

土壤容重和含水率对紫色土坡耕地耕层抗剪强度的影响

张健乐, 史东梅, 刘义, 任予恒, 蒲超江

(西南大学资源环境学院, 重庆 400715)

摘要: 土壤抗剪强度既可评价土壤侵蚀敏感性, 也是反映耕层土壤耕作性能的重要参数。不同剪切方式下土壤抗剪强度指标存在一定差异, 以紫色土坡耕地耕层土壤为研究对象, 采用室内重塑土三轴及直剪试验方法, 研究容重和含水率对紫色土坡耕地耕层土壤抗剪强度的影响, 并分析了2种试验方法的差异性。结果表明: (1) 紫色土坡耕地耕层土壤黏聚力(c)总体随容重(ρ_d)增大而增加, 随含水率(w)增加而减小, 三轴及直剪试验条件下黏聚力最大值均出现在容重 1.4 g/cm^3 、含水率 10% 水平下, 分别为 $32.33, 21.78 \text{ kPa}$ 。耕层土壤内摩擦角(φ)随容重增加而增大, 随含水率增大而减小, 三轴及直剪试验条件下内摩擦角最大值均出现在容重 1.4 g/cm^3 、含水率 10% 水平下, 分别为 $22.67^\circ, 29.11^\circ$ 。 (2) 在同一围压下, 耕层土壤最大主应力差随容重增加而增大, 随含水率增加而减小; 在同一容重和含水率水平下, 耕层土壤的最大主应力差随着围压升高而增大。 (3) 耕层土壤容重、含水率的交互作用对黏聚力和内摩擦角影响显著($P < 0.05$), 对坡耕地耕层土壤抗剪强度抵抗侵蚀作用的最优土壤容重—含水率条件为 1.4 g/cm^3 — 10% 。 (4) 不同剪切方式影响了土体抗剪强度指标, 耕层土壤黏聚力在三轴试验条件下大于或接近直剪试验结果, 而土壤内摩擦角则明显小于直剪试验结果, 这主要与两种剪切试验原理差异有关。

关键词: 土壤抗剪强度; 耕层; 土壤容重; 土壤含水率; 坡耕地; 紫色土

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2020)03-0162-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2020.03.025

Effects of Soil Bulk Density and Water Content on Shear Strength of Cultivated-layer in Purple Soil Sloping Farmland

ZHANG Jianle, SHI Dongmei, LIU Yi, REN Yuheng, PU Chaojiang

(College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400715)

Abstract: Soil shearing strength can not only evaluate the sensitivity of soil erosion, but also is an important parameter to reflect the tillage performance of cultivated-layer. There are some differences in soil shearing strength indexes under different shearing modes. In this paper, the soil of purple soil sloping farmland was taken as the research object, the laboratory triaxial and direct shearing test method were used to study the bulk density and water content on remolded purple soil. The effect on shearing strength of the cultivated-layer soil was analyzed, and the differences between the two test methods were analyzed. The results showed that: (1) The soil cohesion (c) of the purple soil sloping farmland increased with the increasing of the bulk densities (ρ_d) and decreased with the increasing of water contents (w). The maximum cohesive forces of the triaxial and direct shearing tests were 32.33 and 21.78 kPa respectively, both of which occurred under bulk density of 1.4 g/cm^3 and water content of 10% . The internal friction angle (φ) of the cultivated-layer increased with the increasing of the bulk densities and decreased with the increasing of the water contents. The maximum internal friction angles of the triaxial and direct shearing tests were 22.67° and 29.11° respectively, under bulk density of 1.4 g/cm^3 and water content of 10% . (2) Under the same confining pressure, the maximum principal stress difference of the cultivated-layer soil increased with the increasing of the bulk densities, and decreased with the increasing of water contents. Under the same bulk density and water content, the maximum principal stress difference of the cultivated-layer soil increased with the confining pressure. (3) The interaction of soil bulk density and water content in the cultivated-layer had a significant effect on cohesion and internal friction angle ($P < 0.05$). The optimum soil bulk density—water content condition for the shear strength of the soil in sloping farmland

收稿日期: 2019-09-29

资助项目: 国家自然科学基金项目(41771310); 西南大学科技创新“光炯”培育项目(2018019)

第一作者: 张健乐(1996—), 男, 重庆九龙坡人, 硕士研究生, 主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail: 839561158@qq.com

通信作者: 史东梅(1970—), 女, 甘肃灵台人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事水土生态工程、土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail: shidm_1970@126.com

was 1.4 g/cm^3 — 10% 。(4) Different shearing modes affected the shearing strength index of the soil. The soil cohesion of the cultivated-layer was greater or closer to the direct shearing test under the triaxial test conditions, while the soil internal friction angle was significantly lower than the direct shearing test result. This was mainly related to the difference between the two shearing test principles.

Keywords: soil shearing strength; cultivated-layer; soil bulk density; soil water content; sloping farmland; purple soil

紫色土坡耕地是我国西南地区重要的农业资源,同时也是长江流域的重要侵蚀地貌单元和三峡库区水土流失的主要策源地^[1]。在气候、地形等自然因素与人为不合理耕作管理等因素共同影响下,紫色土坡耕地侵蚀剧烈,严重的土壤侵蚀导致耕层愈加浅薄、养分愈加贫瘠,造成了耕层土壤质量退化、土地生产力下降和环境恶化等严重问题,对紫色土坡耕地的农业生产、生态安全及可持续利用构成了巨大威胁^[2-7]。耕层是人类利用工具栽培作物,对土壤进行扰动的深度层,是能协调水、肥、气、热,满足作物生长发育需求的土层^[8]。土壤抗剪强度是评价土壤侵蚀敏感性、维护耕层土壤结构稳定、反映耕层土壤的耕作性能的重要力学指标^[9-11],随着土壤抗剪强度的增大,土壤抵抗径流剪切破坏能力也随之增加,从而减缓土壤侵蚀作用,达到蓄水保土的目的^[12-13]。土壤容重和含水率是影响耕层土壤抗剪强度的重要因素,容重反映耕层土壤结构的紧密程度,而含水率直接影响土壤颗粒间库仑力、范德华力以及土壤颗粒间的连接方式和胶结作用。国内外不少学者研究分析了容重、含水率与土壤抗剪强度之间的关系,García 等^[14]研究了不同土壤密度和含水率梯度下对土壤抗剪强度的影响,表明含水率对抗剪强度的影响大于干密度;倪九派等^[15]认为,2种紫色土干密度和含水率的交互作用对黏聚力有显著影响,而内摩擦角主要受含水率单一因素的影响;郑子成等^[10]研究了容重和含水率对玉米生长期土壤抗剪强度变化特征,表明抗剪强度与土壤含水率呈线性函数关系,与土壤容重呈极显著线性正相关关系;Trauner 等^[16]认为,不同细粒土壤抗剪强度与土壤含水率变化差异显著;李保雄等^[17]、王中文等^[18]、胡斐南等^[19]分别对黄土、红黏土、紫色土区水稻土抗剪强度进行了水敏性研究,结果表明黄土、红黏土、紫色土区水稻土抗剪强度均具有一定水敏性,且具有临界含水率。由于坡耕地在耕作后往往会导致耕层土壤疏松,容重减小;而在休耕或者大型机械碾压后,由于土壤自身重力或耕作器械的压实作用,耕层土壤容重会增大。同时由于西南地区夏季气温高、暴雨多,雨旱交替导致土壤水分变化明显,这些都直接影响了坡耕地耕层土壤的抗剪强度,从而影响耕层土壤的耕作性能。因此,本试验以三峡库区典型紫色土坡耕地耕层土壤为研究对象,设计不同容重和含

水率梯度模拟耕作疏松或机械压实和降雨及灌溉作用,采用室内三轴及直剪试验,分析不同容重和含水率对耕层土壤抗剪强度指标的影响,研究紫色土坡耕地耕层抗剪性能的变化特征,并分析2种试验方法的差异性,研究结果可为客观认识紫色土坡耕地耕层水土流失特征和坡耕地耕作性能改善提供基础参数。

1 材料与方法

1.1 供试土壤及试验设计

于2018年9月进行野外土样采集,供试土壤选用三峡库区代表性紫色土,土壤采自重庆市万州区($30^{\circ}55'10''\text{N}$, $108^{\circ}25'51''\text{E}$),当地属于亚热带湿润季风气候,年平均气温 17.7°C ,年平均降水量 $1\,243 \text{ mm}$ 。当地主要土壤类型是由灰棕紫色泥页岩、红棕紫色泥岩等发育而成的紫色土,主要种植方式为玉米—油菜轮作,一年两至三熟。现场采用“S”形布样及混合采集法,各样点取耕层 0 — 20 cm 的散土样 10 kg 左右,混匀,带回试验室风干处理用于抗剪强度及颗粒组成测定;同时各点采3个铝盒样、3个环刀样,用于测定土壤自然含水率、容重和总孔隙。于2018年10—12月进行室内试验,2019年5月进行数据分析,测得土壤自然含水率 14.59% ,容重 1.28 g/cm^3 ,总孔隙 52.88% ,砂粒含量 17.82% ,粉粒含量 65.35% ,黏粒含量 16.83% 。

为避免现场采样的破坏及重塑土与原状土样品之间土体颗粒结构、排列、黏结关系等物理性质的差异^[20],本试验均采用重塑土样进行三轴及直剪试验,以反映容重和含水率对紫色土坡耕地耕层土壤抗剪强度的影响特征。将采集的耕层土样在自然条件下风干,后用木棒碾散,过 2 mm 筛后充分混合并测定其含水率,并将其装入密封袋以备后续试验使用。本次试验以所测紫色土坡耕地耕层土壤自然容重 (1.28 g/cm^3) 及含水率 (14.59%) 作为中间值,设计容重 $1.2, 1.3, 1.4 \text{ g/cm}^3$ 共3个梯度,土壤含水率梯度 $10\%, 15\%, 20\%$ 共3个梯度,每种处理设3组重复试验。根据所设土壤容重与含水率,称取不同质量土样放于盘中,根据公式(1)计算制备试样所需加入的去离子水量,均匀喷洒于土样上,充分混匀后装入盛土容器中并用保鲜膜密封,使其充分湿润 24 h ,以配制不同容重、含水率梯度的试样。制备试样所需的加水量计算公式为:

$$m_w = \frac{m_0}{0.01 v_0 + 1} \times 0.01 (v_1 - v_0) \quad (1)$$

式中: m_w 为制样所需加水量(g); m_0 为风干土质量(g); v_0 为风干土含水率(%); v_1 为制样所需含水率(%)。

1.2 试验方法

采用 TSZ-1 型全自动三轴仪进行不固结不排水(UU)剪切试验,三轴试件高度为 8 cm,直径为 3.91 cm。根据设计的土壤容重及含水率梯度,称取相应的土样,按照《土工试验方法标准》制备试样,制样完成后安装至三轴仪上,开始剪切试验。试验设计径向围压(σ_3)为 100, 200, 300, 400 kPa,控制剪切速率为 0.8 mm/min,试验中出现剪切峰值后,试验应继续进行,直到超过 15% 的轴向应变为止;若无峰值出现时,剪切应进行到轴向应变为 20% 时停止,此时取轴向应变 15% 时的主应力差作为破坏点。

采用 ZJ 型应变控制式直剪仪进行重塑土直剪试验。根据设计的土壤容重及含水率梯度,称取相应的土样制备,制样完成后安装至直剪仪上,开始剪切试验。剪切速率控制为 12 r/min,试验中采用 100, 200, 300, 400 kPa 4 个荷载,每组荷载做 3 组重复试验。

1.3 数据处理

三轴试验数据通过 TSZ 全自动三轴仪配套的土工试验微机控制数据处理系统进行采集,直剪试验数据及其他描述统计分析在 Excel 2007 中进行,通过 Design Expert Version 8.0.6.1 软件进行回归模型方程及响应曲面模拟。

2 结果与分析

2.1 土壤容重和含水率对耕层土壤黏聚力的影响

黏聚力主要是由于土壤颗粒间引力和斥力综合作用的结果^[19],黏聚力会影响耕层土体的稳定性、抗冲性。土壤容重和含水率对紫色土坡耕地耕层土壤黏聚力的影响见图 1。耕层土壤黏聚力在同一含水率水平下随容重的增加而增大。三轴试验条件下,在含水率为 10% 时,耕层土壤黏聚力随容重增加的增长幅度较大,由 14.25 kPa 增至 32.33 kPa,增加 18.08 kPa;在含水率为 15% 和 20% 时,黏聚力随容重增加的增幅不大,分别由 16.00 kPa 增至 22.67 kPa,增加 6.67 kPa,由 10.67 kPa 增至 13.00 kPa,增加 2.33 kPa。直剪试验条件下,耕层土壤黏聚力随容重增加的增长幅度均不大,含水率从 10% 增至 20% 时,耕层土壤黏聚力分别增加 4.00, 5.89, 6.70 kPa。产生这种变化的主要原因是,随着土壤容重的增大,土体颗粒间距离更近、接触更加紧密,增大了颗粒间范德华力和静电力,使得土壤颗粒之间的相互作用增强,表现为黏聚力的增大^[21]。

紫色土坡耕地耕层土壤黏聚力在同一容重水平

下总体呈现随含水率的增大而减小的趋势。三轴试验条件下,在容重为 1.2 g/cm³ 时,耕层土壤黏聚力随含水率的升高呈现先增加后降低的趋势,由 14.25 kPa 升至 16.00 kPa 再降至 10.67 kPa;而黏聚力在容重为 1.3, 1.4 g/cm³ 时随含水率的升高而降低,且下降幅度较大,在容重为 1.3 g/cm³ 时,黏聚力由 26.50 kPa 降至 12.00 kPa,下降 14.50 kPa,在容重为 1.4 g/cm³ 时,黏聚力由 32.33 降至 13.00 kPa,降低 19.33 kPa。直剪试验条件下,耕层土壤黏聚力随含水率的升高呈现持续降低的趋势,但下降幅度均不大,从容重由 1.2 g/cm³ 增至 1.4 g/cm³ 时,随含水率增加,耕层土壤黏聚力分别减少 11.69, 12.13, 6.72 kPa。耕层土壤黏聚力随含水率的变化关系主要受到水膜影响。水分进入土体,在土壤颗粒表面形成水膜,产生一种润滑作用,随着含水率的升高,颗粒表面水膜增厚,润滑作用增强,使得土壤颗粒在外力作用下相对滑动的阻力减小,从而导致黏聚力随含水率的增加而减小^[19]。而三轴试验条件下耕层土壤黏聚力随含水率的升高呈现先增加后降低的趋势,这与韦杰等^[11]、倪九派等^[15] 研究结果相似。原因可能是当土体处于相对松散状态时,土壤孔隙比较大,土壤颗粒间的水分大多以自由水存在,随着含水率的增加,孔隙比逐渐减小,部分自由水转化为弱结合水,而这种转化使得土粒周围水分子对土粒产生牵引作用,并减弱水膜的润滑作用,此时黏聚力有所升高,但当土壤含水率超过一定限度时,随含水率的上升,土粒周围水膜厚度增大,润滑作用大于牵引作用,导致土壤间摩擦力降低^[11],最终导致相对松散状态下的耕层土壤黏聚力随含水率的增加呈先增加后减小的变化趋势。

三轴试验条件下耕层土壤黏聚力总体大于或接近直剪试验结果,在容重 1.4 g/cm³、含水率 10% 时,两者差距最大为 10.55 kPa。当含水率为 10% 时,随容重的增加,三轴试验测得黏聚力由 14.25 kPa 增加至 32.33 kPa,增加了 18.08 kPa,而直剪试验测得黏聚力由 17.98 kPa 增加至 21.78 kPa,仅增加了 3.80 kPa;当含水率为 15% 时,三轴试验测得黏聚力由 16.00 kPa 增加至 22.67 kPa,增加了 6.67 kPa,直剪试验测得黏聚力由 14.25 kPa 增加至 20.14 kPa,增加了 5.89 kPa;当含水率为 20% 时,三轴试验测得黏聚力由 10.67 kPa 增加至 13.00 kPa,增加了 2.33 kPa,直剪试验测得黏聚力由 9.78 kPa 增加至 16.48 kPa,增加了 6.70 kPa。同时,2 个试验条件下测得耕层土壤黏聚力与倪九派等^[15] 结果相似,但远小于林金石等^[20]、林敬兰等^[22] 崩岗红土层黏聚力,这主要与 2 种土壤类型有关。红土层的黏粒含量、黏土矿物

及有机质含量均较高,土壤颗粒间胶结作用越强,因此拥有较高的黏聚力^[22]。

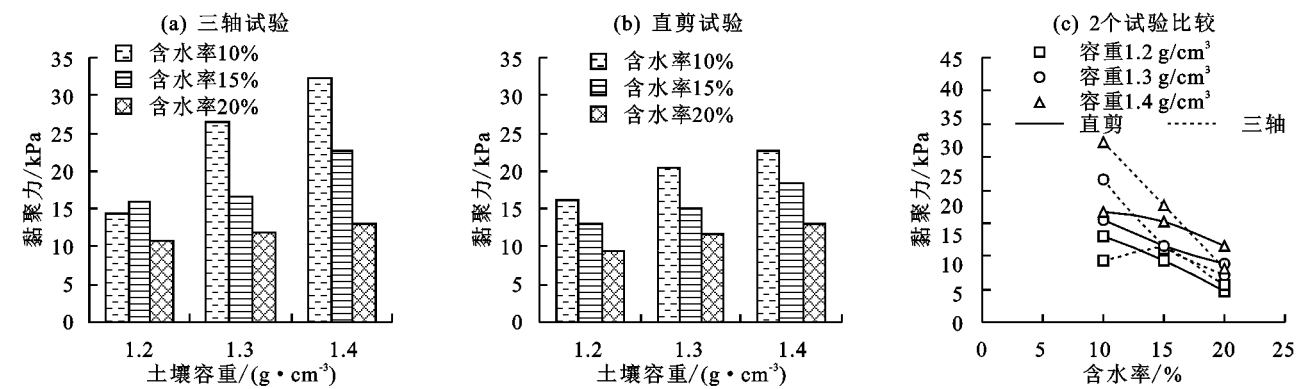


图 1 土壤容重和含水率对坡耕地耕层土壤黏聚力的影响

2.2 土壤容重和含水率对耕层土壤内摩擦角的影响

土壤内摩擦角反映了土壤的摩擦特性,一般包括土壤颗粒之间的滑动摩擦力和颗粒间的咬合力 2 部分^[20]。土壤容重和含水率对紫色土坡耕地耕层土壤内摩擦角的影响见图 2。耕层土壤内摩擦角在同一含水率水平下随容重的增加而增大。三轴试验条件下,耕层土壤内摩擦角随容重增加而增大的幅度均不大,在含水率 10% 时,内摩擦角由 16.25° 增至 22.67°, 增加 6.42°; 在含水率 15% 时,内摩擦角由 13.00° 增至 18.33°, 增加 5.33°; 在含水率 20% 时,内摩擦角由 9.50° 增至 13.00°, 增加 3.50°。直剪试验条件下,耕层土壤内摩擦角随容重的增加而增大的幅度均不大,分别从 25.67° 增至 29.11°, 增加 3.44°, 从 20.13° 增至 25.43°, 增加 5.30°, 从 13.98° 增至 22.39°, 增加 8.41°。这是因为随着土壤容重的增大,土壤更加紧实,土壤颗粒间距变小或造成部分大颗粒破碎而使土壤颗粒重排列,造成颗粒间接触点增多、接触面积增大,由此增加了颗粒间的滑动摩擦和咬合力,表现为内摩擦角的增大^[15]。

耕层土壤内摩擦角在同一容重水平下随含水率的增加而减小。三轴试验条件下,容重为 1.2 g/cm³ 时,内摩擦角由 16.25° 降至 9.50°, 减少 6.75°; 容重为 1.3 g/cm³ 时,内摩擦角由 20.50° 降至 11.67°, 减少 8.83°; 在容重为 1.4 g/cm³ 时,内摩擦角由 22.67° 降至 13.00°, 减少 9.67°。

直剪试验条件下,在容重为 1.2, 1.3 g/cm³ 时,耕层土壤内摩擦角随含水率的增加而减小的幅度较大,分别从 25.67° 降至 13.98°, 下降 11.69°, 从 27.61° 降至 15.48°, 下降 12.13°; 在容重为 1.4 g/cm³ 时,内摩擦角减小幅度不大,由 29.11° 降至 22.39°, 下降 6.72°。这是因为水分在土壤颗粒表面形成一层具有润滑作用水膜,随着含水率的增加,水分在土壤颗粒表面形成水膜的润滑作用更加明显,从而降低了颗粒间的接触摩擦,表现为内摩擦角的下降^[19]。由此得出对应最高内摩擦角的最优容重—含水率也为 1.4 g/cm³—10%。

此外,三轴试验条件下耕层土壤内摩擦角明显小于直剪试验结果,两者最大相差 9.39°, 这与林金石等^[20]研究结果基本一致,但 2 种方式下内摩擦角的变化程度接近。当含水率为 10% 时,随土壤容重的增加,三轴试验测得内摩擦角由 16.25° 增加至 22.67°, 增加了 6.42°, 直剪试验测得内摩擦角由 25.67° 增加至 29.11°, 增加了 3.44°; 当含水率为 15% 时,随容重的增加,三轴试验测得内摩擦角由 13.00° 增加至 18.33°, 增加了 5.33°, 而直剪试验测得内摩擦角由 20.13° 增加至 25.43°, 增加了 5.30°; 当含水率为 20% 时,随容重的增加,三轴试验测得内摩擦角由 9.50° 增加至 13.00°, 增加了 3.50°, 而直剪试验测得内摩擦角由 13.98° 增加至 22.39°, 增加了 8.41°。

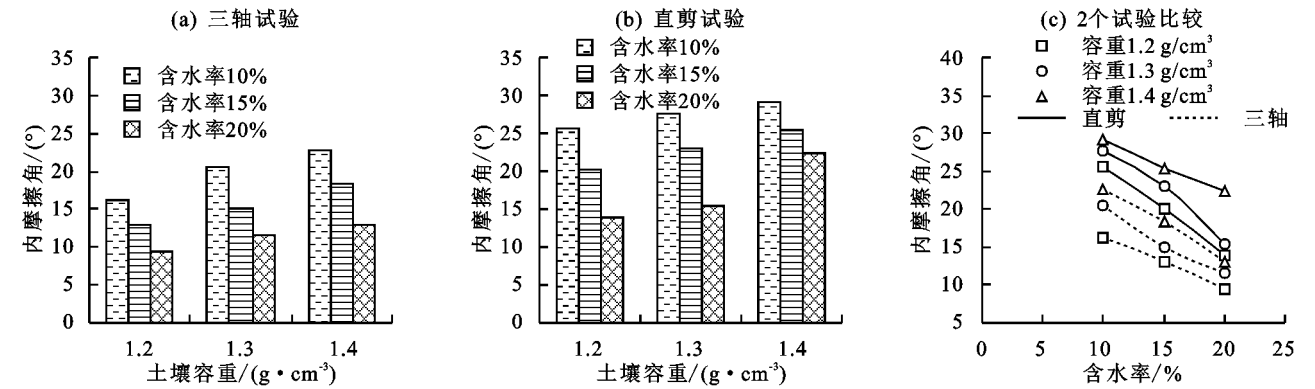


图 2 土壤容重和含水率对坡耕地耕层土壤内摩擦角的影响

2.3 土壤容重和含水率对耕层土壤最大主应力差影响

根据紫色土坡耕地耕层土壤的三轴试验得出的各容重、含水率条件下试样的最大主应力差见图 3、图 4。最大主应力差随容重的增大而增加。当含水率 10%、围压 100 kPa，容重由 1.2 g/cm³ 增加至 1.4 g/cm³ 时，最大主应力差由 109.93 kPa 增至 196.06 kPa。说明土壤容重越大，相同围压下破坏土体时作用于三轴试样的总压力越大，土体更难被破坏。这是因为土壤容重越大，土壤越紧实，颗粒间距离越近，颗粒间接触越密集，导致土壤颗粒之间及土壤颗粒与水分之间

相对作用增强，导致土壤内摩擦角变大、黏聚力增大，进而导致土壤抗剪强度增大^[21]。最大主应力差随含水率的增加而减小，当容重 1.4 g/cm³、围压 400 kPa，含水率由 10% 增至 20% 时，最大主应力差由 539.99 kPa 减至 238.81 kPa。这说明土壤含水率越大，在相同围压下破坏土体时作用于三轴试样的总压力越小，土体更易被破坏。这是因为水分在土粒表面形成水膜，形成润滑作用，当土壤含水率增加后，使土粒周围水膜增厚，润滑作用增强，导致土壤内摩擦角减小、黏聚力下降，进而导致土体抗剪强度减小^[11]。

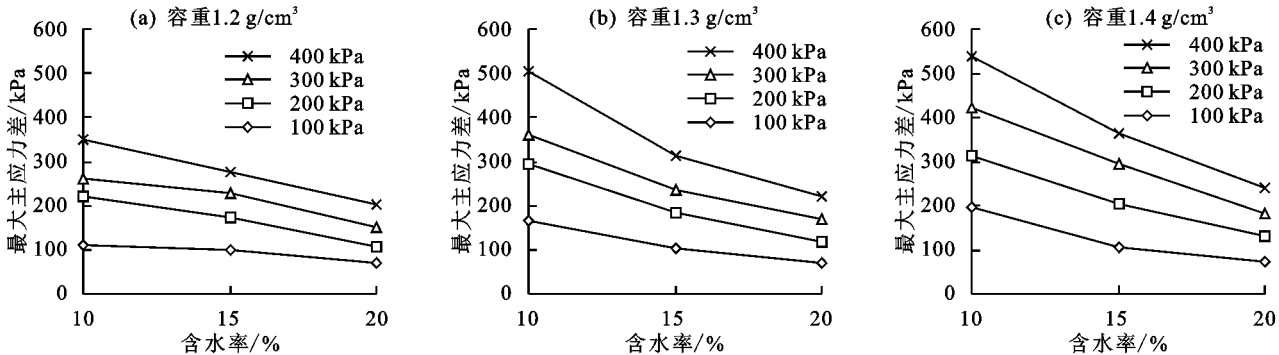


图 3 不同围压下最大主应力差

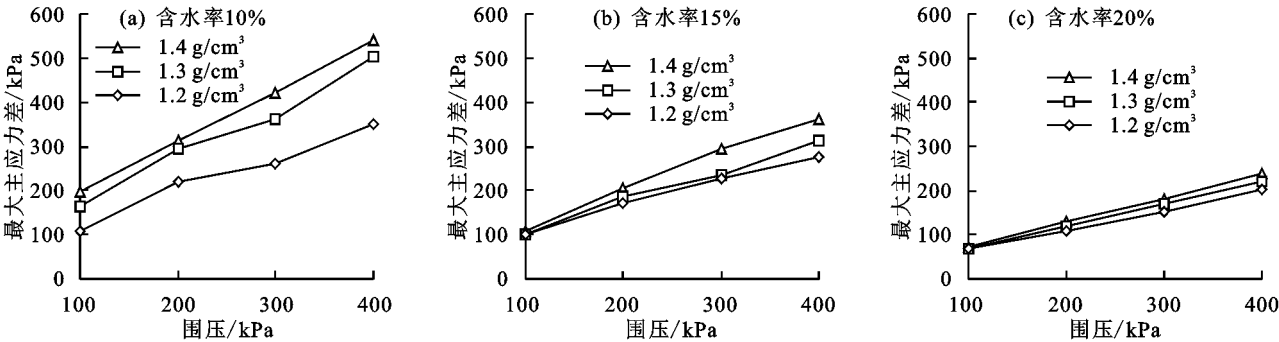


图 4 不同容重条件下最大主应力差

由图 4 可知，最大主应力差峰值为 539.99 kPa，出现在容重为 1.4 g/cm³、含水率为 10%、围压 400 kPa 水平下；在容重为 1.2 g/cm³、含水率为 20%，围压 100 kPa 条件下，最大主应力差最小，为 68.98 kPa。在同一容重、含水率水平下，耕层土壤的最大主应力差随围压的增加而上升，当容重为 1.2 g/cm³、含水率为 20% 时，围压由 100 kPa 升至 400 kPa，最大主应力差从 68.98 kPa 升至 203.09 kPa，增加 134.11 kPa；当容重为 1.4 g/cm³、含水率为 10% 时，最大主应力差从 196.06 kPa 升至 539.99 kPa，增加 343.93 kPa。这说明围压的提升能增大耕层土壤的最大主应力差，这是因为随着围压的升高，土壤颗粒接触更加密集。

2.4 土壤容重和含水率对耕层土壤黏聚力与内摩擦角的交互作用

当土壤容重和含水率同时变化时，紫色土坡耕地耕层土壤黏聚力与内摩擦角表现为曲面关系。以容重、含水率为自变量，耕层土壤黏聚力、内摩擦角为因

变量，通过 Design Expert 软件进行回归方程方差分析，建立容重(ρ_d)、含水率(w)与耕层土壤黏聚力(c)、内摩擦角(φ)的回归模型，其回归方程为：

$$c = -207.77 + 209.94\rho_d + 9.31w - 7.88\rho_d w - 17.94\rho_d^2 - 0.01w^2 \tag{2}$$

$$\varphi = -76.53 + 116.04\rho_d + 0.87w - 1.46\rho_d w - 26.44\rho_d^2 + 0.01w^2 \tag{3}$$

回归模型方程(2)的 $P < 0.05$ ，显著，模型的决定系数 R^2 为 96.24%；回归模型方程(3)的 $P < 0.05$ ，显著，模型的决定系数 R^2 为 99.30%。表明 2 组模型的回归方程拟合优度均较好，且对内摩擦角的拟合优度更高，这说明 2 组模型能较好地表示耕层土壤黏聚力、内摩擦角与土壤容重和含水率之间的关系，同时通过回归方程生成耕层土壤黏聚力、内摩擦角与土壤容重和含水率的响应曲面(图 5、图 6)。响应曲面的陡峭程度反映了因变量黏聚力、内摩擦角随自变量容重、含水率的变化程度，曲线越陡峭表示其影响

越显著。由图 5、图 6 可知,紫色土坡耕地耕层土壤容重、含水率的交互作用对其黏聚力、内摩擦角影响显著。其中,在含水率接近或等于 20% 时,黏聚力、内摩擦角随容重变化不明显;在容重接近或等于 1.2 g/cm³ 时,内摩擦角随含水率变化较黏聚力更明显;在容重为 1.4 g/cm³ 时,黏聚力、内摩擦角随含水率变化最明显。

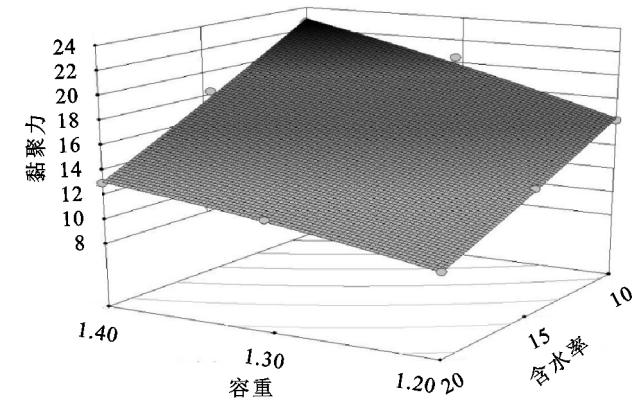


图 5 耕层土壤黏聚力对容重和含水率的响应曲面

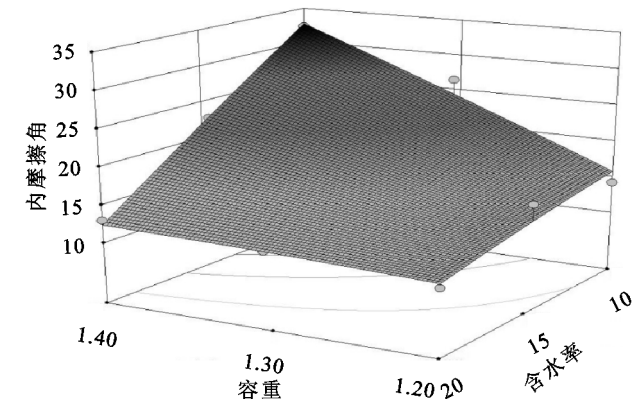


图 6 耕层土壤内摩擦角对容重和含水率的响应曲面

耕层土壤黏聚力、内摩擦角最大值均出现在容重 1.4 g/cm³、含水率 10% 水平下,由此判断耕层土壤最优容重—含水率组合为 1.4 g/cm³—10%,表明在此容重—含水率水平下,紫色土坡耕地耕层土壤抵抗径流冲刷、减少土壤侵蚀的能力最强。而实际生产活动中,由于坡耕地需要翻耕,实际耕层土壤容重会小于 1.4 g/cm³;同时由于降雨及灌溉等因素,耕层土壤含水率常大于 10%,会造成坡耕地较大水土流失。此时应注意加强坡耕地水土流失的防治,减少对耕层的扰动,可采取合理的耕作及管理方式,并配合植物篱、埂坎等水土保持措施,以改善坡耕地耕层物理性能并减少水土流失。

3 结论

(1)紫色土坡耕地耕层土壤黏聚力和内摩擦角在同一含水率水平下均随容重增加而增大;在同一容重水平下土壤黏聚力随含水率增加总体下降,而内摩擦角则呈显著减小趋势。此外,三轴试验在容重为

1.2 g/cm³ 时,土壤黏聚力表现为随着含水率的增加呈现先增大后减小的变化趋势。2 种试验条件均表明耕层土壤在容重为 1.4 g/cm³、含水率为 10% 水平下黏聚力最大,分别为 32.33, 21.78 kPa;内摩擦角也最大,分别为 22.67°, 29.11°。

(2)紫色土坡耕地耕层土壤在同一围压下,最大主应力差随容重增加而上升,随含水率增加而减小;在同一容重和含水率水平下,随着围压升高,耕层土壤的最大主应力差增加。耕层土壤在容重 1.4 g/cm³、含水率 10%、围压 400 kPa 条件下最大主应力差最大,为 539.99 kPa;在容重为 1.2 g/cm³、含水率为 20%、围压 100 kPa 条件下最大主应力差最小,为 68.98 kPa。

(3)紫色土坡耕地耕层土壤容重、含水率交互作用对其黏聚力、内摩擦角影响显著 ($P < 0.05$),判断对坡耕地耕层土壤抵抗径流冲刷、减少土壤侵蚀作用的最优容重—含水率组合为 1.4 g/cm³—10%,但在实际农业生产中耕层土壤常无法达到此容重—含水率水平,故可采取合理的耕作方式,配合适当的水土保持措施调控耕层土壤物理性能和耕作性能以减少水土流失。

(4)不同剪切方式影响了耕层抗剪强度指标,2 种试验方法下,耕层土壤黏聚力、内摩擦角随土壤容重和含水率的变化趋势总体相似,但三轴试验条件的耕层土壤黏聚力总体大于或接近直剪试验结果,最大差距 10.55 kPa;而耕层土壤内摩擦角则明显小于直剪试验结果,最大差距为 9.39°。三轴剪切试验在原理上优于直剪试验,但操作相对困难,适用于室内模拟研究和水土保持工程建设;直剪试验操作简单但数据与实际情况相差较大,适用于简单野外试验。

参考文献:

[1] 史东梅.基于 RUSLE 模型的紫色丘陵区坡耕地水土保持研究[J].水土保持学报,2010,24(3):39-44,251.
[2] 吕巨智,程伟东,钟昌松,等.不同耕作方式对土壤物理性状及玉米产量的影响[J].中国农学通报,2014,30(30):38-43.
[3] Fenton T E, Kazemi M, Lauterbach-Barrett M A. Erosional impact on organic matter content and productivity of selected Iowa soils [J]. Soil and Tillage Research, 2005, 81(2):163-171.
[4] 董杰,段艺芳,许玉凤,等.三峡库区紫色土坡地土壤退化程度评价[J].水土保持通报,2009,29(4):51-56.
[5] 牛俊,张平仓,邢明星.长江上游坡耕地水土流失特征及其防治对策[J].中国水土保持科学,2010,8(6):64-68.
[6] 何晓玲,郑子成,李廷轩,等.不同耕作方式对紫色土侵蚀及磷素流失的影响[J].中国农业科学,2013,46(12):2492-2500.

- [3] Ma D, Rezanian M, Yu H S, et al. Variations of hydraulic properties of granular sandstones during water inrush: Effect of small particle migration[J]. *Engineering Geology*, 2016, 217: 61-70.
- [4] Ma D, Zhou Z L, Wu J Y, et al. Grain size distribution effect on the hydraulic properties of disintegrated coal mixtures[J]. *Energies*, 2017, 10(5): 612-629.
- [5] Ma D, Xin C, Zhou Z L, et al. Experimental investigation on hydraulic properties of granular sandstone and mudstone mixtures[J]. *Geofluids*, 2018(5): 1-13.
- [6] Zhou Z L, Xin C, Ma D, et al. Dynamic tensile properties of sandstone subjected to wetting and drying cycles[J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 182: 215-232.
- [7] 张萍, 查轩. 崩岗侵蚀研究进展[J]. *水土保持研究*, 2007, 14(1): 170-172, 176.
- [8] 张晓明, 丁树文, 蔡崇法. 干湿效应下崩岗区岩土抗剪强度衰减非线性分析[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(5): 241-245.
- [9] 刘昌鑫, 潘健, 邓羽松, 等. 干湿循环对崩岗土体稳定性的影响[J]. *水土保持学报*, 2016, 30(6): 253-258.
- [10] 卫杰, 张晓明, 张鹤, 等. 干湿循环对崩岗不同层次土体无侧限抗压强度的影响[J]. *水土保持学报*, 2016, 30(5): 107-111.
- [11] 魏玉杰, 吴新亮, 蔡崇法. 崩岗体剖面土壤收缩特性的空间变异性[J]. *农业机械学报*, 2015, 46(6): 153-159.
- [12] 张晓明, 丁树文, 蔡崇法, 等. 干湿效应下崩岗岩土不均匀沉降变形规律与崩壁崩坍机制[J]. *岩土力学*, 2013(增刊 2): 299-305.
- [13] 丁树文, 蔡崇法, 张光远. 鄂东南花岗地区重力侵蚀及崩岗形成规律的研究[J]. *南昌工程学院学报*, 1995(增刊 1): 50-54.
- [14] 冯延云, 张晓明, 朱丽丽, 等. 初始含水率对崩岗土体抗拉特性的影响[J]. *水土保持学报*, 2019, 33(5): 41-49.
- [15] Hillel D. *Fundamentals of soil physics* [M]. New York: Academic Press, 1980.
- [16] 鲍士旦. *土壤农化分析* [M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [17] Lu N, Wu B, Tan C P. Tensile strength characteristics of unsaturated sands[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2007, 133(2): 144-154.
- [18] Zemen G, Martine A, Roger C. Analysis of the behavior of a clay soil under cyclic water stress. [J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2009, 68(3): 421-436.
- [19] Tang C S, Cui Y J, Shi B, et al. Desiccation and cracking behavior of clay layer from slurry state under wetting-drying cycles[J]. *Geoderma*, 2011, 166(1): 111-118.
- [20] 赵天宇, 王锦芳. 考虑密度与干湿循环影响的黄土土水特征曲线[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2012, 43(6): 2445-2453.

(上接第 167 页)

- [7] 丁文斌, 蒋光毅, 史东梅, 等. 紫色土坡耕地土壤属性差异对耕层土壤质量的影响[J]. *生态学报*, 2017, 37(19): 6480-6493.
- [8] 韩晓增, 邹文秀, 陆欣春, 等. 旱作土壤耕层及其肥力培育途径[J]. *土壤与作物*, 2015, 4(4): 145-150.
- [9] 史东梅, 蒋光毅, 蒋平, 等. 土壤侵蚀因素对紫色丘陵区坡耕地耕层质量影响[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(13): 270-279.
- [10] 郑子成, 张锡洲, 李廷轩, 等. 玉米生长期土壤抗剪强度变化特征及其影响因素[J]. *农业机械学报*, 2014, 45(5): 125-130, 172.
- [11] 韦杰, 史炳林, 李进林. 紫色土坡耕地埂坎土壤抗剪性能对含水率的响应[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(20): 153-160.
- [12] 花可可, 魏朝富, 任镇江. 土壤液限和抗剪强度特征值及其影响因素研究: 基于紫色土区[J]. *农机化研究*, 2011, 33(6): 105-110.
- [13] Fattet M, Fu Y, Ghestem M, et al. Effects of vegetation type on soil resistance to erosion: Relationship between aggregate stability and shear strength [J]. *Catena*, 2011, 87: 60-69.
- [14] García A J H, Jaime Y N M. Savanna soil water content effect on its shear strength-compaction relationship [J]. *Revista Científica Udo Agrícola*, 2013, 12(2): 324-337.
- [15] 倪九派, 袁天泽, 高明, 等. 土壤干密度和含水率对 2 种紫色土抗剪强度的影响[J]. *水土保持学报*, 2012, 26(3): 72-77.
- [16] Trauner L, Dolinar B, Mišić M. Relationship between the undrained shear strength, water content, and mineralogical properties of fine-grained soils [J]. *International Journal of Geomechanics*, 2005, 5(4): 350-355.
- [17] 李保雄, 苗天德. 黄土抗剪强度的水敏感性特征研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2006, 25(5): 1003-1008.
- [18] 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.
- [19] 胡斐南, 魏朝富, 许晨阳, 等. 紫色土区水稻土抗剪强度的水敏性特征[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(3): 107-114.
- [20] 林金石, 庄雅婷, 黄炎和, 等. 不同剪切方式下崩岗红土层抗剪特征随水分变化规律[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(24): 106-110.
- [21] 王健, 刘旦旦, 张鹏辉. 土壤密度对土壤抗侵蚀性的影响[J]. *灌溉排水学报*, 2013, 32(1): 65-68.
- [22] 林敬兰, 黄炎和, 张德斌, 等. 水分对崩岗土体抗剪特性的影响[J]. *水土保持学报*, 2013, 27(3): 55-58.