土壤含水率和干容重对不同植被类型边坡土壤抗剪强度的影响

王 楠[1]，赵友朋[1]，郭晓平[1,2]，张金池[1]，刘胜龙[1,3]

(1.南方现代林业协同创新中心 江苏省水土保持与生态修复重点实验室 南京林业大学林学院，江苏 南京 210037；2.环境保护部南京环境科学研究所，江苏 南京 210042；3.浙江凤阳山—百山祖国家级自然保护区凤阳山管理处，浙江 龙泉 323700)

摘 要：[目的] 探究边坡土壤的含水率和干容重对土壤抗剪强度的影响，建立经验公式，为提高边坡稳定性提供理论依据。[方法] 以浙江省凤阳山国家级自然保护区内黄棕壤地带 3 种植被类型(常绿阔叶林、针阔混交林、灌草林地)边坡土壤为对象，进行重塑土直剪试验，分析不同含水率分级(25%，27%，29%，31%，33%)和干容重分级(0.8，0.9，1.0，1.1，1.2 g/cm^3)对抗剪强度指标(内摩擦角 φ 和黏聚力 c)的影响规律。[结果] ①黏聚力和干容重呈显著正相关，和含水率(mc)呈显著负相关。内摩擦角和干容重(ρ_d) 呈显著正相关。②土壤黏聚力随含水率的增加而减小，随干容重的增加而增加；随着干容重的增加，内摩擦角有明显增加的趋势，总是在高密实度的情况下，内摩擦角较大。相对于黏聚力，内摩擦角受含水率的影响较小，随含水率的增大，在灌草林地和针阔混交林表现出非线性减小的特征，在常绿阔叶林则呈现先增大后减小的趋势，考虑出现最优含水率。③在同一含水率下，干容重对土壤黏聚力具有增强作用，黏聚力的对数和干容重呈线性正相关。考虑含水率和干容重的综合影响，加入影响系数 β，建立了经验公式。[结论] 黏聚力的对数与含水率呈显著负相关，与干容重呈显著正相关。土壤干容重对土壤内摩擦角影响显著，呈显著正相关。含水率对内摩擦角影响不明显。

关键词：植被类型；含水率；干容重；抗剪强度；内摩擦角；黏聚力

文献标识码：A **文章编号**：1000-288X(2018)06-0088-07 **中图分类号**：S714

文献参数：王楠，赵友朋，郭晓平，等.土壤含水率和干容重对不同植被类型边坡土壤抗剪强度的影响[J].水土保持通报，2018，38(6)：88-94. DOI：10.13961/j.cnki.stbctb.2018.06.014. Wang Nan, Zhao Youpeng, Guo Xiaoping, et al. Effects of soil moisture content and dry bulk density of different vegetation types on slope soil shear strength[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2018, 38(6): 88-94.

Effects of Soil Moisture Content and Dry Bulk Density of Different Vegetation Types on Slope Soil Shear Strength

WANG Nan[1], ZHAO Youpeng[1], GUO Xiaoping[1,2], ZHANG Jinchi[1], LIU Shenglong[1,3]

(1. *Jiangsu Province Key Laboratory of Soil and Water Conservation and Ecological Restoration, Co-Innovation Center for the Sustainable Forestry in Southern China, College of Forestry, Nanjing Forestry University, Nanjing, Jiangsu* 210037, *China*; 2. *Nanjing Institute of Environmental Sciences, Ministry of Environmental Protection, Nanjing, Jiangsu* 210042, *China*; 3. *The Fengyang Mountain Management Office of Fengyang Mountain-Baishanzu National Nature Reserve in Zhejiang Province, Longquan, Zhejiang* 233700, *China*)

Abstract: [Objective] The influence of soil moisture content and dry bulk density on the shear strength of soil in the study area was explored and an empirical formula was established in order to provide a theoretical basis for improving the stability of the slope and protecting the soil and water environment. [Methods] Three typical forest stands (evergreen broadleaved forest, coniferous and broad-leaved mixed forest, shrub-grass forest) was sampled in Fengyang Mountain Nature Reserve, Zhejiang Province. Remolded soil direct shear experiment was conducted to analyze the effect of different classification of moisture content (25%, 27%, 29%, 31%, 33%) and dry bulk density (0.8, 0.9, 1.0, 1.1, 1.2 g/cm) on the shear strength parameters

收稿日期：2018-06-19 **修回日期**：2018-07-19

资助项目：国家林业公益性行业科研专项(201504406)；江苏省高校优势学科建设工程项目(PAPD)

第一作者：王楠(1994—)，女(汉族)，江苏省新沂市，硕士研究生，研究方向为林业生态工程。E-mail：1063843257@qq.com。

通讯作者：张金池(1962—)，男(汉族)，山东省安丘县人，博士，教授，主要从事林业生态工程。E-mail：zhang8811@njfu.edu.cn。

(the internal frictional angle φ and cohesive force c). [Results] ① There were a significant positive correlation between cohesive force and dry bulk density, and a significant negative correlation between cohesive force and moisture content. There was a significant positive correlation between the internal frictional angle and the dry bulk density. ② The soil cohesive force decreased with the increase of moisture content, and increased with the increase of dry bulk density, it had obvious regularity; with the increase of dry bulk density, the internal frictional angle had a tendency of obvious increase, which in the case of high compactness, the internal frictional angle was always large. In relate to the cohesive force, the internal frictional angle was less affected by the moisture content. With the increase of the moisture content, the characteristics of non-linear decrease in shrub-grassland forests and coniferous and broad-leaved mixed forest were showed. In the evergreen broad-leaved forest, there was a trend of increasing first and then decreasing, considering the occurrence of optimal moisture content. ③ At the same moisture content, the dry bulk density had an enhanced effect on the cohesive force of the three types of soils. The logarithm of cohesion and the dry density showed a positive linear correlation. We consider the combined effects of moisture content and dry bulk density, add the influence coefficient β, and establish an empirical formula, respectively. [Conclusion] The logarithm of cohesive force and moisture content were significantly negatively correlated with each other, and there was a significant positive correlation with dry bulk density and cohesive force. Soil dry bulk density had a significant effect on soil internal frictional angle, and moisture content had no significant effect on internal frictional angle.

Keywords: vegetation type; moisture content; dry density; shear strength; internal friction angle; cohesive force.

边坡是一种自然地质体,受到外因作用时,土壤内部某一面上的滑动力超过土壤抗滑动的能力,边坡将失去稳定性[1]。边坡失稳将导致滑坡、崩岗等灾害,还可能带来水土流失等环境问题[2],严重威胁着人民的生命及财产安全。滑坡的发生和水的作用关系密切[3]。产生滑坡的机制是某一滑移面上剪应力超过了该面的抗剪强度所致,土壤的破坏过程实际上是土壤抗剪能力丧失的过程[4-5]。土壤抗剪强度由土粒间发生相对滑动而产生的摩擦力和颗粒间的胶结作用以及电子吸引微小颗粒所产生的黏聚力构成[6]。决定抗剪强度大小的主要内在因素是两个抗剪强度指标为内摩擦角和黏聚力,因此研究土壤抗剪强度的大小即是研究内摩擦角和黏聚力的大小[7]。大量实践和试验[3,8-9]结果表明,土壤含水率和干容重与土壤的抗剪强度关系密切,其交互作用对土壤的稳定性存在不同程度的影响[10],且在天然的情况下,受到降雨、蒸发、灌溉等因素的影响,土壤的含水率往往会发生较大的变化,一般情况下,土壤的抗剪强度和稳定性随含水率的变化而变化[11-12]。研究地区主要土壤类型为黄棕壤,发育于亚热带常绿阔叶与落叶阔叶混交林,广泛分布于我国亚热带南部地区,质地黏重,结构稳定性较低,具有明显的发生层次,腐殖质层较厚,铁铝氧化物含量相对较高,且降雨丰富,增加了发生滑坡的机率。因此,探究土壤含水率和干容重对抗剪强度的作用,以期为加强土壤管理和利用提供一定的理论依据。陈红星等[13]研究发现土壤黏聚力随着土壤含水率的增加基本上呈先增大后减小之趋势,土壤内摩擦角随着土壤含水率的增加而线性减小。杨永红等[14]研究发现,随着含水量的增加,非饱和土的黏聚力和内摩擦角均减小,黏聚力有较大变化而内摩擦角变化较小。进行了控制含水率和干容重的直剪试验之后发现,非饱和土的黏聚力和内摩擦角均随含水率增加而线性减小,且黏聚力减小的幅度更明显。而干容重对非饱和土的内摩擦角几乎没有影响,黏聚力随干容重呈指数增加[15]。很多学者已经关注了含水率和干容重对抗剪强度参数的影响,但忽视了含水率和干容重的共同作用对边坡土壤抗剪强度的影响过程,且对具体的影响规律尚无定论。因此,本文对凤阳山自然保护区的三种典型植被类型边坡土壤含水率和干容重对土壤抗剪强度参数黏聚力 c 和内摩擦角 φ 的影响进行研究,以期发现含水率和干容重共同作用下抗剪强度的变化规律,建立经验公式,为土壤的可靠性分析和提高边坡稳定性作科学参考。

1　材料与方法

1.1　研究区概况

研究区位于浙江省凤阳山自然保护区,地处东经 119°06′—119°15′,北纬 27°46′—27°58′。凤阳山保护区是浙江最大的自然保护区,管理范围 15 171.4 hm^2,森林覆盖率为 90.8%。保护区为亚热带湿润季风气候,气候特点是温暖湿润,雨量充沛。年均气温 12.3 ℃,年降水量在 2 000 mm 以上。凤阳山自然保护区的主要土壤类型为黄棕壤,颜色为黄棕色,土层已完整发育,人为干扰较少。保护区内植被类型丰富,主要包括针阔混交林、常绿阔叶林、竹林、茶园以及灌草林地等。天然分布的木本植物主要有:木荷

(*Schima superba*)、杉木(*Cunninghamia Lanceolata*)、短柄枹(*Quercus glandulifera*)、马尾松(*Pinus massoniana*)、柳杉(*Cryptomeria fortunei*)等。

1.2 样品采集与理化性质的测定

2017年8月,在凤阳山自然保护区内选择常绿阔叶林、针阔混交林和灌草林地三种不同的植被类型的边坡土壤,坡面植被覆盖率相对较高。阔叶林为人工林,主要树种是木荷和短柄枹;针阔混交林多为残存的黄山松、杉木等,以及石楠(*Photinia serrulata*)、柃木(*Eurya japonica*)、青冈等阔叶树种;灌草林地主要是狗牙根(*Cynodon dactylon*)、香附子(*Cyperus rotundus*)和茅草(*Imperata cylindrica*)等。每个植被类型选取3块典型样地(20 m×20 m),每个样地内沿对角线取2个点,去除表面的枯枝落叶层,随机采取20—40 cm土壤30 kg带回实验室风干,混合每个植被类型的土壤样品,用于抗剪强度的测定。再用环刀和铝盒取各层的原状土,尽快带回实验室测定土壤理化性质。土壤的含水率、容重、毛管孔隙度、非毛管孔隙度、总孔隙度采用环刀法测定[16];将环刀内的土壤放至烘箱内烘干直至恒重,计算获得其天然含水率。土壤颗粒(沙粒2～0.02 mm,粉粒0.02～0.002 mm,黏粒<0.002 mm)组成采用激光粒度分析仪进行测定;pH值采用电位法〔水土比2.5∶1,pH计(PHS-3D)测定〕。结果详见表1。

表1 研究区样地基本土壤理化性质

植被类型	容重/(g·cm^{-3})	含水率/%	pH值	孔隙度/%			机械组成/%		
				非毛管孔隙度	毛管孔隙度	总孔隙度	沙粒	粉粒	黏粒
SGF	1.24	25.23	4.59	11.22	53.73	64.95	36.78	46.86	16.36
CBF	1.13	28.26	4.82	10.4	54.75	65.14	46.04	47.94	6.02
EBF	1.15	29.8	4.84	11.73	49.79	61.52	60.27	33.30	6.43

注:EBF代表常绿阔叶林;CBF代表针阔混交林;SGF代表灌草林地。下同。

1.3 试验设计

将采集的土壤自然风干,按照《土工试验规程SL237-1999》要求过2 mm筛,去除土中的根系和砾石等杂质,取足够试验用的土样,充分拌匀,测定风干土含水率,装入自封袋保湿备用。试验设计75个处理,涉及3种植被类型,含水率根据实际情况处理为5个水平(25%,27%,29%,31%,33%),干容重处理为5个水平(0.8,0.9,1.0,1.1,1.2 g/cm^3)。称取过筛的土壤平铺于搪瓷盘内,按公式(1)计算需水量(去离子水),然后均匀的喷洒在土样上,搅拌均匀后装入密封的容器内润湿24 h备用。制样前选取代表性的土样20～30 g,用烘箱测定配制土样的实际含水率,分别为25.2%,26.9%,29.1%,30.8%和33.3%,与原设计含水率基本接近。

根据试验所需的土量和含水率,计算制备试样所需的加水量,计算公式为:

$$m_\omega=\frac{m}{1+0.01\omega_0}0.01\times(\omega'-\omega_0) \tag{1}$$

式中:m_ω——土样所需加水量(g);m——风干含水率时的土样质量(g);ω_0——风干含水率(%),ω'——土样所要求的含水率(%)。

根据环刀体积和设计的干容重,单个试件所需湿土质量的计算公式为:

$$m=(1+0.01\omega_0)\rho_d V \tag{2}$$

式中:ρ_d——试样的干容重(g/cm^3);V——试样容积(环刀体积)(cm^3)。

1.4 土壤抗剪强度的测定和计算

土壤抗剪强度利用ZJ-2型等应变直剪仪(南京土壤仪器厂)进行测定,进行不固结不排水的快剪试验。剪切时分别施加100,200,300,400 kPa的垂直压力,以10 s/rin(每1 min为6转)的速度匀速转动手轮,直至试样剪损。

试样所得的剪应力按下式计算:

$$\tau=C\cdot R \tag{3}$$

式中:τ——剪应力(kpa);C——测力计率定系数(kPa/0.01 mm),本试验中的测力计率定系数为1.825 kPa/0.01 mm;R——测力计度数,单位0.01 mm。

根据所得的不用压力下的剪应力,依据库仑公式(4),计算出每组试样的黏聚力c(kPa)和内摩擦角φ(°)。

$$\tau=c+\tan\varphi \tag{4}$$

1.5 数据处理和统计分析

采用SPSS 20.0软件对含水率、干容重和抗剪强度参数进行相关性分析,Excel 2016进行黏聚力随干容重变化规律的方程拟合,进行统计分析,建立预测模型,Excel 2016,Origin 9.0软件作图。

2 结果与分析

2.1 干容重和含水率对不同植被类型土壤抗剪强度参数的影响

从图1—3可以看出,3种植被类型的土壤黏聚力

(c)表现出明显一致的变化趋势,均随含水率的增加而减小,随干容重的增加而增加。灌草林地和常绿阔叶林在含水率为 25%,27%时黏聚力(c)随干容重的增加,增大的幅度较大,针阔混交林在含水率从 25%到 29%时黏聚力(c)随干容重的增加,增幅较大。而干容重在 1.1,1.2 g/cm^3 时,土壤黏聚力(c)随含水率的增加,减小趋势明显。3 种植被类型土壤黏聚力(c)的最大值均出现在含水率为 25%,干容重为 1.2 g/cm^3 的时候。从图 1—3 可以看出,内摩擦角(φ)对含水率和干容重的响应效果不明显。3 种植被类型土壤内摩擦角(φ)随含水率的变化总是集中在一个范围内离散波动。当压实程度相同时,内摩擦角(φ)随着含水率的增加基本表现出非线性减小的特征。但并不是所有的植被类型都表现出相同的规律,常绿阔叶林的土壤内摩擦角(φ)随含水率的增加表现出先增加后减小的趋势,且在含水率为 29%时出现了较明显的峰值,这表明相对于黏聚力而言,含水率对内摩擦角(φ)的影响可能存在一个最优含水率。而当含水率相同时,内摩擦角(φ)随着干容重的增加呈现一定程度的增加〔高干容重下的内摩擦角(φ)的值明显较大〕。

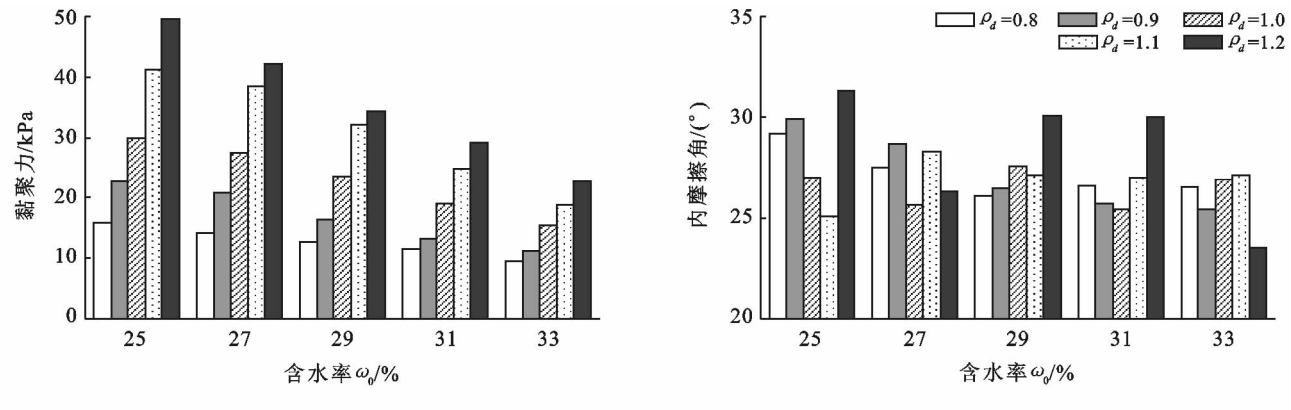


图 1　灌草林地土壤在不同含水率 ω_0 和干容重 ρ_d 下的土壤黏聚力和内摩擦角

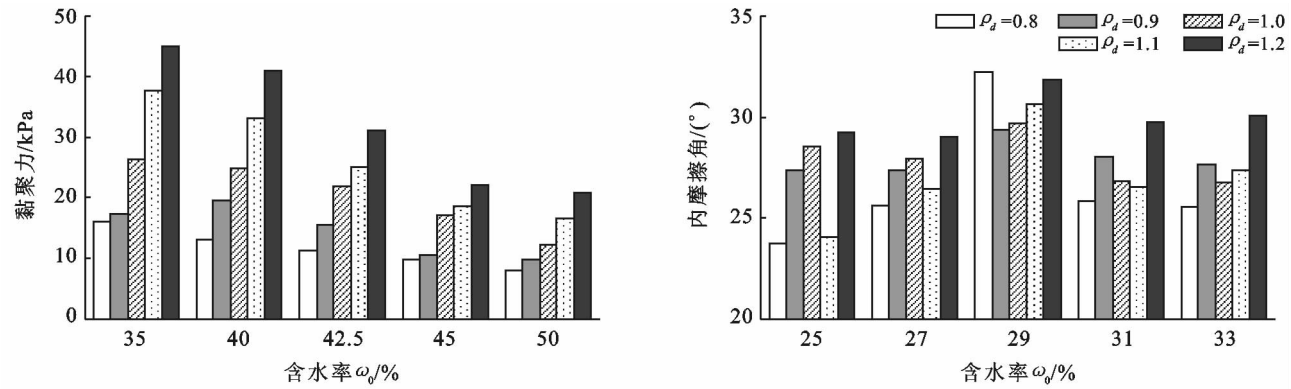


图 2　常绿阔叶林土壤在不同含水率 ω_0 和干容重 ρ_d 下的土壤黏聚力和内摩擦角

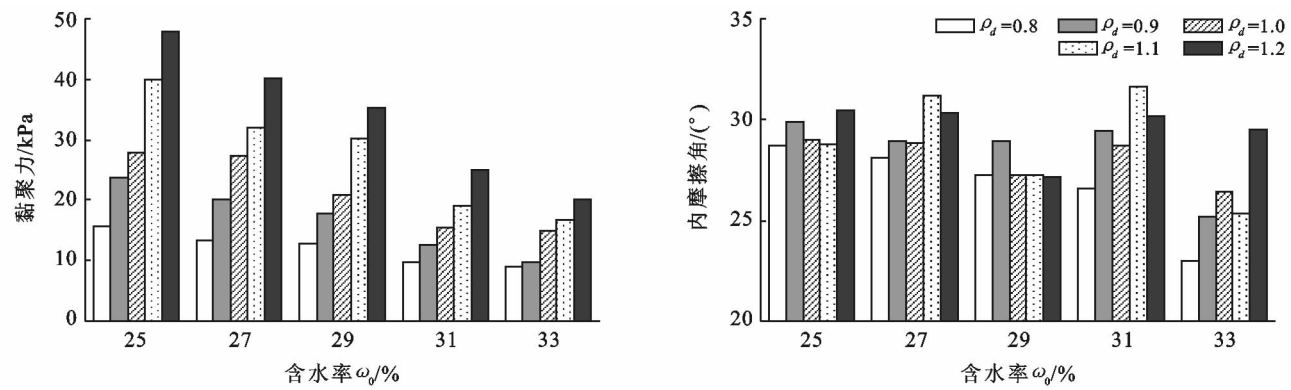


图 3　针阔混交林土壤在不同含水率 ω_0 和干容重 ρ_d 下的土壤黏聚力和内摩擦角

表 2 说明了植被类型、含水率 mc(%)和干容重 ρ_d(g·cm^{-3})对 tanφ、内摩擦角 φ(°)和黏聚力 c(kPa)的影响。从表中可以看出,植被类型对内摩擦角(φ)和黏聚力(c)影响不显著。含水率(mc)与土壤黏聚力 c 之间是显著的负相关关系,干容重和 tanφ、内摩擦角(φ)和黏聚力(c)之间呈现显著的正相关关系,而 tanφ、内摩擦角(φ)和黏聚力(c)显著负相关。各个相关关系均达到极显著水平。

表 2 各变量之间的相关系数矩阵

项 目	植被类型	含水率/%	干容重/(g·cm^{-3})	Tanφ	内摩擦角 φ/(°)	黏聚力 c/kPa
植被类型	1	0.157	−0.005	0.157	0.156	−0.237
含水率/%		1	0.105	0.224	0.221	−0.388**
干容重/(g·cm^{-3})			1	0.351**	0.344**	0.532**
tanφ				1	1.000**	−0.348**
内摩擦角 φ/(°)					1	−0.351**
黏聚力 c/kPa						1

注:* 代表在 $p<0.05$ 水平存在显著性差异,** 代表在 $p<0.01$ 水平存在极显著性差异。

2.2 不同植被类型土壤黏聚力随含水率和干容重的变化规律

不同含水率条件下,不同植被类型土地黏聚力(c)随干容重的变化规律,通过回归方程拟合,可以采用指数方程进行拟合,且方程拟合程度较高,ρ_d − ln$c$ 呈线性相关关系。

不同含水率下拟合的相关系数详见表 3。灌草林地的相关系数在 0.971~0.991 之间。常绿阔叶林的相关系数在0.965~0.987 之间。针阔混交林的相关系数在0.953~0.997 之间。

表 3 不同植被类型不同含水率下土壤抗剪强度指标随干容重变化的规律

植被类型	拟合方程	相关系数 R^2	统计范围			
			ω/%	c/kPa	φ/(°)	ρ_d/(g·cm^{-3})
SGF	ln$c$=0.534+2.850 2ρ_d	0.991	25×(1±1%)	15~50	25~32	0.8~1.2
	ln$c$=0.504+2.775 8ρ_d	0.971	27×(1±1%)	14~43	25~29	0.8~1.2
	ln$c$=0.472+2.633 5ρ_d	0.967	29×(1±1%)	12~35	26~31	0.8~1.2
	ln$c$=0.439+2.471 3ρ_d	0.978	31×(1±1%)	11~30	25~31	0.8~1.2
	ln$c$=0.419+2.274 2ρ_d	0.989	33×(1±1%)	9~23	23~28	0.8~1.2
EBF	ln$c$=0.444+2.825 1ρ_d	0.965	25×(1±1%)	16~46	23~30	0.8~1.2
	ln$c$=0.411+2.775 9ρ_d	0.987	27×(1±1%)	13~41	25~30	0.8~1.2
	ln$c$=0.388+2.570 3ρ_d	0.971	29×(1±1%)	11~32	29~33	0.8~1.2
	ln$c$=0.375+2.378 3ρ_d	0.980	31×(1±1%)	9~23	25~30	0.8~1.2
	ln$c$=0.321+2.222 8ρ_d	0.974	33×(1±1%)	8~21	25~31	0.8~1.2
CBF	ln$c$=0.611+2.750 3ρ_d	0.983	25×(1±1%)	15~48	28~31	0.8~1.2
	ln$c$=0.558+2.653 5ρ_d	0.972	27×(1±1%)	13~41	28~32	0.8~1.2
	ln$c$=0.552+2.538 4ρ_d	0.985	29×(1±1%)	12~36	27~29	0.8~1.2
	ln$c$=0.499+2.248 9ρ_d	0.997	31×(1±1%)	9~25	26~32	0.8~1.2
	ln$c$=0.462+2.138 6ρ_d	0.953	33×(1±1%)	8~20	23~30	0.8~1.2

由表 3 可以看出,灌草林地、常绿阔叶林和针阔混交林 ρ_d − ln$c$ 的拟合方程常数项和一次项系数之间的比值总体差别不大,在 4.50~6.92 之间。这里以灌草林地土壤为例进行说明。

对于灌草林地土壤,拟合方程为:

ω=25×(1±1%), ln$c$=0.534+2.850 2ρ_d

ω=27×(1±1%), ln$c$=0.504+2.775 8ρ_d

ω=29×(1±1%), ln$c$=0.472+2.633 5ρ_d

ω=31×(1±%), ln$c$=0.439+2.471 3ρ_d

ω=33×(1±%), ln$c$=0.419+2.274 2ρ_d

上述方程中,把含水率 ω=25×(1±1%)的常数项和一次项作为基准值,含水率 ω=27×(1±1%)时的常数项和一次项分别与各自基准值的比值为0.943 和 0.974,两者相差 3.2%,两个方程大致符合线性相关关系;而含水率 ω=29×(1±1%)时的常数项和一次项分别与各自基准值的比值为 0.883 和 0.924,两

者相差 4.4%,含水率 $\omega=31\times(1\pm1\%)$时的常数项和一次项分别与各自基准值的比值为 0.822 和 0.867,两者相差 5.2%,含水率 $\omega=33\times(1\pm1\%)$时的常数项和一次项分别与各自基准值的比值为0.785 和 0.798,两者相差 1.6%,方程也大致符合线性相关关系。因此,考虑含水率 ω 对 ln$c$ 的线性影响系数为 β,有:

$\omega=25\times(1\pm1\%)$, $\beta=1$

$\omega=27\times(1\pm1\%)$, $\beta=(0.943+0.974)/2=0.958$

$\omega=29\times(1\pm1\%)$, $\beta=(0.883+0.924)/2=0.903$

$\omega=31\times(1\pm1\%)$, $\beta=(0.822+0.867)/2=0.844$

$\omega=33\times(1\pm1\%)$, $\beta=(0.785+0.798)/2=0.792$

经拟合,可得 $\beta=-0.026\ 5\omega+1.669\ 3$($R^2=0.997$),再把含水率 ω 的线性影响代入公式,最后的形式为:

$$\ln c=(0.534+2.850\ 2\rho_d)(-0.026\ 5\omega+1.669\ 3)$$

根据上述的分析方法,也可得到常绿阔叶林和针阔混交林的预测公式。考虑含水率的变化对土壤黏聚力的影响,最后的结果详见表 4。为验证公式的有效性,另外进行试验,进行实测数据和预测数据的对比,结果表明实测数据与预测数据间的误差较小,可满足工程精度要求(表 5)。

表 4　不同植被类型土壤黏聚力随干容重与含水率的变化关系

植被类型	线性影响系数 β	相关系数 R^2	经验公式
SGF	$-0.026\ 5\omega+1.669\ 3$	0.997	$\ln c=(0.534+2.850\ 2\rho_d)(-0.026\ 5\omega+1.669\ 3)$
EBF	$-0.030\ 1\omega+1.761\ 6$	0.985	$\ln c=(0.444+2.825\ 1\rho_d)(-0.030\ 1\omega+1.761\ 6)$
CBF	$-0.029\ 4\omega+1.739\ 9$	0.975	$\ln c=(0.611+2.750\ 3\rho_d)(-0.029\ 4\omega+1.739\ 9)$

表 5　经验公式 $\ln c=(A+B\rho_d)(C_\omega+D)$预测结果分析

植被类型	干容重/(g·cm^{-3})	含水率 mc(%)	预测值 (kpa)	实测值 (kpa)	误差值 (%)
SGF	1.15	26.5	39.89	39.24	1.6
	1.24	27.8	44.44	45.12	−1.5
	1.07	30.2	22.52	23.05	−2.3
EBF	1.05	24.5	32.88	32.67	0.6
	1.13	28.6	26.45	25.23	4.8
	1.26	29.4	33.44	32.45	3.1
CBF	0.98	23.9	30.86	30.65	0.7
	1.13	28.8	27.70	28.13	−1.5
	1.27	31.2	29.25	28.79	1.6

3　讨 论

(1) 水分是影响土壤抗剪强度的最主要因素之一[17-18],黏聚力主要是由于土壤间的细粒连接形成,影响土壤的稳定性。研究发现,含水率对黏聚力作用比较明显,而对内摩擦角的影响相对微弱。这和黄琨等[11]研究结果一致。随着含水率的增加,土壤黏聚力减小,边加敏等[19]也有同样的结论,但是土壤内摩擦角对应的减小,却和本文得出的结论有偏差,本研究发现,随着含水率的增加,3 种植被类型的内摩擦角变化规律是不同的,灌草林地和针阔混交林的土壤内摩擦角随着含水率的增加相应的减小,而常绿阔叶林却呈现先增大再减小的趋势。这可能和植被类型以及土壤的理化性质有关,不同类型的土壤,内摩擦角主要与土壤的颗粒大小、结构及密实度等紧密相关[20-21]。土壤的粒径级配在一定程度上影响了其的内部结构[22],对内摩擦角影响显著[23]。土壤黏聚力随着土壤含水率的变化而变化,它是由基质吸力或负孔隙水压力产生[24]。随着土壤含水率的增大,基质吸力减小,空隙水压力增大,水和土粒之间的水膜增厚,水膜对土粒的吸力减小,土壤颗粒间的联结力变小,黏聚效果变低,土的抗剪强度降低,黏聚力为土壤抗剪强度的主控因素。而含水率的增加,同时使得土壤中游离的铁铝氧化物的胶结作用逐渐降低,破坏了土壤的胶结物质,使得抗剪强度降低[25-26]。随着含水率的增加,水在颗粒之间发挥润滑作用,使得摩擦角逐渐减小,从而呈现内摩擦角波动变化但整体下降的趋势[27],但是本文含水率对内摩擦角的影响不显著,这和王丽等的结论一致[28],含水率对黏聚力的影响远大于其对内摩擦角的影响。

(2) 土壤干容重反映了土粒间的压实程度,本文研究表明,随着干容重的增加,土壤黏聚力和内摩擦角都呈现显著增加的趋势,黏聚力的规律性更加明显。这和张奎等[29]得到的结论一致。土壤的干容重越大,土粒间的空隙越小,接触点越多,结合的越紧密,从而黏聚力增大。一般情况下,含水率一定时越密实的土,其内摩擦角越大。土壤越密实,颗粒挤得越来越紧密,整体结构性越好(颗粒间的约束作用越强),在剪切过程中颗粒间的摩擦力逐渐增大,故内摩擦角增大[30]。

(3) 本文通过拟合干容重和黏聚力,发现黏聚力的对数与干容重呈正相关。这与申春妮等[15]研究结果相同,证明黏聚力随干容重呈指数增加。在研究抗剪强度的影响因素时,应综合考虑各因子的共同作

用。本文综合考虑了含水率和干容重对抗剪强度指标黏聚力(c)的共同影响,发现黏聚力的对数与含水率呈线性负相关,这与许旭堂等[31]研究结果一致。通过研究含水率和干容重的交互作用,能够更好的表征黏聚力的变化规律,为预测抗剪强度强弱和土壤稳定性提供依据。

(4) 影响土壤抗剪强度的因素错综复杂,本文仅解释了土壤含水率和干容重的影响效应,要进一步解释抗剪强度的受影响机制,尚需结合土壤酸碱度、机械组成等其他因子的作用[32-33],从而丰富边坡土壤抗剪强度的影响机理,为提高边坡稳定性作科学参考。

4 结 论

(1) 土壤黏聚力(c)和干容重显著正相关,和含水率显著负相关,内摩擦角(φ)和干容重显著正相关。

(2) 土壤黏聚力随含水率的增加而减小,随干容重的增加而增加,规律明显;随着干容重的增加,内摩擦角有明显增加的趋势,相对于黏聚力,内摩擦角受含水率的影响较小,随含水率的增大,在灌草林地和针阔混交林表现出非线性减小的特征,在常绿阔叶林呈现先增大后减小的趋势,考虑出现最优含水率。

(3) 在同一含水率下,干容重对 3 类土壤黏聚力具有增强作用,ρ_d $-\ln c$ 呈线性正相关,本文考虑干容重和含水率对土壤抗剪强度的共同作用,建立经验公式,为边坡稳定性预测和边坡整治提供参考。

[参 考 文 献]

[1] 王玉平,曾志强,潘树林. 边坡稳定性分析方法综述[J]. 西华大学学报:自然科学版,2012,31(2):101-105.

[2] 嵇晓雷. 基于植被根系分布形态的生态边坡稳定性研究[D]. 江苏 南京:南京林业大学,2013.

[3] 倪九派,高明,魏朝富,等. 干密度和含水率对岩溶地区黄壤抗剪强度的影响:以重庆市南川区木渡河小流域为例[J]. 中国岩溶,2012,31(1):82-86.

[4] 夏艳华. 黄土抗侵蚀能力与抗剪强度的关系研究[D]. 北京:中国科学院研究生院,2003.

[5] De Guzman E M B, Stafford D, Alfaro M C, et al. Large-scale direct shear testing of compacted frozen soil under freezing and thawing conditions[J]. Cold Regions Science and Technology, 2018,151:138-147.

[6] 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.

[7] 李想,王瑄,盛世博,等. 不同土地利用方式土壤抗剪强度及其影响因子分析[J]. 水土保持学报,2016,30(5):102-106.

[8] 陈高峰,杨帅东,苏涛,等. 不同含水率下土体抗剪强度试验及破坏过程分析[J]. 人民珠江,2016,37(12):37-41.

[9] Liu Jie, Chen Pan, Li Wwentao. Assessing Hydraulic Hysteresis Models to Characterize Unsaturated Flow Behavior under Drying and Wetting Conditions[J]. International Journal Geomechanics, 2018,18(7):8.

[10] 倪九派,袁天泽,高明,等. 土壤干密度和含水率对 2 种紫色土抗剪强度的影响[J]. 水土保持学报,2012,26(3):72-77.

[11] 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.

[12] Qi Shunchao, Vanapalli S K. Simulating hydraulic and mechanical responses of unsaturated expansive soil slope to rainfall: Case study[J]. International Journal of Geomechanics, 2018,18(6)05018002.

[13] 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.

[14] 杨永红,刘淑珍,王成华. 土壤含水量和植被对浅层滑坡土体抗剪强度的影响[J]. 灾害学,2006,21(2):50-54.

[15] 申春妮,方祥位,王和文,等. 吸力、含水率和干密度对重塑非饱和土抗剪强度影响研究[J]. 岩土力学,2009,30(5):1347-1351.

[16] 张万儒,许本彤. 森林土壤定位研究方法[M]. 北京:中国林业出版社,1986.

[17] 林敬兰,黄炎和,张德斌,等. 水分对崩岗土体抗剪切特性的影响[J]. 水土保持学报,2013,27(3):55-58.

[18] 张晓明,丁树文,蔡崇法. 干湿效应下崩岗区岩土抗剪强度衰减非线性分析[J]. 农业工程学报,2012,28(5):241-245.

[19] 边加敏,王保田. 含水量对非饱和土抗剪强度参数的影响研究[J]. 地下空间与工程学报,2011, 7(1):17-21.

[20] 李雪梅,陈玉明,袁利伟,等. 含水率对尾矿抗剪强度影响的试验研究[J]. 黄金,2016,37(4):70-73.

[21] Sun Pinghe, Tian Mingjin, Cao Han, et al. Study on the mechanism of ENI action on preventing drilling fluid overflowing in HDD[J]. Tunn Undergr Space Technol, 2018,77:94-102.

[22] Georgiannou V N, Coop M R, Altuhafi F N, et al. Compression and strength characteristics of two silts of low and high plasticity[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2018,144(7):12.

[23] 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.

[24] 王晨沣,张守红,王彬,等. 不同土壤前期含水量对土壤分离临界水动力学特性及其抗剪强度的影响[J]. 水土保持学报,2017,31(1):91-96.

(下转第 102 页)

拟研究[D].陕西 西安:西安理工大学,2006.
[12] 刘宝元.西北黄土高原区土壤侵蚀预报模型开发项目研究成果报告[R].北京:水利部水土保持监测,2006.
[13] Mccool D K, Brown L C, Foster G R, et al. Revised slope steepness factor for the universal soil loss equation[J]. Transactions of the ASAE-American Society of Agricultural Engineers(USA), 1987,30(5):1387-1396.
[14] Zhang, Hongming, Yao Zhihong, Yang Qinke, et al. An integrated algorithm to evaluate flow direction and flow accumulation in flat regions of hydrologically corrected DEMs[J]. Catena, 2017 (151):174-181.
[15] Zhu Hanhua, Wu Jinshui, Guo Shengli, et al. Land use and topographic position control soil organic C and N accumulation in eroded hilly watershed of the Loess Plateau[J]. Catena, 2014, 120(1):64-72.
[16] 谢红霞.延河流域土壤侵蚀时空变化及水土保持环境效应评价研究[D].陕西 西安:陕西师范大学,2008.
[17] Liu Baoyuan, Nearing M A, Shi P J, et al. Slope length effects on soil loss for steep slopes[J]. Soil Science Society of America Journal, 1994,64(5):1759-1763.
[18] 张科利,彭文英,杨红丽.中国土壤可蚀性值及其估算[J].土壤学报,2007,44(1):7-13.
[19] 林慧龙,郑舒婷,王雪璐.基于RUSLE模型的三江源高寒草地土壤侵蚀评价[J].草业学报,2017,26(7):11-22.
[20] 中华人民共和国水利部.SL190-2007土壤侵蚀分类分级标准[M].北京:中国水利水电出版社,2008:3-12.
[21] 张岩,刘宝元,史培军,等.黄土高原土壤侵蚀作物覆盖因子计算[J].生态学报,2001,21(7):1050-1056.
[22] 怡凯,王诗阳,王雪,等.基于RUSLE模型的土壤侵蚀时空分异特征分析:以辽宁省朝阳市为例[J].地理科学,2015,35(3):365-372.
[23] 杨冉冉,徐涵秋,林娜,等.基于RUSLE的福建省长汀县河田盆地区土壤侵蚀定量研究[J].生态学报,2013,33(10):2974-2982.
[24] 冯强,赵文武. USLE/RUSLE中植被覆盖与管理因子研究进展[J].生态学报,2014,34(16):4461-4472.
[25] 陈思旭,杨小唤,肖林林,等.基于RUSLE模型的南方丘陵山区土壤侵蚀研究[J].资源科学,2014,36(6):1288-1297.
[26] 王锦志,刘林,王小平.3S技术在王家沟流域沟道侵蚀研究中的应用[J].山西水土保持科技,2017(3):9-12.
[27] 方广玲,香宝,赵卫,等.基于GIS和RUSLE的拉萨河流域土壤侵蚀研究[J].水土保持学报,2015,29(3):6-12.
[28] 王春梅,杨勤科,王琦,等.区域土壤侵蚀强度评价方法研究:以安塞县为例[J].中国水土保持科学,2010,8(3):1-7.
[29] 孟祥志,刘艇,王继红.我国黑土区水土流失研究综述[J].中国农村水利水电,2010(10):36-38.
[30] 李斌兵,郑粉莉,龙栋材,等.基于GIS纸坊沟小流域土壤侵蚀强度空间分布[J].地理科学,2009,29(1):105-110.

(上接第94页)

[25] 林金石,庄雅婷,黄炎和,等.不同剪切方式下崩岗红土层抗剪特征随水分变化规律[J].农业工程学报,2015,31(24):106-110.
[26] Perfect E, Mclaughlin N B, Kay B D, et al. An improved fractal equation for the soil water retention curve[J]. Water Resources Research, 1996,32(2):281-288.
[27] 施威,魏继红,宋京雷,等.含水率对下蜀土抗剪强度的影响[J].西华大学学报:自然科学版,2016,35(3):97-101.
[28] 王丽,梁鸿.含水率对粉质黏土抗剪强度的影响研究[J].内蒙古农业大学学报:自然科学版,2009,30(1):170-174.
[29] 张奎,李梦姿,杨贝贝.含水率和干密度对重塑黄土抗剪强度的影响[J].安徽理工大学学报:自然科学版,2016,36(3):74-79.
[30] 李振,邢义川.干密度和细粒含量对砂卵石及碎石抗剪强度的影响[J].岩土力学,2006,27(12):2255-2260.
[31] 许旭堂,简文彬,柳侃.含水率和干密度对残积土抗剪强度参数的影响[J].地下空间与工程学报,2015,11(2):364-369.
[32] Su Lijun, Zhou Wanhua, Chen Weibin, et al. Effects of relative roughness and mean particle size on the shear strength of sand-steel interface[J]. Measurement,2018,122:339-346.
[33] Gyssels G, Poesen J, Bochet E, et al. Impact of plant roots on the resistance of soils to erosion by water: A review[J]. Progress in Physical Geography, 2005,29(2):189-217.