表 6 可知, 抗剪强度的大小受内摩擦角的影响大于受黏聚力的影响, 即粗颗粒间的摩擦效应是决定抗剪强度大小的主要因素。从土壤侵蚀力学角度分析, 土壤在水流冲刷下的破坏形式为剪切破坏, 当黏聚力大于 10 kPa 后, 影响土壤抗侵蚀能力大小的主要是粗颗粒间的摩擦效应。这与陈安强等^[13]的研究结论相符。

究其原因是土体中颗粒级配的不同, 导致在固结剪切过程中形成悬浮-密实结构、骨架-密实结构和骨架-孔隙结构。

由于试验控制每个试样初始孔隙比相同, 在固结剪切过程中, II、III 号试样粗砂的含量分别为 20%、10%, 试样中粗颗粒较少接触或者未能接触, 未能起到骨架的作用, 部分粗颗粒悬浮在细

砂、细粒或微团聚体之中, 形成悬浮-密实结构。IV 号试样中粗砂颗粒含量达到 32.44%, 粗颗粒间形成稳定的骨架结构, 粗砂的孔隙被细砂、细粒或微团聚体填充, 形成骨架-密实结构。V、VI 号试样中孔隙缺少了细粒的填充, 级配不连续, 不易被压实, 形成骨架-孔隙结构。相对于悬浮-密实结构, 骨架-密实结构中粗颗粒之间形成良好的传力骨架, 且细颗粒也能发挥其黏聚效应, 所以抗剪强度更大, 同理, 骨架-孔隙结构中由于缺少细粒的填充, 粗粒在剪切过程中容易产生相对位移, 抗剪强度指标均较小。即抗剪强度和抗侵蚀能力大小排序为骨架-密实结构>悬浮-密实结构>骨架-孔隙结构。

2.4 各影响因子与土壤抗侵蚀能力的关联度

采用灰色关联分析法对各影响因子与土壤抗侵蚀能力的关联度进行分析, 具体分析步骤如下:

(1) 确定直接体现抗剪强度特征的 c 、 φ 值列分别作为参考序列, 其余为比较序列。

(2) 对数据采用均值化消除量纲。见表 7。

(3) 计算绝对差值 $|\Delta_{ij}(k)| = |X_{ik} - X_{ik}|$, $k=1, 2, \dots, n, j=i$ 。(表略), 并找出两级最小差和两级最大差。两级最大差 $\max_i \max_k |x_0(k) - x_i(k)| = 2.148$, 最小差 $\min_i \min_k |x_0(k) - x_i(k)| = 0.012$ 。

(4) 求灰色关联系数 $\varepsilon_i(k)$ 。

$$\varepsilon_i(k) = \frac{\min_i \min_k |X_0(k) - X_i(k)| + \eta \times \max_i \max_k |X_0(k) - X_i(k)|}{|X_0(k) - X_i(k)| + \eta \times \max_i \max_k |X_0(k) - X_i(k)|}$$

其中, η —分辨系数, 取 0.5。

(5) 计算灰色关联度 r_i 。 $r_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \varepsilon_i(k)$

表 7 抗剪强度指标与影响因子参数

Table 7 Shear strength index and influence factor parameters

编号 No.	黏聚力 Cohesion c/kPa	内摩擦角 Internal friction angle $\varphi/^\circ$	不均匀系数 Uneven coefficient C_u	曲率系数 Curvature coefficient C_c	限定粒径 Limited particle size d_{60}/mm	中值粒径 Median particle size d_{30}/mm	有效粒径 Effective particle size d_{10}/mm
I	1.107	0.965	0.853	1.093	0.916	1.029	0.701
II	0.987	1.079	0.776	1.268	0.743	0.941	0.624
III	0.970	1.099	0.730	1.462	0.609	0.854	0.544
IV	0.874	1.154	0.740	1.381	0.654	0.885	0.576
V	1.103	0.797	2.622	0.365	1.750	0.652	0.448
VI	0.959	0.907	0.279	0.432	1.329	1.639	3.107

表8 影响因子与土壤抗侵蚀能力的关联系数及关联度

Table 8 Correlation coefficient and correlation degree between impact factor and soil erosion resistance

编号 No.	不均匀系数 Uneven coefficient Cu	曲率系数 Curvature coefficient Cc	限定粒径 Limited particle size d_{60}/mm	中值粒径 Median particle size d_{30}/mm	有效粒径 Effective particle size d_{10}/mm
I	0.817	0.998	0.858	0.942	0.733
II	0.845	0.801	0.824	0.970	0.756
III	0.826	0.694	0.756	0.912	0.724
IV	0.899	0.687	0.839	1.000	0.792
V	0.419	0.599	0.631	0.712	0.628
VI	0.619	0.678	0.752	0.619	0.337
关联度 Correlation	0.737	0.743	0.777	0.859	0.662

由表8关联度大小排序可以看出, $d_{30}(0.859) > d_{60}(0.777) > Cc(0.743) > Cu(0.737) > d_{10}(0.662)$ 。同理可得各影响因素参考 ϕ 值的关联度大小排序: $d_{30}(0.860) > Cc(0.827) > d_{60}(0.759) > Cu(0.727) > d_{10}(0.684)$ 。可以发现, d_{30} 与 c 、 ϕ 值关联度较大, d_{10} 与 c 、 ϕ 值关联度较小。一般经验认为关联度大于0.3的均为明显关联, 所以, 以上几种因素对土壤抗剪强度及抗侵蚀能力均有明显影响。

3 结 论

不同粒组土壤单粒的缺失会改变土体的粒径级配, 对重庆地区浅层边坡稳定的影响尤为明显。本研究主要针对重庆市北碚区某浅层边坡紫色研究, 试验发现随着水土流失的不断发展, 改变了坡体的颗粒级配组成。其中缺少细颗粒的土壤级配不良, 抗侵蚀能力下降, 容易引起浅层滑坡的发生, 是治理防护的重点部位。且当土壤的黏聚力 $c > 10 \text{ kPa}$ 时, 影响土体抗侵蚀能力的主要依靠粗颗粒间的摩擦效应。通过灰色关联法分析 Cu 、 Cc 、 d_{60} 、 d_{30} 、 d_{10} 对抗剪强度指标的关联程度发现。 d_{30} 与 c 、 ϕ 值关联度较大, d_{10} 与 c 、 ϕ 值关联度较小。并且 Cu 、 Cc 、 d_{60} 、 d_{30} 、 d_{10} 均对抗剪强度有明显的影响。针对重庆地区易发生滑坡的敏感浅层地区治理与防护, 提出以下建议: (1) 治理水土流失, 防止进一步的水土流失造成土壤单粒的缺失, 比如增加植被覆盖或者搭建防护网等; (2) 人为改变土体的粒径级配, 形成级配良好的土体。

参 考 文 献

- [1] 慈恩, 唐江, 连茂山, 等. 重庆市紫色土系统分类高级单元划分研究. 土壤学报, 2018, 55 (3): 569—584
Ci E, Tang J, Lian M S, et al. Higher category partition for purple soils in Chongqing in Chinese soil taxonomy (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2018, 55 (3): 569—584
- [2] 李月臣, 刘春霞, 赵纯勇, 等. 三峡库区重庆段水土流失的时空格局特征. 地理学报, 2008, 63 (5): 475—486
Li Y C, Liu C X, Zhao C Y, et al. Spatiotemporal features of soil and water loss in the Three Gorges Reservoir Area of Chongqing (In Chinese). Acta Geographica Sinica, 2008, 63 (5): 475—486
- [3] 苏正安, 熊东红, 张建辉, 等. 紫色土坡耕地土壤侵蚀及其防治措施研究进展. 中国水土保持, 2018 (2): 42—47
Su Z A, Xiong D H, Zhang J H, et al. Research progress of soil erosion of purple soil slope farmland and its prevention and control measures (In Chinese). Soil and Water Conservation in China, 2018 (2): 42—47
- [4] 温熙胜. 三峡库区坡耕地土壤侵蚀研究. 北京: 北京林业大学水土保持学院, 2007
Wen X S. The study of soil erosion from sloping farmland in Three Gorges Reservoir area (In Chinese). Beijing: School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, 2007
- [5] 程琴娟, 蔡强国, 李家永, 表土结皮发育过程及其侵蚀响应研究进展. 地理科学进展, 2005, 24 (4): 42—47

- 114—122
Cheng Q J, Cai Q G, Li J Y. Summarization on study of soil surface crust or sealing and its effects on erosion (In Chinese). *Progress in Geography*, 2005, 24 (4): 114—122
- [6] Barthès B, Roose E. Aggregate stability as an indicator of soil susceptibility to runoff and erosion; validation at several levels. *Catena*, 2002, 47 (2): 133—149
- [7] 陈晓燕, 牛青霞, 周继, 等. 人工模拟降雨条件下紫色土陡坡地土壤颗粒分布空间变异特征. *水土保持学报*, 2010, 24 (5): 163—168
Chen X Y, Niu Q X, Zhou J, et al. Study on spatial variability characters of steep purple soil particles under rainfall simulation condition (In Chinese). *Journal of Soil and Water Conservation*, 2010, 24 (5): 163—168
- [8] 葛莎, 刘之葵, 高伊航, 等. 重庆北碚区浸口滑坡形成机制和稳定性分析. *广西大学学报 (自然科学版)*, 2015, 40 (4): 934—942
Ge S, Liu Z K, Gao Y H, et al. Formation mechanism and stability analysis of Jinkou landslide in Beibei District, Chongqing (In Chinese). *Journal of Guangxi University (Natural Science Edition)*, 2015, 40 (4): 934—942
- [9] 李振林. 汶川震区滑坡堆积体物质组成与堆积体休止角关系模拟研究. 重庆: 西南大学资源环境学院, 2013
Li Z L. The Wenchuan earthquake landslide accumulation substance pile repose angle of simulation on relations (In Chinese). Chongqing: College of Resources and Environment, Southwest University, 2013
- [10] 王云琦, 王玉杰, 张洪江, 等. 重庆缙云山不同土地利用类型土壤结构对土壤抗剪性能的影响. *农业工程学报*, 2006, 22 (3): 40—45
Wang Y Q, Wang Y J, Zhang H J, et al. Impacts of soil structure on shear-resistance of soil under different land uses in Jinyun Mountain of Chongqing City (In Chinese). *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2006, 22 (3): 40—45
- [11] 钟小燕. 预压固结时间与粒径级配对崩岗土体抗剪强度的影响. 福州: 福建农林大学资源与环境学院, 2016
Zhong X Y. Effects of preloading consolidation time and particle size distribution on soil strength of granite collapsing hill (In Chinese). Fuzhou: College of Resources and Environment, Fujian Agriculture and Forestry University, 2016
- [12] Cruse R M, Larson W E. Effect of soil shear strength on soil detachment due to raindrop impact. *Journal Soil Science Society American*, 1977, 41 (4): 777—781
- [13] 陈安强, 张丹, 熊东红, 等. 元谋干热河谷坡面表层土壤力学特性对其抗冲性的影响. *农业工程学报*, 2012, 28 (5): 108—113
Chen A Q, Zhang D, Xiong D H, et al. Effects of mechanical properties of surface soil on soil anti-scourability in Yuanmou dry-hot valley (In Chinese). *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28 (5): 108—113
- [14] 谌芸, 何丙辉, 练彩霞, 等. 三峡库区陡坡根-土复合体抗冲性能. *生态学报*, 2016, 36 (16): 5173—5181
Chen Y, He B H, Lian C X, et al. Root-soil system anti-scourability on steep slopes in the Three Gorges Reservoir Area (In Chinese). *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36 (16): 5173—5181
- [15] 倪九派, 高明, 魏朝富, 等. 干湿循环条件下重庆地区三种土壤抗剪强度的动态变化. *土壤学报*, 2013, 50 (6): 1090—1101
Ni J P, Gao M, Wei C F, et al. Dynamics of soil shear strength of three types of soils under wetting-drying alternation in Chongqing Area (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2013, 50 (6): 1090—1101
- [16] 汪时机, 陈正汉, 李贤, 等. 土体孔洞损伤结构演化及其力学特性的CT-三轴试验研究. *农业工程学报*, 2012, 28 (7): 150—154
Wang S J, Chen Z H, Li X, et al. Pore-damage evolution and mechanical properties of remolded soil by CT-triaxial test (In Chinese). *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28 (7): 150—154
- [17] 张晓明, 王玉杰, 夏一平, 等. 重庆缙云山典型植被原状土抗剪强度的灰色关联度分析与评价. *水土保持研究*, 2007, 14 (2): 145—147
Zhang X M, Wang Y J, Xia Y P, et al. Grey relational analysis and evaluation on anti-shear strength of the undisturbed soil of typical vegetations in Jinyun Mountain in Chongqing City (In Chinese). *Research of Soil and Water Conservation*, 2007, 14 (2): 145—147
- [18] 刘思峰, 蔡华, 杨英杰, 等. 灰色关联分析模型研究进展. *系统工程理论与实践*, 2013, 33 (8): 2041—2046
Liu S F, Cai H, Yang Y J, et al. Advance in grey incidence analysis modelling (In Chinese). *Systems Engineering -Theory & Practice*, 2013, 33 (8):

- 2041—2046
- [19] 杨同, 徐川, 王宝学, 等. 岩土三轴试验中的粘聚力与内摩擦角. 中国矿业, 2007, 16 (12): 104—107
Yang T, Xu C, Wang B X, et al. The cohesive strength and the friction angle in rock-soil triaxial rests (In Chinese). China Mining Magazine, 2007, 16 (12): 104—107
- [20] 崔洁, 江权, 冯夏庭, 等. 岩石抗剪强度参数的理论概率分布形态研究. 岩土力学, 2015, 36 (5): 1261—1274
- Cui J, Jiang Q, Feng X T, et al. Theoretical probability distribution of shear strength parameters for rock (In Chinese). Rock and Soil Mechanics, 2015, 36 (5): 1261—1274
- [21] 钟茫. 非饱和紫色土抗剪强度影响因素研究. 重庆: 西南大学资源环境学院, 2014
Zhong M. Study on the influence factors of unsaturated purple soil shear strength (In Chinese). Chongqing: College of Resources and Environment, Southwest University, 2014

Impact of Soil Particle Deletion on Erosion Resistance of Purple Soil in Chongqing Based on Strength Index

XUE Le¹ WANG Shiji^{1†} LI Xian^{1,2} HU Dongxu³ SHEN Taiyu¹ JIANG Shenghua¹

(1 College of Engineering and Technology, Southwest University, Chongqing 400715, China)

(2 College of Physical Sciences & Engineering, Cardiff University, CF24 3AA, UK)

(3 Urban and Rural Construction Bureau of Jintang County, Chengdu 610400, China)

Abstract 【Objective】 Under a weather of plentiful rainfall, Chongqing is one of the most seriously eroded areas in China. The aggravating soil erosion causes depletion of soil particles of various sizes from the soil, weakening soil resistance to erosion, thus eventually leading to natural disasters, such as landslide and debris flow. So this paper aims mainly at exploring impacts of depletion of a certain fraction of soil particles on erosion resistance of the purple soil in Chongqing. 【Method】 For this study, an indoor experiment was carried out on purple soil of loamy sands of which soil samples, after being fully dispersed, passed through a standard soil sieve to remove a certain fraction of soil particles and then got blended uniformly again to simulate the soil that had lost a certain fraction of soil particle as a result of soil erosion. In this way, soil samples different in absence of a fraction of soil particles were prepared, and then made the same in water content and density. and reshaped for triaxial consolidation shear tests through controlling suction of the matrix and changing confining pressure. Based on the parameters of cohesion c and internal friction angle φ obtained from the test, analysis of soil erosion mechanism was performed. 【Result】 Results show: (1) Compared with the sample of original soil, the samples with the fraction (0.25 mm or more) of soil particles removed were higher in surface friction and snap-in force between soil particles, while the samples with the fraction (below 0.25 mm) of soil particles removed were lower; (2) With rising confining pressure, soil erosion resistance of the sample significantly improved. The soil samples with the fraction (0.25 mm or more) of soil particles removed were good in gradation and in compactibility, as well, and hence were enhanced in erosion resistance by a larger margin, while the soil samples with the fraction (less than 0.25 mm) of soil particles removed were poor in gradation and in compactibility and enhanced in erosion resistance by a relatively limited margin; (3) In the consolidation shearing test, soil samples different in gradation formed a suspension-compaction structure, a skeleton-compaction structure, and a skeleton-pore structure, separately, with erosion resistance following an order of skeleton-compaction structure > suspension-compaction structure > skeleton-pore structure. In soil samples with cohesive force

being higher than 10 kPa, the main factor affecting soil erosion resistance was internal friction angle of the soil; and (4) Grey correlation analysis shows that soil particles of median size, d_{30} , was quite closely correlated with cohesion c and internal friction angle φ is large, while soil particles of effective size, d_{10} , were not so. Besides, nonuniformity coefficient C_u , curvature coefficient C_c , limited particle size d_{60} , d_{30} , and d_{10} of a soil sample all had significant impacts on its erosion resistance. 【 Conclusion 】 All the findings in the study are expected to be able to serve as experimental data and scientific basis for future studies on mechanisms of shallow landslide and soil erosion in the purple soil area of Chongqing.

Key words Purple soil; Missing of a certain fraction of soil particles; Confining pressure; Shear strength; Grey correlation analysis

(责任编辑：檀满枝)