

干湿循环条件下重庆地区三种土壤 抗剪强度的动态变化*

倪九派 高明 魏朝富 谢德体[†]

(西南大学资源环境学院, 三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400715)

摘要 选择广泛分布于重庆丘陵山区的黄壤、钙质紫色土和中性紫色土 3 种土壤, 通过对室内三轴剪切试验, 测定含水率和容重交互作用对土壤抗剪强度指标的影响。在含水率和容重对土壤抗剪强度影响分析的基础上, 3 种土壤按各自最优含水率和容重制作干湿循环试验土样, 进行干湿循环条件下土壤抗剪强度的动态变化分析。试验结果显示: (1) 在相同容重情况下, 3 种土壤黏聚力 c 值随着含水率的增加呈现出先增加后减小的趋势, 在相同土壤含水率水平下, 土壤黏聚力 c 值随容重增大而增大; 3 种土壤内摩擦角 φ 值在各容重条件下均随着含水率增加呈明显减小的趋势。(2) 含水率和容重的交互作用对土壤黏聚力 c 值有显著影响。黏聚力 c 值在 $1.3 \sim 1.7 \text{ g cm}^{-3}$ 容重范围内随着容重的增大而增大, 且每一个容重均有一个含水率与之对应。在这样一个交互作用下黏聚力 c 值达到最大, 含水率和容重的交互作用对内摩擦角 φ 值影响相对较小。同一容重下, 其 φ 值差异不大, 随容重的增大缓慢增大。(3) 3 种土壤的黏聚力 c 值均随干湿循环次数的增加均呈减小趋势, 且前两次循环 c 值衰减幅度都很大, 从第三次干湿循环至第五次干湿循环黏聚力 c 值衰减幅度很小, 趋于稳定。(4) 3 种土壤在干湿循环后内摩擦角 φ 值总体呈减小趋势, 但不同土壤类型间存在差异, 第五次循环结束后, 黄壤为 24.6° , 中性紫色土为 22.6° , 钙质紫色土为 19.3° 。

关键词 土壤含水率; 土壤容重; 土壤抗剪强度; 干湿循环

中图分类号 F301.24 **文献标识码** A

土地平整是丘陵山区稳产高产农田建设不可缺少的措施。科学合理的土地平整工程, 对合理灌溉的实现、保水、保土、保肥性能的提升、机械作业效率的发挥以及劳动生产率的提高等均有着重要的作用^[1-4]。田土坎的修筑是丘陵山区土地平整工程的重要环节。但是, 随着丘陵山区土地整理工程的大面积开展, 已实施土地整理工程部分暴露出严重问题, 尤其是丘陵山区修建的田土坎屡见垮塌。土地平整工程中田土坎的修筑需要考虑到诸多因素, 其中干湿循环条件下土壤抗剪强度的变化对田土坎的稳定性有着重要的影响。因此, 本文选择广泛分布于重庆丘陵山区的黄壤、钙质紫色土和中性紫色土 3 种土壤, 通过对室内三轴剪切试验, 测定含水率和容重交互作用对土壤抗剪强度指标的影响。在含水率和容重对土壤抗剪强度影响分析的

基础上, 三种土壤按各自最优含水率和容重制作干湿循环试验土样, 进行干湿循环条件下 3 种土壤抗剪强度的动态变化分析, 以为丘陵山区高标准基本农田建设以及水土环境的保护提供一定的理论依据。

1 实验与方法

1.1 供试土壤

供试土壤分别为黄壤、钙质紫色土和中性紫色土, 其中钙质紫色土取自潼南县桂林镇高何村, 中性紫色土取自西南大学试验农场, 黄壤取自北碚区槽上乡鸡公山。按随机取样, 取耕作层下 $20 \sim 40 \text{ cm}$ 土壤 30 kg 带回实验室风干用于抗剪强度的测定。按坡度 ($8^\circ, 15^\circ, 20^\circ$) 分别采 9 个环刀样, 用于

* 国家科技支撑计划项目(2013BAJ11B03)、中央高校基本科研业务费项目(XDJK2012B003)资助

[†] 通讯作者: 谢德体, 教授, 博士生导师, 主要从事农业资源与环境等方面的研究。E-mail: xdt@swu.edu.cn

作者简介: 倪九派(1976—), 湖北孝感人, 博士, 教授, 主要从事水土保持、地理信息系统及土地资源管理与利用等方面的研究。E-mail: nijupai@163.com

收稿日期: 2013-01-23; 收到修改稿日期: 2013-05-28

测定土壤物理性状,包括 ρ_d (容重)、 G_s (土粒相对密度)、 e (孔隙比)、 ω (含水量)、 I_p (塑性指数)、 I_L (液性指数) 以及颗粒组成,其结果见表 1。

表 1 供试土壤的物理性质
Table 1 Physical properties of the soil samples

土壤类型 Soil type	ρ_d (g cm^{-3})	G_s	e	ω (%)	I_p	I_L	颗粒组成 (%)			土壤质地 Soil texture
							Size composition			
							<0.02 mm	0.02 ~ 0.002 mm	2 ~0.02 mm	
黄壤 Yellow soil	1.41	2.72	0.93	15.84	19.1	0.71	52.65	15.08	32.27	黏土 Caly soil
钙质紫色土 Calcareous purple soil	1.35	2.70	0.99	15.47	18.3	0.74	59.19	20.77	20.03	黏土 Caly soil
中性紫色土 Neutral purple soil	1.54	2.67	0.84	16.25	—	—	12.94	8.74	78.32	砂土 Sandy soil

1.2 试验设计

1.2.1 土样准备 将采集的土样自然风干,放在橡皮板上用木棒碾散,根据三轴压缩试验要求通过 1 mm 的筛,取筛下足够试验用的土样,充分拌匀,测定风干土含水率,装入保湿袋备用^[5-6]。

1.2.2 试验方案 交互作用:为测定含水率和容重交互作用对 3 种土壤抗剪强度指标的影响,共设计了 75 个处理,其中涉及土壤类型为 3 种,含水率处理为 5 个水平 (5%, 10%, 15%, 20%, 25%),容重处理为 5 个水平 (1.3、1.4、1.5、1.6、1.7 g cm^{-3})。称取过筛的风干土样平铺于搪瓷盘内,按下述公式计算需水量 (去离子水),然后均匀喷洒于土样上,充分拌匀后装入盛土容器内密封,润湿一昼夜,从而配制成不同含水率的散状土^[7-8]。根据试验所需土量与含水率,制备试样所需的加水量按下式计算:

$$m_w = \frac{0.01m_0(v_1 - v_0)}{1 + 0.01v_0}$$

式中, m_w 为制备试样所需加水量 (g); m_0 为湿土 (或风干土) 质量 (g); v_0 为湿土 (或风干土) 含水率 (%); v_1 为制样要求的含水率 (%)。

根据饱和器容积和设计的容重,单个试件所需湿土质量按下式计算:

$$m_0 = (1 + 0.01v_0)\rho_d V$$

式中, ρ_d 为试样的容重 (g cm^{-3}); V 为试样体积 (饱和器容积) (cm^3)。

干湿循环:干湿循环试验所需试样,在常规三轴试验结束并对手剪强度指标分析处理后,按计算的最优含水率配制土样,并按计算的最优容重击实

试样^[9]。各土壤类型设计干湿循环为 6 次,分别为 0、1、2、3、4、5 次。0 次循环试样直接测定其抗剪强度参数。其余试样在 40℃ 恒温鼓风状态下干燥 6 h,试样增湿采用喷水,通过称量试样干燥前后质量差计算失水量,增湿分 3 次进行,每次间隔 2 h,增湿结束后用保鲜膜密封试样,并置于保湿罐中放置 72 h 以达到水分均匀的目的。如此完成第一次干湿循环,同理进行 2 至 5 次干湿循环。

1.2.3 测定方法 采用 TSZ 全自动三轴仪 (南京土壤仪器厂) 进行不固结不排水 (UU) 剪切试验,三轴剪切试件的直径为 3.91 cm,高度为 8 cm。按照设计干容重,称取一定质量土样,分 5~8 层均匀装入饱和器内击实,各层土料数量相等,各层接触面应刨毛。击完最后一层,将饱和器内地试样两端用平口刀削平,取出试样称量是否与设计所计算的质量一致^[10-11]。为消除试样之间的误差,本次试验采用多级剪,即对一个试样在不同围压下测定^[12-14]。按土工试验规程,试验主要参数设定为轴向应变 5%, 10%, 15%, 20%; 对应的围压 σ_3 设定分别为 100、200、300、400 kPa; 剪切速率设定为 0.8 mm m^{-1} 。

1.2.4 数据处理 抗剪强度指标采用南京土壤仪器厂提供的土工试验微机控制数据采集系统进行采集,其他土壤物理性质指标在西南大学土壤物理实验室进行分析。描述性统计分析在 Excel 和 SPSS 中进行。交互效应采用牛顿法 (BFGS) + 通用全局优化算法 (Universal Global Optimization - UGO) 通过 1stOpt1.5 进行多元回归分析^[15-16],并在 Matlab 中编程生成响应曲面^[17-19]。

2 结果与讨论

2.1 容重和含水率对土壤黏聚力 c 的影响

2.1.1 统计特征 黄壤黏聚力 c 对含水率及容重的响应见图 1。图 1 表明黄壤黏聚力 c 随着含水率增加呈现出先增加后减小的趋势。在土壤容重为 1.3、1.4、1.5 g cm^{-3} 的条件下,含水率从 5% 至 10% 黏聚力增幅不大;从 10% 至 20%、25% 缓慢减小。在土壤容重为 1.6、1.7 g cm^{-3} 的条件下,含水率从 5% 至 10% 黏聚力增幅较大;从 10% 至 15% 迅速减小;15% 至 25% 减小程度趋缓。在各土壤含水率水平下,土壤黏聚力 c 总体随容重增大而增大,容重为 1.3、1.4 g cm^{-3} 时增大趋势不明显,当容重从 1.4 g cm^{-3} 至 1.71 g cm^{-3} 土壤黏聚力明显增大,且在 10% 含水率水平下增大效应最明显。

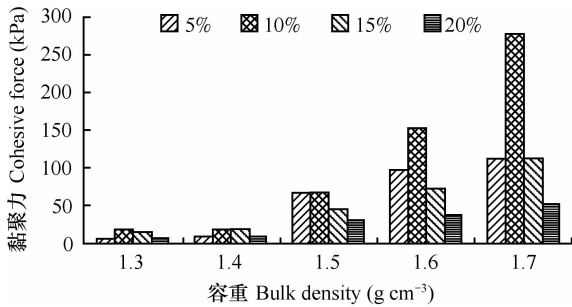


图 1 黄壤在不同容重和含水率下的土壤黏聚力

Fig. 1 Soil cohesive force of yellow soil as affected by ρ_d and ω

钙质紫色土土壤黏聚力 c 对含水率及容重的响应见图 2。图 2 表明土壤黏聚力 c 随着含水率增加呈现出先增加后减小的趋势。在土壤容重为 1.3、1.4、1.5、1.6 g cm^{-3} 的条件下,含水率从 5% 至 15% 黏聚力增幅不大;从 15% 至 20%、25% 缓慢减小;黏聚力 c 最大值出现在含水率 15% 水平。在土壤容重为 1.7 g cm^{-3} 的条件下,含水率从 5% 至 10% 黏聚力增幅较大;从 10% 至 20% 迅速减小;黏聚力 c 最大值出现在含水率 10% 水平。在各土壤含水率水平下,土壤黏聚力 c 总体随容重增大而增大,容重为 1.3、1.4 g cm^{-3} 时增大趋势不明显;当容重从 1.4 g cm^{-3} 至 1.7 g cm^{-3} 土壤黏聚力明显增大,且在 10% 含水率水平下增大效应最明显。

中性紫色土土壤黏聚力 c 对含水率及容重的响应见图 3。图 3 表明在容重为 1.3、1.4、1.7 g cm^{-3} 时土壤黏聚力 c 随着含水率增加呈现出先增加后减

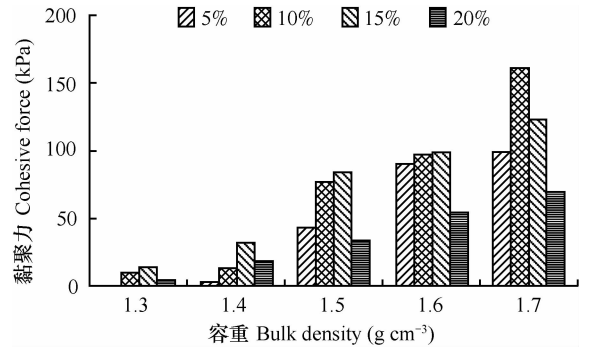


图 2 钙质紫色土在不同容重和含水率下的土壤黏聚力

Fig. 2 Soil cohesive force of calcareous purple soil as affected by ρ_d and ω

小的趋势。在土壤容重为 1.3、1.4 g cm^{-3} 的条件下,含水率从 5% 至 15% 黏聚力增幅不大;从 15% 至 20%、25% 缓慢减小;黏聚力 c 最大值出现在含水率 15% 水平。在土壤容重为 1.5、1.6 g cm^{-3} 的条件下,含水率从 5% 至 20% 黏聚力呈减小趋势,黏聚力 c 最大值出现在含水率 5% 水平。在土壤容重为 1.7 g cm^{-3} 的条件下,含水率从 5% 至 10% 黏聚力增幅较大;从 10% 至 20% 迅速减小;黏聚力 c 最大值出现在含水率 10% 水平。在各土壤含水率水平下,土壤黏聚力 c 总体随容重增大而增大。容重为 1.3、1.4 g cm^{-3} 时增大趋势不明显。当容重从 1.4 g cm^{-3} 至 1.7 g cm^{-3} 土壤黏聚力明显增大,且在 10% 含水率水平下增大效应最明显,其次为 5%、15%。当含水率达到 20% 时,黏聚力 c 基本不再随容重增大而增大。

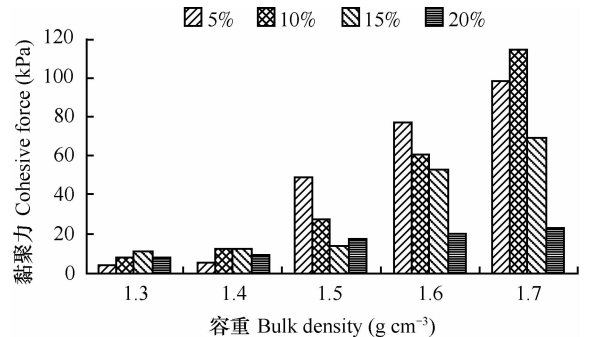


图 3 中性紫色土在不同容重和含水率下的土壤黏聚力

Fig. 3 Soil cohesive force of neutral purple soil as affected by ρ_d and ω

三种土壤类型土壤黏聚力 c 在各容重条件下随含水率基本呈先增大后减小的趋势,只有中性紫色土在容重为 1.5、1.6 g cm^{-3} 时黏聚力 c 随含水率增大直接呈递减趋势。各土壤类型黏聚力 c 出现最值

的含水率基本都在 10%,但黏聚力 c 最大值在各土壤类型间表现出了较大的差异。黄壤土壤黏聚力 c 最大值为 276 kPa,钙质紫色土土壤黏聚力 c 最大值为 161.3 kPa,中性紫色土土壤黏聚力 c 最大值为 113.7 kPa。与峰值相比,随着含水率的增加在容重为 1.7 g cm^{-3} 时黄壤粘聚力 c 值降低了 80.72%,中性紫色土黏聚力 c 值降低了 80.03%,钙质紫色土黏聚力 c 值降低了 57.97%。

2.1.2 最优值模拟 不同容重条件下,黏聚力 c 随含水率的变化趋势可采用一元二次方程进行拟合描述,且拟合程度较高。不同容重下拟合的相关系数见表 2。黄壤在 0.658 3 ~ 0.98 之间,钙质紫色土在 0.878 5 ~ 0.962 7 之间,中性紫色土在

0.951 1 ~ 0.989 6 之间。对模型中的特征值 ω 和 c 分别进行计算可知容重为 1.7 g cm^{-3} 时,3 种土壤对应的黏聚力 c 均达到最大值。对于黄壤和钙质紫色土而言,黏聚力 c 出现最大值所对应的含水率大致在 10% ~ 15% 区间,中性紫色土黏聚力 c 出现最大值所对应的含水率大致在 15% 左右。其中出现了一个特异值,在容重 $1.5 \sim 1.7 \text{ g cm}^{-3}$ 时,黏聚力 c 最大值对应的含水率 ω 在 8% 左右。3 种土壤黏聚力 c 最大值差异较大,黄壤为 212.9 kPa,钙质紫色土为 150.5 kPa,中性紫色土为 107.3 kPa。黏聚力 c 最小值差异不大,黄壤为 12.63 kPa,钙质紫色土为 10.94 kPa,中性紫色土为 10.42 kPa。

表 2 3 种土壤黏聚力 c 的回归方程

Table 2 Regression equation for soil cohesive force of the three types of soils

土壤类型 Soil type	容重 Bulk density (g cm^{-3})	回归方程 Regression equation	相关系数 Correlation coefficient	ω (%)	c (kPa)
黄壤 Yellow soil	1.3	$c = -0.191\omega^2 + 4.741\omega - 13.02$	0.980 0	12	12.63
	1.4	$c = -0.0931\omega^2 + 2.254\omega + 2.76$	0.922 3	12	16.41
	1.5	$c = -0.152\omega^2 + 1.248\omega + 63.15$	0.957 6	6	65.59
	1.6	$c = -0.912\omega^2 + 17.58\omega + 41.45$	0.774 0	10	126.1
	1.7	$c = -2.218\omega^2 + 48.60\omega - 53.35$	0.658 3	11	212.9
钙质 紫色土 Calcareous purple soil	1.3	$c = -0.159\omega^2 + 4.237\omega - 17.27$	0.943 2	13	10.94
	1.4	$c = -0.2129\omega^2 + 6.719\omega - 27.48$	0.878 5	16	25.53
	1.5	$c = -0.804\omega^2 + 19.68\omega - 36.5$	0.962 7	12	83.93
	1.6	$c = -0.515\omega^2 + 10.76\omega + 46.32$	0.928 8	10	102.4
	1.7	$c = -1.183\omega^2 + 27.00\omega - 3.325$	0.921 1	11	150.5
中性 紫色土 Neutral purple soil	1.3	$c = -0.076\omega^2 + 2.208\omega - 5.6$	0.951 1	15	10.42
	1.4	$c = -0.0871\omega^2 + 2.396\omega - 3.92$	0.983 9	14	12.56
	1.5	$c = 0.263\omega^2 - 8.753\omega + 87.22$	0.989 6	5	50.03
	1.6	$c = -0.16\omega^2 + 0.352\omega + 78.05$	0.968 0	5	75.81
	1.7	$c = -0.628\omega^2 + 10.3\omega + 65.1$	0.967 2	8	107.3

容重和含水率是影响土壤抗剪强度的两个重要因子,容重和含水率同时发生变化时,黏聚力 c 会表现出较为规律的响应特性。尤其是在实验室精确控制的前提下,其变化规律更为明显和规则。换言之,容重和含水率对黏聚力 c 产生明显的交互效应,从而显著影响抗剪强度。当容重和含水率共同变化时黏聚力 c 表现为一个曲面,本研究采用牛顿

法 (BFGS) + 通用全局优化算法 (Universal Global Optimization -UGO) 进行曲面拟合。以含水率 ω 、容重 ρ_d 为自变量,黏聚力 c 为因变量,采用 1stOpt1.5 对试验数据进行多项式回归分析,回归模型检验参数见表 3,各项回归系数见表 4,各因子经拟合得回归方程:

$$c = \frac{P_1 + P_2 \times \ln\omega + P_3 \times (\ln\omega)^2 + P_4 \times (\ln\omega)^3 + P_5 \times (\ln\rho_d) + P_6 \times (\ln\rho_d)^2}{1 + P_7 \times \ln\omega + P_8 \times \ln\rho_d + P_9 \times (\ln\rho_d)^2 + P_{10} \times (\ln\rho_d)^3}$$

表 3 黏聚力 c 回归模型检验参数

Table 3 Parameters of the regression model for soil cohesive force

土壤类型 Soil type	RMSE	SSE	R	R^2	DC
黄壤 Yellow soil	9.697	1 974.8	0.989	0.977 **	0.977 9
钙质紫色土 Calcareous purple soil	7.764	1 265.8	0.985	0.971 **	0.971
中性紫色土 Neutral purple soil	6.403	8 60.9	0.981	0.961 **	0.961

注:表中 ** 表示 0.01 显著水平 ($n=25$) Note: ** Represents statistical significance at 0.01 ($n=25$)

表 4 3 种土壤黏聚力 c 回归模型系数

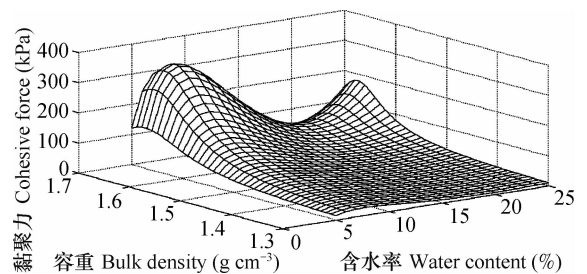
Table 4 Coefficient of the regression model for soil cohesive force of the three types of soils

参数 Parameter	黄壤 Yellow soil	钙质紫色土 Calcareous purple soil	中性紫色土 Neutral purple soil
P_1	-2 848	2.575	-70.11
P_2	3 789	-9.144	113.8
P_3	-1 578	4.879	-50.20
P_4	210.4	-0.807	6.597
P_5	316.8	16.08	50.29
P_6	-542.5	-19.30	-83.92
P_7	-0.156	0.003	-0.071
P_8	78.67	-6.34	14.22
P_9	-306.1	13.48	-63.03
P_{10}	295.4	-9.587	63.25

根据构建的模型,在含水率 5% ~ 25%,容重 1.3 ~ 1.7 g cm^{-3} 区间进行模拟。设定含水率变化步长为 1%,容重变化步长为 0.01 g cm^{-3} ,在 Matlab 中编程计算,通过多元回归方程生成黏聚力 c 对含水率和容重的响应曲面。

含水率和容重的交互作用对黏聚力 c 有显著影响。黏聚力 c 在 1.3 ~ 1.7 g cm^{-3} 范围内随着容重的增大而增大,且每一个容重均有一个含水率与之对应,在这样一个交互条件下 c 达到最大。在一定的含水率范围内,黏聚力 c 随着含水率的升高而增大,当超过这个含水率时,黏聚力 c 反而降低。对于黄壤而言,黏聚力 c 在容重为 1.7 g cm^{-3} 、含水率在 8% 达到极大值,此时黏聚力 c 为 301.3 kPa;容重在 1.3 ~ 1.5 g cm^{-3} 区间 c 值增大不明显,含水率超过 10% 之后呈 c 值迅速减小。对于钙质紫色土而言,黏聚力 c 在容重为 1.7 g cm^{-3} ,含水率在 11% 达到极大值,此时黏聚力 c 为 154.6 kPa,容重在 1.3 ~ 1.4 g cm^{-3} 区间 c 值增大不明显;1.4 ~ 1.5 g cm^{-3} 区间 c 值显著增大;含水率超过 15% 之后呈 c 值迅速减小。对于中性紫色土而言,黏聚力 c 在容重为 1.68 g cm^{-3} ,含水率在 8% 达到极大值,此时黏聚力 c 为 126.4 kPa,容重在 1.3 ~ 1.5 g cm^{-3} 区间 c 值增

大不明显;1.5 ~ 1.6 g cm^{-3} 区间 c 值显著增大;含水率超过 10% 之后呈 c 值迅速减小。三者相比较而言,黄壤和中性紫色土对容重及含水率反应缓慢,达到某一个区间值后才呈现出快速变化;而钙质紫色土,在容重和含水率开始有变化时,黏聚力 c 也相应呈现缓慢变化,逐渐达到极大值。结合图 4、图 5、图 6 可以知,当含水率在 8% ~ 11%,容重达到 1.68 ~ 1.7 g cm^{-3} 时均出现黏聚力 c 的最大值,含水率及容重任意一个因素为最佳时均不能满足黏聚力 c 极值的要求。黏聚力 c 既受到含水率和容重的单因素效应影响,同时也受到两者的交互影响。

图 4 黄壤黏聚力 c 对容重和含水率影响的响应面Fig. 4 Response surface of the soil cohesive force of yellow soil to ρ_d and ω

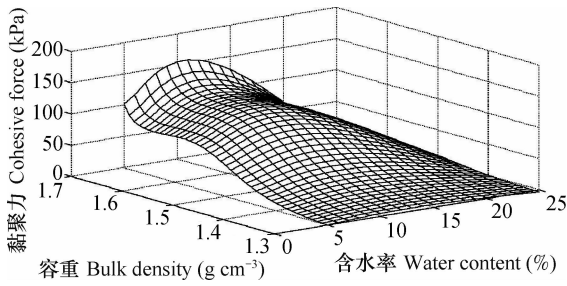


图5 钙质紫色土黏聚力 c 对容重和含水率影响的响应面

Fig. 5 Response surface of the soil cohesive force of calcareous purple soil to ρ_d and ω

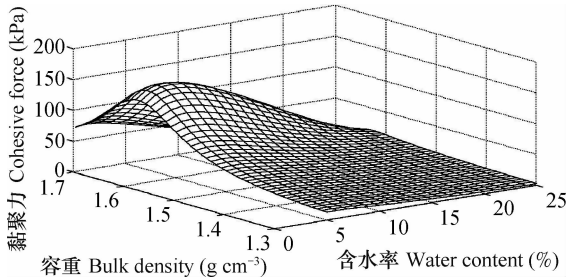


图6 中性紫色土黏聚力 c 对容重和含水率影响的响应面

Fig. 6 Response surface of the soil cohesive force of neutral purple soil to ρ_d and ω

2.2 容重和含水率对土壤内摩擦角 φ 的影响

2.2.1 统计特征 黄壤内摩擦角 φ 对含水率及容重的响应见图7。图7表明黄壤内摩擦角 φ 在各容重条件下均随着含水率增加呈明显减小的趋势, 衰减速率基本一致。含水率5%对应内摩擦角 φ 总体水平 > 含水率10%对应内摩擦角 φ 总体水平 > 含水率15%对应内摩擦角 φ 总体水平 > 含水率20%对应内摩擦角 φ 总体水平。同一含水率水平下, 内摩擦角 φ 随容重变化不明显, 土壤容重为 1.6 g cm^{-3} 内摩擦角相对较大。

钙质紫色土内摩擦角 φ 对含水率及容重的响应见图8。图8表明钙质紫色土内摩擦角 φ 在各容重条件下均随着含水率增加呈明显减小的趋势, 衰减速率基本一致。含水率5%对应内摩擦角 φ 总体水平 > 含水率10%对应内摩擦角 φ 总体水平 > 含水率15%对应内摩擦角 φ 总体水平 > 含水率20%对应内摩擦角 φ 总体水平。同一含水率水平下, 内摩擦角 φ 随容重变化不明显, 土壤容重为 1.7 g cm^{-3} 内摩擦角相对较大。

中性紫色土内摩擦角 φ 对含水率及容重的响应见图9。图9表明中性紫色土内摩擦角 φ 在各容重条件下均随着含水率增加呈明显减小的趋势, 衰

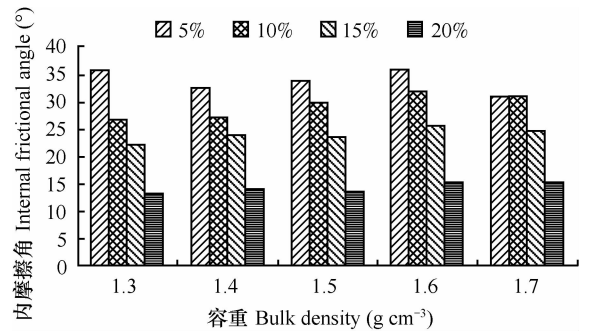


图7 黄壤在不同容重和含水率下的土壤内摩擦角

Fig. 7 Internal frictional angle of yellow soil as affected by ρ_d and ω

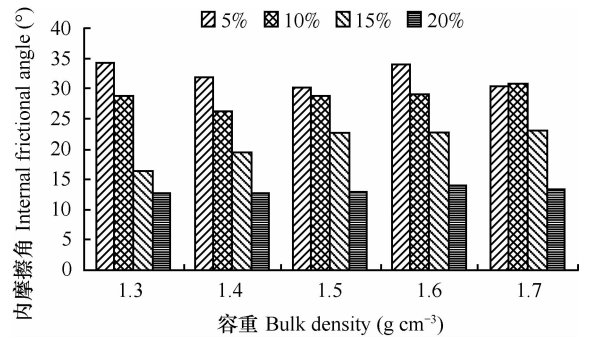


图8 钙质紫色土在不同容重和含水率下的土壤内摩擦角

Fig. 8 Internal frictional angle of calcareous purple soil as affected by ρ_d and ω

减速率基本一致。含水率5%对应内摩擦角 φ 总体水平 > 含水率10%对应内摩擦角 φ 总体水平 > 含水率15%对应内摩擦角 φ 总体水平 > 含水率20%对应内摩擦角 φ 总体水平。同一含水率水平下, 内摩擦角 φ 随容重变化不明显, 土壤容重为 1.7 g cm^{-3} 内摩擦角相对较大。

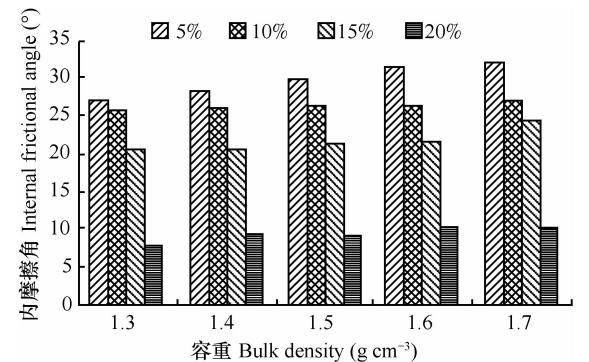


图9 中性紫色土在不同容重和含水率下的土壤内摩擦角

Fig. 9 Internal frictional angle of neutral purple soil as affected by ρ_d and ω

3 种土壤内摩擦角 φ 在不同容重条件下均随含水率呈递减趋势,各土壤类型内摩擦角 φ 出现最大值的含水率都在 5% 左右。但内摩擦角 φ 最大值在 3 种表现出了较大的差异,黄壤内摩擦角 φ 最大值为 35.7° ;钙质紫色土内摩擦角 φ 最大值为 34.2° ;中性紫色土内摩擦角 φ 最大值为 31.9° 。与最大值相比,随着含水率的增加在容重为 1.6 g cm^{-3} 时黄壤内摩擦角 φ 值降低了 57.42%;钙质紫色土在容重为 1.3 g cm^{-3} 时内摩擦角 φ 值降低了 63.45%;中性紫色土在容重为 1.7 g cm^{-3} 时内摩擦角 φ 值降低了 68.65%。这主要是由于 3 种土壤物理化学性质差异引起的,中性紫色土系沙溪庙组母质发育而成,根据颗粒分析试验,其土壤质地为砂土;黄壤及钙质紫色土属于黏土,黏粒含量较大表现出了内摩擦角 φ 均较大的特点,即黄壤和钙质紫色土内摩擦角 φ 显著大于中性紫色土。含水量的增加使土颗粒周围的结合水膜变厚,颗粒胶结性能变弱,致使颗粒之间的分子引力变弱,结构性降低,颗粒之间更容易分离。当含水量超过塑限后,颗粒周围会出现自由水,水在颗粒表面起的润滑作用使颗粒之间的连接“断裂”。含水量越大,颗粒之间的接触点越少,摩擦力越小,在相同的法向压力下颗粒之间越容易发生翻滚,小颗粒越容易填充到大颗粒形成的

空隙中,在较小的剪切位移内颗粒调整的速度就越快,相应的抗剪强度就越小,结构密实度越好,滑动带抗剪强度就越提前发挥^[20-22]。

2.2.2 最优值模拟 不同容重条件下,内摩擦角 φ 随含水率的变化趋势,同样可采用一元二次方程进行拟合描述,且拟合程度较高。不同容重下拟合的相关系数黄壤在 0.980 4 ~ 0.999 6 之间,钙质紫色土在 0.987 5 ~ 0.999 9 之间,中性紫色土在 0.987 7 ~ 0.997 3 之间(表 5)。对模型中的特征值 ω 和 φ 分别进行计算可知不同容重下 3 种土壤对应的内摩擦角 φ 差异并不大。这表明容重对非饱和土的内摩擦角 φ 影响不大,在 5% 左右含水率情况下出现最大值。黄壤和钙质紫色土容重为 1.7 g cm^{-3} 时,在 7% 含水率情况下内摩擦角 φ 达到最大值。对于中性紫色土而言,容重为 1.3 g cm^{-3} 时,在 7% 含水率情况下内摩擦角 φ 达到最大值。不同土壤质地间内摩擦角 φ 差异不大,黄壤在最大内摩擦角 φ 为 38.09° ,最小值为 31.16° ,随容重增大略有减小,主要集中在 33° 左右;钙质紫色土最大值为 34.95° ,最小值为 30.09° ,也随容重增大略有减小,同样主要集中在 33° 左右;中性紫色土最大值为 31.55° ,最小值为 27.16° ,随容重增大略有增大,主要集中在 29° 左右。

表 5 三种土壤内摩擦角 φ 的回归方程

Table 5 Regression equation for internal frictional angle of the three types of soils

土壤类型 Soil type	容重 Bulk density (g cm^{-3})	回归方程 Regression equation	相关系数 Correlation coefficient	ω (%)	φ ($^\circ$)
黄壤 Yellow soil	1.3	$\varphi = -0.003\omega^2 - 1.383\omega + 42.07$	0.980 4	5	38.09
	1.4	$\varphi = -0.0363\omega^2 - 0.269 4\omega + 34.38$	0.990 2	5	32.13
	1.5	$\varphi = -0.057\omega^2 + 0.087\omega + 34.52$	0.999 6	5	33.54
	1.6	$\varphi = -0.058\omega^2 + 0.094\omega + 36.6$	0.999 5	5	35.62
	1.7	$\varphi = -0.101\omega^2 + 1.455\omega + 25.92$	0.996 4	7	31.16
钙质 紫色土 Calcareous purple soil	1.3	$\varphi = 0.017\omega^2 - 1.971\omega + 44.37$	0.964 3	5	34.95
	1.4	$\varphi = -0.013 1\omega^2 - 0.965 7\omega + 37.76$	0.987 5	5	32.61
	1.5	$\varphi = -0.079\omega^2 + 0.829\omega + 27.92$	0.999 0	5	30.09
	1.6	$\varphi = -0.034\omega^2 - 0.466\omega + 36.95$	0.999 9	5	33.77
	1.7	$\varphi = -0.101\omega^2 + 1.355\omega + 26.32$	0.992 4	7	30.86
中性 紫色土 Neutral purple soil	1.3	$\varphi = -0.113\omega^2 + 1.575\omega + 21.67$	0.997 3	7	27.16
	1.4	$\varphi = -0.050 9\omega^2 + 0.089 7\omega + 29.6$	0.987 7	5	28.78
	1.5	$\varphi = -0.083\omega^2 + 0.745\omega + 27.77$	0.993 7	5	29.43
	1.6	$\varphi = -0.062\omega^2 + 0.17\omega + 31.75$	0.990 2	5	31.05
	1.7	$\varphi = -0.094\omega^2 + 0.99\omega + 28.55$	0.957 5	5	31.55

容重和含水率是影响土壤抗剪强度的两个重要因子,且含水率相对于容重而言,对内摩擦角 φ 有重要影响,容重对内摩擦角 φ 的影响较小。容重和含水率同时发生变化时,内摩擦角 φ 的变化响应也像前述的黏聚力 c 一样表现为一个曲面,因此也可以用牛顿法 (BFGS) + 通用全局优化算法 (Universal Global Optimization-UGO) 进行曲面拟合。以含水率 ω , 容重 ρ_d 为自变量, 内摩擦角 φ (Z2) 为因变量, 采用 1stOpt1.5 对试验数据进行多项式回归分析, 各项回归系数见表 6 和表 7, 各因子经拟合得回归方程:

$$\varphi = P_1 + P_2 \times \omega + P_3 \times \omega^2 + P_4 \times \omega^3 + P_5 \times \omega^4 + P_6 \times \rho_d + P_7 \times \rho_d^2$$

表 6 内摩擦角 φ 回归模型检验参数

Table 6 Parameters of the regression model for internal frictional angle

土壤类型 Soil type	RMSE	SSE	R	R ²	DC
黄壤 Yellow soil	1.392	40.67	0.986	0.973 **	0.973
钙质紫色土 Calcareous purple soil	1.431	43.01	0.985	0.971 **	0.971
中性紫色土 Neutral purple soil	0.687	9.903	0.997	0.994 **	0.994

注:表中 ** 表示 0.01 显著水平 ($n = 25$) Note: ** Represents statistical significance at 0.01 ($n = 25$)

表 7 不同土壤类型内摩擦角 φ 回归模型系数

Table 7 Coefficient of the regression model for internal frictional angle of the three types of soils

参数 Parameter	黄壤 Yellow soil	钙质紫色土 Calcareous purple soil	中性紫色土 Neutral purple soil
P_1	10.12	6.271	57.96
P_2	-6.122	5.667	-11.05
P_3	0.701	-0.689	1.394
P_4	-0.037	0.027	-0.074
P_5	0.001	-0.001	0.001
P_6	50.16	10.88	-6.939
P_7	-15.18	-2.142	4.821

根据构建的模型,在含水率 5% ~ 25%, 容重 1.3 ~ 1.7 g cm⁻³ 区间进行模拟,设定含水率变化步长为 1%, 容重变化步长为 0.01 g cm⁻³, 在 Matlab 中编程计算,通过多元回归方程生成内摩擦角 φ 对

含水率和容重的响应曲面。

含水率和容重的交互作用对内摩擦角 φ 影响相对较小,同一容重下,其 φ 值差异不大,随容重的增大缓慢增大,相对而言,含水率对内摩擦角 φ 的影响更明显。黄壤和钙质紫色土内摩擦角 φ 随含水率的增大呈曲线下降,中性紫色土内摩擦角 φ 随含水率增大有一个短暂的增大的过程,而后随之迅速减小。因此对于内摩擦角 φ 其主要受含水率变化这一单因素影响,与容重交互作用不强。内摩擦角 φ 对含水率和容重交换影响的响应曲面见图 10、图 11 和图 12。

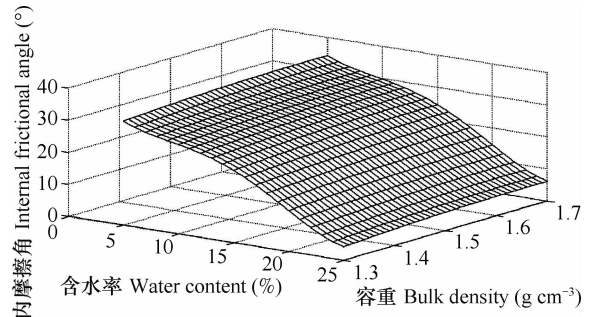


图 10 黄壤内摩擦角对容重和含水率影响的响应面
Fig. 10 Response surface of the internal frictional angle φ of yellow soil to ρ_d and ω

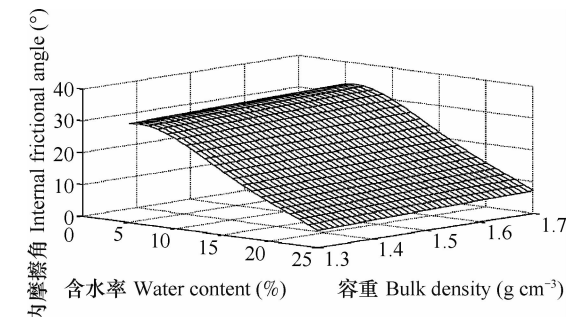


图 11 钙质紫色土内摩擦角对容重和含水率影响的响应面
Fig. 11 Response surface of the internal frictional angle φ of calcareous purple soil to ρ_d and ω

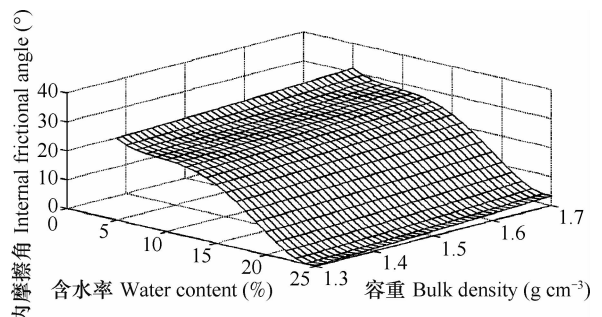


图 12 中性紫色土内摩擦角对容重和含水率影响的响应面
Fig. 12 Response surface of the internal frictional angle φ of neutral purple soil to ρ_d and ω

2.3 干湿循环条件下土壤抗剪强度的动态变化

根据上面的研究结果,3种土壤按各自最优含水率和容重制作干湿循环试验土样。其中,黄壤设定容重为 1.7 g cm^{-3} ,含水率为8%;钙质紫色土设定容重为 1.7 g cm^{-3} ,含水率为11%;中性紫色土容重为 1.68 g cm^{-3} ,含水率为8%。试验测定的不同干湿循环次数下黏聚力 c 、摩擦角 φ 的值见表8。可以看出,3种土壤的黏聚力 c 值均随干湿循环次数的增加均呈减小趋势,且前两次循环 c 衰减幅度都很大。黄壤第一次循环结束后,黏聚力 c 值衰减68.14%;第二次循环结束后,黏聚力 c 值衰减90.23%;第三次循环结束后,黏聚力 c 值衰减92.49%;第四次循环结束后,黏聚力 c 值衰减94.99%;第五次循环结束后,黏聚力 c 值衰减96.87%。钙质紫色土第一次循环结束后,黏聚力 c 值衰减18.24%;第二次循环结束后,黏聚力 c 值衰减80.36%;第三次循环结束后,黏聚力 c 值衰减87.15%;第四次循环结束后,黏聚力 c 值衰减90.61%;第五次循环结束后,黏聚力 c 值衰减96.24%。中性紫色土第一次循环结束后,黏聚力 c 值衰减55.99%;第二次循环结束后,黏聚力 c 值衰减90.13%;第三次循环结束后,黏聚力 c 值衰减93.93%;第四次循环结束后,黏聚力 c 值衰减97.01%;第五次循环结束后,黏聚力 c 值衰减98.51%。黄壤和中性紫色土第一次干湿循环后黏聚力 c 值衰减超过50%,钙质紫色土第一次干湿循环后黏聚力 c 值衰减为18.24%。

3种土壤在几次干湿循环后内摩擦角 φ 总体呈减小趋势,但衰减幅度并不大。第三次干湿循环结束后,黄壤摩擦角 φ 值从38.6降低至30.5,衰减幅度达到20.98%;钙质紫色土内摩擦角 φ 值从27.7降低至24.9,衰减幅度达到10.11%;中性紫色土内摩擦角 φ 值从36.6降低至32.1,衰减幅度达到12.29%;五次干湿循环后,黄壤内摩擦角 φ 值降低至24.6,衰减幅度达到36.26%;钙质紫色土内摩擦角 φ 值降低至19.3,衰减幅度达到30.32%;中性紫色土内摩擦角 φ 值降低至22.6,衰减幅度达到38.25%。

第三次干湿循环至第五次干湿循环黏聚力 c 值衰减幅度很小,趋于稳定。从各类型土壤干湿循环次数于黏聚力 c 值的回归模型来看(表9),方程拟合较好。

表8 不同干湿循环次数下3种土壤抗剪强度参数

Table 8 Shear strength parameters of the three types of soils as affected by number of wetting and drying cycles

土壤类型 Soil type	循环次数 Times of alternation	黏聚力 c (kPa) Cohesive force	内摩擦角 φ (°) Internal frictional angel
黄壤 Yellow soil	0	207.8	38.6
	1	66.2	35.1
	2	20.3	30.5
	3	15.6	30.5
	4	10.4	26.8
钙质 紫色土 Calcareous purple soil	0	165	27.7
	1	134.9	26.1
	2	32.4	24.9
	3	21.2	21.6
	4	15.5	21.4
中性 紫色土 Neutral purple soil	0	207.7	36.6
	1	91.4	36.2
	2	20.5	32.1
	3	12.6	31.2
	4	6.2	30.9
5	3.1	22.6	

第一次干湿循环至第五次干湿循环内摩擦角 φ 值呈线性稳定小幅度减小。从各类型土壤干湿循环次数于内摩擦角 φ 的回归模型来看(表10),方程拟合较好。

表9 干湿循环条件下不同土壤类型黏聚力 c 回归模型

Table 9 Regression model for soil cohesive force c of different types of soils under wetting-drying alternation

土壤类型 Soil type	回归方程 Regression equation	R^2
黄壤 Yellow soil	$c = 15.20n^2 - 140.1n + 314.2$	0.9314**
钙质紫色土 Calcareous purple soil	$c = 8.771n^2 - 94.64n + 260.7$	0.9355**
中性紫色土 Neutral purple soil	$c = 14.71n^2 - 139.8n + 322.9$	0.9707**

注:表中**表示0.01显著水平($n=25$) Note: ** represents statistical significance at 0.01 ($n=25$)

表 10 干湿循环条件下 3 种土壤内摩擦角 φ 回归模型Table 10 Regression model for internal frictional angle φ of different types of soils under wetting-drying alternation

土壤类型 Soil type	回归方程 Regression equation	R^2
黄壤 Yellow soil	$\varphi = 0.1804n^2 - 3.974n + 42.19$	0.971 6**
钙质紫色土 Calcareous purple soil	$\varphi = 0.0268n^2 - 1.885n + 29.69$	0.969 5**
中性紫色土 Neutral purple soil	$\varphi = -0.4339n^2 + 0.5575n + 36.23$	0.895 4**

注:表中**表示 0.01 显著水平 ($n = 25$) Note: ** represents statistical significance at 0.01 ($n = 25$)

3 结 论

采用不固结不排水三轴剪切试验,分析了含水率和容重交互作用对重庆地区 3 种土壤抗剪强度指标的影响,在此基础上,探讨了干湿循环条件下重庆地区 3 种土壤抗剪强度的动态变化,实验结果表明:

1)在相同容重情况下,3 种土壤黏聚力 c 随着含水率增加呈先增加后减小的趋势,在相同土壤含水率水平下,土壤黏聚力 c 随容重增大而增大。3 种土壤内摩擦角 φ 在各容重条件下均随着含水率增加呈明显减小的趋势。

2)含水率和容重的交互作用对黏聚力 c 有显著影响,黏聚力 c 在 $1.3 \sim 1.7 \text{ g cm}^{-3}$ 范围内随着容重的增大而增大,且每一个容重均有一个含水率与之对应,在这样一个交互作用下黏聚力 c 达到最大。含水率和容重的交互作用对内摩擦角 φ 影响相对较小,同一容重下,其 φ 值差异不大,随容重的增大缓慢增大,相对而言,含水率对内摩擦角 φ 的影响非常显著。

3)黏土相对砂土而言表现出了聚力 c 及内摩擦角 φ 均较大的特点,即黄壤和钙质紫色土聚力 c 及内摩擦角 φ 显著大于中性紫色土。3 种土壤类型的黏聚力 c 值均随干湿循环次数的增加均呈减小趋势,且前两次循环 c 衰减幅度均很大,从第三次干湿循环至第五次干湿循环黏聚力 c 值衰减幅度很小,趋于稳定,第五次干湿循环结束后黄壤黏聚力略大于钙质紫色土,两者均大于中性紫色土。

4)3 种土壤在几次干湿循环后内摩擦角 φ 总体

呈减小趋势,但不同土壤类型间存在差异。第五次循环结束后,黄壤内摩擦角为 24.6° ,为最大,其次为中性紫色土,内摩擦角衰减为 22.6° ,钙质紫色土在第五次干湿循环结束后内摩擦角最小,为 19.3° 。

参 考 文 献

- [1] 鹿心社. 论中国土地整理的总体方略. 农业工程学报,2002,18(1):1—5. Lu X S. General strategy of land consolidation in China(In Chinese). Transactions of the CSAE,2002,18(1):1—5
- [2] 赵其国,周生路,吴绍华,等. 中国耕地资源变化及其可持续利用与保护对策. 土壤学报,2006,43(4):662—672. Zhao Q G,Zhou S L,Wu S H,et al. Cultivated land resource and strategies for its sustainable utilization and protection in China(In Chinese). Acta Pedologica Sinica,2006,43(4):662—672
- [3] 倪九派,李萍,魏朝富,等. 基于 AHP 和熵权法赋权的区域土地开发整理潜力评价. 农业工程学报,2009,25(5):202—209. Ni J P,Li P,Wei C F,et al. Potentialities evaluation of regional land consolidation based on AHP and entropy weight method(In Chinese). Transactions of the CSAE,2009,25(5):202—209
- [4] 王瑗玲,赵庚星,王瑞燕,等. 区域农地整理质量评价及其时空配置研究. 自然资源学报,2006,21(3):369—374. Wang Y L,Zhao G X,Wang R Y,et al. Quality evaluation for regional farmland consolidation and spatio-temporal collocation(In Chinese). Journal of Natural Resource,2006,21(3):369—374
- [5] 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. 水土保持学报,2009,23(6):48—50. Ni J P,Gao M,Wei C F,et al. Effects of soil water content on soil shearing strength to sifferent soil layer of shallow landslide(In Chinese). Journal of Soil and Water Conservation,2009,23(6):48—50
- [6] 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. 农业工程学报,2007,23(2):21—25. Chen H X,Li F H,Hao S L,et al. Effects of soil water content and soil sodicity on soil shearing strength(In Chinese). Transactions of the CSAE,2007,23(2):21—25
- [7] PefectE,Mehaughlin N B,Kay B D,et al. An improved equation for the soil water retention curve. Water Resources Research,1996,32:281—287
- [8] 孙树林,王利丰. 饱和、非饱和和有机质粉土抗剪强度的对比. 岩土工程学报,2006,28(11):1932—1935. Sun S L,Wang L F. Comparison of shear strength between saturated and unsaturated sandy silt(In Chinese). Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2006,28(11):1932—1935
- [9] 冯勇,何建新,刘亮,等. 冻融循环作用下细粒土抗剪强度特性试验研究. 冰川冻土,2008,30(6):1013—1017. Feng Y,He J X,Liu L,et al. Experimental study of the shear strength sharacteristics of fine-grained soil under freezing and thawing cycles(In Chinese). Journal of Glaciology and Geocryology,2008,30(6):1013—1017

- [10] 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. 农业工程学报,2006,22(3):40—45. Wang Y Q, Wang Y J, Zhang H J, et al. Impacts of soil structure on shear-resistance of soil under different land uses in Jinyun Mountain of Chongqing City (In Chinese). Transactions of the CSAE,2006,22(3):40—45
- [11] 王伟,卢延浩,陶菲菲,等. 膨胀土一次性浸水膨胀3参数时程模型. 应用基础与工程科学学报,2008,16(6):840—845. Wang W, Lu Y H, Tao F F, et al. Three-parameter model for expansive deformation process of expansive soil (In Chinese). Journal of Basic Science and Engineering,2008,16(6):840—845
- [12] Cokca E, Erol O, Armanigil F. Effects of compaction moisture content on the shear strength of an unsaturated clay. Geotechnical and Geological Engineering,2004,22:285—297
- [13] 刘瑜,夏唐代. 砂土颗粒粗糙度对剪切波速影响的试验研究. 岩土工程学报,2011,33(2):287—290. Liu Y, Xia T D. Experimental study on influence of particle roughness on shear wave velocity of sand (In Chinese). Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2011,33(2):287—290
- [14] 王博涛,张增志. 土基改性固沙植草材料抑制地表水分蒸发. 农业工程学报,2012,28(2):95—99. Wang B T, Zhang Z Z. Inhibiting water evaporation of ground surface by clay-based sand-fixing and grass-planting materials (In Chinese). Transactions of the CSAE,2012,28(2):95—99
- [15] 王建平,程声通,贾海峰. 水质模型参数优化的遗传算法实现及控制参数分析. 环境科学,2005,26(3):61—65. Wang J P, Cheng S T, Jia H F. Parameter optimization of water quality model: Implementation of genetic algorithm and its control parameters analysis (In Chinese). Environmental Science,2005,26(3):61—65
- [16] 史洪宇,贺前华,魏晓慧. 基于遗传-拟牛顿混合算法的到达时间差定位. 计算机工程,2011,37(11):220—222. Shi H Y, He Q H, Wei X H. Time difference of arrival localization based on genetic-quasi-Newton hybrid algorithm (In Chinese). Computer Engineering,2011,37(11):220—222
- [17] 刘振华,赵英时. 基于遗传算法的不同光照条件下植被和土壤组分温度反演. 农业工程学报,2012,28(1):161—166. Liu Z H, Zhao Y S. Retrieval of plant and soil component temperature under different light conditions based on genetic algorithm (In Chinese). Transactions of the CSAE,2012,28(1):161—166
- [18] 柳春峰,李凯,杨善林. 基于改进 DP 算法的具有优先序的变速机最小化成本调度. 系统工程理论与实践,2011,31(2):276—282. Liu C F, Li K, Yang S L. Scheduling of unrelated machines to minimize costs with precedence constraints based on amended DP algorithm (In Chinese). Systems Engineering-Theory and Practice,2011,31(2):276—282
- [19] 王志刚,赵永存,孙维侠,等. 基于稳健统计学确定高潜在污染土壤 Cu、Pb 基线值. 土壤学报,2011,48(2):246—254. Wang Z G, Zhao Y C, Sun W X, et al. Defining Cu and Pb geochemical baselines for soils high in pollution risk with robust statistics (In Chinese). Acta Pedologica Sinica,2011,48(2):246—254
- [20] 刘姗姗,白美健,许迪,等. Green-Ampt 模型参数简化及与土壤物理参数的关系. 农业工程学报,2012,28(1):106—110. Liu S S, Bai M J, Xu D, et al. Parameters simplification of Green-Ampt infiltration models and relationships between infiltration and soil physical parameters (In Chinese). Transactions of the CSAE,2012,28(1):106—110
- [21] 赵景波,贺秀斌,邵天杰. 重庆地区紫色土和紫色泥岩的物质组成与微结构研究. 土壤学报,2012,49(2):212—219. Zhao J B, He X B, Shao T J. Material composition and microstructure of purple soil and purple mudstone in Chongqing area (In Chinese). Acta Pedologica Sinica,2012,49(2):212—219
- [22] 张世文,王胜涛,刘娜,等. 土壤质地空间预测方法比较. 农业工程学报,2011,27(1):332—339. Zhang S W, Wang S T, Liu N, et al. Comparison of spatial prediction method for soil texture (In Chinese). Transactions of the CSAE,2011,27(1):332—339

DYNAMICS OF SOIL SHEARING STRENGTH OF THREE TYPES OF SOILS UNDER WETTING-DRYING ALTERNATION IN CHONGQING AREA

Ni Jiupai Gao Ming Wei Chaofu Xie Deti[†]

(College of Resources and Environment, Key Laboratory of Eco-environments in Three Gorges Reservoir Region
(Ministry of Education), Southwest University, Chongqing 400715, China)

Abstract By means of triaxial shearing test in laboratory, effect of the interaction of soil water content and bulk density on soil shearing strength in yellow soil, calcareous purple soil and neutral purple soil was explored. The three types of soils are extensively distributed in the hilly regions of Chongqing. Dynamics of the soil shearing strengths of the three types of soils under wetting-drying alternation were analyzed, using soil samples adjusted to be optimal in soil water content and bulk density specific of the three soils, separately, based on the analysis of effect of soil water content and bulk density on soil shearing strength. Results show that the soil cohesive force first increased and then decreased with the

increasing soil water content in all the three soils unchanged in soil bulk density, and it increased with the increasing soil bulk density in the soils the same in soil water content. Internal frictional angle decreased significantly with the increasing soil water content in all the three soils, regardless of bulk density. The interaction of soil water content and bulk density affected soil cohesive force significantly, which increased with increasing soil bulk density in the range of 1.3 ~ 1.7 g cm⁻³, and would peak when bulk density interacted with a matching soil water content. The interaction did not have much effect on internal frictional angle, which did not vary much when bulk density remained the same, but increased gradually with increasing soil bulk density. In all the three soils, soil cohesive force decreased with increasing number of wetting-drying alternations, and it dropped sharply in the first 2 cycles of wetting and drying and very slowly during the following three cycles, and then leveled off. Internal frictional angle as a whole decreased with increasing number of wetting-drying alternations in all the three soils, however, differences were found between the soils different in soil type. The angle was 24.6°, 22.6° and 19.3° in yellow soil, neutral purple soil and calcareous purple soil, respectively after the fifth cycle of wetting-drying alternation.

Key words Soil water content; Soil bulk density; Soil shearing strength; Wetting-drying alternation

(责任编辑:汪枫生)