

紫色页岩发育土壤的颗粒特性及其对抗剪强度的作用机制^①

冉卓灵^{1,2}, 钟守琴^{1,2}, 刘波³, 魏朝富^{1,2*}

(1 西南大学资源环境学院, 重庆 400715; 2 农业部西南耕地保育重点实验室, 重庆 400715;

3 重庆市国土资源和房屋勘测规划院, 重庆 400715)

摘要: 土体发生破坏最开始往往是从内部的土壤颗粒破坏开始, 而抗剪强度是反映土体抵抗剪切破坏能力的重要指标。本文以紫色页岩发育的坡耕地土壤为研究对象, 通过测定土样颗粒组成以及不同含水率和垂向压力下的抗剪强度, 研究页岩发育的土壤颗粒特性及其对抗剪强度的作用机制。结果表明从坡顶至坡脚, 土壤颗粒组成与其母岩颗粒组成具有显著相关性; 土壤中 <0.25 mm 颗粒累计含量在 995.65 ~ 998.62 g/kg 之间, 其中以 0.25 ~ 2 mm 岩石碎屑存在的土壤颗粒含量为 439.80 ~ 510.40 g/kg, 以 0.25 ~ 2 mm 团聚体存在的土壤颗粒含量为 6.01 ~ 80.50 g/kg, 随着位置高程的降低, 土壤中岩石碎屑和团聚体的含量并没有显著变化。在含水率从 7% 增加到 25% 的过程中, 土壤水分与内摩擦角呈负相关关系且对内摩擦角的影响随着高程的降低缓慢减小, 而对黏聚力的影响是随着含水率的增加单一坡位黏聚力呈现先增加后减少的趋势, 但是随高程降低变化并不明显。因此, 在紫色页岩发育的土壤颗粒组成中存在大量 <2 mm 的岩石碎屑, 这些大量致密坚硬的岩石碎屑提高土壤抗剪强度同时减弱了抗剪强度的水敏性。

关键词: 页岩; 抗剪强度; 颗粒组成; <2 mm 岩石碎屑

中图分类号: S152 **文献标识码:** A

对于某一土体而言, 其土体发生破坏往往是从内部土壤颗粒及团聚体的破坏开始^[1]。土壤抗剪强度是土体抵抗剪切破坏的极限能力, 同时也是重要的土力学指标^[2]。目前已有大量学者对土壤颗粒组成和团聚体对于抗剪强度作用机制进行了研究。钟守琴等人^[3]通过分析紫色泥岩土壤颗粒组成及团聚体状态发现土壤中大量存在的岩石碎屑能显著影响土壤抗剪强度特性, 同时提出了先天性团聚体和后天性团聚体的概念; 蔡奕等人^[4]通过团聚体大小对填筑土强度影响的试验研究发现团聚体平均粒径大小对素土、纤维土和石灰土抗剪强度变化趋势具有显著影响; 张爱国等人^[5]在水蚀区范围内的土壤试验发现土壤有机质含量、土壤质地均对抗剪强度有显著影响并且抗剪强度随着土壤类型的改变发生有规律的变化; 余宏明等^[6]以红色泥岩风化的含砾黏土为研究对象发现抗剪强度与含水量、密度和黏粒含量具有单一的相关性。因此, 研究土壤颗粒组成及特性对土壤抗剪强度的影响具有重要现实的意义。

紫色土作为重庆分布面积最广泛的土壤。紫色黏土岩发育的紫色土具有化学风化微弱、物理风化强

烈、土壤中岩石碎屑含量高^[7], 同时基本保持了母质的理化性质等特征^[8]。紫色页岩作为黏土岩的一种, 因其形成环境为干燥炎热高压下的陆缘浅海, 属于浅海相沉积岩^[9], 其碳酸盐物质含量超过 300 g/kg, 石质坚硬, 很难形成深厚风化壳。由其发育而来的紫色土成土方式以机械破碎为主, 很好地继承了母岩的特性; 由于农业工程的大力发展, 大量的工程被修建在坡耕地上, 因此研究页岩发育的紫色土区域坡耕地抗剪强度的变化具有很重要的价值, 同时也对该地区工程建设具有指导意义。

因此, 本研究在前人对土壤抗剪强度影响因素的研究下, 以紫色页岩发育的坡耕地土壤为研究对象, 分析土壤中颗粒组成及其团聚特性, 探讨其对抗剪强度的作用机制, 为重庆山地丘陵地区紫色坡耕地农业工程建设可持续发展提供一定的理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

重庆市位于四川盆地东部, 地处我国西南部, 平

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2012BAD05B00)资助。

* 通讯作者(weicf@swu.edu.cn)

作者简介: 冉卓灵(1993—), 女, 重庆云阳人, 硕士研究生, 主要研究方向为土壤物理。E-mail: xrsse@163.com

均海拔为 400 m, 北碚区处于重庆市西北部, 气候属于亚热带季风性湿润气候, 降雨量充沛, 具有春早、夏热、秋短、冬迟特征, 地形以丘陵为主, 紫色土分布广泛。紫色土是我国的一种特殊土壤, 也是南方重要的土壤类型之一, 根据土壤 pH、CaCO₃ 含量和硅铝率等特性, 进一步划分为酸性紫色土、中性紫色土、石灰性紫色土。本研究选取三迭系飞仙观组页岩及其发育的暗紫泥为试验对象, 飞仙观组岩层分布较广, 集中见于盆地四周和川东平行岭谷各背斜轴部, 多构成与岩层走向一致的陡坡垄岗状地形, 石质坚硬, 因其形成环境为干燥炎热高压下的陆缘浅海, 属于浅海相沉积岩^[9], 含碳酸盐物质在 300 g/kg 以上, 易沿构造裂隙和成岩裂隙风化崩解成碎屑, 很难形成深厚风化壳; 由其发育而成的土壤为暗紫泥, 颜色与母岩颜色一致, 质地砂壤至轻黏, 耕层疏松, 呈粒状或团块状结构^[10], 成土方式以机械破碎为主, 物理风化强烈, 风化度浅^[11]。

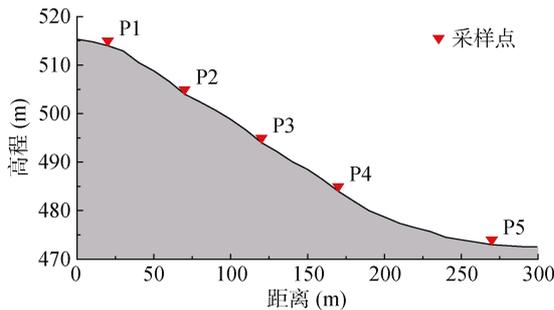


图 1 采样点位置示意图
Fig. 1 Sketch map of sampling sites

1.2 土样采集与测定

供试样采自北碚鸡公山一处坡耕地, 从坡顶至坡脚共计 5 个采样点(图 1), 坡顶至坡脚分别是 P1(29°45'32" N, 106°26'7" E, 514 m)、P2(29°45'50" N, 106°25'38" E, 504 m)、P3(29°45'45" N, 106°25'41" E, 494 m)、P4(29°45'47" N, 106°25'40" E, 484 m)、

P5(29°45'50" N, 106°25'40" E, 473 m), 土地利用类型均为旱地。每样点采集深度 5~20 cm 的土样 10 kg, 除去较大岩石碎屑、动植物残体及其他杂质。同时在采样时用大环刀采集土样测定容重。采集回的土样在通风环境下自然风干, 研磨, 筛掉 >2 mm 的岩石碎屑, 制备成粒径 <2 mm 的土样以备用。并取风干后的土样用人工配置的方法配置 10 种不同含水率(7%、9%、11%、13%、15%、17%、19%、21%、23%、25%) 的土样, 采用 ZJ 型应变控制式直剪仪(四联剪)测定其抗剪强度参数。

测定的基本物理性质见表 1, 其中土壤容重采用烘干法测定, >2 mm 的岩石碎屑采用水洗法测定, 液限和塑限采用液塑限联合测定仪测定。本研究主要探讨紫色土中颗粒组成及其特性, 除了传统意义上的颗粒组成和团聚体, 还需要测定岩石碎屑的含量, 由于现有的研究主要集中在 >2 mm 的岩石碎屑或者砾石上, 本研究探讨的岩石碎屑是粒径 <2 mm 的部分; 由于团聚体和岩石碎屑抵抗分散作用的程度不一, 所以需要采用不同的分散处理^[12-13], 具体操作方法参考钟守琴等人^[3]的处理方法。同时对于土壤中小于某一粒径土壤颗粒中以 3 种不同状态(单粒、岩石碎屑及团聚体)存在的颗粒含量的计算方法如下(以 <0.25 mm 的土壤颗粒为例):

$$N_1 = R_{>0.25} - I_{>0.25} \quad (1)$$

$$N_2 = A_{>0.25} - R_{>0.25} \quad (2)$$

$$N_3 = I_{<0.25} - N_1 - N_2 \quad (3)$$

式中: N_1 表示 >0.25 mm 岩石碎屑含量; N_2 表示 >0.25 mm 水稳性团聚体含量; N_3 表示其他 <0.25 mm 土粒含量(包含 <0.25 mm 的单粒、岩石碎屑及团聚体)^[3]; $R_{>0.25}$ 表示采用测定岩石碎屑方法测定的 >0.25 mm 粒径含量; $I_{>0.25}$ 表示采用测定土壤颗粒组成方法测定的 >0.25 mm 的粒径含量; $A_{>0.25}$ 表示采用测定团聚体方法测定的 >0.25 mm 的粒径含量; $I_{<0.25}$ 表示采用测定土壤颗粒组成方法测定的 <0.25 mm 的粒径含量。

表 1 土壤基本物理特性
Table 1 Basic physical properties of tested soils

土样编号	坡位	土地利用类型	容重(g/cm ³)	>2mm 岩石碎屑(g/kg)	液限(%)	塑限(%)	塑性指数
P1	坡顶	旱地	1.32	475.12	44.44	29.98	0.144 6
P2	坡肩	旱地	1.32	527.04	43.13	31.50	0.116 3
P3	坡腰	旱地	1.20	122.66	44.18	28.80	0.153 8
P4	坡腰	旱地	1.12	188.71	41.60	29.67	0.119 2
P5	坡脚	旱地	1.14	81.79	43.96	28.69	0.152 7

1.3 数据采集与处理

为了研究重庆坡耕地土壤抗剪强度作用机制, 本

试验采用应变直减仪测定土样在不同含水率及垂直压力下的指标, 以及同一含水率下不同坡位土壤的抗

剪强度指标。人为配置的含水率为 10 种(7%、9%、11%、13%、15%、17%、19%、21%、23%、25%)，施加的垂向压力分别是 100、200、300、400 kPa，剪切量设置为 6 mm，试验方法选择快速剪切，试验数据通过应变控制式直剪仪自带的智龙土工试验微机控制数据处理系统采集。试验数据利用 Matlab 2016 和 Excel 2016 进行处理。

2 结果与分析

2.1 土壤颗粒组成

颗粒组成作为评价土壤质地的基础，是一个十分重要的物理指标。由图 2 可知，暗紫泥发育母岩(PR)的颗粒组成中，黏粒、粉粒及砂粒含量依次为 182.26、543.53、274.20 g/kg；坡顶(P1)土壤黏粒、粉粒及砂粒含量依次为 216.28、437.85、345.85 g/kg；坡肩(P2)土壤黏粒、粉粒及砂粒含量依次为 253.54、462.44、284.01 g/kg；坡腰(P3)土壤黏粒、粉粒及砂粒含量依次为 296.21、504.40、199.38 g/kg；坡腰(P4)土壤黏粒、粉粒及砂粒含量依次为 327.24、470.78、201.97 g/kg；坡脚(P5)土壤黏粒、粉粒及砂粒含量依次为 293.83、502.80、203.36 g/kg。从图中可以看出，母岩颗粒组成中黏粒含量小于各坡位土壤的黏粒含量，且从坡顶(P1)到坡脚(P5)黏粒缓慢增大；粉粒含量各坡位土壤与母岩均相差不大，且均以细砂粒(0.02~0.25 mm)为主，粗砂粒(0.25~2 mm)含量很少，且母岩(PR)的颗粒组成中不存在 >0.25 mm 的颗粒；砂粒含量存在坡顶(P1)>坡肩(P2)>母岩(PR)>坡腰(P3)、坡脚(P5)的关系。

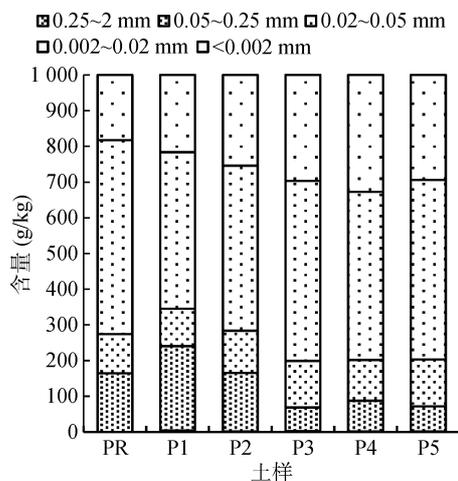


图 2 土壤和母岩颗粒组成

Fig. 2 Particle size distribution of soils and parent rocks

2.2 土壤颗粒聚合状况

土壤中很少有单独存在的颗粒，均是以各种聚合

的形式存在。含岩石碎屑土壤中，除了传统意义上的团聚体还存在大量的岩石碎屑。土壤团聚体是良好的土壤结构体，并且作为评价土壤肥沃的标志之一。按照团聚体测定方法得出图 3 中团聚体的组成图。由图可知，土壤团聚体组成中，P1~P5 土壤中 0.25~2 mm 颗粒含量分别为 518.63、487.86、593.35、514.67、467.62 g/kg；0.05~0.25 mm 颗粒含量分别为 274.51、312.30、235.03、268.42、299.05 g/kg；0.02~0.05 mm 颗粒含量分别为 108.34、117.94、87.03、111.88、121.81 g/kg；0.002~0.02 mm 颗粒含量分别为 83.87、65.82、69.05、80.18、87.80 g/kg；<0.002 mm 颗粒含量分别为 14.64、16.10、15.53、25.85、23.72 g/kg；可以看出各坡位团聚体中 5 种粒径颗粒含量均相差不大，即坡顶到坡脚没有明显规律变化。

试验土壤由紫色页岩的坡残积母质发育而成，成土方式以机械破碎为主，因此土壤中岩石碎屑含量很高，按照岩石碎屑测定方法得出图 3 中岩石碎屑的组成图，从图中可以看出岩石碎屑在 0.05~0.25 mm、0.02~0.05 mm、0.002~0.02 mm 粒径含量与土壤团聚体相差较大，P1~P5 坡位土壤中 0.05~0.25 mm 岩石碎屑颗粒含量分别为 91.48、84.42、69.35、77.85、79.99 g/kg，明显小于团聚体中同粒径颗粒含量；0.02~0.05 mm 岩石碎屑颗粒含量分别为 162.38、170.87、148.94、172.82、198.91 g/kg，0.002~0.02 mm 岩石碎屑颗粒含量分别为 207.26、236.54、220.45、222.12、237.57 g/kg，均明显大于团聚体中同粒径颗粒含量；而对于 0.25~2 mm 和 <0.002 mm 颗粒含量与团聚体中相差不大，虽然单个粒径含量与团聚体中有所差别，但坡顶到坡脚依然没有明显规律变化。

结合图 2、图 3 及公式(1)~公式(3)可以得到图 4 小于某粒径的土壤颗粒结构图。通过前文分析可知，土壤中 <R 粒径含量主要以 3 类形式存在：>R 岩石碎屑、>R 团聚体及其他 <R 土粒。从图 2 可知，坡顶(P1)到坡脚(P5)土壤颗粒组成中 <0.25 mm 土壤颗粒含量相差不大，依次为 995.65、998.10、997.54、998.63、998.12 g/kg，结合图 4A 可以得出其中 >0.25 mm 岩石碎屑分别为 508.27、461.23、510.40、483.27、439.80 g/kg，而 >0.25 mm 团聚体分别为 6.01、24.73、80.50、30.02、25.94 g/kg。继续对土壤中 <0.05 mm、<0.02 mm、<0.002 mm 土壤团聚体颗粒组成结构分析发现：<2 mm 岩石碎屑大量存在于紫色页岩发育的紫色土中，且随着粒径的减小，其中以大于此粒径存在的岩石碎屑的含量占有比例逐渐增加。因此可以得出在紫色页岩发育的土壤中除了水稳性团聚体，还大量存

在 <2 mm 的岩石碎屑, 这些岩石碎屑主要是由母岩机械破碎形成, 继承了母岩的特性, 而传统意义上的团聚体是在有机质参与下形成的, 参考钟守琴等人^[3]

的研究结果可以将其延伸为先天性团聚体和后天性团聚体, 其中 <2 mm 的岩石碎屑属于先天性团聚体, 而水稳性团聚体属于后天性团聚体。

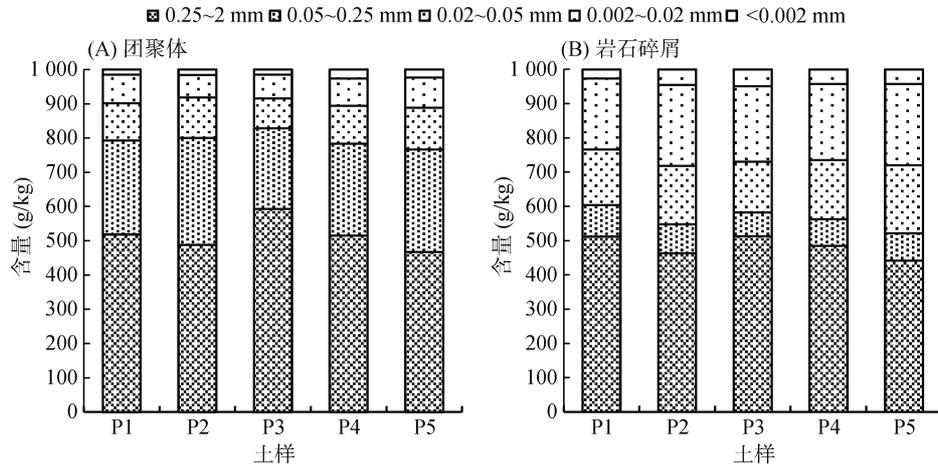
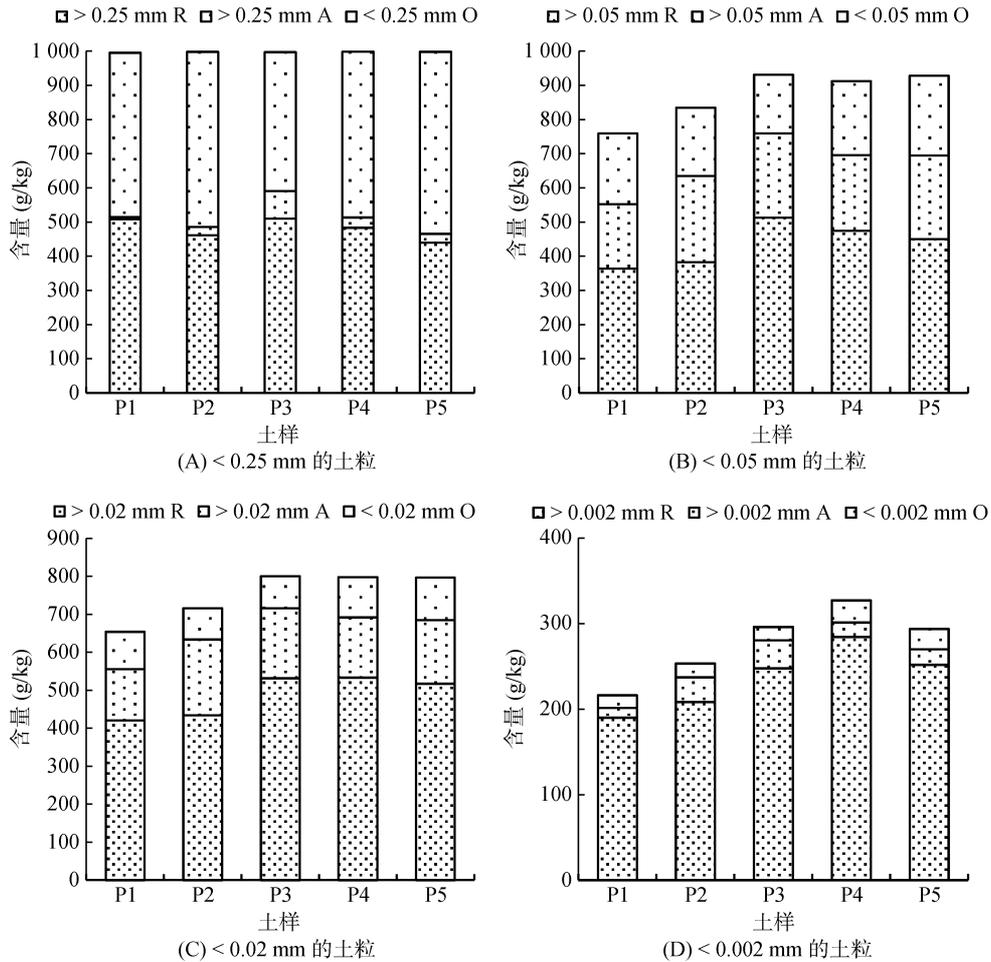


图 3 土壤团聚体和岩石碎屑组成

Fig. 3 Distribution of soil aggregates and rock fragments



(R、A、O 分别表示岩石碎屑、团聚体、其他土粒)

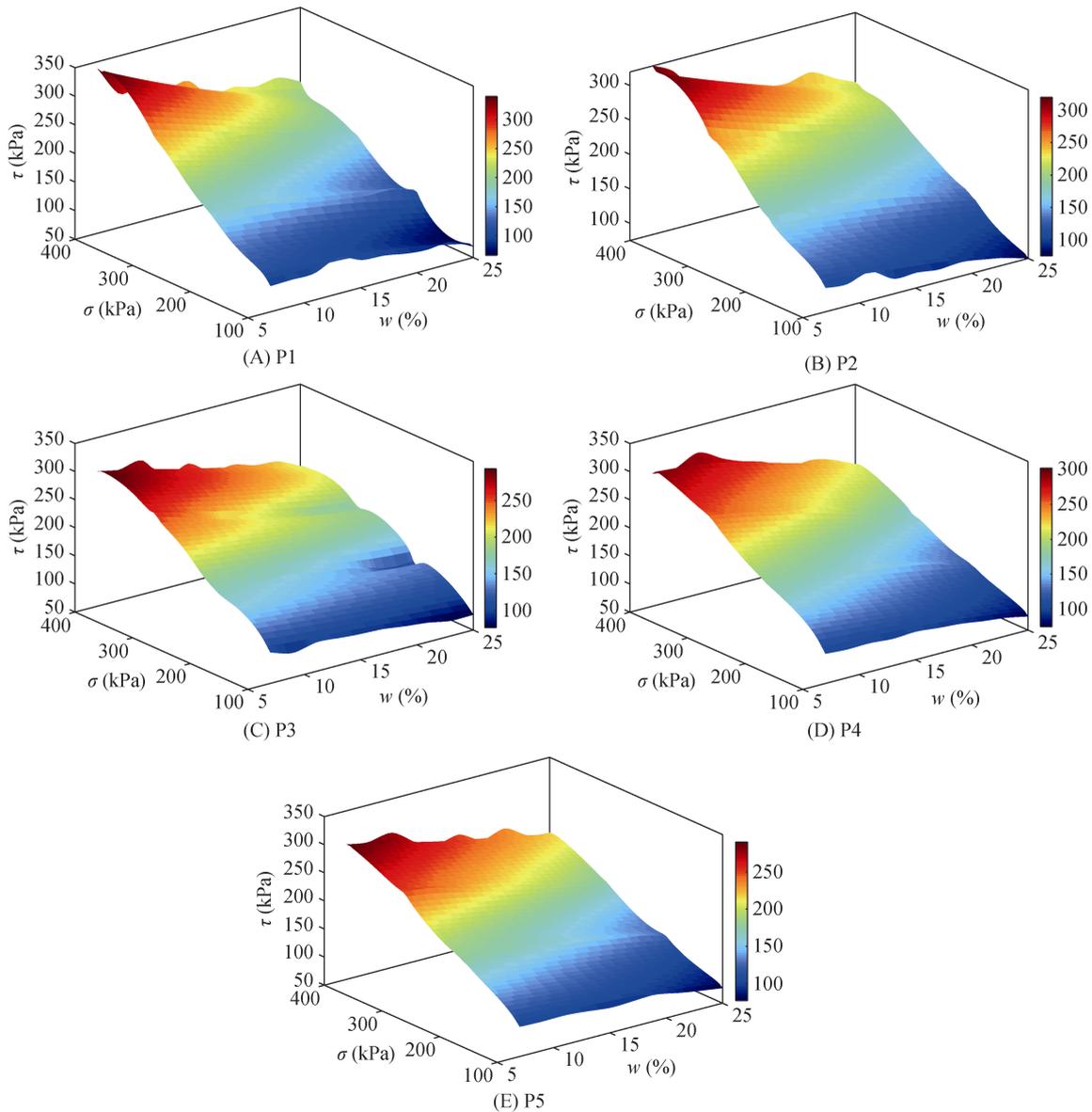
图 4 土壤颗粒组成及团聚状态

Fig. 4 Soil particle compositions and aggregate states

2.3 抗剪强度特征

2.3.1 垂直压力对抗剪强度的影响 通过直剪试验绘制了图 5 所示的 5 个坡面抗剪强度在不同含水率下随着垂直压力的变化图。从图中可以看出，整体而言，土壤抗剪强度在垂直压力 100 ~ 400 kPa 之间，随着垂直压力的增大，抗剪强度也逐渐增大；当含水率从 7% 增加到 25% 时，抗剪强度均是在垂直压力为 100 kPa 的时候出现最小值，且存在 P1(69.39 kPa)<P4(74.58 kPa)<P2(75.2 kPa)<P3(77.055 kPa)<P5(77.135 kPa)的关系；同时随着垂直压力的增大，抗

剪强度显著增加，最大值均出现在垂直压力为 400 kPa 的时候，且存在 P1(337.79 kPa)>P2(320 kPa)>P4(301.825 kPa)>P3(290 kPa)>P5(285.88 kPa)；另外，当垂直压力从 100 kPa 增加到 400 kPa 的过程中，各坡位土壤抗剪强度变化范围存在：P1(268.4 kPa)>P2(244.8 kPa)>P4(227.245 kPa)>P3(212.945 kPa)>P5(208.745 kPa)。即当垂直压力增加时，抗剪强度也会随之增大，且供试坡位的土壤最大值和垂直压力对抗剪强度的影响大小均存在坡顶(P1)>坡肩(P2)>坡腰(P3、P4)>坡脚(P5)的关系。



(τ, σ, w 分别表示土壤抗剪强度、垂直压力及土壤含水率)

图 5 土壤抗剪强度随含水率与轴向压力的变化

Fig. 5 Changes of soil shear strength with soil water content and vertical pressure

2.3.2 含水率对抗剪强度的影响 黏聚力和内摩擦角作为两个常用来表示抗剪强度的参数，图 6 表示

不同坡位土壤黏聚力随着含水率的变化曲线，从整体上看黏聚力随着含水率的增加呈现先增加后降低的

趋势。当含水率为 7% 的条件下, P1 ~ P5 的黏聚力依次是 10.95、38.08、18.48、22.79、30.71 kPa, 随着含水率的增加, P1、P2、P3、P5 均出现了 2 个峰值, 而 P4 只出现了一个峰值。从坡顶到坡脚(P1 ~ P5), 黏聚力出现的最大值依次是 62.30、57.49、54.73、52.93、49.94 kPa, 且对应的含水率依次是 13%、15%、13%、17%、15%; 而最小值依次是 10.95、30.12、18.48、22.79、30.71 kPa, 对应的含水率依次是 7%、25%、7%、7%、7%。可以看出对于同一坡位土壤, 其黏聚力随着含水率(7% ~ 25%)的增大出现先增加后减少的趋势。对于不同坡位土壤, 最大值均出现在 13% ~ 17% 之间且呈现 P1>P2>P3>P4>P5, 即从坡顶到坡脚黏聚力最大值逐渐降低; 而黏聚力的最小值却出现在含水率的两端且呈现 P1<P3<P4<P2<P5, 即从坡顶到坡脚黏聚力最小值反而升高。

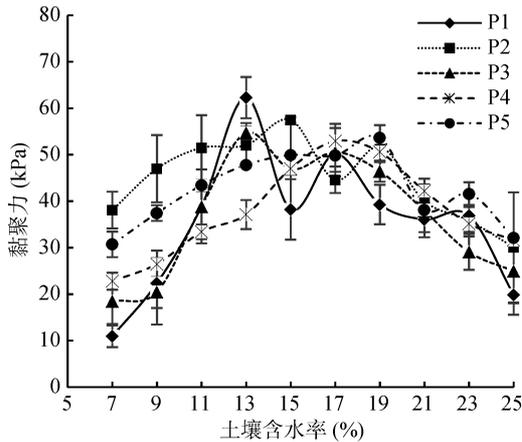


图 6 土壤黏聚力随含水率变化曲线

Fig. 6 Changes of cohesion with increasing soil water content

图 7 表示不同坡位的土壤含水率与内摩擦角之间的变化曲线, 整体上各个坡位土壤内摩擦角均随着土壤含水率的增加而减少, 当含水率从 7% 增加到 25% 时, P1 ~ P5 的内摩擦角分别从 39.44°、36.48°、37.11°、35.80°、33.92° 降低到 25.20°、25.91°、24.53°、23.89°、22.35°。对图 7 进行拟合, 拟合结果见表 2, 从 P1 到 P5 土壤含水率与内摩擦角呈现负相关趋势, 拟合曲线的斜率依次是 -0.765 9、-0.614 1、-0.623、-0.649 4、-0.579, 相关系数为 0.980 6、0.946 9、0.928 2、0.918 8、0.936 1。由此可以看出, 对于同一位置的土壤, 当含水率从 7% 增加到 25% 时, 内摩擦角反而降低; 对于不同位置的土壤在同一含水率下, 内摩擦角存在坡顶(P1)>坡肩(P2)/坡腰(P3、P4)>坡脚(P5)的关系, 且拟合曲线斜率的绝对值也存在坡顶(P1)>坡肩(P2)/坡腰(P3、P4)>坡脚(P5)的关系, 即含水率对不同坡位土壤影响的大小也存在坡顶(P1)>坡肩(P2)/坡腰(P3、

P4)>坡脚(P5)的关系。

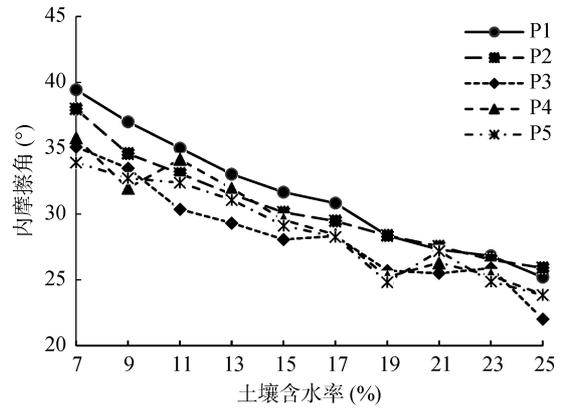


图 7 土壤内摩擦角随含水率变化

Fig. 7 Changes of internal friction angle with increasing soil water content

表 2 不同坡位土壤内摩擦角与含水率变化关系拟合公式
Table 2 Fitting formula between friction angles and water contents in different slope locations

土样编号	拟合方程	R ²
P1	$y = -0.765 9x + 43.723$	0.980 6
P2	$y = -0.614 1x + 40.339$	0.946 9
P3	$y = -0.623x + 38.348$	0.928 2
P4	$y = -0.649 4x + 39.652$	0.918 8
P5	$y = -0.579x + 38.088$	0.936 1

3 讨论

3.1 <2 mm 岩石碎屑是紫色页岩发育的土壤颗粒聚合体之一

紫色土是一种幼年土, 风化度不深, 母质特性明显^[10]。由于其风化程度不高, 土壤中常含有砾石或岩石碎屑, 过去的研究主要集中在土壤中 > 2 mm 的砾石或岩石碎屑^[14-16], 而对土壤中 < 2 mm 的岩石碎屑研究较少。钟守琴等人^[3]对泥岩发育的紫色土中 < 2 mm 的岩石碎屑进行了研究, 发现其大量存在并提出了先天性团聚体和后天性团聚体的概念。本研究结果表明, 坡顶(P1)到坡脚(P5)土壤颗粒组成中, < 0.25 mm 单粒累积含量在 995.65 ~ 98.63 g/kg 之间; 其中, 以 0.25 ~ 2 mm 岩石碎屑存在的颗粒含量分别为 508.27、461.23、510.40、483.27、439.80 g/kg; 以 0.25 ~ 2 mm 团聚体存在的颗粒含量分别为 6.01、24.73、80.50、30.02、25.94 g/kg; 以 < 0.25 mm 单粒态存在的颗粒含量分别为 481.36、512.14、406.64、485.33、532.98 g/kg。且随着粒径的减小, 其中以大于此粒径存在的岩石

碎屑含量占有比例就越大。因此， <2 mm 的岩石碎屑是紫色页岩发育的土壤颗粒聚集体之一，与钟守琴等人^[3]研究结果一致。

因此，在页岩发育的紫色土中，除了单粒与团聚体外，还存在大量 <2 mm 的岩石碎屑，即 <2 mm 岩石碎屑是紫色页岩发育的土壤颗粒聚集体之一。这些岩石碎屑继承了母岩的理化性质，属于先天性团聚体^[3]。

3.2 大量致密坚硬的岩石碎屑提高了页岩发育土壤的抗剪强度

现有的研究表明，紫色土抗剪强度具有水敏性^[17]，对于非饱和土，黏聚力和内摩擦角受含水状态变化的影响很大^[18-19]，土壤中水分含量的增加，会在土体表面形成一层润滑剂，从而导致土体间的内摩擦角减小^[20]。从研究结果可以看出供试点页岩发育的土壤含水率与内摩擦角呈负相关关系且从坡顶到坡脚拟合曲线的斜率的绝对值缓慢减小，即说明含水率对供试坡地土壤内摩擦角的影响随着高程的降低缓慢减小，其中内摩擦角与含水率呈负相关关系，与林鸿州等^[21]、倪九派等^[22]、钟茫^[23]的研究结果一致；当含水率较低时，吸力较小，随着水分的增加，水膜的黏聚力逐渐增强，当含水率增加到一定程度时，水膜逐渐增厚，对土壤颗粒的吸力也逐渐减少，从而造成随着含水率增加，黏聚力出现先增大后减小的现象，这与钟茫^[23]、江浩浩等^[24]的研究结果一致。可以得出页岩发育的紫色土水敏性与前人研究结果一致，但本研究主要想探讨页岩发育的紫色土中 <2 mm 岩石碎屑对其抗剪强度的作用机制，通过对 5 个坡位土壤岩石碎屑组成的分析发现，P1 ~ P5 岩石碎屑含量相差不大，即随着位置高程的降低，土壤中 <2 mm 的岩石碎屑含量并没有出现规律性的升高或降低，同时对钟守琴等^[3]对紫色泥岩发育土壤的研究结果可以发现：在同一含水率下，对紫色泥岩和紫色页岩发育的土壤施加相同的垂向压力，紫色页岩发育土壤的抗剪强度高于紫色泥岩发育的抗剪强度；同时对比两种土壤的内摩擦角和黏聚力的水敏性变化可以发现紫色页岩发育土壤的抗剪强度水敏性低于紫色泥岩发育土壤的抗剪强度水敏性。造成这种差异的原因是：本研究采用的试验土样为页岩发育的紫色土，与钟守琴等^[3]采用的泥岩发育的紫色土有所差别，本研究采用的三迭系飞仙观页岩属于浅海相沉积岩，其形成环境为干燥炎热高压下的陆缘浅海，高压的成土环境导致其石质坚硬，以成土率略高于化泥的速度进行风化^[8]，土壤由页岩的坡残积母质发育而成，成土方式以机械破碎为

主，物理风化强烈，化学风化度浅，水土流失严重，土层浅薄，坡面土壤中碎屑含量很高，而其岩石碎屑很好地继承了母岩的物化性质，具有致密坚硬的特点。而钟守琴等^[3]研究采用的是紫色泥岩及其发育的土壤，泥岩属于湖泊相沉积岩，岩石厚度比较稳定，形成环境为较干旱条件和河漫湖泊的洪水泛滥至正常河流，且其土壤具有最高的成土率与化泥率比值，成土过程主要为剥蚀风化，物理风化程度快，严重的水土流失导致坡的上部主要是薄层石骨子土，随着高程的降低，土层也逐渐加深，坡腰进入黏化初级阶段，而坡脚则以质地偏黏的紫泥土为主^[9,11]。

综上所述，页岩属于浅海相沉积岩，形成环境为干燥炎热高压下的陆缘浅海，高压的成岩环境导致其岩石碎屑具有致密坚硬的特点，同时其特殊的成土过程使坡顶到坡脚的土体中碎屑含量很高，大量致密坚硬的岩石碎屑增强了页岩发育土壤的抗剪强度同时减弱了其抗剪强度的水敏性。

4 结论

1) 页岩发育的紫色土中存在大量 <2 mm 的岩石碎屑，是紫色页岩发育的土壤颗粒聚集体之一，其主要继承了母岩的理化性质，属于先天性团聚体。

2) 页岩发育的紫色土中大量致密坚硬的岩石碎屑提高土壤抗剪强度，同时减弱了抗剪强度的水敏性。

参考文献：

- [1] 郭利娜. 基于 GDS 的非饱和粉质粘土抗剪强度试验研究[D]. 武汉: 中国地质大学(武汉), 2013
- [2] Cruse R M, Larson W E. Effect of soil shear-strength on soil detachment due to raindrop impact[J]. J. Soil Sci. Soc. Am., 1977, 41(4): 777-781
- [3] 钟守琴, 刘波, 魏朝富, 等. 紫色泥岩土壤 <2 mm 岩屑及其对抗剪强度的作用机制[J]. 中国农业科学, 2015, 48(23): 4846-4858
- [4] 蔡奕, 施斌, 刘志彬, 等. 团聚体大小对填筑土强度影响的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(12): 1482-1486
- [5] 张爱国, 李锐, 杨勤科. 中国水蚀土壤抗剪强度研究[J]. 水土保持通报, 2001, 21(3): 5-9
- [6] 余宏明, 胡艳欣, 唐辉明. 红色泥岩风化含砾粘土的抗剪强度参数与物理性质相关性研究[J]. 地质科技情报, 2002, 21(4): 93-95
- [7] Zhang W, Wei C, Li Y, et al. Effects of rock fragments on infiltration and evaporation in hilly purple soils of Sichuan Basin, China[J]. Environmental Earth Sciences, 2011, 62(8): 1655-1665
- [8] 刘波. 重庆紫色土区坡耕地土壤抗剪强度特征[D]. 重庆: 西南大学, 2015

- [9] 中国科学院成都分院土壤研究室. 中国紫色土 上篇[M]. 北京: 科学出版社, 1991
- [10] 谢德体. 土壤地理学[M]. 成都: 成都科技大学出版社, 1995
- [11] 李燕. 紫色土砾石的分布及其对土壤水分性质的影响[D]. 重庆: 西南大学, 2006
- [12] Amezketa E. Soil aggregate stability: A review[J]. *Journal of Sustainable Agriculture*, 1999, 14(2): 83–151
- [13] 赵澄林. 沉积岩石学[M]. 北京: 石油工业出版社, 2001
- [14] Rooij G H D. Methods of soil analysis: Part 4. physical methods[J]. *Vadose Zone Journal*, 2004, 3(2): 722–723
- [15] 洪波, 吕艳兵. 含砾石粘土抗剪强度分析[C]. 中国水利学会勘测专业委员会年会暨学术交流会, 2011
- [16] Kokusho T, Hara T, Hiraoka R. Undrained shear strength of granular soils with different particle gradations[J]. *Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering*, 2004, 130(6): 621–629
- [17] 王中文, 洪宝宁, 刘鑫, 等. 红粘土抗剪强度的水敏性研究[J]. *四川大学学报(工程科学版)*, 2011, 43(1): 17–22
- [18] 张茂花, 谢永利, 刘保健. 增湿时黄土的抗剪强度特性分析[J]. *岩土力学*, 2006, 27(7): 1195–1200
- [19] 王军光, 李朝霞, 蔡崇法, 等. 集中水流内红壤分离速率与团聚体特征及剪强度定量[J]. *土壤学报*, 2011, 48(6): 1133–1140
- [20] 周红艺, 李辉霞. 华南地区崩岗侵蚀区土壤水分含量对土体抗剪强度的影响[J]. *江苏农业科学*, 2014, 42(12): 347–350
- [21] 林鸿州, 于玉贞, 李广信, 等. 降雨特性对土质边坡失稳的影响[J]. *岩石力学与工程学报*, 2009, 28(1): 198–204
- [22] 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[J]. *土壤学报*, 2013, 50(6): 1090–1101
- [23] 钟茫. 非饱和紫色土抗剪强度影响因素研究[D]. 重庆: 西南大学, 2014
- [24] 江浩浩, 董希斌, 王海飙. 边坡土壤含水率对不同植被土壤抗剪强度的影响[J]. *森林工程*, 2009, 25(3): 77–80

Particle Characteristics of Purple Shale Soil and Their Mechanism of Shear Strength

RAN Zhuoling^{1,2}, ZHONG Shouqin^{1,2}, LIU Bo³, WEI Chaofu^{1,2*}

(1 *College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400715, China*; 2 *Key Laboratory of Arable Land Conservation (Southwest China), Ministry of Agriculture, Chongqing 400715, China*; 3 *Land Resources and Housing Survey Planning Institute, Chongqing 400715, China*)

Abstract: The beginning of soil destruction is often from the internal destruction of soil particles, and shear strength is an important indicator to reflect soil's resistance to shear failure. The paper takes shale-derived purple soils in sloping land as the research object and study particle characteristics of purple soil and their mechanism of shear strength by measuring soil particle compositions and shear strengths under different moisture contents and vertical pressures. The result showed that soil particle compositions from summit to footslope were significantly correlated with those of parent rocks. Soil particles <0.25 mm were about 995.65 – 998.62 g/kg, in which particles presented as 0.25 – 2 mm rock fragments were about 439.80 – 510.40 g/kg, however particles presented as 0.25 – 2 mm aggregates were about 6.01 – 80.50 g/kg. With the decrease of elevation, the contents of rock fragments and aggregates in soils did not change obviously. Within soil water content from 7% to 25%, soil water content was negatively correlated with internal friction angle and the influence of soil water content on internal friction angle decreased slowly with the decreased elevation, however cohesion was increased first and then decreased with soil water content increased on single slope, but cohesion did not change obviously with the decreased elevation. Therefore, there are a large amount of <2 mm rock fragments in soil particles in purple soil, and these rock fragments improve soil shear strength while weaken its water sensitivity.

Key words: Shale; Shear strength; Soil particle composition; <2 mm rock fragment