



DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtq.2016.02.009

盛思远, 刘彦辰, 咎学龙, 等. 种植不同作物对土壤抗剪强度影响[J]. 2016, 14(2): 44-48.

SHENG Si yuan, LIU Yan chen, ZHAN Xue long, et al. Effects of different types of crops on soil anti shearing intensity[J]. 2016, 14(2): 44-48. (in Chinese)

种植不同作物对土壤抗剪强度影响

盛思远, 刘彦辰, 咎学龙, 王 瑄

(沈阳农业大学 水利学院, 沈阳 110866)

摘要: 为了确定不同作物种植对土壤抗剪强度的影响, 以辽宁省摩云山小流域为研究对象, 分别采集大豆地、玉米地、果树地和果树台田样本等土样。测定土壤含水量, 利用直剪法测定土壤黏聚力和内摩擦角, 分析同一种作物和不同作物的土壤剪切力与土壤含水量关系以及同一种作物和不同种作物的内摩擦角的关系。结果表明: 土壤黏聚力玉米地(49.27 kPa) > 豆地(38.36 kPa) > 果树台田(30.00 kPa) > 果树地(28.36 kPa); 内摩擦角果树地(25.4°) > 豆地(23.26°) > 玉米地(20.24°) > 果树台田(19.51°); 玉米地的剪切力与豆地的剪切力、果树地的剪切力和果树台田的剪切力均有显著性差异; 不同作物的土壤黏聚力和土壤含水量进行二次线性分析, 拟合度较好。

关键词: 摩云山小流域; 含水量; 土壤黏聚力; 内摩擦角; 相关性分析

中图分类号: S151.19 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2016)02-0044-05

Effects of different types of crops on soil anti shearing intensity

SHENG Si yuan, LIU Yan chen, ZHAN Xue long, WANG Xuan

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

Abstract: To ascertain the influences of different types of crops on soil anti shearing intensity, this research took Moyunshan small watershed of Liaoning province as a study objective. The soil samples of soybean growing area, corn growing area, fruit trees growing area and fruit trees terraces were collected and the soil moisture contents were measured. Soil cohesion and angle of internal friction were measured by direct shearing. The correlations of soil shear strength and soil moisture between the same crops and the different ones were analyzed, as well as the internal friction angle. According to the experimental data (soil cohesion order: corn(49.27 kPa) > soybean(38.36 kPa) > terraces(30.00 kPa) > fruit tree(28.36 kPa); angle of internal friction order: fruit tree(25.4°) > soybean(23.26°) > corn(20.24°) > terraces(19.51°)), the results showed that the soil shear strength of corn growing area, soybean growing area, fruit trees growing area and fruit trees terraces had significant differences. The quadratic linear analysis of the soil cohesion and soil moisture contents of different types of crops was conducted, and the fitting degree was good.

Key words: Moyunshan small watershed; soil moisture; soil cohesion; angle of internal friction; correlation analysis

土壤侵蚀是目前威胁土地资源安全的重要因素之一, 据有关资料显示, 全球范围内, 每年大约有2 000万 hm^2 的土地受到土壤侵蚀因素的影响而丧失或者部分丧失生产力, 研究土壤侵蚀的力学原理,

对于区域或流域治理具有重要意义^[1-2]。土壤剪切力是表征土壤抗侵蚀能力的一个重要量化指标, 它直接反应了土体在外力作用下发生剪切变形的难易程度^[3-4]。张爱国^[5]等利用野外测试数据对土壤的

收稿日期: 2016-01-18 修回日期: 2016-03-21 网络出版时间: 2016-04-14
网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20160414.1408.002.html>

基金项目: 辽宁省自然科学基金(20062110); 辽宁省教育厅项目(L2010496)

Fund: Natural Science Foundation of Liaoning Province: (20062110); Education Department Project of Liaoning Province: (L2010496)

作者简介: 盛思远(1988-), 女, 辽宁海城人, 主要从事流域综合治理研究。Email: 467932505@qq.com。

通讯作者: 王 瑄(1965-), 女, 辽宁昌图人, 教授, 博士, 主要从事土壤侵蚀和农业节水的教学研究。Email: xuanw11@163.com。

各种理化特性进行分析,建立了中国水土流失土壤抗剪强度回归模型,并总结了土壤容重、粉/黏、土壤含水率、有机质含量等对土壤抗剪强度的影响规律;赵晓光^[6]等以黄土高原泥河沟流域为研究对象,在未经翻耕的或人工坡面上采集土样进行抗剪试验,发现土壤抗剪强度与土壤含水量以及容重密切相关;范兴科^[7]等对黄土高原几种土壤的浅层原状土进行抗剪强度测定,并与同类地区扰动土抗剪强度进行对比分析,提供了水土保持工程措施建议;Cruse and Larson^[8]分析了各种影响土粒抗剪强度的因素,结果表明:土壤基质势的增加,将会增加土壤的抗剪强度,而且,很大的容重也有很大的抗剪强度;Kok and McCool^[9]、D R Coote et al^[10]指出土壤的抗剪强度和土壤含水率呈反比关系,这就意味着土壤可蚀性随湿度的增加,强度将会降低,在这种情况下,土壤很容易被径流冲刷和雨滴击溅而分散,发生侵蚀。

本研究将以辽宁省鞍山市摩云山流域为研究对象,对于山体不同位置 and 不同作物进行土样选取,进行抗剪强度试验,探索不同作物种植类型对于土壤抗剪强度的影响。通过试验测定含水率和内摩擦角对土壤抗剪强度指标的影响,为高标准基本农田建设以及水土环境的保护该流域的规划、治理和管理提供一定的理论依据。

1 试验方法

1.1 研究区域概况

摩云山小流域总面积约为 42 km²,位于辽宁省鞍山市千山区东南部,地理坐标为东经 123°02'8"、北纬 40°57'58"。该流域的土壤主要为棕壤土。棕壤土土质黏紧、通透性较差,土壤呈微酸性,有机质含量为 1.25%,林草覆盖率为 60%。该地区多年平均降雨量为 603 mm,降水量年内分配很不均匀,主要集中在 7 月份。多年平均蒸发量为 2 142.2 mm。

试验小流域位于摩云山坡面径流观测场附近,其面积为 59 706 m²,流域东部主要以果树地、玉米地、豆地、果树台田四种不同作物种植类型。选择此流域为试验区域的原因是土地种植作物不同以及流域两侧坡度不同,因此其具有典型性和代表性。

1.2 试验方法设计

试验取土区内作物种类较多,为了比较不同土壤颗粒组成下地表土壤的抗风蚀剪切能力。本试验选取几种不同的试验场地,此流域西部为阳坡,包括玉米地、豆地和果树地三种地类;东部为阴坡,由果

树台田组成。

本试验在各作物的生育期采集土样,分别在阳坡玉米地(坡上、坡中、坡下)、豆地(坡上、坡中、坡下)、果树地(坡上、坡中、坡下)和阴坡果树台田地(坡上、坡中、坡下)这四种地类的每处试验坡中选取三个试验点,每个试验点处各选取 4 个 0~20 cm 土样。每个试验点土样均通过环刀采集,环刀上下通透,下部有刃口,将采集好的土样装塑料袋密封,带回实验室进行剪切试验,然后对不同土地利用类型(坡上、坡中、坡下)的三个试验点的试验数据求均值。

本研究在室内采用直接剪切试验法测定原状土样的抗剪强度。利用 20 mm × 61.8 mm 不锈钢环刀在研究区进行表层土壤样本选取,采用 ZJ 型应变控制式直剪仪在四种不同的垂直压力(50 kPa、100 kPa、150 kPa、200 kPa)下,分别测定样本土样的抗剪强度(τ),绘制抗剪强度和垂直压力图求得土壤内摩擦角和土壤黏聚力^[14-15]。

2 试验结果与分析

相关性分析利用统计分析软件 SPSS 完成。根据分析结果,探索土壤含水量与土壤黏聚力的相关性,并进行相关性分析,找出回归函数,并进行回归拟合度检验。

2.1 不同种植方式地土壤黏聚力分析

2.1.1 同作物不同坡位地土壤黏聚力分析

在同种作物不同坡度中,土壤黏聚力呈以下变化趋势(见图 1)。其中果树地和果树台田的土壤黏聚力变化均随坡上、坡中、坡下呈增大趋势,玉米的土壤黏聚力变化随坡上、坡中、坡下呈减小趋势,与果树地和果树台田形成鲜明对比,而豆地土壤黏聚力则呈现不规律变化。

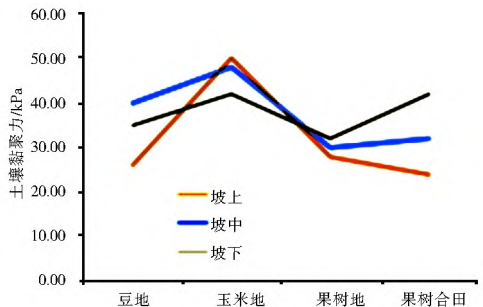


图 1 同一种作物不同坡位的土壤黏聚力

Fig. 1 Soil cohesion of different slope positions in the same land covers

2.1.2 不同作物种植地土壤粘聚力分析

每种作物地点取 3 个样本土样测定值的平均值作为该作物土壤黏聚力,见图 2。通过图 2 可以看出,四种作物土壤黏聚力为玉米地(49.27 kPa) > 豆

地(38.36 kPa) > 果树台田(30.00 kPa) > 果树地(28.40 kPa)。比较四种作物土壤黏聚力得出: 果树土壤黏聚力值最小, 并且在不同坡位的土壤黏聚力值的变化量不大; 玉米土壤黏聚力值最大, 从坡上到坡下的值越来越小; 而豆地土壤黏聚力值在不同坡位土壤黏聚力值无规律变化。

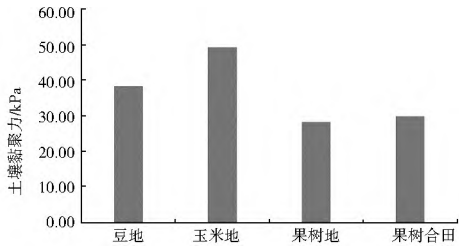


图 2 不同作物的土壤黏聚力

Fig. 2 Soil cohesion under different land covers

2.2 不同作物种植下土壤内摩擦角分析

2.2.1 同作物不同坡位地土壤内摩擦角分析

同一作物不同坡位的土壤内摩擦角由坡上、坡中、坡下内摩擦角组成。每个坡面取三个测点, 试验得出数值再求平均值为每个坡面的摩擦角值见图 3。由图 3 可知: 豆地、果树地、果树台田的内摩擦角值都是沿坡上、坡中、坡下逐渐减小, 趋势相同; 而玉米的摩擦角值是沿坡上、坡中、坡下逐渐增大, 与其他三种作物形成对比, 说明坡上土壤内摩擦角影响较大, 且对果树地影响最大, 对玉米地影响最小。

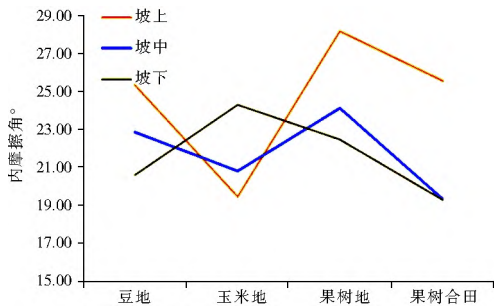


图 3 同一作物不同坡位的土壤内摩擦角

Fig. 3 Angle of internal friction of different slope positions in the same land covers

2.2.2 不同作物种植地土壤摩擦角分析

内摩擦角大小主要与土壤颗粒表面形态及颗粒之间的相互镶嵌咬、连锁作用及脱离咬合状态有关^[21-23]。每个地点取 3 个样本土样测定值的平均值作为该地类内摩擦角。通过图 2 可以看出, 内摩擦角果树地(25.45°) > 豆地(23.26°) > 玉米地(20.24°) > 果树台田(19.51°)。果树土壤的内摩擦角大于其他地类。这说明果树的土壤颗粒之间抗击外力(如地表径流冲刷)破坏的能力较坡耕地要强。

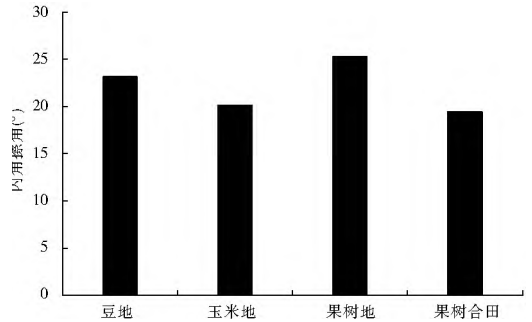


图 4 不同作物种植地的土壤内摩擦角

Fig. 4 Angle of internal friction under different land covers

2.3 不同种植类型地土壤含水量分析

2.3.1 不同作物种植土壤含水率分析

四种不同作物种植地土壤含水率分析见图 5, 由此可见果树台田含水率最高, 因为其位于阴坡, 接受光照少且落叶腐蚀质多, 因而含水率多于其余几类作物。果树地的含水率变化量与其土壤黏聚力变化相近。

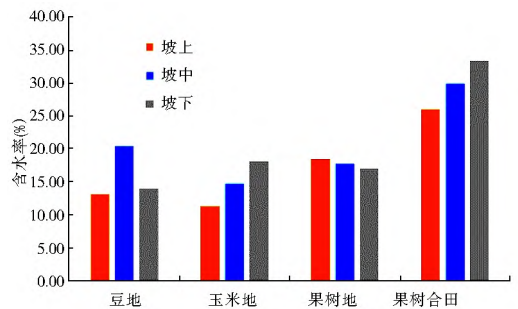


图 5 不同作物种植地土壤含水率

Fig. 5 Moisture contents under different land covers

2.3.2 不同作物种植地土壤含水量分析

由图 6 可以看出: 不同作物种植地土壤含水量没有固定规律; 果树台田处于阴坡, 而其余三种处于阳坡, 所以其土壤含水量大于其余三种。

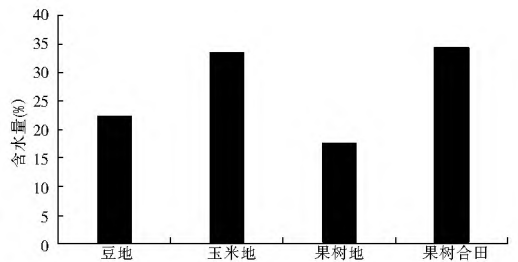


图 6 不同作物种植地土壤含水量

Fig. 6 Moisture contents under different land covers

对比土壤黏聚力和含水量的柱状图(图 2、图 6)可知: 含水量的变化趋势与土壤黏聚力变化趋势基本一致。由于果树台田处于阴坡, 而其余三种处于阳坡, 所以导致果树台田土壤含水量大于其余三种。由于土样采集时间为 7 月份, 这段时间降水比较集

中,土壤含水量都在 15% 以上,主要集中在 15% ~ 30% 之间。果树地土壤均匀,土壤颗粒之间的咬合作用比较强,其颗粒之间抗击外力破坏的能力也最强。因此,果树可以优先选为水土保持植物措施。

2.4 同种作物地土壤剪切力与土壤含水率关系分析

按上述试验方法,求出豆地、玉米地、果树地、果树台田的土壤在不同含水率条件下的土壤黏聚力和含水率。其变化见图 7,由图可知果树台田与果树地的土壤黏聚力的值随含水率增大而增加,而玉米土壤黏聚力值随着含水率增加而减小,豆地则呈不规则变化。其中果树趋势线增长平缓,适合作为水土保持作物。

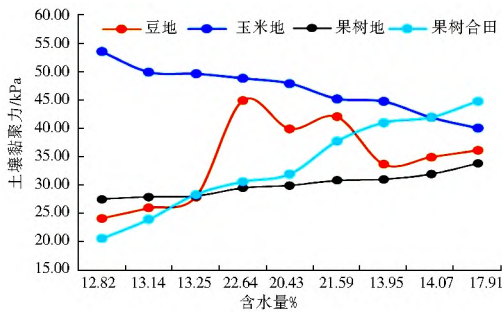


图 7 剪切力随含水率变化曲线

Fig. 7 Shearing force curve with moisture contents

2.5 相关性分析

2.5.1 单因素方差分析

本文采用 SPSS 软件,对不同土地利用类型的土壤黏聚力进行单因素分析。

通过分析:四种土地类型的土壤剪切力平均值存在显著差异,但是并不意味着每两个土地类型的土壤黏聚力之间的差异都显著,所以有必要进行两两之间的多重比较。本文选择 LSD 方法进行多重比较。结果表明:豆地只与玉米地有显著性差异($P > 0.05$);玉米地与豆地、果树地和果树台田均有显著性差异($P > 0.05$);果树地只与玉米地有显著性差异($P > 0.05$);果树台田地只与玉米地有显著性差异($P > 0.05$)。

2.5.2 相关性分析

从图 1 中我们可以看出,土壤黏聚力和土壤含水量具有一定相关性,本研究探索以土壤含水量为自变量,进行二者的相关性研究。设 Y 表示因变量土壤黏聚力, x 表示自变量土壤含水量,利用 SPSS 软件分别进行豆地、玉米地、果树地和果树台田的二次线性回归计算。

经过统计分析软件 SPSS 软件计算得判定系数 (R^2) 和估计标准误差 (S_e) 值 (见表 1)。

表 1 回归函数拟合度评估结果

Tab. 1 Assessment results of regression function goodness of fit

作物	二次线性回归方程	判定系数 (R^2)	估计标准误差 (S_e)
豆地	$Y = -22.73 + 5.2x - 0.1x^2$	0.867	3.064
玉米地	$Y = 45.36 + 1.7x - 0.1x^2$	0.925	1.346
果树地	$Y = 2.71e^2 - 24.86x + 0.63x^2$	0.924	0.658
果树台田	$Y = 21.11 - 1.39x + 0.06x^2$	0.944	2.299

由表 3 可以看出,判定系数 (R^2) 除豆地外均大于 0.9,一元二次回归函数的拟合度较好。并由二次回归曲线图得出豆地和果树台田地的土壤黏聚力是随含水率增加而增大;从幂函数趋势得出豆地在含水率增大到临界点后土壤黏聚力会趋于平稳;果树台田的土壤黏聚力是一直增大,玉米地与果树地的土壤黏聚力是随着含水率增大而逐渐减小,并且果树地的土壤黏聚力在含水率达到 19.6% 后呈减小趋势,玉米地的土壤黏聚力则越来越小。

3 结论

通过对摩云山流域不同地类抗剪强度分析,结果表明:

(1) 土壤黏聚力玉米地 (49.27 kPa) > 豆地 (38.36 kPa) > 果树台田 (30.00 kPa) > 果树地 (28.40 kPa); 内摩擦角果树地 (25.45°) > 豆地 (23.26°) > 玉米地 (20.24°) > 果树台田 (19.51°)。

(2) 豆地只与玉米地有显著性差异 ($P > 0.05$); 玉米地与豆地、果树地和果树台田均有显著性差异 ($P > 0.05$); 果树地只与玉米地有显著性差异 ($P > 0.05$); 果树台田只与玉米地有显著性差异 ($P > 0.05$)。因此确定不同土地利用类型的土壤黏聚力都有显著差异。

(3) 通过对土壤黏聚力和含水率进行了二次线性分析,二次线性分析 R^2 值均大于一次线性分析 R^2 值。经过拟合度检验,二次回归函数更接近于实际变化规律。豆地和果树台田呈正相关,而玉米地和果树地呈负相关。

(4) 通过对同一种作物和不同种作物的土壤黏聚力、内摩擦角和含水率的分析得出果树地各项因素分析结果均较好,因此该地区适合选取果树为水土保持种植作物。

参考文献 (References):

[1] 夏艳华. 黄土抗侵蚀能力与抗剪强度关系研究[J]. 水利水电技术, 2012, 43(9): 119-122. (XIA Yanhua. Study on correlation between erosion resistance and shear strength of loess[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2012, 43(9): 119-122. (in Chinese)).

- [2] 陈安强,张丹,熊东红,等.元谋干热河谷坡面表层土壤力学特性对其抗冲性的影响[J].农业工程学报,2012,28(5):108-113. (CHEN An qiang, ZHANG Dan, XIONG Dong hong, et al. Effects of mechanical properties of surface soil on soil anti scourability in Yuanmou dry hot valley[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(5):108-113. (in Chinese)).
- [3] 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(1): 60-69.
- [4] 张瑜,王佩将,许晓鸿,等.吉林省低山丘陵区土壤抗冲抗剪性研究[J].中国水土保持,2015,(1):41-46. (ZHANG Yu, WANG Pei jiang, XU Xiaohong, et al. Performances of soil anti scourability and anti shear strength of the low mountains and hilly regions of Jilin Province[J]. Soil and Water Conservation in China, 2015, (1): 41-46. (in Chinese)).
- [5] 张爱国,李锐,杨勤科.中国水土土壤抗剪强度研究[J].水土保持通报,2001,21(3):5-9. (ZHANG Ai guo, LI Rui, YANG Qin ke. Study on soil anti shearing intensity of water erosion in China[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2001, 21(3): 5-9. (in Chinese)).
- [6] 赵晓光,石辉.水蚀作用下土壤抗蚀能力的表征[J].干旱区地理,2003,26(1):12-16. (ZHAO Xiaoguang, SHI Hui. Prescription of soil anti erosion capability under water erosion[J]. Arid Land Geography, 2003, 26(1): 12-16. (in Chinese)).
- [7] 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].土壤侵蚀与水土保持学报,1997,3(4):69-75. (FAN Xing ke, JIANG Ding sheng, ZHAO He li. Analysis on anti shear strength of shallow original state soil in loess plateau[J]. Journal of Soil Erosion and Soil and Water Conservation, 1997, 3(4): 69-75. (in Chinese)).
- [8] Cruse R M, Larson W E. Effect of Soil Shear Strength on Soil Detachment due to Raindrop Impact[J]. Soil Sci. Soc. Am. J, 1977, 41: 777-781.
- [9] Kok H D, K McCool. Quantifying Freeze/Thaw induced Variability of Soil Strength[J]. Trans ASAC, 1990, 33: 501-511.
- [10] D R Coote, C A Malcom Mc Coven, G J WALL, et al. Seasonal Variation of Erodibility Indices on Shear Strength and Aggregate Stability in Some Ontario Soils[J]. Can. J. Soil Sci, 1988, 68: 405-416.
- [11] 倪九派,高明,魏朝富,等.土壤含水量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. (NI Jiupai, GAO Ming, WEI Chaofu, et al. Effects of soil water content on soil shearing strength to different soil layer of shallow landslide[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2009, 23(6): 48-50. (in Chinese)).
- [12] 李建兴,何丙辉,谌芸,等.不同护坡草本植物的根系分布特征及其对土壤抗剪强度的影响[J].农业工程学报,2013,29(10):144-152. (LI Jianxing, HE Binghui, CHEN Yun, et al. Root distribution features of typical herb plants for slope protection and their effects on soil shear strength[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(10): 144-152. (in Chinese)).
- [13] 倪九派,袁天泽,高明,等.土壤干密度和含水量对2种紫色土抗剪强度的影响[J].水土保持学报,2012,26(3):72-77. (NI Jiupai, YUAN Tianze, GAO Ming, et al. Effect of soil water content and dry density on soil shearing strength for calcareous purple soil and neutral purple soil[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2012, 26(3): 72-77. (in Chinese)).
- [14] 蒲玉琳,谢德休,倪九派,等.紫色土区植物篱模式对坡耕地土壤抗剪强度与抗冲性的影响[J].中国农业科学,2014,47(5):934-945. (PU Yulin, XIE Deyi, NI Jiupai, et al. Effects of hedgerow patterns on soil shear strength and anti scourability on slope farmland in purple soil area[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2014, 47(5): 934-945. (in Chinese)).
- [15] 张晓勉,张金池,王云南,等.钱塘江源头主要植被类型土壤抗剪强度研究[J].水土保持研究,2015,22(4):79-85. (ZHANG Xiaomian, ZHANG Jinchu, WANG Yunan, et al. Research on soil shear strength of the major forest types in headwaters of Qiantang River[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2015, 22(4): 79-85. (in Chinese)).
- [16] 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. (MA Yun, HE Binghui, LIU Yijun, et al. Impacts of soil moisture content on soil resistance shearing strength at shallow layer of landslide area[J]. Subtropical Soil and Water Conservation, 2009, 21(3): 8-11. (in Chinese)).
- [17] 张嘎,张建民.粗颗粒土的应力应变特性及其数学描述研究[J].岩土力学,2004,25(10):1587-1591. (ZHANG Ga, ZHANG Jianmin. Study on behavior of coarse grained soil and its modeling[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(10): 1587-1591. (in Chinese)).
- [18] 杨进良.土力学[M].北京:中国水利水电出版社,2009. (YANG Jinliang. Soil mechanics[M]. Beijing: China Water power Press, 2009. (in Chinese)).
- [19] 江浩浩,董希斌,王海鹏.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. (JIANG Hao hao, DONG Xibin, WANG Haibiao. Effects of slope soil water content on soil shear strength of different vegetation[J]. Forest Engineering, 2009, 25(3): 77-80. (in Chinese)).
- [20] 史晓梅.紫色土丘陵区不同土地利用类型土壤抗蚀性特征研究[D].重庆:西南大学,2008. (SHI Xiaomei. Study on soil anti erodibility of different land utilization types in purple soil hilly region[D]. Chongqing: Southwest University, 2008. (in Chinese)).
- [21] 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. (ZHENG Zicheng, ZHANG Xizhou, LI Tingxuan, et al. Influence of organic ingredients mixing ratio on anaerobic fermentation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(5): 125-130. (in Chinese)).
- [22] 黎建强,张洪江,陈奇伯,等.长江上游不同植物篱系统土壤抗冲、抗蚀特征[J].生态环境学报,2012,21(7):1223-1228. (LI Jianqiang, ZHANG Hongjiang, CHEN Qibo, et al. Anti scourability and anti erodibility of soil under different hedgerow systems in upper reaches of Yangtze River[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2012, 21(7): 1223-1228. (in Chinese)).
- [23] 郑子成,杨玉梅,李廷轩.不同退耕模式下土壤抗蚀性差异及其评价模型[J].农业工程学报,2011,27(10):199-205. (ZHENG Zicheng, YANG Yumei, LI Tingxuan. Difference and evaluation model of soil anti erodibility with different defarming patterns[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2011, 27(10): 199-205. (in Chinese)).
- [24] 盛骤,谢式千,潘承毅.概率论与数理统计[M].北京:高等教育出版社,2008. (SHENG Zhou, XIE Shiqian, PAN Chengyi. Probability and Mathematical Statistics[M]. Beijing: Higher Education Press, 2008. (in Chinese)).