

# 不同土地利用方式土壤抗剪强度及其影响因子分析

李 想, 王 瑄, 盛世博, 陈志强

(沈阳农业大学水利学院, 沈阳 110161)

**摘要:** 通过野外调查与室内试验相结合的方法, 对比分析不同土地利用方式土壤抗剪强度及其与影响因子的关系, 以期为研究区域不同土地利用方式水土流失评价提供一定科学依据。选取针阔混交林、灌木林、园地、坡耕地、荒地 5 种土地利用方式, 观测土壤抗剪强度指标、容重、含水率、干密度、总孔隙度、土壤团聚体 MWD 值、粉/黏粒值, 运用灰色关联法分析影响土壤抗剪强度的因素。结果表明: 同一种土地利用方式土壤黏聚力从坡上到坡下逐渐减小; 不同土地利用方式土壤抗剪强度大小顺序为: 坡耕地>园地>针阔混交林>荒地>灌木林; 土壤容重与土壤黏聚力  $C$  和内摩擦角  $\varphi$  的关联度最大, 湿筛 MWD 值与土壤黏聚力  $C$  和内摩擦角  $\varphi$  的关联度最小; 土壤抗剪强度分别与土壤容重、总孔隙度、含水率以及干密度呈线性关系。

**关键词:** 内摩擦角; 黏聚力; 土壤抗剪强度; 灰色关联法

**中图分类号:** S157.9

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1009-2242(2016)05-0102-05

**DOI:** 10.13870/j.cnki.stbcxb.2016.05.017

## Analysis of Soil Shear Strength under Different Land Use Patterns and Its Principal Influence Factors

LI Xiang, WANG Xuan, SHENG Shibo, CHEN Zhiqiang

(College of Water Conservancy, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110161)

**Abstract:** With field survey and laboratory experiment, the relationship between the shear strength under different land uses and its influential factors were studied to provide a scientific basis for different land use assessment of regional soil erosion. Five land use patterns, i. e. conifer-broadleaf mixed forests, shrubs lands, gardens, slope farmlands, wastelands were selected as samples to conduct observations upon these values: The soil shear strength index, bulk density, moisture content and dry density, as well as the porosity, MWD of soil aggregate and clay/silt value. Then the influential factors were analyzed with the method of the grey correlation, and the results revealed that the soil cohesion on a same slope gradually decreased from the higher parts to the lower ones under the same land use pattern. Meanwhile, the shear strength, in different lands, changed like this: sloping farmlands>gardens>conifer-broadleaf mixed forests>wastelands>shrubs lands. Finally, the soil bulk density had the greatest correlations with the soil cohesion ( $C$ ) and internal friction angle ( $\varphi$ ), while the MWD had smallest correlations with them. To sum up, there were linear relations between the soil shear strength and soil bulk density, total porosity, moisture content and dry density respectively.

**Keywords:** the internal friction angle; cohesion; the soil shear strength; grey correlation method

土壤抗剪强度是由土粒间发生相对滑动而产生的摩擦力和颗粒间胶结作用以及电子吸引微小颗粒所产生的黏聚力构成<sup>[1]</sup>。内摩擦角和黏聚力作为土壤的抗剪强度指标是决定土壤抗剪强度大小的主要内在因素。因此, 对土壤抗剪强度的研究一般分为土壤黏聚力和内摩擦角的研究。土壤的抗剪强度常用于计算建筑物地基强度和保持边坡土体稳定性等重要方面, 也是定量土壤抗蚀性的重要指标应用于区域水土流失评价<sup>[2]</sup>。土体的结构、密度和含水量等因素都与土壤的抗剪强度指标有很大联系<sup>[3]</sup>, 王云琦等<sup>[4]</sup>

认为对内摩擦角影响最大的是土壤机械组成分维和微团聚体组成分维, 机械组成分维对黏聚力的影响最大。江浩浩等<sup>[5]</sup>指出随着含水率的增加, 土壤抗剪强度及其指标(黏聚力和内摩擦角)基本呈现先增大后减小的趋势。Xiong 等<sup>[6]</sup>表明土壤水分状态和密度状态对重塑非饱和粘性土抗剪强度参数的影响是有规律的, 但不容易通过简单的函数来表示。李云鹏等<sup>[7]</sup>认为在楠竹林中土壤孔隙度是影响土壤剪切力的主要因素, 在常绿阔叶林中则是土壤含水率。齐娜等<sup>[8]</sup>研究表明土壤黏聚力决定相同林地类型不同层

收稿日期: 2016-03-25

资助项目: 辽宁省自然科学基金(201102193)

第一作者: 李想(1991—), 女, 在读研究生, 主要从事水土保持与荒漠化防治研究。E-mail: 768998244@qq.com

通信作者: 王瑄(1965—), 女, 博士, 教授, 主要从事土壤侵蚀研究。E-mail: xuanw11@163.com

次土壤抗剪强度大小;不同林地类型同一层次土壤抗剪强度大小受含水率、土壤结构多种因素的综合影响。吴发启等<sup>[9]</sup>认为含水量、坡度和雨强对黄土区坡耕地表层土壤抗剪强度有综合影响。钟茫<sup>[10]</sup>指出在紫色土区,土壤力学特性有别于其它类型土壤,并提出含水率和颗粒组成是影响紫色土抗剪强度的主要因素。综上所述,目前土壤抗剪强度的研究集中于同一土地利用方式内土壤含水率和土壤结构对抗剪强度指标的影响,并研究土壤抗剪强度垂直分布规律,对于不同土地利用方式,土壤抗剪强度的研究较少,本文设定不同的土地利用方式,对比分析坡面土壤抗剪强度的变化规律以及影响因素,以便为该区域坡地不同土地利用方

表 1 不同土地利用方式代表性样地基本情况

土地利用类型	海拔/ m	坡向	坡度/ (°)	龄级	植被 状况	地被物 盖度/%	枯落物 厚度/cm	土壤侵蚀模数/ (t·km <sup>-2</sup> ·a <sup>-1</sup> )
针阔混交林	182	阳坡	10	Ⅵ	油松、蒙古栎、辽东栎、花曲柳等	75	3.2	1020
灌木林	173	阳坡	9	Ⅵ	胡枝子、榛子、接骨木和花木兰等	80	4.2	1130
园地	160	阳坡	10	Ⅴ	柞树	70	2.8	1320
坡耕地	161	阳坡	11		种植玉米			1840
荒地	176	阳坡	9		蒿类和苔草类为主	85		1250

1.2 试验设计

2015 年 7 月在沈阳市天柱山区域,对 5 种土地利用方式进行分别采样,取样坡面分为上、中、下(Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ)3 个部位,坡上、坡中、坡下之间的距离设定为 10 m,共 15 个取样点,用 61.8 mm×20 mm 环刀在每个取样点取 4 份原状土,选取 1—20 cm 之间的土层,共计 60 个土样,同时,用铝盒在 15 个取样点分别取土壤,每个取样点进行 3 次重复取样。按照土工实验方法(GB/T 50123)标准,采用 ZJ-2 型等应变直剪仪进行(15 s/转)快剪试验,剪切时用 50,150,200,250 kPa 4 种垂直压力,对每一小组试样进行剪切试验后,可以得到 4 个不同垂直压力下的相应剪应力,作出抗剪强度与垂直压力的关系图,根据库伦公式求得黏聚力 C 和内摩擦角 φ。

$$\tau_f = \sigma \tan \varphi + C$$

(1)

式中:τ<sub>f</sub> 为土体抗剪强度(kPa);σ 为作用在剪切面上的法向应力(kPa);φ 为土壤内摩擦角(°);C 为土壤黏聚力(kPa)。

用环刀法测得土壤容重、干密度、总孔隙度,烘箱法测定含水率,将各铝盒取样的土壤带回实验室,进行风干,当样品稍干时,挑去石块、石砾及明显的根系,应用干筛和湿筛法<sup>[11]</sup>测定土壤团聚体,采用平均重量直径(MWD)来衡量团聚体稳定性,用密度计法进行土壤颗粒分析,用直接加热消解法<sup>[12]</sup>测定土壤有机质含量。

$$MWD = \frac{\sum_{i=1}^{n+1} r_{i-1} + r_i}{2} \times m_i$$

(2)

式中:r<sub>i</sub> 为第 i 个筛子孔径(mm),r<sub>0</sub> = r<sub>1</sub>,r<sub>n</sub> = r<sub>n+1</sub>,

式土壤水土流失评价和合理利用提供理论指导。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本研究区位于辽宁省沈阳市东陵区沈阳农业大学天柱山,平均海拔为 175.36 m,地理坐标北纬 41°44′,东经 123°27′,属于半湿润温带大陆性气候,土壤为发育在黄土性母质上的壤质棕壤。研究区土壤侵蚀模数 1 510 t/(km<sup>2</sup>·a),年平均气温 6~11 ℃,≥10 ℃积温 3 460 ℃,年均降水量 755 mm,蒸发量 1 431 mm,年日照时数 2 587.6 h,全年太阳辐射 544 J/cm<sup>2</sup>。研究区主要土地利用方式有:针阔混交林、灌木林、园地、坡耕地、荒地,基本情况见表 1。

m<sub>i</sub> 为第 i 个筛子的破碎团聚体重量百分比。

1.3 数据分析方法

运用灰度关联分析方法,选取抗剪强度指标为参考数据列 X<sub>ik</sub>,k=1,2,⋯,n。影响抗剪强度的因子为比较数列 X<sub>jk</sub>,k=1,2,⋯,n。根据公式|Δ<sub>ij</sub>(k)|=X<sub>ik</sub>-X<sub>jk</sub>,k=1,2,⋯,n,j≠i。求参考数据列与各比较数列对应数值的绝对值,并找出|Δ<sub>ij</sub>(k)|的最大值 Δmax,最小值 Δmin。求参考数据列每个时刻的关联系数 ξ<sub>ij</sub>(k)和灰色关联度 r<sub>ij</sub>。其中:ξ<sub>ij</sub>(k)= $\frac{\Delta_{\min} + \lambda \Delta_{\max}}{|\Delta_{ij}(k)| + \lambda \Delta_{\max}}$ ,式中:λ 为分辨系数,本文取 0.5;  
 $r_{ij} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \xi_{ij}(k), j=1,2,\cdots,m(15)$ 。

采用 SPSS18.0 中相关性分析方法处理数据,借助 EXCEL 2003 进行数据的线性分析。

2 结果与分析

2.1 不同土地利用方式土壤抗剪强度分析

根据公式(1),抗剪强度与作用在土体表面的法向应力成正比,所以通过其线性关系可以确定抗剪强度的 2 个指标内摩擦角和黏聚力,土壤抗剪强度指标随坡位的变化如图 1 所示。由图 1 可知,同一种土地利用方式土壤黏聚力从坡上到坡下逐渐减小,这是由于土壤的抗剪强度受土体的结构、密度和含水量等因素影响,而坡面各坡位土壤的物理性质存在差异。5 种土地利用方式土壤黏聚力最大值出现在园地坡上部位(42.29 kPa),由于园地内种植柞树,柞树喜光,坡上光照时间较长,使得柞树生长更茂盛,蒸腾作用增强,对

土壤水分吸收更多,导致土壤含水率降低,因此黏聚力较大。土壤黏聚力最小值出现在荒地的坡下部位(17.04 kPa),荒地植被多为荒草,无人为扰动,植被覆盖度较高,有利于水分保持,同时土壤通透性也随之增大,因此黏聚力较小,各个土地利用方式,坡下相比坡上黏聚力减小幅度最大的是园地,其数值为 17.33 kPa,而减小幅度最小的是坡耕地,其数值为 9.53 kPa。

对于同一土地利用方式的土壤,考虑到植被等因素的影响,把作用在土体上的压力定为 50 kPa,再根据公式(1),计算在垂直压力为 50 kPa 时,5 种土地利用方式的土壤抗剪强度大小为:坡耕地>园地>针阔混交林>荒地>灌木林,这与图 1 不同土地利用方式黏聚力  $C$  变化一致,因此,用不同土地利用方式的土壤黏聚力来代表其抗剪强度。由此可得坡耕地抗剪强度最大,其原因为坡耕地人为扰动性较大,对土壤的物理性质有较大影响,尤其是对土壤容重影响最为显著,经测定坡耕地土壤容重值偏高(如表 2 所示),土壤的松散度较小,导致抗剪强度增大,这与朱利<sup>[13]</sup>在研究坡地利用方式对土壤物理性质影响中得出的结论一致,即坡面种植农作物会增大土壤容重,而容重是影响抗剪强度的主要因素,土壤抗剪强度随土壤容重增大而增大,因此,坡耕地在不同土地利用方式中抗剪强度最大。灌木林的抗剪强度最小,这是由于灌木林内的腐殖质较厚,有机质含量比较多,加上微生物活动频繁,使得土壤容重降低,且土壤结构随之发生变化,致使抗剪强度减小。

由图 1 可知,同一种土地利用方式土壤的内摩擦角从坡上到坡下无明显规律,分析其原因可能为内摩擦角是表征土体摩擦强度的参数,由有效压力和土粒间的摩擦力而形成,含水率的增大可有效地减弱土粒间摩擦力,同时土壤颗粒大小及级配也对土粒间摩擦力存在一定影响,内摩擦角影响因素较多,将会在以后深入研究中继续分析其如何作用及影响。

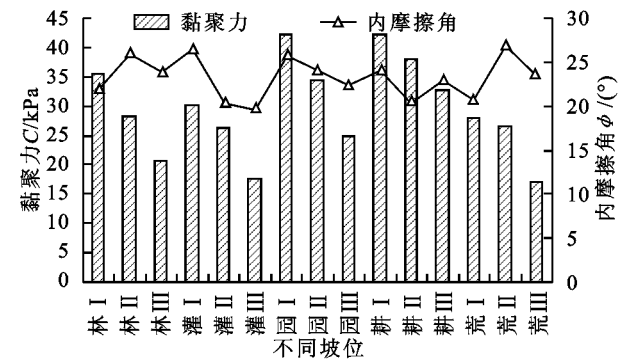


图 1 土壤抗剪强度指标随坡位的变化

2.2 原状土抗剪强度的主要影响因素灰色关联法分析  
选取容重、含水率、干密度、总孔隙度、土壤团聚体 MWD 值、粉/黏粒值以及有机质含量作为影响土壤抗

剪强度的因子,通过室内试验对以上因子进行测定,测定结果见表 2。由表 2 可知,在相同土地利用方式中,土壤容重与干密度基本呈现从坡上至坡下减小的趋势,而总孔隙度和含水率从坡上至坡下逐渐增大,灌木林有机质的含量最高,坡耕地有机质的含量最低,这主要是由于灌木林郁闭度大,近地表层土壤受枯落物的影响,腐殖质含量高,因此有机质含量较高,而坡耕地种植玉米,受人为扰动较多,其中包括整地、耕作、施肥等,水土流失严重,使得有机质含量严重降低。

运用灰色关联法对以上影响原状土抗剪强度的因素进行分析,对表 2 的数据进行无量纲化预处理,即各列数据每一个数值均除以对应数列中的最大值,得到抗剪强度指标与影响因子参数的初值化结果,再根据灰色关联分析公式,找出  $|\Delta_{ij}(k)|$  的最大值  $\Delta_{\max}=0.868$ ,最小值  $\Delta_{\min}=0.011$ 。根据公式求得参考数列对应的关联系数  $\xi_{ij}(k)$  和灰色关联度  $r_{ij}$ ,计算的结果见表 3。

从表 3 可以看出,黏聚力  $C$  与影响因子参数的关联度顺序为:容重(0.792)>干密度(0.754)>总孔隙度(0.688)>含水率(0.656)>有机质含量(0.652)>粉/黏粒值(0.637)>干筛 MWD 值(0.621)>湿筛 MWD 值(0.554)。从以上排序可以得出,容重、干密度以及总孔隙度对黏聚力的影响较大,影响最大的是容重。根据相同计算过程,也可以得出内摩擦角  $\varphi$  与影响因子间的关联度排序为:容重(0.865)>干密度(0.835)>总孔隙度(0.784)>含水率(0.760)>有机质含量(0.691)>干筛 MWD 值(0.601)>粉/黏粒值(0.547)>湿筛 MWD 值(0.533)。根据以上排序可知容重是影响内摩擦角最大的因子。在各个土地利用方式中,容重与黏聚力的关联度,坡耕地最大(0.832),荒地最小(0.665),而容重与内摩擦角的关联度,灌木林最大(0.874),荒地最小(0.801)。

### 2.3 土壤抗剪强度主要影响因素分析

根据灰色关联分析的结果,将抗剪强度与影响因子参数进行相关分析,结果如表 4 所示。从表 4 可以看出,土壤容重、总孔隙度、含水率与黏聚力在 0.01 水平上相关性显著,相关系数分别为 0.738,0.738,0.695,说明以上 3 个因子对土壤抗剪强度的影响最为密切。土壤容重综合反映了土壤的密实程度,对于相同类型的土壤,在同一含水率下,其容重值越大,土体结构就越密实,土壤的抗剪能力就越大,郑子龙等<sup>[1]</sup>在研究耕地土壤抗剪强度时,也得到相同结论,即土壤抗剪强度与土壤容重呈显著正相关;土壤孔隙会拉大颗粒间的距离,孔隙度的大小直接反应了土壤的松散程度,同时也反映了土壤对水分及空气容量的大小,土壤孔隙度大,其透气性和透水性较好,质地较疏松,更易

发生土壤剪切破坏;土壤含水率是影响土壤抗剪强度大小的因素之一,陈红星等<sup>[14]</sup>、江浩浩等<sup>[5]</sup>研究表明,土壤的抗剪强度随着土壤含水率的增加先增大后减小,在含水率为 10%左右时达到最大值,本文研究的是自然条件下的原状土,由实验结果可知,不同土地利用方式土壤含水率均大于 10%,由于水分在土体中所起的润滑作用以及对土粒间牵引力的破坏作用,当土壤

的含水率较高时,土粒间的分子膜引力减小,使得土体抗剪能力降低;从表 4 也可以看出,土壤干密度与黏聚力在 0.05 水平上相关性显著,土壤干密度是在不考虑含水率的影响情况下,土壤容重的表达形式,由分析可知,土壤的抗剪强度与干密度呈正相关,土壤干密度越大,说明颗粒之间的距离越近,颗粒间的范德华力和静电力加大,致使土壤的抗剪强度增大。

表 2 影响原状土抗剪强度的主要因子

土地利用 方式	坡位	容重/ (g·cm <sup>-3</sup> )	含水率/ %	干密度/ (g·cm <sup>-3</sup> )	总孔隙度/ %	有机质 含量/%	土壤团聚体 MWD 值/mm		粉/黏粒
							干筛	湿筛	
针阔混交林	坡上	1.56	18.15	1.84	42.47	2.18	1.03	0.66	0.66
	坡中	1.50	22.18	1.72	44.45	3.53	1.49	0.68	0.68
	坡下	1.29	27.62	1.47	51.38	3.19	1.16	0.76	0.76
灌木林	坡上	1.90	15.45	2.12	31.26	3.53	2.93	0.74	0.74
	坡中	1.65	17.86	1.93	39.51	3.87	4.19	0.82	0.82
	坡下	1.22	19.42	1.37	53.69	3.87	3.70	0.86	0.86
园地	坡上	1.75	16.82	1.74	36.21	2.59	2.44	2.31	2.31
	坡中	1.62	17.73	1.67	40.50	1.41	2.63	3.26	3.26
	坡下	1.52	28.72	1.67	43.79	2.52	1.36	2.23	2.23
坡耕地	坡上	1.80	15.82	1.71	34.56	1.00	2.03	0.86	0.86
	坡中	1.55	16.25	1.96	42.80	1.30	2.07	0.76	0.76
	坡下	1.77	17.52	1.95	35.55	1.30	1.32	0.65	0.65
荒地	坡上	1.56	20.80	1.77	42.47	1.82	2.38	0.89	0.89
	坡中	1.50	21.42	1.76	44.45	2.49	2.28	0.96	0.96
	坡下	1.38	25.60	1.38	48.41	1.61	3.22	1.23	1.23

表 3 黏聚力 C 与影响因子参数间的灰色关联系数与灰色关联度计算结果

土地利用 方式	坡位	容重/ (g·cm <sup>-3</sup> )	含水率/%	干密度/ (g·cm <sup>-3</sup> )	总孔隙 度/%	有机质 含量/%	土壤团聚体 MWD 值/mm		粉/黏粒
							干筛	湿筛	
针阔混交林	坡上	0.985	0.724	0.966	0.924	0.627	0.433	0.391	0.428
	坡中	0.796	0.776	0.766	0.745	0.653	0.599	0.585	0.533
	坡下	0.715	0.471	0.699	0.494	0.580	0.687	1.025	0.693
灌木林	坡上	0.771	0.608	0.772	0.628	0.910	0.752	0.802	0.418
	坡中	0.656	0.974	0.620	0.816	0.550	0.550	0.550	0.552
	坡下	0.672	0.615	0.666	0.436	0.436	0.493	0.608	0.804
园地	坡上	0.867	0.540	0.723	0.586	0.582	0.522	0.374	0.613
	坡中	0.944	0.733	0.961	0.899	0.503	0.716	0.519	0.719
	坡下	0.691	0.548	0.718	0.675	0.899	0.636	0.900	0.843
坡耕地	坡上	0.920	0.519	0.711	0.565	0.380	0.470	0.342	0.517
	坡中	0.947	0.712	0.769	0.986	0.507	0.618	0.390	0.660
	坡下	0.911	0.658	0.940	0.685	0.456	0.447	0.354	0.553
荒地	坡上	0.692	0.773	0.676	0.726	0.773	0.931	0.452	0.592
	坡中	0.716	0.732	0.675	0.674	0.936	0.904	0.451	0.654
	坡下	0.588	0.464	0.653	0.477	0.995	0.557	0.569	0.968
关联度		0.792	0.656	0.754	0.688	0.652	0.621	0.554	0.637

有机质含量、土壤团聚体 MWD 值和粉黏粒比值与黏聚力的相关系数分别为 0.488,0.294,0.349 和 0.198,虽然相关系数较小,但结合灰色关联分析可知,黏聚力与粉黏粒比值呈负相关,粉黏粒的比值越小,说明土壤质地越细,土壤越黏重,黏聚力越大<sup>〔2〕</sup>。土壤团聚体 MWD 值对土壤抗剪强度指标有一定影响,由于土壤颗粒的凝聚、胶结和黏聚,形成了土壤团聚体,因此土壤具有一定的结构稳定性和水稳性,水稳性团聚体含量高的

土壤因其具有高度的持水性和孔隙度,从而导致了土壤黏聚力降低<sup>〔7〕</sup>,分析结果表明,土壤抗剪强度与团聚体 MWD 值呈负相关,即土壤平均重量直径越大,抗剪强度越小,这与王云琦等<sup>〔4〕</sup>得出的土壤强度与团聚体、微团聚体呈正相关的结果不同。土壤有机质含量与黏聚力有关,研究发现土壤黏聚力会随有机质含量的增加而减小,这与张晓明等<sup>〔15〕</sup>的研究结果一致,可能是由于有机质的增加,会使得土壤密度下降,增大了土壤的孔隙度,

导致土壤黏聚力减小。

根据抗剪强度与影响因子参数的相关分析结果,分别将土壤含水率、容重、总孔隙度、干密度与土壤抗剪强度进行回归分析,结果如表 5 所示,从表 5 可以看出以上 4 个因子与土壤抗剪强度呈线性关系,相比

表 4 抗剪强度与影响因子参数的相关分析

参数	含水率	总孔隙度	容重	干密度	有机质	干筛 MWD 值	湿筛 MWD 值	粉黏粒比值
Pearson 相关性	-0.695**	-0.738**	0.738**	0.574*	-0.488	-0.294	-0.349	0.198
抗剪强度 显著性(双侧)	0.004	0.002	0.002	0.025	0.065	0.287	0.202	0.480
<i>n</i>	15	15	15	15	15	15	15	15

注: \* 表示在 0.01 水平(双侧)上显著相关; \* 表示在 0.05 水平(双侧)上显著相关。

表 5 土壤抗剪强度与单一因子相关关系

自变量	回归方程	<i>R</i> <sup>2</sup>
容重	$y=37.686x-29.194$	0.755
总孔隙度	$y=-1.142x+78.108$	0.755
含水率	$y=-1.406x+58.265$	0.543
干密度	$y=28.778x-19.956$	0.556

3 结 论

本文通过原状土剪切试验,研究原状土内摩擦角和黏聚力随地形因素变化规律,分析对比不同土地利用方式土壤抗剪强度大小,运用灰色关联法和相关分析法,分析影响原状土抗剪强度的主要因素及其与抗剪强度的相关关系,主要结论如下:

(1)同一种土地利用方式土壤黏聚力从坡上到坡下逐渐减小,土壤黏聚力最大值出现在园地坡上部位(42.29 kPa),最小值为荒地的坡下部位(17.04 kPa)。而内摩擦角随不同坡位的变化规律不明显;不同土地利用方式土壤抗剪强度大小顺序为:坡耕地>园地>针阔混交林>荒地>灌木林。

(2)影响因子与土壤黏聚力 *C* 的关联度大小为:容重(0.792)>干密度(0.754)>总孔隙度(0.688)>含水率(0.656)>有机质含量(0.652)>粉/黏粒值(0.637)>干筛 MWD 值(0.621)>湿筛 MWD 值(0.554)。与内摩擦角  $\varphi$  关联大小为:容重(0.865)>干密度(0.835)>总孔隙度(0.784)>含水率(0.760)>有机质含量(0.691)>干筛 MWD 值(0.601)>粉/黏粒值(0.547)>湿筛 MWD 值(0.533),土壤容重与土壤黏聚力 *C* 和内摩擦角  $\varphi$  的关联度最大,湿筛 MWD 值与土壤黏聚力 *C* 和内摩擦角  $\varphi$  的关联度最小。

(3)土壤容重、总孔隙度、含水率与黏聚力在 0.01 水平上相关性显著,干密度与黏聚力在 0.05 水平上相关性显著。土壤容重、总孔隙度、含水率以及干密度对土壤抗剪强度的影响在一定范围内存在线性关系。

参考文献:

[1] 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

之下线性关系最良好的是容重、总孔隙度,*R*<sup>2</sup> 值均为 0.755,含水率和干密度次之,*R*<sup>2</sup> 值分别为 0.543 和 0.556。通过以上的分析方法,结合灰色关联分析结果,可以得出,影响抗剪强度的主要因素为容重、总孔隙度、含水率和干密度。

(5);125-130.

[2] 李温雯.重庆四面山不同森林植物群落土壤抗剪性质研究[D].北京:北京林业大学,2010.

[3] 倪九派,高明,魏朝富,等.土壤含水率对浅层滑坡体不同层次土壤抗剪强度的影响[J].水土保持学报,2009,23(6):48-50.

[4] 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.

[5] 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.

[6] Xiong C R, Liu B C, Zhang J S, et al. Relation between shear strength parameters and physic-alstate variables of remolded unsaturated cohesive soil[J]. China Railway Science,2003,24(3):17-20.

[7] 李云鹏,王云琦,王玉杰,等.重庆缙云山不同林地土壤剪切破坏特性及影响因素研究[J].土壤通报,2013,44(5):1074-1080.

[8] 齐娜,王玉杰,张心平,等.重庆缙云山不同林地类型土壤的抗剪强度研究[J].安徽农业科学,2010,38(6):3238-3240.

[9] 姚军,吴发启,宋娟丽,等.黄土高原沟壑区坡耕地表层土壤抗剪强度影响因素分析[J].干旱地区农业研究,2010,28(3):236-239.

[10] 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.

[11] 李贵圆.冻融作用对黑土、棕壤团聚体水稳性影响对比研究[D].沈阳:沈阳农业大学,2012.

[12] 李婧.土壤有机质测定方法综述[J].分析试验室,2008,27(增刊1):154-156.

[13] 朱利.坡地利用方式和改造措施对紫色土理化性质的影响[D].山东 泰安:山东农业大学,2012.

[14] 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.

[15] 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[J].水土保持研究,2007,14(2):145-147.