

# 石匣小流域整地措施对土壤剪切性质的影响

潘欣<sup>1,2</sup>, 王云琦<sup>1,2</sup>, 高勇<sup>3</sup>, 宋伯岩<sup>3</sup>, 朱楠<sup>1,2</sup>, 歌丽巴<sup>1,2</sup>

(1. 北京林业大学, 水土保持与荒漠化防治教育部重点实验室, 北京 100083; 2. 北京林业大学, 北京市水土保持工程技术研究中心, 北京 100083; 3. 密云县水土保持工作站, 北京 101500)

**摘要:** 为了解坡面整地措施对坡体稳定性的影响和土壤物理性质对土壤抗剪强度的差异性, 选取石匣小流域4个标准样地, 通过测量多个土壤物理性质指标(土壤容重、土壤含水率、总孔隙度、毛管孔隙度、非毛管孔隙度、紧实度和液限), 研究不同坡面整地措施的土壤临界剪切力随深度的变化, 以及土壤抗剪切破坏能力的强弱关系和影响因素。结果表明: 原状土的临界剪切力随深度的增加而增加; 通过库伦公式得出的土壤抗剪强度与土壤临界剪切力的回归方程为  $\sigma = 0.0123\tau_f + 0.6308$ 。土壤物理性质对抗剪强度的影响不同, 紧实度、容重与含水率对抗剪强度的影响相对较大。对于不同的坡面整地措施, 土壤抗剪切能力强弱顺序为梯田>水平条>裸地, 其中, 在水平条上种植针叶树, 土壤抗剪切能力优于种植阔叶树。在北京石匣地区, 布设坡面整地措施时, 需因地制宜地增加田面宽度, 并种植针阔混交林以增加土壤抗剪强度。

**关键词:** 土壤剪切力; 土壤抗剪强度; 土壤物理性质

**中图分类号:** S157.2; 157.3

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1009-2242(2016)06-0314-05

**DOI:** 10.13870/j.cnki.stbcxb.2016.06.052

## Effects of Engineering Measures on Soil Shear Characteristics in Shixia Small Watershed

PAN Xin<sup>1,2</sup>, WANG Yunqi<sup>1,2</sup>, GAO Yong<sup>3</sup>, SONG Boyan<sup>3</sup>, ZHU Nan<sup>1,2</sup>, GE Liba<sup>1,2</sup>

(1. Beijing Forestry University, Key Laboratory of Soil and Water Conservation and Desertification Combating, Ministry of Education, Beijing 100083; 2. Beijing Forestry University, Soil and Water Conservation of Beijing

Engineering Research Center, Beijing 100083; 3. Soil and Water Conservation Workstation of Miyun County, Beijing 101500)

**Abstract:** Shixia Basin is located at north of Miyun Reservoir, which is the first level nature reserve as well as an important water source of Beijing area, but suffering from serious soil erosion and debris flow. Slope engineering measures may decrease soil loss of the slope, accumulate aggregates, and increase slope stability. Terrace and horizontal bar are two kinds of engineering measures well adopted in Beijing area. To investigate the effects of engineering measures on slope stability, and understand the effects of soil physical properties (soil bulk density, soil moisture, total porosity, capillary porosity, non-capillary porosity, firmness and liquid limit) on soil shear strength, the changes of soil shear force with depth under different engineering measures, soil shear characteristics and the affecting factors were studied. The results showed that soil critical shear force increased with soil depth. The relationship between soil shear strength calculated by Coulomb formula and soil critical shear force measured in situ fitted with the equation:  $\sigma = 0.0123\tau_f + 0.6308$ . Cohesion and angle of internal friction on and down the channel of irrigation differed slightly, but shear strength differed significantly. The effects of soil physical characteristics varied, among which soil compaction, volume-weight and moisture content had the most significant effects. The anti-shear ability ranked as follows: terrace>horizontal bars>bare land, and the anti-shear ability of the horizontal bars with conifer was better than the one with deciduous trees. In the area of Miyun, Beijing, when carrying out engineering measures, it is important to increase the width of terrace, and establish mingled forest of conifers and deciduous trees.

**Keywords:** soil critical shear force; soil shear strength; soil physical properties

收稿日期: 2016-07-23

资助项目: 国家林业公益性行业科研专项“基于生态安全的水土保持措施空间配置技术”(201404209); 北京市教育委共建项目“北京山区生态风险监测与评估技术研究”

第一作者: 潘欣(1991—), 女, 硕士研究生, 主要从事水土保持研究。E-mail: panxin@bjfu.edu.cn

通信作者: 王云琦(1978—), 女, 博士, 教授, 主要从事林业生态工程和水土保持研究。E-mail: wangyunqi@bjfu.edu.cn

石匣小流域位于密云水库北岸,是密云水库一级保护区,也是北京地区重要水源,但其存在严重的土壤侵蚀和滑坡,严重威胁到山区人民的生命财产安全<sup>[1]</sup>。坡面整地是防治土壤侵蚀、减少滑坡泥石流的重要水土保持措施之一。通过坡面整地,减轻坡面水流对表层物质冲刷,增加团聚体含量,使表层土体稳定性提高,浅表层土体不易失稳。梯田和水平条作为北京山区造林整地和坡面治理措施被广泛采用,且治理效果较好<sup>[2-3]</sup>。土壤抗剪强度是土体抵抗剪切破坏的极限强度,其大小反应了土体在外力作用下发生剪切破坏的难易程度<sup>[4]</sup>。土壤的类型、结构、含水率、孔隙度等因素都会影响基质吸力、孔隙水压力等<sup>[5-8]</sup>,从而对土壤抗剪强度产生影响。然而在同一区域内,土壤类型、结构并无太大差别,因此土壤孔隙度、含水率等因素则成为主要原因。土壤性质与抗剪强度的关系研究表明,存在一个最适含水率使土壤抗剪强度最大,过大或过小抗剪强度都会降低<sup>[4,9-10]</sup>。植物根系有改变土壤抗剪强度、防止浅层滑坡和固持水土的功能,不同类型植物根系产生的固持作用有所区别<sup>[11-12]</sup>。关于梯田和水平条的防蚀功能研究表明,坡面整地措施可影响土壤容重、孔隙度、含水率等性质<sup>[13-16]</sup>,但并未证明土壤抗剪强度如何受到影响。

水土保持坡面工程措施是小流域水土保持综合治理措施的重要组成部分,北京密云石匣试验区位于石匣小流域中心示范区内,其土壤条件、气候特征均代表了密云水库库区范围内的情况<sup>[17]</sup>。本文以北京密云石匣小流域的 2 种坡面整地措施梯田和水平条为例,分析影响土壤抗剪强度的影响因素。通过野外调查,对不同深度的土壤临界剪切力等性质展开研究,进一步观察这些因素对土壤剪切性能的作用,从而得出坡面整地措施对抗剪强度的影响,为比较相应措施的坡体稳定性打下基础,也为北京山区生态安全的研究提供一定的理论依据,对于水土侵蚀严重的地区具有指示作用。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况

密云石匣小流域地处北京市北部山区(117°01′—117°07′E,43°32′—42°38′N)。该流域主要为土石浅山丘陵区,地势北高南低,海拔 150~390 m,沟壑密度 0.2 km/km<sup>2</sup>,坡面平缓,>20°的坡面仅占流域面积的 16.2%<sup>[17]</sup>。土壤类型为洪、冲积物母质上发育的淋溶褐土,质地为轻壤。

按照坡度坡向接近、水热条件相似、位置集中的原则,研究选取北京山区较为常见的坡面整地措施:梯田(种植板栗,宽 4 m)、水平条(种植板栗,宽 1 m)、水平条(种植圆柏,宽 1 m)、裸地等 4 个标准样

地(10 m×5 m)(表 1)。选取不同沟距的水平条目的在于评估各项指标,比较得出较优化的水平条配置方式。试验地以经济林为主,主要种植板栗,优势种为刺槐和圆柏,选择试验地时为考虑田面宽度与植物的影响,选择种植板栗且树龄相近、长势旺盛的梯田和水平条,以及田面宽度相同但分别种植板栗和圆柏的水平条。板栗和圆柏均种植于 20 世纪 90 年代末,板栗株间距为 2 m,圆柏株间距为 1.7 m。梯田和裸地选取上、中、下 3 个坡位进行测量;对于水平条,还设置了埂下和埂上 2 个细部(区别为有种植木本植物或仅有杂草)进行测量。样点选择在每个坡位上进行“S”型布点,保证距离均匀,采样结果互相不受影响。因该地区土层较薄,设定测量深度均为 30 cm。

表 1 整地措施坡面基本情况和采样点

整地措施	坡长/m	坡度°	坡向	采样区位
无(裸地)	10	14°38′	半阳坡	坡上、坡中、坡下
梯田(种植板栗,宽 4 m)	10	14°38′	阳坡	坡上、坡中、
水平条(种植板栗,宽 1 m)	10	14°38′	半阳坡	坡下以及埂上、埂下
水平条(种植圆柏,宽 1 m)	10	14°38′	半阳坡	

### 1.2 试验设备及其方法

测定原位土壤临界剪切力,采用 14.05 型土壤剪切力测定仪进行十字板剪切试验。该仪器可测量深度 1 m 以内,测量量程为 0~260 kPa,精度 0.01 kPa<sup>[18]</sup>。测定不同整地措施下每 10 cm 深度的土壤临界剪切力,重复测量 10 次,取平均值。测定重塑土的黏聚力和内摩擦角,按照土工试验方法标准(GB/T 50123),采用 ZJ 型应变控制式直剪仪,制备与采样土相等含水率的土样,分别施加 100,200,300,400 kPa 的法向应力进行固结快剪试验,剪切速率控制在 0.4 mm/min,记录抗剪强度峰值,并利用库仑公式计算黏聚力和内摩擦角。

土壤紧实度( $N$ )又叫做土壤硬度,是指土壤抵抗外力的压实和破碎的能力,是土壤重要的物理性质之一<sup>[19]</sup>,用金属柱塞或探针压入土壤时的阻力(Pa)表示。采用 TJSD-750-II 型土壤紧实度仪,于每 2.5 cm 深度测量土壤紧实度。土壤液限可按照碟式液限仪标准(GB 7961—87),采用 DSY 型碟式液限仪进行测量。该仪器击打速度 2 次/s,可测定不同含水率下土样的击数,并依此计算出液限。

将装有湿土的环刀揭去上底盖,仅留填有滤纸的有网眼的下底盖,放入平底方形塑料盆(盆高 15 cm)中,注入并保持盆中水层的高度至环刀上沿为止,使其吸水达 12 h,盖上上、下底盖,水平取出后,环刀去掉底盖,将其放置在铺有干沙的平底方形塑料盆中 2 h,盖上底盖,立即称重,即可算出毛管持水量(%/mm)和非毛管孔隙。利用环刀法计算出土壤容重,从而得出总孔隙和毛管孔隙。另外,利用环刀法测量

土壤容重,烘干法测量土壤自然含水率。

### 1.3 土壤抗剪强度理论

土壤抗剪强度是指土壤在剪切力下抵抗剪切破坏的能力,其指标主要包括内摩擦角  $\varphi$  与黏聚力  $c$  两项,由库伦(Coulomb)提出的摩尔-库伦强度理论可知,在破坏面上的剪应力  $\tau_f$  是法向应力  $\sigma$  的函数:

$$\tau_f = f(\sigma) = \sigma \tan \varphi + c$$

式中: $\tau_f$  为抗剪强度(kPa); $\sigma$  为作用在剪切面上的法向应力(kPa); $\varphi$  为土的内摩擦角( $^\circ$ ); $c$  为土的黏聚力(kPa)。

## 2 结果与分析

### 2.1 抗剪破坏特性分析

2.1.1 剪切力特征 在同一坡面整地措施下,临界剪切力随土壤深度增加而加大(图 1)。取各个坡面整地措施下土壤临界剪切力的实测值与土壤深度进行回归分析,两者之间线性回归方程为:

$$\tau_f = 5.216H - 28.76 (R^2 = 0.901, n = 54) \quad (1)$$

式中: $\tau_f$  为临界剪切力(kPa); $H$  为土壤深度(cm)。

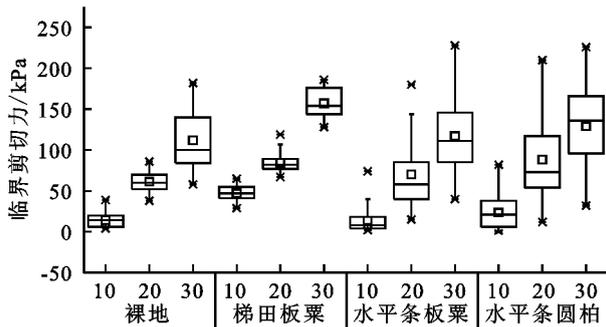


图 1 不同坡面整地措施临界剪切力随深度的变化

计算各个措施在不同深度的平均临界剪切力结果为:裸地 62.56 kPa,梯田 96.13 kPa,水平条板栗 67.04 kPa,水平条圆柏 80.31 kPa,因此梯田的抗剪切性能最优。

经统计,4种坡面整地措施的临界剪切力分布均近似服从正态分布,则可进行差异显著性检验,得到表 2 结果,显著水平  $\alpha = 0.05$  时  $t_{0.05} = 1.960$ ,因此不同整地措施对临界剪切力的影响在统计上是显著的。

结合图 1 和表 2 的结果,不难发现随着土壤深度的增加,抵抗剪切破坏的能力加强,且梯田的临界土壤剪接力高于水平条,而水平条组中,种植圆柏的水平条抗剪切效果优于种植板栗的水平条。由于梯田田面宽度大于水平条,所生长植物根系分布均匀,促进土壤水分保持。而种植针叶树圆柏的水平条与种植阔叶树板栗的水平条抗剪强度有很大区别的原因在于,针叶树和阔叶树对土壤临界剪切力的影响不同。针叶树的根系强度大于阔叶树根系<sup>[20]</sup>,在发生剪切破坏时,土体本身被破坏后,抗剪能力的主要来源为植物根系,而针叶树根系的抗剪能力强于阔叶

树。这可能是因为针叶树根系纤维素含量较多,而阔叶树根系木质素含量多,使得针叶树根系抗拉性能优于阔叶树根系,但抗弯性能弱于阔叶树根系。作为对照组的裸地表现出较好抗剪性能,是因为在无植物条件下,土壤硬化,沙质土壤的透水能力下降较慢,同时由于保水作用土壤下部的的水分较多,也使土壤保留部分抗剪能力。在野外进行实测临界剪切力时,需要考虑到根系对土壤性质的改良作用,土壤会相对变得疏松多孔,渗水、透气性能均有提高,在发生剪切位移时,有植物根系的土壤抗剪强度较大。

表 2 整地措施下临界剪切力差异显著性检验结果

显著性 t	裸地	梯田	水平条板栗	水平条圆柏
裸地	—			
梯田	32.07	—		
水平条板栗	5.06	32.42	—	
水平条圆柏	18.47	16.31	20.02	—

单独对水平条埂上和埂下临界剪切力进行对比(图 2),可发现埂下临界剪切力大于埂上。埂上仅生长杂草,埂下生长树和杂草,这对土壤结构的影响有所不同:埂上的抗剪能力远小于埂下,这是由于埂上的土壤缺乏木本根系固持,水分大多数被植物根系吸收,含水量低,且被草本植物根系及其残体占据,土壤的孔隙度增加,土壤蒸发加剧,因此抗剪能力最低。

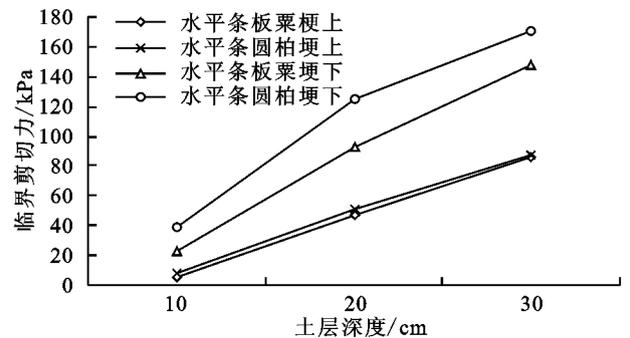


图 2 水平条临界剪切力随土层深度的变化

2.1.2 土壤抗剪强度特征 该地区的土壤黏聚力基本接近 0(图 3)。因土壤为沙壤土,土壤粘性颗粒所占比例小,因此黏聚力在 0~3 kPa 范围内,土壤通气性好,保水力差,即便有坡面措施和植被根系的作用,也无法改变该性质。对于内摩擦角来说,由于种植板栗的梯田和水平条中,板栗根系发达,在土壤比较浅的山地根系水平分布很广,小根多,增加非毛管孔隙,有效提高土壤入渗能力。在黏聚力和内摩擦角方面,水平条埂上与埂下的区别不大。

2.1.3 临界剪切力与抗剪强度指标关系研究 土壤临界剪切力与抗剪强度对比可知:在同种坡面整地措施下,土壤临界剪切力与土壤黏聚力相关性不大,主要因为该地区土壤黏聚力基本为 0,而内摩擦角在受到植物根系及其他土壤生物的影响,变化很大,从而

影响土壤抗剪强度。利用库仑公式计算石匣不同坡面整地措施不同土壤深度的抗剪强度值,并取各措施下抗剪强度与临界剪切力随土壤深度变化的值进行回归分析,得出两者间的线性回归方程为:

$$\sigma = 0.0123\tau_f + 0.6308 (R^2 = 0.8899, n = 54)$$

式中: $\tau_f$ 为临界剪切力(kPa); $\sigma$ 为抗剪强度(kPa)。

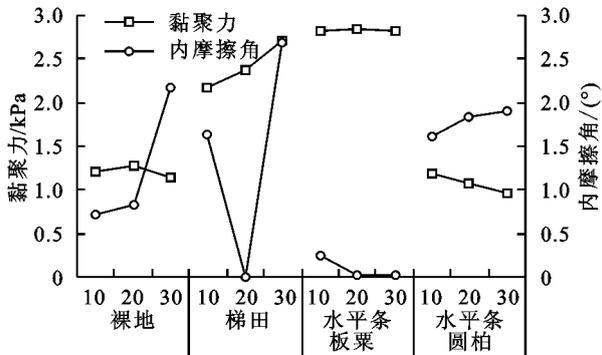


图 3 不同坡面整地措施土壤抗剪强度指标

通过公式(2),可以在野外利用 14.05 型土壤剪切力测定仪所测得的土壤剪切力估测该土壤的平均抗剪强度,从而较准确且快速确定土壤抗剪能力的强弱。

## 2.2 土壤临界剪切力影响因素分析

土壤临界剪切力受到多种土壤物理性质的影响,包括土壤孔隙度和含水率等,这些因素对土壤临界剪切力的影响程度有所不同。现将试验所得出的不同措施下土壤临界剪切力与土壤物理性质指标进行相关性分析(表 3)。可知容重越大,抗剪切破坏的能力

表 3 不同坡面整地措施土壤临界剪切力与土壤物理性质指标的相关性分析

土壤物理性质指标	裸地	梯田	水平条板栗埂上	水平条板栗埂下	水平条圆柏埂上	水平条圆柏埂下
土壤容重	0.47	0.32	0.51	0.04	0.62*	0.83**
土壤含水率	0.59	0.21	0.31	0.12	0.15	0.44
总孔隙度	0.22	-0.48	0.33	0.05	-0.87**	0.7*
毛管孔隙度	0.02	0.11	0.31	0.14	0.18	-0.6*
非毛管孔隙度	0.13	-0.8	0.02	-0.38	-0.88**	0.11
紧实度	0.93**	0.63*	0.87**	0.84**	0.29	0.84**
液限	-0.03	-0.92**	-0.18	0.01	-0.36	-0.77*

注:表中\*和\*\*分别表示 $P < 0.05$ 和 $P < 0.01$ 。

液限可以反映土壤从塑态变为液态时含水量的情况,侧面反映了土体的软硬程度,土壤液限越高,抗剪性能越差,即稠度越高临界剪切力越小(表 3)。而液限对土壤抗剪强度的影响主要在于黏聚力,在该地区土壤黏聚力基本为 0,液限的不同主要集中于对基质吸力的影响。含水率低时,抗剪强度主要由基质吸力引起,而含水量增大到一定程度后,由于土壤颗粒周围水膜厚度增加,水膜对土壤颗粒的黏结力减小,土壤颗粒产生位移,摩擦力降低,更易于滑动,抗剪强度降低。

## 3 讨论

### 3.1 临界剪切力与土壤抗剪强度

不同坡面整地措施下,土壤临界剪切力与土壤抗剪强度成明显的线性关系。3 种整地措施中,种植板栗水平条的临界剪切力较小,整地措施上的植物主要

越强,但孔隙度对临界剪切力的影响却不一致,因为土壤孔隙度在植物生长过程中逐渐增大。孔隙主要受根系影响,裸地、水平条埂上的植物生长少,因此土壤孔隙受影响小。水平条埂上孔隙度与临界剪切力的相关性更强,是因为该位置土壤容重相对偏低,受植物根系影响程度弱;而埂下土壤内含有大量根系,增加孔隙度,降低土体临界剪切力。在此种条件下,植物虽得以生长旺盛,但抵抗剪切破坏能力低。

含水率对抗剪强度有较大影响,因该地区土壤为沙质土,其黏聚力极小,但含水率较高时,土壤内水一气系统对周围土壤颗粒的基质吸力较大,随着含水率的降低,土壤颗粒周围的基质吸力逐渐减小,对其牵引力也降低。不同坡面整地措施下,土壤含水率对土壤临界剪切力影响较为明显。裸地土壤含水率较低,临界剪切力也较其他布设坡面整地措施的地块低;相反,水平条埂下的含水率较其他地块高,其中植物根系对浅层土壤的水分含量和分布都有改良作用,促进水分蓄积。

紧实度高的土壤,其水分入渗能力受限,土壤含水量因此降低,抗剪强度有所提高(表 3),但二者并不完全等同。土壤抗剪强度是表征土壤紧实度的因素之一,在剪切力作用以外,还有压力、摩擦力等的作用,因此土壤抗剪强度与紧实度有正相关关系,但不能粗略地用紧实度来表征抗剪强度。

受浅层土壤影响,田面宽度增加有利于植物根系伸展。虽然植物根系破坏土体本身的稳定性,其与土体结合反而增加土壤抗剪性能,这与 Comino 等<sup>[12]</sup>的研究相一致。植物对土体抗剪切的作用主要分为木本植物和草本植物两种,木本植物根系与土壤融为一体,产生“锚固”作用,根系越深该作用越强;草本植物存在于土壤浅层,产生“加筋”作用,可增加黏聚力<sup>[21]</sup>,但是研究地区沙性土的黏聚力十分低,草本植物增加抗剪强度的作用不明显。木本植物中,阔叶树种根系在土壤类型相同的情况下抗剪切能力不如针叶树种,因此需要在经济发展的基础上可考虑针阔混交的方式进行种植。北京石匣地区的坡面整地措施应适当增加田面宽度,以保证植物根系充分发挥作用。在其他研究中,大多数都采取经验参数对当地的梯田和水平条宽度进行

设置,但是在坡体稳定和土方搬运量合理的前提下,尽可能增加田面宽度<sup>[22]</sup>,土壤临界剪切力也相应增加。

### 3.2 土壤剪切特性影响因素

土壤抗剪强度的影响因素中,土壤紧实度、土壤容重和土壤含水率影响程度依次递减,均呈正相关关系,这与黄琨等<sup>[23]</sup>的研究相一致。对土壤剪切特性的影响因素大体可分为2类:一类是土壤物理性质,包括土粒级配、容重、结构、含水率等;另一类是孔隙水压力,其取决于试验过程中是否将孔隙水排出。因此,若在进行土壤抗剪强度测定试验时,条件不同影响孔隙水压力的排出,导致试验结果不准确。而上述3个因素都属于第一类影响因素,为了保证本次试验中为测量原位土的抗剪强度,采取土壤含水率与试验地原状土相同的条件进行试验。在进行评价土壤抗剪性能时,需要结合当地土壤条件与工程措施,并明确土壤中是否含有其他物质,如死亡根系、有机材料、微生物等。在坡面整地措施布设时,应当结合可种植的乡土树种分析土壤容重、含水率、紧实度等物理性质,使该处土壤在整地后抗剪强度和自身临界剪切力都达到最优,这样才能充分发挥坡面整地的有效性。

## 4 结论

在北京石匣地区,原状土的临界剪切力随土壤深度的增加而增加,对于不同的坡面整地措施土壤,其抗剪能力强弱顺序为梯田>水平条圆柏>水平条板栗>裸地。土壤临界剪切力与土壤抗剪强度呈正相关的线性关系,其回归方程为: $\sigma = 0.0123\tau_f + 0.6308$ 。水平条埂下临界剪切力大于埂上,但在黏聚力和内摩擦角方面,埂上与埂下的区别不大。不同土壤物理性质对不同林地土壤抵抗剪切破坏能力的影响不同,且影响能力有差异,其中紧实度、容重和含水率的影响最大。在该地区布设坡面整地措施时,需因地制宜地增加田面宽度,并种植包含当地树种的针阔混交林增加土壤抗剪强度。

### 参考文献:

- [1] 符素华,吴敬东,段淑怀,等.北京密云石匣小流域水土保持措施对土壤侵蚀的影响研究[J].水土保持学报,2001,15(2):21-24.
- [2] 肖雨琳,魏欣,刘宝元,等.北京山区果园水平阶整地措施的水土保持效益[J].中国水土保持科学,2013,11(6):81-86.
- [3] 樊登兴.北京山区坡面土壤侵蚀响应特征及模型模拟研究[D].北京:北京林业大学,2014.
- [4] 马云,何丙辉,刘益军.土壤含水量对浅层滑坡区土体抗剪强度影响[J].亚热带水土保持,2009,21(3):8-11,20.
- [5] Lee S J, Lee S R, Kim Y S. An approach to estimate unsaturated shear strength using artificial neural network

and hyperbolic formulation[J]. Computers and Geotechnics, 2003, 30(6):489-503.

- [6] Melinda F, Rahardjo H, Han K K. Shear strength of compacted soil under infiltration condition[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2004, 130(8):807-817.
- [7] Tony L T Zhan, Charles W W Ng. Shear strength characteristics of an unsaturated expansive clay[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2006, 43(7):751-763.
- [8] Wang G H, Sassa K, Fukuoka H. Experimental study on the shearing behavior of saturated silty soils based on ring-shear tests[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2007, 133(3):319-333.
- [9] Cokca E, Erol O, Armangil F. Effects of compaction moisture content on the shear strength of an unsaturated clay[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2004, 22(2):285-297.
- [10] 陈高峰,石丙飞,黄志怀,等.含水率对非饱和土抗剪强度影响试验研究[C].第九届全国工程地质大会论文集,青岛:中国地质学会工程地质专业委员会,2012:127-131.
- [11] Bischetta G B, Chiaradia E A, Agostino V D, et al. Quantifying the effect of brush layering on slope stability[J]. Ecological Engineering, 2010, 36(3):258-264.
- [12] Comino E, Druetta A. The effect of Poaceae roots on the shear strength of soils in the Italian alpine environment[J]. Soil and Tillage Research, 2010, 106(2):194-201.
- [13] 连纲,郭旭东,傅伯杰,等.黄土高原小流域土壤容重及水分空间变异特征[J].生态学报,2006,26(3):647-654.
- [14] 张杰.降雨条件下边坡入渗及稳定性的影响因子分析[D].杭州:浙江大学,2014.
- [15] 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[J].农业工程学报,2006,22(3):40-45.
- [16] 于国强,李占斌,张茂省,等.水土保持措施对黄土高原小流域重力侵蚀的调控机理研究[J].土壤学报,2012,49(4):646-654.
- [17] 蔡新广.石匣小流域水土保持措施蓄水保土效益试验研究[J].资源科学,2004,26(增刊):144-150.
- [18] 徐小明,杨鸿钧.关于十字板剪切试验成果分析中主要问题的探讨[J].港工技术,2012,49(4):71-73.
- [19] 孙丽娟,冯健.土壤紧实度仪校准方法研究[J].农业开发与装备,2015(8):47-48.
- [20] 李云鹏,张会兰,王玉杰,等.针叶与阔叶树根系对土壤抗剪强度及坡体稳定性的影响[J].水土保持通报,2014,34(1):40-45.
- [21] 毛伶俐.生态护坡中植被根系的力学分析[D].武汉:武汉理工大学,2007.
- [22] 王海雯.水平沟措施水土保持作用机理与适宜性研究[D].重庆:西南交通大学,2008.
- [23] 黄琨,万军伟,陈刚,等.非饱和土的抗剪强度与含水率关系的试验研究[J].岩土力学,2012,33(9):2600-2604.