

坡面不同土地利用类型土壤抗剪强度影响因素分析

李 想, 王 瑄, 盛思远, 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, 选取不同坡度(10° , 15° , 20°)的针阔混交林、灌木林、园地、坡耕地、荒地 5 种土地利用类型, 观测土壤抗剪强度指标、含水率、容重、干密度、总孔隙度、有机质、土壤团聚体 MWD 值(干筛和湿筛), 运用模糊贴度法和逐步回归分析法分析影响不同土地利用类型土壤抗剪强度的因素。结果表明: 相同土地利用类型土壤黏聚力随着坡度的增加先增大后减小; 在针阔混交林中, 团聚体湿筛 MWD 值与土壤黏聚力的贴度最大, 在荒地中则是有机质, 而在其他 3 个土地利用类型中, 容重与干密度对土壤黏聚力的贴度较大; 在针阔混交林、灌木林、荒地中, 4 种贴度计算影响其土壤内摩擦角较大的因素为总孔隙度, 而容重和干密度是影响园地和坡耕地土壤内摩擦角的重要因子; 在针阔混交林中, 建立基于干密度和容重的土壤抗剪强度方程($R^2=0.865$); 在坡耕地中, 建立基于干密度、容重和团聚体干筛 MWD 值的土壤抗剪强度预测模型($R^2=0.964$); 在灌木林、园地、荒地中, 对土壤抗剪强度影响显著的因子分别为干密度、团聚体干筛 MWD 值、容重。

关键词: 内摩擦角; 黏聚力; 不同土地利用类型; 坡度

中图分类号: S157.9

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2017)01-0080-05

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2017.01.014

Analysis of Influence Factors on Soil Shear Strength in Slope under Different Land Use Types

LI Xiang, WANG Xuan, SHENG Siyuan, CHEN Zhiqiang

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

Abstract: In order to determine the index of soil shearing strength, soil moisture content, bulk density, dry density, total porosity, organic matter and soil aggregate MWD value (which containing dry and wet screening), five types of land use, including conifer and broad-leaved mixed forest, shrub forest, field, sloping farmland and wasteland, had been taken into consideration and the field survey and laboratory experiment under different grades (10° , 15° and 20°) were conducted, besides, the fuzzy close-degree analysis and step-wise regression analysis had both been used, for analyzing the influencing factors on soil shearing strength under those land use types. The results showed that in the same land use type, soil cohesion force increased firstly then decreased with slope degree increasing gradually. In conifer and broad-leaved mixed forest, the close degree was greatest between wet-screening MWD value and soil cohesion force, but this degree was comparatively greater between bulk density, dry density and this force in shrub forest, field and sloping farmland, in wasteland, this force was affected mostly by the organic matter. In conifer and broad-leaved mixed forest, shrub forest and wasteland, the calculating results of 4 kinds of close degrees showed that the main impacting factor on soil internal friction angle was total porosity, while in other two land use types, the main factors were bulk density and dry density. In conifer and broad-leaved mixed forest, the equations of soil shear strength based on dry density and bulk density were established ($R^2=0.865$). In sloping farmland, the predicting model, which was based on dry density, bulk density and dry-screening MWD value, was established ($R^2=0.964$). In shrub forest, field and wasteland, the factors affecting soil shear strength were dry density, dry-screening MWD value and bulk density.

Keywords: internal friction angle; cohesion force; different land use types; grade

坡面是一种重要的土地资源,坡面水土流失会导致土壤质量退化和坡面生产力下降,坡度是决定坡面水土流失的重要因素之一,已有研究表明,研究坡面不同土地利用类型下土壤侵蚀是研究坡面环境及其生态系统演变的重要环节之一^[1]。发生在坡面的主要侵蚀通常是由于土壤层中存在水分发生水蚀而导致,坡面水蚀过程中,侵蚀、沉积和搬运也随之发生,剪切破坏是坡面侵蚀的主要表现形式^[2]。因此,土壤抗剪强度大小常用于定量土壤抗侵蚀能力,而不同土地利用类型对坡面土壤抗剪切能力也存在影响。

土壤抗剪强度是指土体内部产生相对滑动时,土体能够抵抗剪切破坏的临界强度,是表征土体力学的重要指标^[3]。国外的学者对于土壤抗剪强度的研究起步较早,而且已经成功的用于预测土壤可蚀性和其与土壤侵蚀的关系^[4],而国内对于土壤抗剪强度的研究起步较晚,姚军等^[5]认为含水量、雨强、坡度是影响黄土高原沟壑区坡耕地表层土壤抗剪强度的 3 个主要因素。李云鹏等^[6]的研究表明在相同类型林地中,原状土的临界剪切力随土层深度的增加而增加,对于各个典型林地,土壤抗剪能力强弱顺序为:裸地>楠竹林>针阔混交林>灌木林>常绿阔叶林。廖红建等^[7]通过对高陡边坡滑坡体黄土的强度进行研究,得出重塑土抗剪强度与土壤含水率密切相关,内摩擦角随含水率增大而减小,黏聚力随含水率的增加先增大后减小,在接近某一含水率时达到最大。杨永红等^[8]通过对浅层滑坡土体抗剪强度研究得到了相似的结论,并指出植被具有提高非饱和土抗剪强度的作用。倪九派等^[9]认为土壤干密度和含水率对紫色土抗剪强度存在影响,在相同含水率情况下,土壤黏聚力随干密度的增大而增大,大量的研究表明,土壤物理性质及不同植被类型对土壤抗剪强度指标有较大影响,但没有考虑到不同坡度条件下土壤抗剪指标的变化,对于不同土地利用类型而言,其土壤物理性质存在差异,导致对抗剪强度的影响也存在不同,因此本文设定不同土地利用类型,对比分析不同坡度下土壤抗剪强度指标的变化规律及影响因素,以期对坡面土壤的合理利用和水土流失防治提供一定的理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于辽宁省中部,沈阳市东陵区沈阳农业大学天柱山研究基地(41°44' N, 123°27' E),平均海拔为 175.36 m,土壤以棕壤及草甸土为主,属于半湿润温带大陆性气候,年平均气温 6~11℃,≥10℃积温 3 460℃,年平均降水量 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/cm²。在天柱山选取 5 种主要土地利用类型,即针阔混交林、灌木林、园地、坡耕地和荒地,对其土壤的抗剪强度和

相关物理性质进行研究。

1.2 试验设计

2015 年 7 月分别在沈阳市天柱山主要的土地利用类型区域内选取不同坡度(10°, 15°, 20°)坡面,每个坡面分别在坡上、坡中、坡下进行采样,坡上、坡中、坡下之间的距离设定为 10 m,共计 45 个采样点,用规格为 61.8 mm×20 mm 的环刀在每个采样点 1—20 cm 土层之间随机取 4 份原状土,共计 180 个土样,用于土壤抗剪强度的测定,同时,用四分法分别在每个取样点取土样 2 kg 左右,带回实验室风干,用于土壤相关物理性质的测定,每个取样点进行 3 次重复试验,坡面土壤抗剪强度及相关物理性质的数值取坡上、坡中、坡下测得数值的平均值。

1.3 测定方法与数据采集处理

根据库伦公式的原理,采用 ZJ-2 型等应变直剪仪进行(15 s/转)快剪试验,每组试样垂直压力 σ 分别选取 50, 150, 200, 250 kPa,当剪切中的水平力到达一个峰值时,土壤发生剪切破坏,即得到这一试样在相应垂直压力 σ 下的抗剪强度 τ_f 。根据不同垂直压力 $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \sigma_4$ 可以得到相应的 $\tau_1, \tau_2, \tau_3, \tau_4$,试验结果绘制抗剪强度与垂直压力的关系图 $\tau_f-\sigma$,抗剪强度线与水平线的夹角为内摩擦角 φ ,与纵坐标的截距为黏聚力 C 。

$$\tau_f = \sigma \tan \varphi + C \quad (1)$$

式中: τ_f 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)。

采用环刀法对土壤容重、干密度、总孔隙度进行测定;烘干法测定含水率;采用干筛和湿筛法^[10]测定土壤团聚体含量,计算团聚体平均重量直径(MWD)来衡量团聚体稳定性;用直接加热消解法^[11]测定土壤有机质含量。

本文选取模糊贴近度分析法,模糊数学由美国 Zaden 提出,汪培庄教授在其基础上提出贴近度理论,其基本思路是模糊贴近度越大,2 个模糊集的接近程度越大,其计算公式分以下 4 种:

Hamming 贴近度 σ_H

$$\sigma_H(C_j, D_k) = 1 - \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m |c_{ij} - d_{ik}| \quad (2)$$

Euclid 贴近度 σ_E

$$\sigma_E(C_j, D_k) = 1 - \frac{1}{\sqrt{m}} \left[\sum_{i=1}^m (c_{ij} - d_{ik})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

最大最小贴近度 σ_1

$$\sigma_1(C_j, D_k) = \frac{\sum_{i=1}^m (c_{ij} \cap d_{ik})}{\sum_{i=1}^m (c_{ij} \cup d_{ik})} \quad (4)$$

算术平均最小贴近度 σ_2

$$\sigma_2(C_j, D_k) = \frac{2 \sum_{i=1}^m (c_{ij} \cap d_{ik})}{\sum_{i=1}^m (c_{ij} + d_{ik})} \quad (5)$$

式中: C_j 为比较模糊集; D_k 为参考模糊集; c_{ij} 为比较数列集合; d_{ik} 为参考数列集合。

2.1 不同坡度下 5 种土地利用类型土壤抗剪强度分析

根据试验结果,分别制作 5 种土地利用类型土壤抗剪强度与垂直压力的关系图 $\tau_f-\sigma$, 确定各个坡度坡面土壤黏聚力和内摩擦角。土壤黏聚力是决定土壤抗剪强度大小的一个重要指标,也是黏性土的特性指标,黏聚力包括土粒间分子引力形成的原始黏聚力和土中化合物胶结作用形成的固化黏聚力^[12],内摩擦角主要由粗糙土粒相互滑动产生的表面滑动摩擦和粗颗粒间相互镶嵌咬合及连锁作用产生的咬合摩擦来反映^[13],对 5 种土地利用类型进行抗剪强度指标分析,其抗剪强度指标值见图 1。由图 1 可知,相同土地利用类型土壤黏聚力随着坡度的增加先增大后减小,其中坡耕地土壤黏聚力随坡度的变化幅度较小,增幅和减幅分别为 15.93% 和 5.89%,坡耕地种植玉米,由人工统一管理,导致其自然情况基本保持一致,因此,土壤黏聚力随坡度的变化幅度不明显。不同坡度的 5 种土地利用类型土壤黏聚力最大值出现在园地的 20°坡面(39.48 kPa)上,由于随着坡度的加大,土壤本身的入渗速率降低,坡面的水分更易从表层向坡下迁移,且园地内种植的柞树密度和郁闭度较大,加上柞树蒸腾作用较强,在相同光照条件下导致坡面土壤含水率降低,因此黏聚力较大。不同土地利用类型在坡度为 10°时,土壤黏聚力大小为:坡耕地>园地>针阔混交林>灌木林>荒地,在坡度为 15°时,土壤黏聚力大小为:坡耕地>园地>针阔混交林>灌木林>荒地,在坡度为 20°时,土壤黏聚力大小为:园地>坡耕地>针阔混交林>荒地>灌木林,从以上结果可以看出,各坡度不同土地利用类型中坡耕地和园地的土壤黏聚力较大,这说明坡度较小时,土地利用类型为坡耕地会明显增大土壤黏聚力,而坡度较大时,园地对土壤黏聚力的影响较大。

由图 1 可知,在针阔混交林、园地和坡耕地中,土壤内摩擦角的大小随着坡度的增加逐渐减小,而在灌木林和荒地中,土壤内摩擦角随着坡度的增加先增大后减小,这说明植被和坡度对土壤内摩擦角的影响没有一致的规律。

2.2 不同土地利用类型土壤抗剪强度指标影响因素模糊贴近度分析

已有研究表明,在不同土地利用类型下,土壤性质都存在显著差异,尤其是受到人为干扰的土地利用类型,其土壤物理性质和化学性质与其他土地利用类

型差异明显^[14],因此影响不同土地利用类型土壤抗剪强度的因子存在差异。

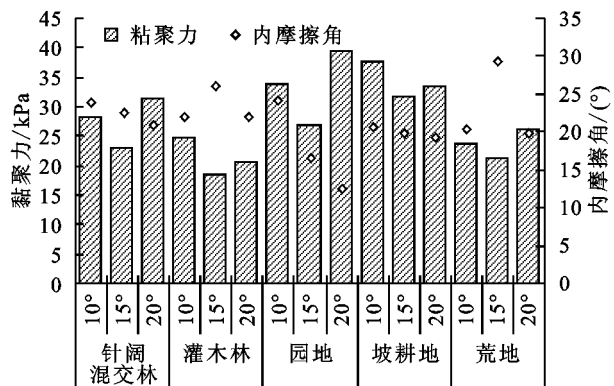


图 1 不同土地利用类型不同坡度下土壤抗剪强度指标变化

土壤抗剪强度大小受土壤含水率、土壤质地以及土壤结构等因素的影响^[6],选取含水率(x_1)、容重(x_2)、总孔隙度(x_3)、干密度(x_4)、有机质(x_5)、团聚体平均重量直径 MWD(干筛 x_6 和湿筛 x_7)作为影响土壤黏聚力 C 的指标,将影响指标列为数列集合,运用模糊贴近度公式(2)~公式(5)计算不同土地利用类型各因子对土壤黏聚力的 4 种贴近度,计算结果见表 1。从表 1 可以看出,在针阔混交林中,4 种贴近度的大小排序相同,即 $\sigma(x_7, C) > \sigma(x_2, C) > \sigma(x_4, C) > \sigma(x_5, C) > \sigma(x_3, C) > \sigma(x_6, C) > \sigma(x_1, C)$,团聚体湿筛 MWD 值与土壤黏聚力的贴近度最大,说明团聚体湿筛 MWD 值对土壤黏聚力的影响最大,这与李云鹏等^[6]认为团聚体(湿筛)与土壤抗剪强度的关系最大的结论一致;在灌木林中,影响土壤黏聚力较大的因子 4 种贴近度排序一致,即容重的影响最大,干密度和有机质含量分别居于第 1 和第 3 位;在园地中,各因子与土壤黏聚力的 4 种贴近度序排为: $\sigma(x_2, C) > \sigma(x_4, C) > \sigma(x_6, C) > \sigma(x_5, C) > \sigma(x_7, C) > \sigma(x_3, C) > \sigma(x_1, C)$,在坡耕地中,排序为 $\sigma(x_2, C) > \sigma(x_4, C) > \sigma(x_5, C) > \sigma(x_6, C) > \sigma(x_3, C) > \sigma(x_1, C) > \sigma(x_7, C)$,根据以上排序,可以看出,在园地和坡耕地中,容重与干密度对土壤黏聚力的贴近度最大,这是由于容重和干密度综合反映土壤的紧实程度,园地和坡耕地受人为干扰较大,导致土壤容重和干密度相对较大,因此容重和干密度对园地和坡耕地的土壤黏聚力影响较显著,这与郑子龙等^[15]和倪九派等^[9]得出的黏聚力随着容重和干密度的增大而增大的结果一致;在荒地中,4 种贴近度计算结果的大小排序基本一致,有机质和容重对土壤黏聚力影响较大,团聚体湿筛 MWD 值的 Hamming 和 Euclid 贴近度大于总孔隙度,而团聚体湿筛 MWD 值的最大最小和算术平均贴近度小于总孔隙度,因此团聚体湿筛 MWD 值和总孔隙度对荒地土壤黏聚力的影响尚无法判断,团聚体湿筛 MWD 值和总孔隙度对荒地土壤黏聚力的影响大于团聚体干筛 MWD 值和含水率。

表 1 不同土地利用类型土壤黏聚力 C 影响因子的贴近度计算结果

土地 利用类型	项目	$\sigma(x_1, C)$	$\sigma(x_2, C)$	$\sigma(x_3, C)$	$\sigma(x_4, C)$	$\sigma(x_5, C)$	$\sigma(x_6, C)$	$\sigma(x_7, C)$
针阔混交林	Hamming 贴近度	0.8874	0.9339	0.9049	0.9286	0.9204	0.9023	0.9380
	Euclid 贴近度	0.7287	0.8212	0.7667	0.8134	0.7858	0.7365	0.8412
	最大最小贴近度	0.3140	0.5241	0.3994	0.5095	0.4306	0.3788	0.5439
	算术平均贴近度	0.4780	0.6877	0.5708	0.6751	0.6020	0.5495	0.7046
灌木林	Hamming 贴近度	0.9100	0.9820	0.8831	0.9787	0.9423	0.8985	0.9080
	Euclid 贴近度	0.7520	0.9520	0.7057	0.9438	0.8279	0.7385	0.7480
	最大最小贴近度	0.2538	0.7763	0.2455	0.7306	0.4679	0.2815	0.2187
	算术平均贴近度	0.4048	0.8741	0.3942	0.8443	0.6375	0.4394	0.3589
园地	Hamming 贴近度	0.8874	0.9547	0.8977	0.9464	0.9224	0.9359	0.9207
	Euclid 贴近度	0.7223	0.8607	0.7316	0.8565	0.7811	0.8016	0.7710
	最大最小贴近度	0.2782	0.6271	0.3839	0.5879	0.5147	0.5864	0.5094
	算术平均贴近度	0.4353	0.7708	0.5548	0.7404	0.6796	0.7392	0.6750
坡耕地	Hamming 贴近度	0.8838	0.9618	0.8938	0.9464	0.9349	0.9163	0.8838
	Euclid 贴近度	0.7102	0.8700	0.7110	0.8485	0.7965	0.7749	0.7061
	最大最小贴近度	0.2820	0.7161	0.3556	0.6026	0.5382	0.4301	0.1992
	算术平均贴近度	0.4400	0.8345	0.5247	0.7521	0.6997	0.6015	0.3323
荒地	Hamming 贴近度	0.8928	0.9319	0.9253	0.9271	0.9323	0.9114	0.9315
	Euclid 贴近度	0.7413	0.8291	0.7968	0.8046	0.8402	0.7777	0.8196
	最大最小贴近度	0.2344	0.4869	0.4813	0.4577	0.4916	0.3662	0.4257
	算术平均贴近度	0.3798	0.6549	0.6499	0.6280	0.6592	0.5361	0.5972

根据模糊贴近度理论用公式(2)~公式(5)计算不同土地利用类型各因子对土壤内摩擦角 φ 的 4 种贴近度,见表 2。从表 2 可以看出,不同土地利用类型中,4 种贴近度计算影响其土壤内摩擦角较大的因子结果一致,在针阔混交林中,各因子与土壤内摩擦角的 4 种贴近度序排为: $\sigma(x_3, \varphi) > \sigma(x_6, \varphi) > \sigma(x_1, \varphi) > \sigma(x_4, \varphi) > \sigma(x_2, \varphi) > \sigma(x_5, \varphi) > \sigma(x_7, \varphi)$,在灌木林中,排序为 $\sigma(x_3, \varphi) > \sigma(x_6, \varphi) > \sigma(x_1, \varphi) > \sigma(x_7, \varphi) > \sigma(x_2, \varphi) > \sigma(x_4, \varphi) > \sigma(x_5, \varphi)$,根据以上排序,得出影响针阔混交林和灌木林土壤内摩擦角较大的因子均为总孔隙度、团聚体干筛 MWD 值、含水率,而影响最大的为总孔隙度,团聚体干筛 MWD 值和含水率分别具于第 2 位、第 3 位;在园地中,影响土壤内摩擦角较大的因子为容重和干密度,影响最大的为容重,含水率的 Hamming 和 Euclid 贴近度大于有机质,而含水率的最大最小和算术平均贴近度小于有机质,因此含水率和有机质对园地土壤内摩擦角的影响尚无法判断,而影响最小的为团聚体湿筛 MWD 值;在坡耕地中,影响土壤内摩擦角较大的因子为干密度、容重、含水率,影响最大的为干密度;在荒地中,4 种贴近度的大小排序相同,即 $\sigma(x_4, \varphi) > \sigma(x_5, \varphi) > \sigma(x_2, \varphi) > \sigma(x_3, \varphi) > \sigma(x_6, \varphi) > \sigma(x_1, \varphi) > \sigma(x_7, \varphi)$,总孔隙度、有机质、团聚体干筛 MWD 值与土壤内摩擦角的贴近度较大,贴近度最大的为总孔隙度,其次为有机质和团聚体 MWD 值,而贴近度最小的为团聚体湿筛 MWD 值。

2.3 不同土地利用类型土壤抗剪强度与主要影响因素逐步回归分析

根据模糊贴近度分析结果,选取各土地利用类型影

响土壤抗剪强度主要的因子,将其与土壤抗剪强度进行逐步回归分析,其结果如表 3 所示。从表 3 可以看出,在针阔混交林中,首先进入模型的是干密度 x_4 ,说明干密度对土壤抗剪强度的影响显著($p < 0.05$),模型 1 的 $F = 16.134 > F_{0.01}(1, 14) = 8.86$,说明模型 1 具有显著水平。模型 2 引入土壤容重 x_2 , $F = 27.678 > F_{0.01}(2, 13) = 6.70$,模型 2 中的 2 个因子的 t 检验值分别为 $t_{x_4} = 5.339 > t_{0.01} 12 = 3.055$, $t_{x_2} = 4.204 > t_{0.01} 12 = 3.055$,说明模型 2 中干密度和容重与土壤抗剪强度极显著相关,模型 2 的土壤抗剪强度逐步回归方程为 $\tau_f = 28.311 + 144.223x_4 - 117.931x_2$, $R^2 = 0.865$ 。在坡耕地中,首先进入模型的因子与针阔混交林相同,为土壤干密度,模型 2 引入因子土壤容重, $F = 9.306 > F_{0.01}(2, 13) = 6.70$,说明模型 2 是达到 0.01 显著水平,模型 2 中的两个因子 t 检验值分别为 $t_{x_4} = 3.620 > t_{0.05} 12 = 2.179$, $t_{x_2} = 3.051 > t_{0.05} 12 = 2.179$,同样得出干密度和容重与土壤抗剪强度显著相关,模型 2 的土壤抗剪强度逐步回归方程为 $\tau_f = 11.913 + 345.221x_4 - 280.308x_2$, $R^2 = 0.838$ 。团聚体干筛 MWD 值第 3 个进入模型,模型 3 的 $F = 17.281 > F_{0.01}(3, 12) = 5.95$,且 $t_{x_4} = 7.673 > t_{0.01} 12 = 3.055$, $t_{x_2} = 6.531 > t_{0.01} 12 = 3.055$, $t_{x_6} = 4.157 > t_{0.01} 12 = 3.055$,说明模型 3 中干密度、容重和团聚体干筛 MWD 值与土壤抗剪强度极显著相关,团聚体干筛 MWD 值是模型 3 中对土壤抗剪强度影响最小的因子,模型 3 的土壤抗剪强度逐步回归方程为 $\tau_f = 21.413 + 387.819x_4 - 316.551x_2 - 4.58x_6$, $R^2 = 0.964$ 。在灌木林、园地、荒地中,均只有一个因子进入方程,分别为干密度、团聚体干筛 MWD 值、容重, F 值分别为

78.98,48.535,16.066 均大于 $F_{0.01}(1,14)=8.86$,说明 3 种土地利用类型的模型均达到 0.01 显著水平。

表 2 不同土地利用类型土壤内摩擦角 φ 影响因子的贴近度

土地 利用类型	项目	$\sigma(x_1,\varphi)$	$\sigma(x_2,\varphi)$	$\sigma(x_3,\varphi)$	$\sigma(x_4,\varphi)$	$\sigma(x_5,\varphi)$	$\sigma(x_6,\varphi)$	$\sigma(x_7,\varphi)$
针阔 混交林	Hamming 贴近度	0.9404	0.9191	0.9429	0.9361	0.9181	0.9425	0.9118
	Euclid 贴近度	0.8384	0.7924	0.8534	0.8192	0.7915	0.8529	0.7630
	最大最小贴近度	0.5676	0.4238	0.5937	0.5332	0.4233	0.5775	0.4126
	算术平均贴近度	0.7242	0.5953	0.7451	0.6955	0.5948	0.7322	0.5842
灌木林	Hamming 贴近度	0.9439	0.9153	0.9452	0.9146	0.9029	0.9446	0.9343
	Euclid 贴近度	0.8331	0.7865	0.8469	0.7838	0.7606	0.8440	0.8263
	最大最小贴近度	0.5751	0.3947	0.6311	0.3771	0.3702	0.6121	0.4966
	算术平均贴近度	0.7303	0.5660	0.7738	0.5477	0.5403	0.7594	0.6636
园地	Hamming 贴近度	0.9122	0.9409	0.8919	0.9123	0.8949	0.8818	0.8644
	Euclid 贴近度	0.7515	0.8393	0.7307	0.7734	0.7321	0.7152	0.6735
	最大最小贴近度	0.3270	0.4870	0.3066	0.3561	0.3367	0.3020	0.2210
	算术平均贴近度	0.4929	0.6550	0.4693	0.5252	0.5037	0.4639	0.3620
坡耕地	Hamming 贴近度	0.9259	0.9279	0.9231	0.9394	0.9093	0.9334	0.9104
	Euclid 贴近度	0.7909	0.7922	0.7812	0.8307	0.7408	0.8206	0.7604
	最大最小贴近度	0.4588	0.5044	0.4128	0.5498	0.3949	0.5111	0.3674
	算术平均贴近度	0.6291	0.6706	0.5843	0.7096	0.5662	0.6765	0.5374
荒地	Hamming 贴近度	0.9180	0.9400	0.9329	0.9468	0.9465	0.9304	0.9105
	Euclid 贴近度	0.7769	0.8350	0.8114	0.8482	0.8425	0.7979	0.7690
	最大最小贴近度	0.3361	0.5191	0.4940	0.5620	0.5591	0.4639	0.2886
	算术平均贴近度	0.5031	0.6835	0.6613	0.7196	0.7172	0.6338	0.4479

表 3 不同土地利用类型土壤抗剪强度与
影响因子逐步回归结果

类型	模型	变量	回归系数	R^2	F	t
针阔 混交林	1	常量	-15.61	0.467	16.134	-0.892
		x_4	35.436			2.477
	2	常量	28.311	0.865	27.678	2.003
		x_4	144.223			5.339
灌木林	1	常量	-117.931	0.919	78.98	4.204
		x_2	-6.119			-1.970
	2	常量	22.069	0.874	48.535	8.887
		x_4	30.645			15.399
园地	1	常量	-10.366	0.586	9.909	6.967
		x_6	-46.106			-1.802
	2	常量	56.635	0.838	9.306	3.148
		x_4	11.913			0.463
坡耕地	1	常量	345.221	0.964	17.281	3.620
		x_2	-280.308			3.051
	2	常量	21.413	0.864	16.066	1.582
		x_4	387.819			7.673
荒地	1	常量	-316.551	0.964	17.281	6.531
		x_2	-4.58			4.157
	2	常量	18.962	0.864	16.066	-1.100
		x_2	-27.184			2.463

注： $F_{0.01}(1,14)=8.86,F_{0.01}(2,13)=6.70,F_{0.01}(3,12)=5.95,$
 $t_{0.0112}=3.055,t_{0.0512}=2.179。$

3 结 论

(1)相同土地利用类型土壤黏聚力随着坡度的增加先增大后减小;不同土地利用类型在坡度为 10°时,土壤黏聚力大小为坡耕地>园地>针阔混交林>灌木林>荒地,在坡度为 15°时,土壤黏聚力大小为坡耕地>园地>针阔混交林>灌木林>荒地,在坡度

为 20°时,土壤黏聚力大小为园地>坡耕地>针阔混交林>荒地>灌木林;不同土地利用类型,植被和坡度对土壤内摩擦角的影响没有一致的规律。

(2)根据模糊贴近度分析得出,在针阔混交林中,团聚体湿筛 MWD 值与土壤黏聚力的贴近度最大,其次为容重和干密度,在荒地中贴近度最大的因子为有机质,而在其他 3 个土地利用类型,土壤容重与干密度对黏聚力的贴近度较大;4 种贴近度计算影响其土壤内摩擦角较大的因子结果一致,在针阔混交林、灌木林、荒地中,影响土壤内摩擦角最大的因子为总孔隙度,其次为团聚体干筛 MWD 值,在园地和坡耕地中,影响土壤内摩擦角较大的因子为容重和干密度。

(3)逐步回归分析结果表明,在针阔混交林中,干密度和容重对土壤抗剪强度的影响达到显著水平,逐步回归方程为 $\tau_f=28.311+144.223x_4-117.931x_2,R^2=0.865$;在坡耕地中,干密度、容重和团聚体干筛 MWD 值与土壤抗剪强度极显著相关,土壤抗剪强度预测方程为 $\tau_f=21.413+387.819x_4-316.551x_2-4.58x_6,R^2=0.964$;在灌木林、园地、荒地中,对土壤抗剪强度影响显著的因子分别为干密度、团聚体干筛 MWD 值、容重。

参考文献:

[1] 胡萃. 川西山地坡面不同土地利用方式下土壤侵蚀研究[D]. 四川 雅安:四川农业大学,2006.
[2] 肖培青,郑粉莉,汪晓勇,等. 黄土坡面侵蚀方式演变与侵蚀产沙过程试验研究[J]. 水土保持学报,2008,22(1):24-27.