

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2024.04.023.

徐圣贤, 张庆玮, 李雯玲, 等. 应变式直剪仪与微型十字板剪切仪测定土壤抗剪强度的对比分析[J]. 水土保持研究, 2024, 31(4): 205-213.

Xu Shengxian, Zhang Qingwei, Li Wenling, et al. Comparative Analysis of Soil Shear Strength Measured by Strain-Controlled Direct Shear Apparatus and Micro-Vane Shear Apparatus[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(4): 205-213.

# 应变式直剪仪与微型十字板剪切仪测定 土壤抗剪强度的对比分析

徐圣贤<sup>1</sup>, 张庆玮<sup>1,2</sup>, 李雯玲<sup>1</sup>, 陈伟杰<sup>1</sup>, 陈紫燕<sup>1</sup>, 赵成龙<sup>1</sup>

(1.西北农林科技大学 水土保持科学与工程学院(水土保持研究所),

陕西 杨凌 712100; 2.西北农林科技大学 资源环境学院, 陕西 杨凌 712100)

**摘要:** [目的] 分析两种仪器(应变式直剪仪与微型十字板剪切仪)测得的土壤抗剪强度指标(土壤黏聚力值  $c$ 、内摩擦角  $\varphi$ 、土壤剪应力  $\tau$ ) 特征, 并建立直剪仪测得的  $c$  和  $\varphi$  与十字板仪测得的  $\tau$  之间的函数关系, 以期深化对土壤抗剪强度的认识, 提高土壤抗剪强度指标测定效率。 [方法] 选取黄土高原 3 种典型质地类型土壤(杨凌黏黄土、安塞黄绵土、定边沙黄土), 每种土壤设 5 个含水量梯度(12%, 16%, 20%, 24%, 28%), 分别用上述两种仪器测定不同处理下土壤抗剪强度指标  $c$ ,  $\varphi$  和  $\tau$ , 探究了 3 指标对土壤质地、土壤含水量的响应特征以及 3 指标间的函数关系。 [结果] (1) 试验条件下,  $c$  值在 16.88~27.12 kPa 范围,  $\varphi$  值在 5.03°~21.30° 范围,  $\tau$  值在 1.76~7.72 kPa 范围变化; (2) 不同土壤类型下,  $c$  和  $\tau$  均随含水量的增大呈现先增大后减小趋势, 而  $\varphi$  随含水量增大呈现逐渐降低趋势; (3) 总体来看, 安塞黄绵土的  $\tau$ ,  $c$ ,  $\varphi$  值略高于定边沙黄土, 但它们均显著大于杨凌黏黄土。 (4) 3 种土壤类型下, 微型十字板剪切仪所测定的  $\tau$  值与直剪仪测定的  $c$  值均具有较强的线性相关关系 ( $R^2 > 0.90$ ); 而  $\varphi$  值与  $\tau$  值间并无显著相关关系。如不考虑土壤类型差异,  $\tau$  与  $c$  之间仍有较强的相关性, 关系式为  $c = 1.59\tau + 14.10$  ( $R^2 = 0.51, p < 0.01$ )。 [结论] 应变式直剪仪测得的黏聚力  $c$  值和微型十字板仪测得的土壤剪应力  $\tau$  值对土壤质地、含水量的响应相似, 且二者有显著的相关关系, 在一定条件下可以用快速便捷的微型十字板仪测得的  $\tau$  值估算原本需用直剪仪测的  $c$  值。研究结果可为野外极端条件下提高土壤抗剪强度测定效率方面提供参考。

**关键词:** 应变式直剪仪; 微型十字板剪切仪; 剪应力; 黏聚力; 内摩擦角

中图分类号: S152.9

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2024)04-0205-09

## Comparative Analysis of Soil Shear Strength Measured by Strain-Controlled Direct Shear Apparatus and Micro-Vane Shear Apparatus

Xu Shengxian<sup>1</sup>, Zhang Qingwei<sup>1,2</sup>, Li Wenling<sup>1</sup>, Chen Weijie<sup>1</sup>, Chen Ziyang<sup>1</sup>, Zhao Chenglong<sup>1</sup>

(1. College of Soil and Water Conservation Science and Engineering / Institute of

Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shanxi 712100, China;

2. College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shanxi 712100, China)

**Abstract:** [Objective] This study aims to analyze the characteristics of soil shear strength parameters obtained by strain-controlled direct shear apparatus and micro-vane shear apparatus, respectively (soil cohesive force  $c$ , internal friction angle  $\varphi$ , and soil shear force  $\tau$ ), and then establish the relationship between  $c$ ,  $\varphi$  and  $\tau$ . This can deepen the understanding of soil shear strength, and have important significance for improving the efficiency of soil shear strength measurement. [Methods] Three typical texture types of soil (Yangling clayey soil, Ansai loessial soil, Dingbian sandy soil) from the Loess Plateau, and five

收稿日期: 2023-08-28

修回日期: 2023-09-24

资助项目: 国家自然科学基金“黄土区坡面细沟间侵蚀粒径分选动力学过程研究”(42107362)

第一作者: 徐圣贤(2001—), 男, 河北保定人, 在读硕士研究生, 研究方向为土壤侵蚀。E-mail: 1335965095@qq.com

通信作者: 张庆玮(1993—), 女, 陕西榆林人, 博士, 副教授, 主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail: zhangqingwei@nwsuaf.edu.cn

<http://stbcj.paperonce.org>

levels of soil moisture (12%, 16%, 20%, 24% and 28%) were designed to obtain their soil shear strength using the above mentioned apparatuses. The responses of soil shear strength to soil types and soil moisture, as well as relationships between  $c$ ,  $\varphi$  and  $\tau$  were then analyzed. [Results] (1) Under experiment conditions, the values of  $c$ ,  $\varphi$  and  $\tau$  range between 16.88~27.12 kPa,  $5.03^{\circ}$ ~ $21.30^{\circ}$ , 1.76~7.72 kPa, respectively. (2) In the three soil types, the  $c$  and  $\tau$  firstly increase and then decrease with the increase of soil moisture. While, the  $\varphi$  decreases gradually with the soil moisture increase. (3) The  $c$ ,  $\tau$ , and  $\varphi$  of Ansai loessial soil are similar or slightly higher than those in Dingbian sandy soil, while they are significantly higher than those in Yangling clay soil. (4) In the three types of soil, there is a significant linear correlation between the  $\tau$  and  $c$  ( $R^2 > 0.93$ ), while there is no significant correlation between the  $\varphi$  and  $\tau$ . Without considering the difference of soil type, there is still a strong linear correlation between  $\tau$  and  $c$ , and its relation can be described by  $c = 1.59\tau + 14.10$  ( $R^2 = 0.51$ ,  $p < 0.01$ ). [Conclusion] The responses of  $c$  to soil type and soil moisture were similar to that of  $\tau$ , and a significant relation are found between  $c$  and  $\tau$ . It implies that researchers can use  $\tau$ , conveniently obtained by micro-vane shear apparatus, to assess  $c$ , obtained by strain-controlled direct shear apparatus slowly under some conditions. The results can provide reference for improving the measurement efficiency of soil shear strength under extreme field conditions.

**Keywords:** strain-controlled direct shear apparatus; micro-vane shear apparatus; shear force; cohesion; internal friction angle

土壤的抗剪强度是指土体抵抗剪切破坏的能力,直接反映了土体在外力作用下发生剪切变形的难易程度,是衡量土体稳定性的重要指标<sup>[1-5]</sup>。近年来,不少研究者发现在众多土壤因子中,土壤抗剪强度与土壤可蚀性相关性很强,可以用该指标表征土壤可蚀性对土壤侵蚀量进行预报,因此该指标在土壤侵蚀领域被广泛使用。如潘剑君<sup>[6]</sup>利用土壤入渗速率和土壤抗剪切力确定土壤侵蚀等级。Su等<sup>[3]</sup>通过分析植物地下根系对土壤抗剪切力的影响,来研究土壤的可蚀性与保水保土效益。郭文召等<sup>[4]</sup>进行了黄土高原风蚀水蚀交错区黄土抗剪强度敏感性分析,旨在为该区重力侵蚀的力学机理分析提供参考依据。邢书昆等<sup>[7]</sup>分析了黄土丘陵沟壑区退耕年限对根-土复合体抗剪强度的影响,揭示了影响根-土复合体抗剪强度的关键因素。

从机理上讲,土壤的抗剪强度是由一系列土壤特性决定的,其大小取决于土颗粒之间的黏性和摩擦力<sup>[8]</sup>。一般来说,土壤黏聚力随着黏土含量的增加而增加,而粗颗粒的数量、大小和形状增加了内摩擦<sup>[9]</sup>。土壤的抗剪强度还受到许多土壤固有特性如土壤的体积密度、团聚度及有机质含量等因素影响,导致不同土壤类型下土壤抗剪强度值存在明显差异。除土壤这些固有特性的影响外,水分条件的变化也是导致土壤抗剪强度变化的重要触发因素,许多研究者在试验中发现,抗剪强度在特定含水量下可达到峰值<sup>[10-11]</sup>,土体抗剪强度峰值及其各向异性受含水量、正应力和土体质地的共同作用影响<sup>[2]</sup>。此外,选用不

同的抗剪强度测定仪器,其测试效率、表征指标等也有所不同,各表征指标间随土壤理化性质的变化趋势也不尽相同。

纵观国内外研究现状,发现在土壤侵蚀领域,研究者多用应变式直剪仪和微型十字板剪切仪两种仪器测定土壤抗剪强度。应变式直剪仪通常将试样在不同垂直压力下,施加剪切力进行剪切,求得破坏时的剪应力,再根据库伦定律确定抗剪强度指标——内摩擦角  $\varphi$ 、土壤黏聚力值  $c$ <sup>[12]</sup>。但现有仪器存在剪切盒小、应力集中现象明显、加载损失较大、无法实现原位剪切等缺陷<sup>[13]</sup>。相比而言,微型十字板剪切仪个头小、重量轻、操作简单、价格便宜,是一种简单易用、快速试验的剪切仪,一方面可以直接进行原位剪切试验,可以极大地减少工作量,简化试验步骤;另一方面,利用微型十字板剪切仪测定土样抗剪强度时,避免了土样在装卸、运输过程中的扰动对实验室力学测试的影响<sup>[14]</sup>。利用微型十字板剪切仪测定土壤抗剪强度时,通常用扭矩乘以系数而得到土壤剪切力  $\tau$ ,该试验方法大大简化了抗剪强度的测定方法,但同时,利用微型十字板剪切仪测定土壤抗剪强度指标动态变化时,只能得到土样的剪切力,无法测定土壤的黏聚力及内摩擦角变化。此外,现有研究中,有些研究者将微型十字板剪切仪测算出的  $\tau$  值叫“土壤抗剪强度”,有些叫“土壤黏结力”,有些叫“土壤剪切力”,有些叫“土壤黏聚力”,与直剪仪得的土壤黏聚力  $c$  值混淆。对于同一个土壤样品,用应变式直剪仪和微型

十字板剪切仪测得的土壤抗剪强度指标之间有什么函数关系?能否用快速便捷的微型十字板仪测得的抗剪强度值高精度估算原本需用直剪仪测得的内摩擦角  $\varphi$  和土壤黏聚力值  $c$ ? 这些问题迄今为止并未得到很好回答。

本研究假定,用两种仪器测得的土壤抗剪强度指标具有一定的函数关系,且这个函数关系在不同条件下(如土壤质地类型、土壤含水量等)有所不同。为了回答这个假设以及填补研究空白,本研究选取黄土高原由南至北 3 种典型质地类型的土壤、每种土壤设 5 个含水量梯度,在保证其他条件完全一致情况下,分别用两种仪器测定每种处理下的样品抗剪强度特征,得出相应的  $\varphi, c, \tau$  值并分析研究三者之间的关系。研究结果对提高土壤抗剪强度测定效率具有重要意义。

1 材料与方法

1.1 试验材料制备

试验于 2022 年 5—10 月在西北农林科技大学资源环境学院土壤侵蚀实验室进行。因抗剪强度对土

壤含水量、粒径组成等的变化较为敏感,在室外用环刀直接采集原状土样进行试验不好保证样品理化性质完全一致,所以该项目选用重塑土做试验。试验用土采自黄土高原,依据黄土高原土壤质地由南至北呈由细至粗特征,以及黄土水平带可划为黏黄土带、黄土带、沙黄土带<sup>[15]</sup>,本研究分别选用位于第三带黏黄土带的典型土壤杨凌黏黄土,位于第二带黄土带的典型土壤安塞黄绵土,以及位于第一带沙黄土带的典型土壤定边沙黄土为试验样品。按照国际制土壤质地分类标准,杨凌黏黄土属于粉砂黏土,安塞黄绵土和定边沙黄土属于粉砂壤土。样品从野外采集回实验室后,过 5 mm 筛以去除秸秆、草根等杂质并风干。每种土壤分别设含水量 12%, 16%, 20%, 24%, 28% 共 5 个梯度。将每种处理下的土壤分别按 1.2 g/cm<sup>3</sup> 容重填装在不同土槽中,并用塑料膜将土槽密封静置 24 h,确保水分在土槽中均匀分布。然后用环刀在土槽取样并在应变式直剪仪上测定土壤黏聚力  $c$  值和内摩擦角  $\varphi$ ;与此同时,用微型十字板仪在土槽内直接测样,并计算得出土壤的剪切力  $\tau$  值。所选用土壤基本性质见表 1。

表 1 试验土壤基本性质  
Table 1 Basic properties of test soil

土壤性质	指标	安塞黄绵土	杨凌黏黄土	定边沙黄土
机械组成特征	黏粒含量(<0.002 mm)/%	9.91	25.83	6.25
	粉粒含量(0.002~0.05 mm)/%	61.16	66.63	58.54
	砂粒含量(0.05~2 mm)/%	28.93	7.54	35.21
	$D_{50}/\mu\text{m}$	34.23	12.13	38.65
	<0.002 mm 含量/%	7.26	9.14	5.81
有效粒径组成特征	0.002~0.05 mm 含量/%	59.47	48.25	57.65
	0.05~2 mm 含量/%	33.27	42.61	36.54
	$D_{50_1}/\mu\text{m}$	41.03	41.56	39.96
有机质含量/(g·kg <sup>-1</sup> )		6.28	14.85	3.23

注:  $D_{50}$  为试验土壤的中值粒径;  $D_{50_1}$  为试验土壤有效粒径组成的中值粒径。

1.2 试验设计

本试验采用的试验装置为应变控制式直剪仪与十字板剪切仪,通过分别用两种仪器测量相同土样来进行土壤抗剪强度的测定。

1.2.1 应变式直剪仪试验 如图 1 所示,该仪器的主要部件由固定的上盒和活动的下盒组成,试样位于上盒下盒内两块透水石之间<sup>[12]</sup>。试验过程中,以仪器台面为基准,调整机架,使其水平,安装稳固仪器,后由杠杆系统通过加压活塞和上透水石对试件施加某一垂直压力  $\sigma$ ,后匀速转动手轮对于下盒施加水平推力,使试样在上下盒之间的水平接触面产生剪切变形直至破坏,此时量力环取值达到最大值。

在剪切过程中,随着上下盒相对剪切变形的发展,土样抗剪强度逐渐发挥出来,直到剪应力等于土

的抗剪强度时,土样被破坏。因此通常可取峰值或稳定值作为破坏点。试验时,用环刀在土槽中取若干个土壤样品,并按照要求将环刀样放置在直剪仪中土样室中,分别在不同垂直压力(50, 100, 200, 300, 400 kPa)下进行直剪试验。直剪试验结束后,将试验结果绘制成如图 2 所示的抗剪强度  $\tau_f$  与  $\sigma$  之间的关系,试验结果表明,对于黏性土的  $\tau_f$ - $\sigma$  关系曲线基本呈直线关系,该直线与横轴的夹角为内摩擦角  $\varphi$ ,在纵轴上的截距为黏聚力  $c$ 。为使试验结果具有代表性,每种土壤类型、含水量及垂直压力处理下均做 5 次重复,共计 375 次直剪试验。

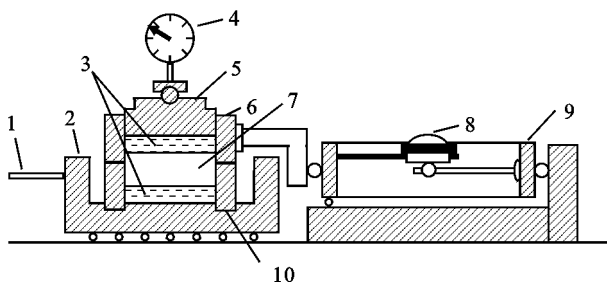
抗剪强度用库仑公式<sup>[16]</sup>表示为:

$$\tau_f = c + \sigma \tan \varphi \tag{1}$$

式中:  $\tau_f$  为土壤抗剪强度(kPa);  $\sigma$  为垂直压力

(kPa);  $c$  为黏聚力(kPa);  $\varphi$  为内摩擦角( $^{\circ}$ )。

**1.2.2 微型十字板剪切仪试验** 微型十字板剪切仪主要由板头、加力装置和量测设备 3 部分组成(图 3)。试验时,将十字板插到预定深度。然后在地面上以一定的转速对它施加扭力矩,使板内的土体与其周围土体发生剪切,直到剪破为止,测出其相应的最大扭矩,根据力矩平衡关系,推算圆柱形剪破面上土的剪切力。



注:1 为轮轴;2 为底座;3 为透水石;4 为量表;5 为活塞;6 为上盒;7 为土样;8 为量表;9 为量力环;10 为下盒。

图 1 应变控制式直剪仪

Fig. 1 Strain-controlled direct shear apparatus

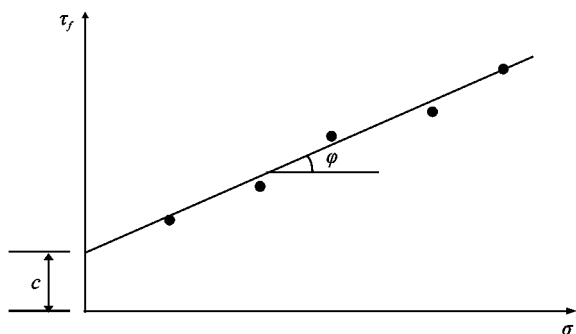


图 2 直接剪切试验结果

Fig. 2 Direct shear test results

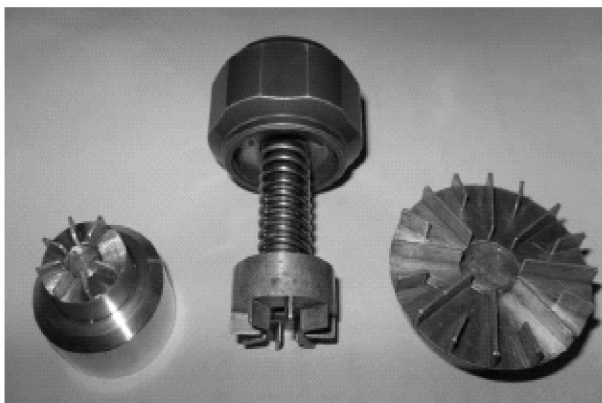


图 3 微型十字板剪切仪

Fig. 3 Micro-vane shear apparatus

本试验采用微型十字板剪切仪进行试验,根据仪器说明选取剪切系数为 2.186 的旋头进行试验即:

$$\tau = 2.186x \quad (2)$$

式中: $\tau$  为土壤剪切力; $x$  为实测值。测定时,将仪器旋头复位后插入土壤中,保持恒定的垂直压力,匀速旋转仪器上部的握柄直至土体被剪切破坏,缓慢释放弹簧扭

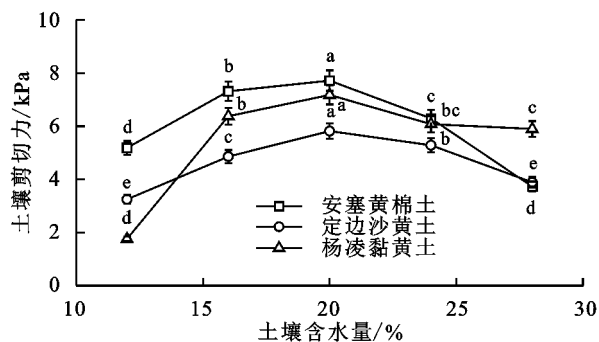
力。在手动复位前,指针所示读数即为实测值。

为使试验结果具有代表性,每种土壤类型、含水量条件下均做 15 次重复,共计 225 次微型十字板剪切试验。每种处理测出的 15 个数值,换算后取其平均值作为该种处理下的土壤剪切力  $\tau$  值。

## 2 结果与分析

### 2.1 基于微型十字板剪切仪的土壤剪切力特征

**2.1.1 不同含水量土壤剪切力特征** 由图 4 可知,试验条件下土壤剪切力在 1.76~7.72 kPa 间变化,3 种不同类型土壤其剪切力值随前期土壤含水量变化趋势基本相同,均呈现随含水量的变化为先增大后减小的趋势,在前期土壤含水量为 20% 左右达到峰值。试验条件下杨凌黏黄土、安塞黄绵土、定边沙黄土的土壤剪切力峰值分别是 7.18, 7.72, 5.82 kPa。杨凌黏黄土到达剪切力峰值时的含水量明显高于其他土类到达峰值时的含水量,这可能是由于杨凌黏黄土机械组成中黏粉粒及有机质含量较高,储水性能较好,到达临界点较慢。因为土颗粒粒径愈小,颗粒表面活性越大,其比表面积越大,黏土矿物吸附结合水的能力越强,水敏性越强<sup>[15]</sup>。Manuwa 等<sup>[17]</sup> 在研究中也发现,利用十字板剪切仪测定抗剪强度时,抗剪强度随含水率的增加而增大,达到最大值,然后随土壤含水率的进一步增大而减小。这是由于当土层含水量过大时,土层呈流塑状态,稳定的土体结构尚未形成,土层的应力状态对抗剪强度的影响几乎可以忽略<sup>[18]</sup>。



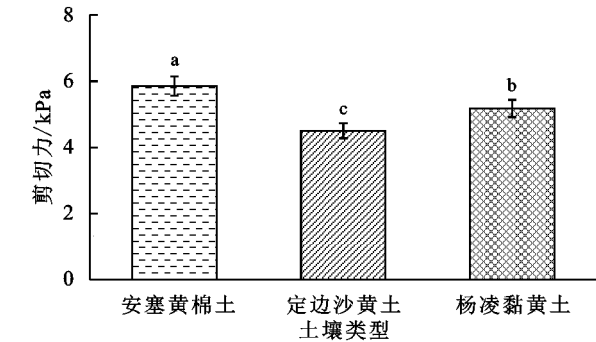
注:同一颜色、不同小写字母表示同一种土壤类型、不同含水量下土壤剪切力值之间具有显著差异( $p < 0.05$ )。

图 4 3 种土壤类型下土壤剪切力随土壤含水量变化特征

Fig. 4 Characteristics of soil shear variation with soil water content under three soil types

**2.1.2 不同类型土壤平均剪切力特征** 3 种土壤下的土壤平均剪切力如图 5 所示。经过显著差异性分析后得出,3 种土样剪切力间存在显著差异,且剪切力大小关系为:安塞黄绵土(均值 6.05 kPa) > 杨凌黏黄土(均值 5.46 kPa) > 定边沙黄土(均值 4.62 kPa)。这可能是由于安塞黄绵土中细颗粒物质(小于 0.05 mm)大于杨凌黏黄土,同时其有机质含量也较高(表

1);而定边沙黄土中虽然细颗粒物质多于杨凌黏黄土,但其有机质含量较少,不易形成团粒结构,从而导致其剪切力较低。这一结论与其他研究者的发现相类似。有研究表明土壤抗剪强度指标的水平变化趋势与土壤颗粒组成中小于 0.01 mm 的物理性黏粒的含量变化趋势最为吻合随着土壤中<0.01 mm 物理性黏粒含量的增多,土壤的凝聚力增大<sup>[19]</sup>。除土壤中细颗粒物质含量外,土壤抗剪强度大小与土壤有机质含量有着较大关系。由于杨凌黏黄土中有机质数量较多,有利于土壤团聚结构形成,提高土壤的保水性能,因而增加在较高含水量时土壤水膜间的黏结作用,使得其平均剪切力高于定边沙黄土。由表 1 可知,在 3 种土样中,有机质含量大小为:杨凌黏黄土>安塞黄绵土>定边沙黄土。研究表明,土壤中有机质含量增多能够直接改善土壤的理化性质,促进土壤中团聚体的形成,提高土壤颗粒之间的胶结力,进而提高土壤的抗剪强度<sup>[7]</sup>,这与本研究结果相同。



注:不同小写字母表示不同土壤类型剪切力之间具有显著差异( $p<0.05$ )。

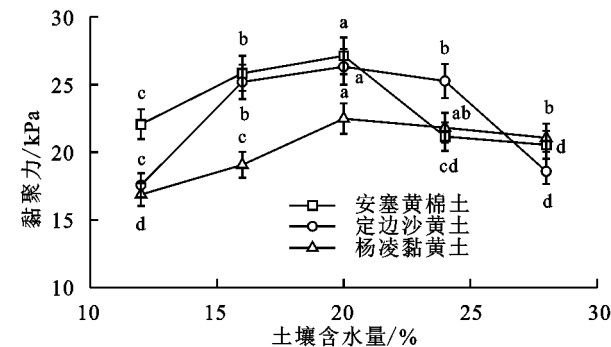
图 5 不同土壤类型剪切力比较

Fig. 5 Comparison of shear forces of different soil types

2.2 基于应变式直剪仪的土壤抗剪强度特征

2.2.1 不同含水量土壤黏聚力特征 土壤黏聚力是影响土壤抗剪强度的重要因素<sup>[20]</sup>,包含分子间的范德华力、胶结力和水膜连结力等<sup>[21]</sup>。由图 6 可知,试验条件下土壤黏聚力在 16.88~27.12 kPa 变化,3 种土壤类型下其随前期土壤含水量变化呈现先增后减的趋势,在前期土壤含水量为 18%~20%达到峰值。试验条件下杨凌黏黄土、安塞黄绵土、定边沙黄土的土壤黏聚力峰值分别是 22.48,27.12,26.31 kPa。这是由于土壤黏聚力除与库仑力、范德华力、胶结作用力以及浓度差所引起的渗透压力有关外,它还受水膜黏结力的影响。当土壤含水率较低时,土壤黏聚力主要通过水膜黏结力的大小影响土壤的力学性质<sup>[22]</sup>。此时水膜间的黏结作用由弱变强,这是土壤黏聚力随含水量增大的主要原因。而随着土壤含水量的持续增加,导致土壤黏聚力反而呈现下降的趋势,其主要原因可能有以下 3 点:第一,土壤颗粒周围水膜厚度的逐渐增大导

致水膜对土壤颗粒的胶结作用变弱以及土粒间有效接触面积的减小,土壤颗粒间相互移动变得较为容易,摩擦力、范德华力等的减弱都导致土壤黏聚力的下降;第二,当土壤含水量增大时,水分对胶结物质会产生一种楔入作用,从而导致土颗粒之间更易滑动<sup>[23]</sup>;第三,水分还可以使某些起胶结作用的盐类溶解或使某些胶结物软化,引起土壤胶结物质破坏从而导致土壤抗剪强度的降低<sup>[24]</sup>。有研究同样发现,当土壤含水量增加时,土体孔隙中毛细水所产生的毛细压力增大,胶结作用增强,土体存在基质压力等,导致黏聚力增强;当含水量超过某个值时,含水量的增加将会造成土粒间间距增大,水膜增厚,黏聚力减小<sup>[25]</sup>。这一现象也与土壤中 3 个吸附阶段有关:缓慢吸附阶段(吸附水主要以强结合水为主)、强吸附阶段(吸附结合水的量在不断增加,此阶段吸附水主要以弱结合水为主)和吸附平衡阶段(基本不再吸附水汽)。在缓慢吸附阶段与强吸附阶段由于土壤颗粒对于结合水的吸附作用形成稳定集聚体结构,因此土壤黏聚力增加。而随着含水量继续增大,此时土体处于吸附平衡阶段,基本不再吸附水汽,但土壤颗粒间由于自由水的存在而导致间距增大,因此黏聚力呈现减小趋势<sup>[26]</sup>。



注:同一颜色、不同小写字母表示同一种土壤类型、不同含水量下黏聚力值之间具有显著差异( $p<0.05$ )。

图 6 3 种土壤类型下土壤黏聚力随土壤含水量变化特征

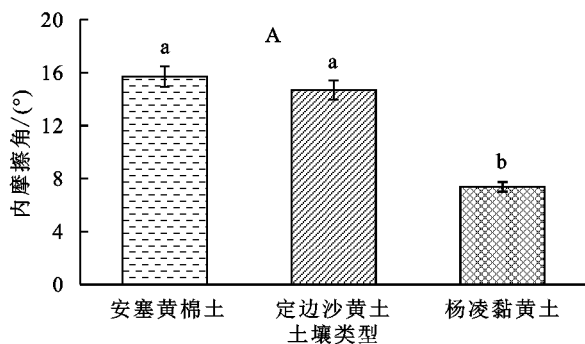
Fig. 6 Characteristics of soil cohesion change with soil water content under three soil types

2.2.2 不同含水量土壤内摩擦角特征 图 7 是 3 种土壤类型下内摩擦角随土壤含水量的变化图。由图可知,在不同含水量下,安塞黄绵土、定边沙黄土和杨凌黏黄土的内摩擦角分别 19.08°~12.19°,21.30°~11.39°,5.03°~9.73°呈现递减的趋势,并与含水率有较强的线性相关性。这与其他研究者的研究结果类似<sup>[27-28]</sup>。内摩擦角与土颗粒间的摩擦作用有关,可代表土的内摩阻力。该阻力包括土粒之间的表面摩擦力和由于土粒之间的连锁作用而产生的咬合力。其中,咬合力是指当土体相对滑动时,将嵌在其他颗粒之间的土粒拔出所需的力。当土壤处于含水量时,土粒与土粒之间接触紧

密,在胶结作用力与水膜连结力的共同作用下,土粒与土粒之间的接触面大,摩擦作用强,因而内摩擦角也大。随着土壤含水量增大,土粒的结合水膜增厚,咬合力和水膜作用力随之减弱,水膜还可起到一定的润滑作用,导致外力驱动下土粒间摩擦作用减弱,内摩擦角也相应减小。随着含水量继续增大,土粒之间的孔隙被水充盈,显著降低了土粒之间的有效接触面积,水的润滑作用也进一步增强,外力驱动下摩擦作用随之减弱,最终导致内摩擦角进一步减小<sup>[26]</sup>。

### 2.2.3 不同土壤类型平均黏聚力和内摩擦角特征

图8表征3种土壤类型在不考虑含水量差异下的平均黏聚力和平均内摩擦角。安塞黄绵土与定边沙黄土的平均黏聚力值、内摩擦角值无显著差异,但他们均显著高于杨凌黏黄土。这可能是由于土壤颗粒级分配不同导致的。安塞黄绵土、定边沙黄土、杨凌黏黄土中,细颗粒物质主要为黏粉粒,而粗颗粒物质主要为砂粒,3种土壤类型粗细颗粒比值分别为:2.00,1.74,1.35,而3种土样在不考虑含水量差异下的平均内摩擦角分别为 $15.700^{\circ}$ , $14.686^{\circ}$ , $7.370^{\circ}$ 。这是由于在安塞黄绵土与定边沙黄土中,细颗粒物质含



注:不同小写字母表示不同土壤类型剪切力之间具有显著差异( $p < 0.05$ )。

图8 不同土壤类型平均黏聚力和内摩擦角

Fig. 8 Average cohesion and internal friction Angle of different soil types

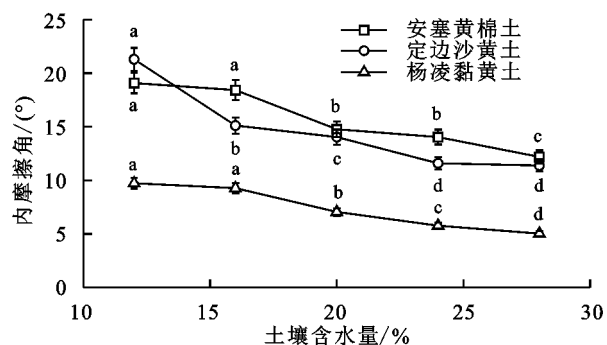
### 2.3 不同土壤类型两种仪器测定土壤抗剪强度指标间关系

本试验通过在含水量分别为12%,16%,20%,24%,28%的重塑土中分别进行十字剪切试验和直接剪切试验。对于微型十字板剪切仪测定的土壤剪切力 $\tau$ 与应变式直剪仪测定的土壤黏聚力 $c$ 及内摩擦角 $\varphi$ 进行回归分析,以期得到通过微型十字板剪切仪测定土壤剪切力从而推测土壤黏聚力及内摩擦角值。

2.3.1 3种土壤类型下土壤剪切力与黏聚力、内摩擦角的关系 图9A—C分别为3种土壤类型下,以微型十字板试验测得的剪切力值 $\tau$ 为x轴,以土壤黏聚力值 $c$ 为y轴建立的关系图。二者的线型拟合关系式如下所示:

定边沙黄土:

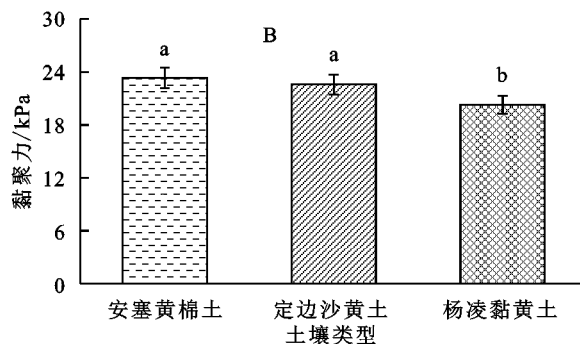
量较高,能够使得土壤颗粒之间咬合较为紧密,颗粒间滑动或滚动需要消耗的力较大,从而颗粒间摩擦力较大,因此内摩擦角大于杨凌黏黄土的内摩擦角。这一结论与赵洲等<sup>[29]</sup>的研究结论类似,小颗粒的细粒土与大颗粒的石英砂填充效果较好,颗粒间接触面积越大,颗粒间滑动或滚动运动时变位调整所需要的力就越大,颗粒间的摩擦作用增强,因此内摩擦角变大。



注:同一颜色、不同小写字母表示同一种土壤类型、不同含水量下黏聚力值之间具有显著差异( $p < 0.05$ )。

图7 3种土壤类型下内摩擦角随土壤含水量变化特征

Fig. 7 Characteristics of internal friction Angle variation with soil water content under three soil types



$$c = 4.03\tau + 5.18 \quad R^2 = 0.93 \quad p < 0.01 \quad (3)$$

安塞黄绵土:

$$c = 1.73\tau + 13.26 \quad R^2 = 0.91 \quad p < 0.01 \quad (4)$$

杨凌黏黄土:

$$c = 1.09\tau + 14.64 \quad R^2 = 0.92 \quad p < 0.01 \quad (5)$$

图9A—C及公式(3)—(5)均表明,微型十字板剪切仪测得的剪切力值 $\tau$ 与黏聚力值 $c$ 值呈正相关关系,且该关系可用线性方程很好描述。然而不同土壤类型情况下,其对应的关系式也不尽相同。质地越粗的土壤, $\tau$ - $c$ 线性关系的斜率越大,截距越小[图9,公式(3)—(5)]。其原因可能是由于土壤剪切力大小不仅取决于土壤黏聚力大小,也与不同土壤类型中各类其他因素例如土壤有机质含量、土壤颗粒级配等有关。同样,经过统计分析发现土壤剪切力与内摩擦角

并无显著相关关系(图 9D—F)。通过上述的研究及关系式表明,土壤黏聚力变化与土壤剪切力变化相关性较强,而土壤内摩擦角变化与土壤剪切力变化相关性较弱。因此在野外试验时,可以通过微型十字板剪切仪测定原状土壤的剪切力值来对土壤黏聚力进行预测,而内摩擦角的预测仍具有随机性。

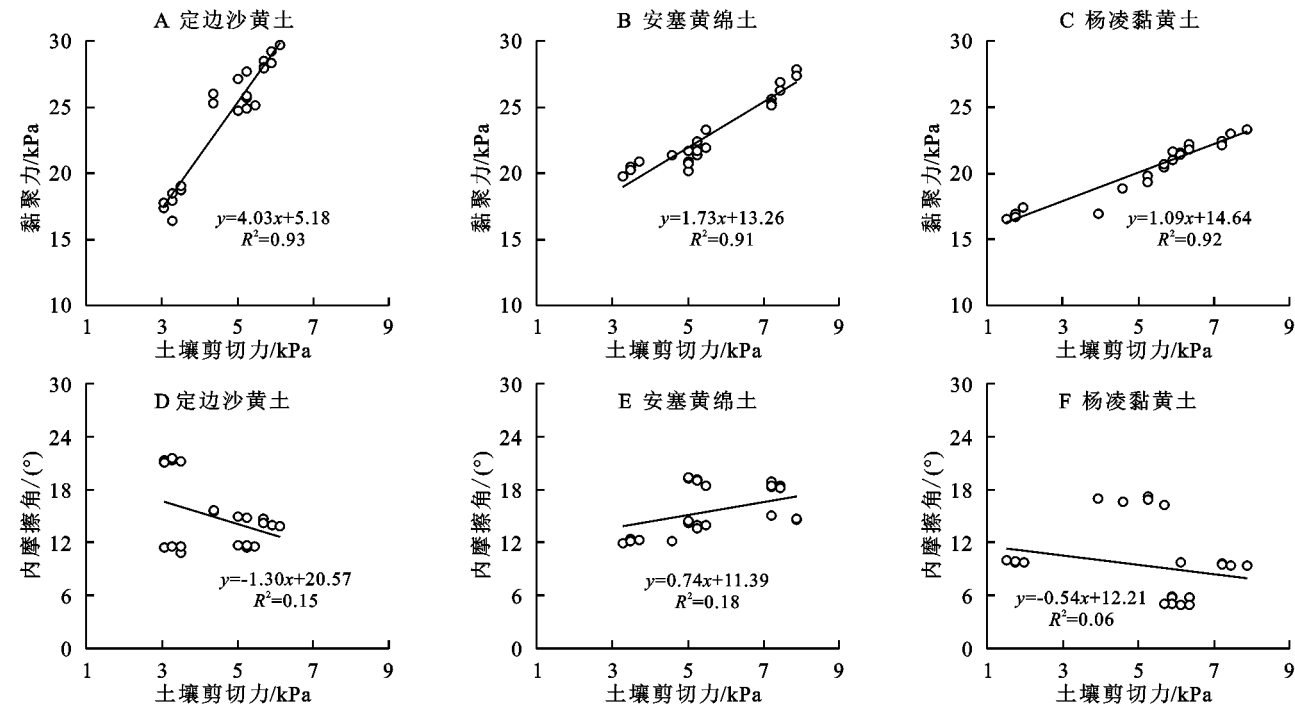


图 9 不同土壤类型土壤剪切力-黏聚力、土壤剪切力-内摩擦角相关关系

Fig. 9 Correlation between soil shear force- cohesion and soil shear force-internal friction angle in different soil types

2.3.2 不考虑土壤类型下两种仪器测定土壤抗剪强度指标间的关系 图 10 是不考虑土壤类型差异下,以微型十字板试验测得的抗剪强度值  $\tau$  为 x 轴,以土壤黏聚力值  $c$  为 y 轴建立的关系图。二者的相关关系如公式(6)所示:

$$c = 1.59\tau + 14.10 \quad R^2 = 0.51 \quad p < 0.01 \quad (6)$$

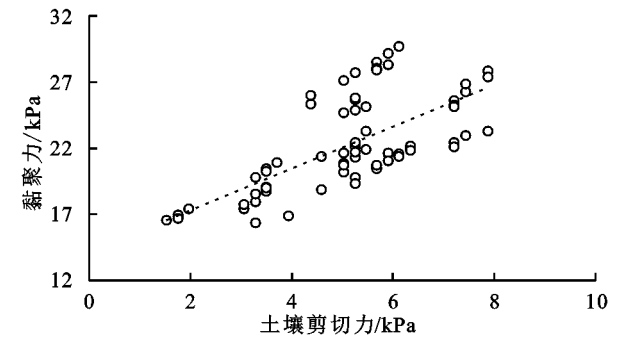


图 10 不考虑土壤类型下剪切力-黏聚力相关关系

Fig. 10 Shear force-cohesion correlation without considering soil types

图 10 和公式(6)表明用应变式直剪仪和微型十字板剪切仪测得的土壤抗剪强度指标之间( $\tau$  和  $c$ )存在显著的线性相关关系,可以用快速便捷的微型十字板仪测得的抗剪强度值高精度估算原本需用直剪仪测的土壤黏聚力值  $c$ 。研究结果对提高土壤抗剪强度测定效率具有重要意义。

3 结论

(1) 基于微型十字板剪切仪测定的土壤剪切力  $\tau$  在 1.76~7.72 kPa 范围,不同土壤类型下, $\tau$  均随含水量的增大呈现先增大后减小的趋势;3 种土壤类型下, $\tau$  从大到小为:安塞黄绵土(均值 6.05 kPa)>杨凌黏黄土(均值 5.46 kPa)>定边沙黄土(均值 4.62 kPa)。

(2) 基于应变式直剪仪测定的土壤黏聚力  $c$  在 16.88~27.12 kPa 范围,不同土壤类型下, $c$  随含水量的增大呈现先增大后减小趋势;3 种土壤类型下, $c$  值从大到小为:安塞黄绵土(均值 23.34 kPa)>定边沙黄土(均值 22.58 kPa)>杨凌黏黄土(均值 20.26 kPa)。试验条件下, $\varphi$  在 5.03°~21.30°范围,不同土壤类型下, $\varphi$  随含水量的增大呈现减小趋势;3 种土壤类型下, $\varphi$  从大到小为:安塞黄绵土(均值 15.70°)>定边沙黄土(均值 14.69°)>杨凌黏黄土(均值 7.37°)。

(3) 土壤抗剪强度值  $\tau$  与黏聚力  $c$  相关性较显著,呈线性正相关;而土壤剪切力值  $\tau$  与土壤内摩擦角  $\varphi$  无显著相关关系。本研究构建的土壤剪切力  $\tau$ -黏聚力  $c$  预测曲线: $c = 1.59\tau + 14.10 (R^2 = 0.51, p < 0.01)$ ,表明用应变式直剪仪和微型十字板剪切仪测得的土壤抗剪强度指标之间( $\tau$  和  $c$ )存在显著的线性相关关系,可以用快速便捷的微型十字板仪测得的

抗剪强度值高精度估算原本需用直剪仪测的土壤黏聚力值 $c$ 。研究结果对提高土壤抗剪强度测定效率具有重要意义。

#### 参考文献(References):

- [1] Rachman A, Anderson S H, Gantzer C J, et al. Influence of long term cropping systems on soil physical properties related to soil erodibility[J]. Soil Science Society of America Journal, 2003,67(2):637-644.
- [2] Wei Y J, Wu X L, Xia J W, et al. The effect of water content on the shear strength characteristics of granitic soils in South China[J]. Soil and Tillage Research, 2019,187:50-59.
- [3] Su X M, Zhou Z C, Liu J E, et al. The role of roots traits of climax community species to shear strength in the Loess Hilly Region, China[J]. Soil and Tillage Research, 2022,221:105417.
- [4] 郭文召,刘亚坤,徐向舟,等.水蚀风蚀交错区黄土抗剪强度敏感性分析[J].水土保持研究,2018,25(3):23-28.  
Guo W Z, Liu Y K, Xu X Z, et al. Sensitivity on shear strength of the Loess in the ecotone of wind-water erosion[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2018,25(3):23-28.
- [5] 雷洁,张国明,刘连友,等.土壤抗剪强度测定与影响因素研究进展[J].北京师范大学学报:自然科学版,2016,52(4):486-492.  
Lei J, Zhang G M, Liu L Y, et al. Measuring soil shear strength and impact factors[J]. Journal of Beijing Normal University: Natural Science, 2016,52(4):486-492.
- [6] 潘剑君.利用土壤入渗速率和土壤抗剪力确定土壤侵蚀等级[J].水土保持学报,1995(2):93-96  
Pan J J. Determination of soil erosion class using soil infiltration rate and soil shear resistance[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1995(2):93-96.
- [7] 邢书昆,张光辉,朱平宗.黄土丘陵沟壑区退耕年限对根-土复合体抗剪强度的影响[J].水土保持学报,2021,35(4):41-48,54.  
Xing S K, Zhang G H, Zhu P Z. Effects of vegetation restoration age on shear strength of root-soil system in hilly and Gully Region of the Loess Plateau[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021,35(4):41-48,54.
- [8] Yi F, Hong C, Zou X Y, et al. Shear strength of Aeolian sand sediments[J]. Transactions of the ASABE, 2018,61(2):583-590.
- [9] 姜佳豪,冯少杰,吕腾锋.浅谈土体直剪试验的缺陷及影响因素[J].科技风,2015(6):34.  
Jiang J H, Feng S J, Lv T F. Defects and influencing factors of direct shear test of soil[J]. Technology Wind, 2015(6):34.
- [10] Fasinmirin J T, Olorunfemi I E, Olakuleyin F. Strength and hydraulics characteristics variations within a tropical Alfisol in Southwestern Nigeria under different land use management[J]. Soil and Tillage Research, 2018, 182:45-56.
- [11] Horn R. Stress-strain effects in structured unsaturated soils on coupled mechanical and hydraulic processes[J]. Geoderma, 2003,116:77-88.
- [12] Khaboushan E A, Emami H, Mosaddeghi M R, et al. Estimation of unsaturated shear strength parameters using easily-available soil properties[J]. Soil and Tillage Research, 2018,184:118-127.
- [13] Mouazen A M, Ramon H, Baerdemaeker J D. Effects of bulk density and moisture content on selected mechanical properties of sandy loam soil[J]. Biosystems Engineering, 2002,83(2):217-224.
- [14] 王振红,张昆,朱泓,等.微型十字板在海洋软土中的应用[J].水利学报,2015,46(S1):205-208.  
Wang Z H, Zhang K, Zhu H, et al. Application of miniature vane in seabed soft soil[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2015,46(S1):205-208.
- [15] 刘东生.黄土的物质成分和结构[M].北京:科学出版社,1996.  
Liu D S. Material Composition and Structure of Loess [M]. Beijing: Science Press, 1996.
- [16] 罗姆他捷.砂土和黏土的物理力学性试验法[M].饶鸿雁,译.北京:人民铁道出版社,1953.  
Lomtatidze V D. Test Method for Physical and Mechanical Properties of Sands and Clays [M]. Rao H Y, Translated. Beijing: China Railway Publishing House, 1953.
- [17] Manuwa S I, Olaiya O C. Evaluation of shear strength and cone penetration resistance behavior of tropical silt loam soil under uni-axial compression[J]. Open Journal of Soil Science, 2012,2(2):95-99.
- [18] 韩鹏.关于十字板剪切强度与含水率的相关性研究[J].山西建筑,2016,42(15):79-80.  
Han P. Study on the relativity of vane shear strength and moisture content[J]. Shanxi Architecture, 2016, 42(15):79-80.
- [19] 范兴科,蒋定生,赵合理.黄土高原浅层原状土抗剪强度浅析[J].水土保持学报,1997,3(4):69-75.  
Fan X K, Jiang D S, Zhao H L. Analysis on anti-shear strength of shallow original state soil in the Loess Plateau[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1997, 3(4):69-75.
- [20] 廖建华,李丹勋,王兴奎,等.黄土高原侵蚀产沙与高含沙水流空间分异对比分析[J].自然资源学报,2010,25(1):100-111.  
Liao J H, Li D X, Wang X K, et al. Comparative analy-

- sis of spatial distribution between the specific sediment yield and the hyperconcentrated flow frequency in the Loess Plateau [J]. *Journal of Natural Resources*, 2010, 25(1):100-111.
- [21] Mitchell J K, Soga K. *Fundamentals of Soil Behavior*[M]. 3rd edition. New York: John Wiley & Sons, 2005.
- [22] 王为, 李小昱, 王转卫. 农业土壤抗剪强度的试验研究[J]. *干旱地区农业研究*, 2002, 20(1):125-127.  
Wang W, Li X Y, Wang Z W. An experimental study on the resistance to shear of agricultural soil[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2002, 20(1):125-127.
- [23] 刘洋, 王国强, 周健. 增湿条件下合肥膨胀土的强度特性[J]. *勘察科学技术*, 2004(6):17-19.  
Liu Y, Wang G Q, Zhou J. Relationship between shear strength and water content of Hefei expansive soil[J]. *Site Investigation Science and Technology*, 2004(6):17-19.
- [24] 陈红星, 李法虎, 郝仕玲等. 土壤含水率与土壤碱度对土壤抗剪强度的影响[J]. *农业工程学报*, 2007, 23(2):21-25.  
Chen H X, Li F H, Hao S L, et al. Effects of soil water content and soil sodicity on soil shearing strength[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2007, 23(2):21-25.
- [25] 罗爽, 黄选华, 高华端. 黔中喀斯特坡耕地土壤含水量对土力学性质的影响[J]. *西南农业学报*, 2020, 33(12):2879-2884.  
Luo S, Huang X H, Gao H D. Effect of soil moisture content on soil mechanical properties in Karst slope cropland of central Guizhou [J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2020, 33(12):2879-2884.
- [26] 曾召田, 潘斌, 吴昱东, 等. 土中结合水对红黏土抗剪强度特性的影响机制[J]. *地下空间与工程学报*, 2022, 18(5):1565-1572, 1579.  
Zeng Z T, Pan B, Wu Y D, et al. Influence mechanism of bound water on shear strength characteristics of lateritic clay[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2022, 18(5):1565-1572, 1579.
- [27] 李旭东, 黄雪峰, 杨佳, 等. 延安新区压实黄土抗剪强度试验研究[J]. *河北工程大学学报:自然科学版*, 2018, 35(1):19-23.  
Li X D, Huang X F, Yang J, et al. Experimental study of the shear strength of compacted loess in Yan'an new district fracture energy of concrete[J]. *Journal of Hebei University of Engineering: Natural Science Edition*, 2018, 35(1):19-23.
- [28] 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.  
Hu F N, Wei C F, Xu C Y, et al. Water sensitivity of shear strength of purple paddy soils[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013, 29(3):107-114.
- [29] 赵洲, 郑思苗, 坚亚博. 基于田口方法的砂土抗剪强度特征分析[J]. *干旱区资源与环境*, 2022, 36(1):103-110.  
Zhao Z, Zheng S M, Jian Y B. Analysis of characteristics of sand shear strength based on Taguchi method [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2022, 36(1):103-110.

(上接第204页)

- [24] 孙艳玲, 郭鹏, 延晓冬, 等. 内蒙古植被覆盖变化及其与气候、人类活动的关系[J]. *自然资源学报*, 2010, 25(3):407-414.  
Sun Y L, Guo P, Yan X D, et al. Dynamics of vegetation cover and its relationship with climate change and human activities in Inner Mongolia [J]. *Journal of Natural Resources*, 2010, 25(3):407-414.
- [25] 张清雨, 吴绍洪, 赵东升, 等. 内蒙古草地生长季植被变化对气候因子的响应[J]. *自然资源学报*, 2013, 28(5):754-764.  
Zhang Q Y, Wu S H, Zhao D S, et al. Responses of growing season vegetation changes to climatic factors in Inner Mongolia grassland [J]. *Journal of Natural Resources*, 2013, 28(5):754-764.
- [26] 邹慧, 高光耀, 傅伯杰. 干旱半干旱草地生态系统与土壤水分关系研究进展[J]. *生态学报*, 2016, 36(11):3127-3136.  
Zou H, Gao G Y, Fu B J. The relationship between grassland ecosystem and soil water in arid and semiarid areas: A review [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(11):3127-3136.