

土壤含水量和容重对砂姜黑土抗剪强度的影响及其传递函数构建

张红霞^{1,2}, 彭新华^{1,2*}, 郭自春¹, 高磊¹,
陈月明^{1,2}, 邵芳荣³

(1. 中国科学院南京土壤研究所, 江苏南京 210008; 2. 中国科学院大学, 北京 100049;
3. 安徽省农垦集团龙亢农场有限公司, 安徽怀远 233426)

摘要:【目的】砂姜黑土湿时泥泞, 干时僵硬, 难耕难耙, 适耕期短, 研究砂姜黑土抗剪强度对于确定土壤适耕性具有重要意义。【方法】以砂姜黑土为研究对象, 土壤容重设置 1.2、1.4 和 1.6 g cm⁻³ 共 3 个水平, 土壤含水量设置田间持水量的 100%、85%、70%、55% 和 40% 共 5 个水平, 采用直剪仪测定土壤抗剪强度参数 (黏聚力, c ; 内摩擦角, ϕ), 分析土壤剪切特性随土壤含水量 (θ) 和容重 (ρ) 的变化规律, 并利用多元回归拟合建立土壤抗剪强度 (τ) 的传递函数。【结果】砂姜黑土黏聚力随土壤含水量增加呈现指数减小趋势, 随土壤湿容重 (ρ') 增加呈线性增加趋势, 三者关系能够用回归方程 $c = a_1 e^{(b_1 - c_1)}$ 表示 ($R^2 = 0.984$, $P < 0.001$)。内摩擦角随土壤含水量增加先减小之后趋于稳定, 随土壤湿容重增加而增加, 表现出 $\phi = a_2 e^{(b_2/\theta)}$ ($R^2 = 0.856$, $P < 0.001$) 的规律性变化。参照 Mohr-Coulomb 抗剪强度公式, 建立砂姜黑土的抗剪强度传递函数 $\tau = a_1 e^{(b_1 \rho' + c_1 \theta)} + \sigma \tan(a_2 e^{(b_2 \rho' / \theta)})$, 该函数能够很好地表示砂姜黑土的抗剪强度变化规律 ($R^2 = 0.870$, $P < 0.001$)。【结论】土壤含水量和容重是砂姜黑土抗剪强度的两个重要影响因素, 在此基础上构建了以土壤含水量和湿容重为自变量的砂姜黑土抗剪强度传递函数。本研究结果可为砂姜黑土结构和耕性改良提供科学依据。

关键词: 砂姜黑土; 剪切特性; 黏聚力; 内摩擦角; 土壤传递函数

中图分类号: S152 **文献标识码:** A **文章编号:** 0564-3945(2022)03-0524-08

DOI: 10.19336/j.cnki.trtb.2021101306

张红霞, 彭新华, 郭自春, 高磊, 陈月明, 邵芳荣. 土壤含水量和容重对砂姜黑土抗剪强度的影响及其传递函数构建 [J]. 土壤通报, 2022, 53(3): 524 - 531

ZHANG Hong-xia, PENG Xin-hua, GUO Zi-chun, GAO Lei, CHEN Yue-ming, SHAO Fang-rong. Influence of Soil Water Content and Bulk Density on Shear Strength of Shajiang Black Soil and Its Pedo-transfer Function Construction [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2022, 53(3): 524 - 531

【研究意义】抗剪强度 (τ) 是土壤发生破坏前所能承受的最大剪应力, 是表征耕层土壤结构稳定和耕作性能的重要力学指标^[1-2], 也被用作种子出苗和根系生长的可靠量度^[3]。抗剪强度大小主要取决于土壤颗粒间各种物理化学键的相互连结 (黏聚力, c) 以及二者间的摩擦作用 (内摩擦角, ϕ)^[4]。随着农业机械化水平的提高, 农用机具的使用频率和重量不断增加^[5], 当外界作用力超过土壤自身所能承载的最大剪应力时, 土壤结构将发生不可逆转的破坏^[6], 孔隙连通性恶化, 紧实度增加, 土层内水、气、热的传输和根系下扎受阻, 不利于农田质量提升与作物产量的稳定^[7-8]。此外, 抗剪强度增大导致耕作能耗增加, 农田工作效率降低, 进而造成土壤管理成

本上升^[9]。【前人研究进展】影响耕层土壤抗剪强度的因素众多, 土壤容重 (ρ) 和含水量 (θ) 通常被认为是最重要的两个因素^[10-11]。容重反映了耕层土壤的紧实程度, 而含水量会直接影响土壤颗粒间的连接方式和胶结作用。国内外已有不少关于土壤含水量、容重与抗剪强度之间关系的研究, 一般而言, 容重增加会使颗粒间接触更加紧密, 咬合作用增强, 因而表现出黏聚力和内摩擦角均增大的现象^[12-13]; 而含水量增加 (5% ~ 13%) 使颗粒表面形成一层黏滞水膜, 胶结性能增强, 致使土壤颗粒更容易黏聚; 当含水量超过 13% 时, 颗粒间结合水膜逐渐增厚, 过多水分的存在对胶结物质产生一种楔入作用, 土壤颗粒间的滑动变得容易, 黏聚力随之降低^[14-15]。土壤

收稿日期: 2021-04-13; 修订日期: 2021-10-13

基金项目: 国家重点研发计划项目课题 (2016YFD0300809) 和国家自然科学基金项目 (41930753, 41725004) 资助

作者简介: 张红霞 (1995-), 女, 甘肃定西人, 硕士研究生, 主要从事土壤结构改良。E-mail: zhanghongxia@issas.ac.cn

*通讯作者: E-mail: xhpeng@issas.ac.cn

含水量和容重的交互作用对抗剪强度的影响研究结果差异明显。王萌等^[16]发现青海黄土黏聚力和内摩擦角最大值出现在容重 1.70 g cm^{-3} 和含水量 13% 水平下, 分别为 162.9 kPa 和 23.22° ; 张健乐等^[17]发现重庆紫色坡耕地土壤黏聚力和内摩擦角最大值出现在 1.4 g cm^{-3} 、含水量 10% 水平下, 分别为 22.76 kPa 和 29.08° ; 倪九派等^[18]发现重庆黄壤黏聚力最大值 (278.28 kPa) 出现在 1.7 g cm^{-3} 、含水量 10% 水平下, 而内摩擦角最大值 (35.56°) 出现在 1.3 g cm^{-3} 、含水量 5% 水平下。由此可见, 不同土壤类型性质差异显著影响抗剪强度参数。以往测定抗剪强度参数主要基于直剪试验与三轴试验等直接测定方法, 耗时费力, 而通过构建土壤传递函数 (Pedo-transfer Function, PTFs) 间接获得抗剪强度将更加快捷高效。Wei 等^[19]和倪九派等^[18]通过分析含水量和容重及二者交互作用对紫色土和黄壤抗剪强度的影响, 分别建立了黏聚力—含水量—容重 ($c-\theta-\rho$) 和内摩擦角—含水量—容重 ($\phi-\theta-\rho$) 的回归模型, 这些模型能够表征土壤黏聚力和内摩擦角的变化规律, 但是并不能为直接预测土壤抗剪强度提供参考, 且较难推广到其他土壤类型。【本研究切入点】为了更加全面的认识土壤的剪切行为, 因地制宜建立特定土壤类型下的传递函数, 将极大地便利土壤结构和适耕性的科学研究。砂姜黑土区地势平坦, 水热资源丰富, 适宜种植玉米、小麦、大豆等农作物, 是我国主要的粮食生产基地之一。砂姜黑土容重大, 其范围一般在 $1.22 \sim 1.65 \text{ g cm}^{-3}$, 紧实度较高^[20], 耕作时农业机具进地次数较高, 因而极易发生土壤压实破坏。同时由于降雨量分配不均, 旱涝交替使土壤水分剧烈变化 ($8.7\% \sim 41.8\%$)^[21], 这些都直接影响了砂姜黑土耕层土壤抗剪强度, 导致土壤湿时泥泞膨胀, 干时僵硬板结, 难耕难耙, 通常表现为耕作

阻力大、质量差、耕期短等障碍性特征。【拟解决的问题】本研究拟以砂姜黑土耕层土壤为研究对象, 通过设置不同容重和土壤含水量水平来分析二者及其交互作用对耕层土壤抗剪强度的影响, 构建土壤抗剪强度传递函数并进行验证, 以期在砂姜黑土适耕期及耕性改良等方面提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 供试材料

于 2020 年 7 月进行田间土样采集, 供试土壤取自安徽省蚌埠市怀远县龙亢农场 ($33^\circ 32' \text{N}$, $115^\circ 59' \text{E}$) 农田土壤, 当地属于亚热带向暖温带过渡的季风气候区, 作物为冬小麦—夏玉米轮作系统, 土壤类型为河湖相石灰性沉积物发育而来的典型砂姜黑土, 对应我国系统分类中的变性土。将采集的 $0 \sim 20 \text{ cm}$ 土壤风干去除根系、石块等杂质后, 研磨、过 2 mm 筛备用。供试土壤比重 2.69 g cm^{-3} , 砂粒 ($0.05 \sim 2.0 \text{ mm}$) 80 g kg^{-1} , 粉粒 ($0.002 \sim 0.05 \text{ mm}$) 541 g kg^{-1} , 黏粒 ($< 0.002 \text{ mm}$) 379 g kg^{-1} , 土壤有机碳 (SOC) 13.6 g kg^{-1} , pH 7.1。

1.2 试验设计

本研究采用双因素交互试验设计 (表 1), 基于前期的田间调查结果^[20], 土壤容重设置 1.2 、 1.4 和 1.6 g cm^{-3} 共 3 个水平; 田间持水量是土壤水分有效性的上限值, 根据前人研究结果^[21], 土壤含水量设置田间持水量的 100% 、 85% 、 70% 、 55% 和 40% , 共 5 个水平, 总计 15 个处理。每个处理重复 4 次。由于砂姜黑土含有膨胀性粘土矿物蒙脱石, 土壤在吸水和脱水过程中体积会发生明显变化, 其实际容重随之改变, 因此, 本研究测定了不同含水量条件下的土壤湿容重, 如表 1 所示。未做特别说明时, 本文中所指容重均为干容重, 即初始容重。

表 1 土壤质量含水量与湿容重的对应关系
Table 1 Corresponding relationship between soil mass water content and wet bulk density

土壤质量含水量 Soil gravimetric water content	容重 Bulk density 1.2 g cm^{-3}		容重 Bulk density 1.4 g cm^{-3}		容重 Bulk density 1.6 g cm^{-3}	
	质量含水量 (%) Gravimetric water content	湿容重 (g cm^{-3}) Wet bulk density	质量含水量 (%) Gravimetric water content	湿容重 (g cm^{-3}) Wet bulk density	质量含水量 (%) Gravimetric water content	湿容重 (g cm^{-3}) Wet bulk density
	100% FC	40.8	1.11	36.7	1.19	31.7
85% FC	34.7	1.11	31.2	1.19	26.9	1.27
70% FC	28.5	1.14	25.7	1.23	22.2	1.32
55% FC	22.4	1.18	20.2	1.28	17.4	1.34
40% FC	16.3	1.20	14.7	1.30	12.7	1.37

注: FC 为田间持水量。

1.3 土壤基本性质测定及土样制备

田间持水量 (Field capacity) 的测定: 过筛后的土壤以细雾状喷洒蒸馏水湿润之后, 置于自封袋中室温下平衡 2 天, 以确保水分在土壤中均匀分布。称取相应容重的土壤填充到包有滤纸兜底的 60 cm^3 (环刀直径 61.8 mm , 高度 20 mm) 标准钢环刀中。对于容重 1.4 和 1.6 g cm^{-3} 的土壤样品, 为保证环刀上下部填充均匀, 采用压样器将土壤分两层压入环刀中, 层间接触面用小刀刨毛。然后, 将环刀土样置于盛水的塑料框中, 环刀未浸没, 让土壤借助毛管吸力从底部吸水至完全饱和后拿出, 再放入沙箱失水并及时覆盖环刀顶部, 防止表层蒸发, 平衡 2~3 天使土壤孔隙中的重力水排出, 直到土壤湿度基本稳定后称重。

不同含水量的土壤制备过程: 饱和土壤在自然状态下失水, 在此期间反复称量土样质量, 直到达到目标土壤质量含水量, 如表 1 所示, 之后立即置于自封袋中密封保存 48 h, 使试样上下部进行充分的水汽交换, 每个环刀样品选取 4 个样点测定土壤高度变化进而获得土壤湿容重。

1.4 土壤抗剪强度测定

土壤抗剪强度参数采用应变控制式四联直剪仪 (南京土壤仪器有限公司, ZJ 型号) 进行测定。试验时将制备好的土样小心压入剪切盒中, 分别施加 50、100、200、400 kPa 的法向应力, 剪切速率控制在 0.8 mm min^{-1} , 剪切位移 5 mm。试验按照《土工试验方法标准》(GB/T 50123—1999) [22] 中规定的步骤进行。对每一组土样进行剪切试验后, 可以得到 4 个不同法向应力下的最大剪应力, 作出抗剪强度与法向应力的关系图, 根据 Mohr-Coulomb 公式即可求得黏聚力 (c) 和内摩擦角 (φ) [21]。

$$\tau = c + \sigma \tan \varphi \quad (1)$$

式中: τ 为土壤抗剪强度 (kPa); σ 为作用在土壤剪切面上的法向应力 (kPa); φ 为土壤内摩擦角 ($^\circ$); c 为土壤黏聚力 (kPa)。即土壤抗剪强度由黏聚强度 c 和摩擦强度 $\sigma \tan \varphi$ 两部分组成。

1.5 数据处理

采用 SPSS 24.0 进行数据分析。通过双因素方差分析 (Two-way ANOVA) 考察土壤含水量和容重及其相互作用对抗剪强度的影响, 并用邓肯 (Duncan) 法进行多重比较, 分析同一含水量下不同容重之间以及同一容重下不同含水量之间的差异, 采用单因

素方差分析 (One-way ANOVA) 检验传递函数显著性, 显著水平均为 $P < 0.05$ 。采用 Origin 2017 进行图形绘制。通过 Matlab R2017b 对土壤的抗剪强度参数进行多元回归拟合, 运用不同函数形式拟合后发现, 指数函数对于抗剪强度参数的拟合效果最好且符合实际变化规律。选取决定系数 (R^2)、均方根误差 (RMSE) 作为传递函数精度的评价指标。

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (2)$$

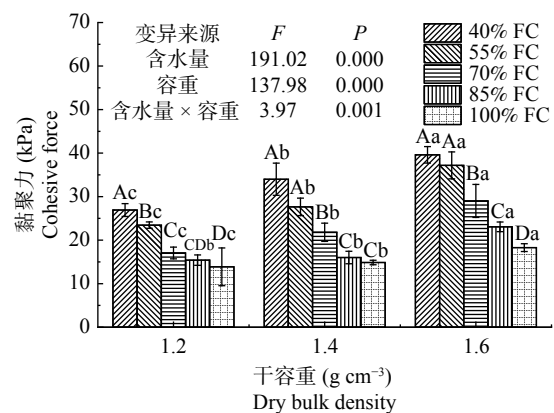
$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y})^2} \quad (3)$$

式中: n 为用于检验的样本数 (33); y_i 为实测值; \hat{y} 为预测值。 R^2 越接近于 1, RMSE 的值越小, 则传递函数的预测精度越好, 可靠性越高。

2 结果与分析

2.1 砂姜黑土耕层抗剪强度对土壤含水量和容重变化的响应特征

如图 1 所示, 砂姜黑土黏聚力随土壤容重的增加呈增加趋势 ($P < 0.01$), 随土壤含水量的增加呈下降趋势 ($P < 0.01$)。土壤含水量越低, 容重对黏聚力的影响越明显。比如在 40% FC 的土壤含水量下, 当容重从 1.2 g cm^{-3} 变化至 1.4 g cm^{-3} 和容重由 1.4 g cm^{-3} 增加至 1.6 g cm^{-3} 时, 土壤黏聚力分别增大 7.07 和 5.61 kPa; 而在高土壤含水量 (100% FC) 条件下, 相邻容重间黏聚力的差异仅为 0.99 和 3.42



注: 不同小写字母代表相同土壤含水量下不同容重处理之间差异显著 ($P < 0.05$); 不同大写字母代表相同容重下不同土壤含水量之间差异显著 ($P < 0.05$)。

图 1 土壤含水量和容重对砂姜黑土黏聚力的影响

Fig. 1 Effects of soil water content and bulk density on cohesive force of Shanjiang black soil

kPa, 换言之, 土壤含水量的增加削弱了黏聚力对于容重变化的响应。此外, 随着容重的增加, 黏聚力随土壤含水量变化的范围逐渐增大, 敏感性增强, 具体表现为土壤容重由 1.2 g cm^{-3} 增至 1.4 g cm^{-3} 再至 1.6 g cm^{-3} 时, 黏聚力由湿到干的变化区间依次为 13.05、19.13、21.33 kPa。

砂姜黑土耕层土壤内摩擦角对不同土壤含水量和容重变化的响应存在差异 (图 2)。与黏聚力不同, 随土壤含水量增加, 内摩擦角呈现出先迅速降低之后趋于稳定的变化趋势, 且不同容重条件下降低的趋势相似。当水分由 40% FC 增加至 55% FC 时内摩擦角迅速减小, 土壤容重从 1.2 g cm^{-3} 变化至 1.4 g cm^{-3} 再至 1.6 g cm^{-3} 时, 内摩擦角分别降低 14.2%、20.5% 和 11.5%。此后, 当土壤含水量高于 55% FC 时, 内摩擦角对于土壤含水量增加的响应没有显著差异 ($P > 0.05$), 同一容重条件下, 相邻含水量间内摩擦角的差异最大仅为 1.51° 。容重在一定程度上影响砂姜黑土内摩擦角的变化, 当容重从 1.2 g cm^{-3} 变化至 1.4 g cm^{-3} 和容重由 1.4 g cm^{-3} 增加至 1.6 g cm^{-3} 时, 含水量为 40% FC 的土壤内摩擦角分别增加 11.36% 和 2.23%, 而含水量为 100% FC 的土壤内摩擦角增幅不大, 分别为 5.46%、2.76%。

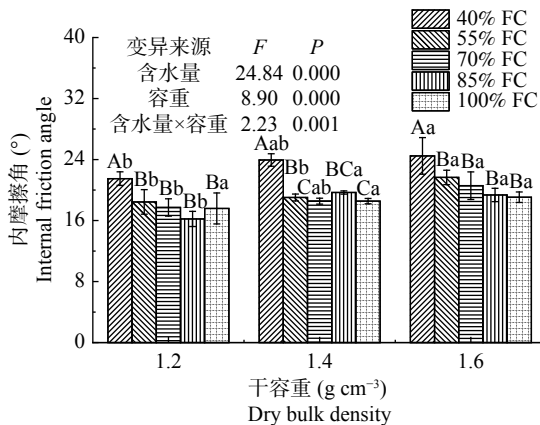


图 2 土壤含水量和容重对砂姜黑土内摩擦角的影响

Fig.2 Effects of soil water content and bulk density on internal friction angle of Shajiang black soil

2.2 土壤传递函数的构建与验证

2.2.1 土壤传递函数的构建 抗剪强度参数受到土壤含水量和容重的显著影响, 且符合一定的函数关系, 将不同容重条件下的黏聚力与土壤含水量进行最优拟合得到二者的指数关系式:

$$c = ae^{b\theta} \quad (4)$$

式中, θ 为土壤含水量 (%), a , b 是经验常数。

考虑到砂姜黑土吸水 and 失水过程中的体积变化, 在此利用与土壤含水量一一对应的湿容重建立 τ - θ - ρ' 传递函数, 运用 Matlab R2017b 进行多元回归拟合, 得到黏聚力预测公式:

$$c = a_1 e^{(b_1 \rho' - c_1 \theta)} \quad (5)$$

式中, ρ' 为土壤湿容重 (g cm^{-3}), a_1 , b_1 , c_1 是经验常数, $R^2=0.972$, $\text{RMSE}=1.505$ 。

随后用同样方法拟合得到以土壤含水量、湿容重为自变量, 内摩擦角为因变量的预测公式:

$$\varphi = a_2 e^{(b_2 \rho' / \theta)} \quad (6)$$

式中, a_2 , b_2 是经验常数, $R^2=0.852$, $\text{RMSE}=0.92$ 。

两个预测公式均能很好地表征土壤含水量和湿容重对抗剪强度参数的影响, 其 R^2 均在 0.85 以上。运用 Matlab R2017b 绘制 c - θ - ρ' 和 φ - θ - ρ' 的三维曲面图, 由图 3 可知, 黏聚力和内摩擦角原始数据紧密围绕在拟合曲面附近, 黏聚力和内摩擦角随土壤含水量增加均呈现出指数降低的趋势, 且相较于内摩擦角前期的急剧减小, 黏聚力变化相对缓慢; 当土壤含水量越来越大时, 黏聚力和内摩擦角均有趋于稳定的态势, 且后者更加明显。将三维图旋转来看, 黏聚力和内摩擦角均随湿容重增加而线性增大。黏聚力 c 和内摩擦角 φ 既受到含水量和湿容重的单一因素效应影响, 同时也受到两者的交互影响, 且均在土壤含水量为 100% FC 而容重为 1.2 g cm^{-3} 时达到最小值。

将式 (5) 和式 (6) 代入式 (1), 得到以 Mohr-Coulomb 强度公式为基础的砂姜黑土抗剪强度 (τ) PTFs:

$$\tau = a_1 e^{(b_1 \rho' + c_1 \theta)} + \sigma \tan \left(a_2 e^{(b_2 \rho' / \theta)} \right) \quad (7)$$

至此, 本研究得到了以土壤含水量、湿容重为自变量的砂姜黑土抗剪强度传递函数。

2.2.2 土壤传递函数有效性的验证 为检验本研究建立的砂姜黑土抗剪强度 PTFs 的预测能力, 使得传递函数能够广泛应用于生产实践过程中, 设置不同于前文中的处理进行试验, 选择 1.2 至 1.6 g cm^{-3} 等间距的 3 个容重, 并随机测定不同含水量条件下的抗剪强度值, 共计 33 组数据。以 50 kPa 为例, 运用公式 (7) 计算土壤抗剪强度, 然后将实测值与预测值进行线性回归分析, 由表 2 可知, 本研究所建立的 c - θ - ρ' 、 φ - θ - ρ' 和 τ - θ - ρ' 三个 PTFs 均通过显著性检验, 且在 $P < 0.001$ 水平上显著。

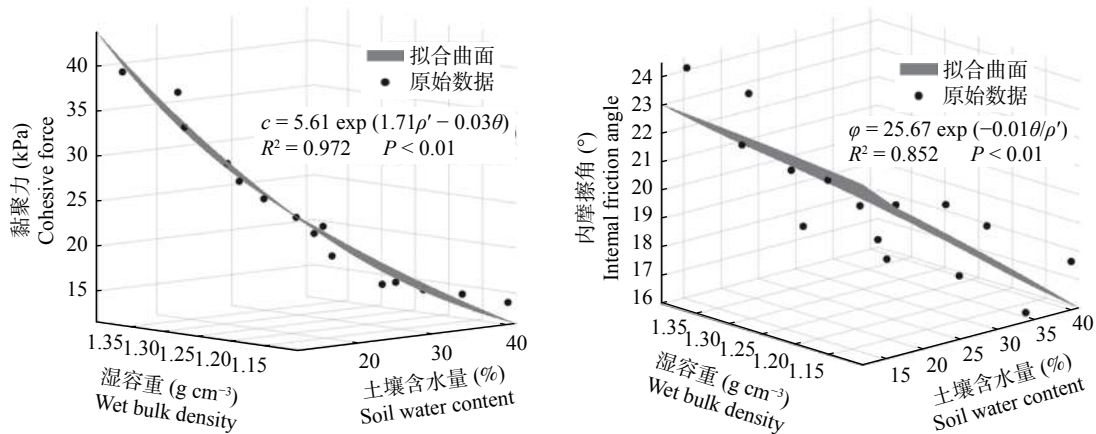


图 3 抗剪强度参数响应曲面的侧面图

Fig.3 Side view of response surface of shear strength parameters

表 2 传递函数的显著性检验

Table 2 Significance test of pedo-transfer functions

传递函数 Pedo-transfer function	平方和 Sum of squares	自由度 Degree of freedom	F值 F value	P值 P value
$c-\theta-\rho'$	1355.259	1	326.546	0.000
$\phi-\theta-\rho'$	673.947	1	188.364	0.000
$\tau-\theta-\rho'$	2173.945	1	505.132	0.000

由图 4 可知，砂姜黑土抗剪强度 PTFs 的决定系数 R^2 达到 0.942，预测值与实测值均匀分布在 1 : 1 线周围 ($P < 0.05$)，说明所建抗剪强度 PTFs 预测精度良好，具有较强的适用性。由此，在田间已知湿容重和土壤含水量的情况下，可以较快地应用该公式实现不同机械载荷条件下抗剪强度的野外预测。

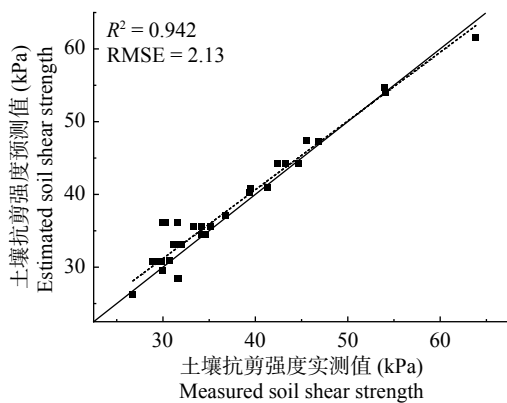


图 4 土壤抗剪强度预测值与实测值的比较

Fig.4 Comparison of estimated and measured soil shear strength

3 讨论

3.1 土壤含水量和容重对砂姜黑土耕层抗剪强度的影响

本研究结果表明，砂姜黑土耕层黏聚力不仅受

到含水量和容重的单一因素影响 ($P < 0.001$)，同时也受到两者交互作用的显著影响 ($P < 0.001$)。耕层黏聚力总体上随土壤含水量增加而下降，且越密实的土壤对含水量变化越敏感，这可能是因为高容重 (1.6 g cm^{-3}) 砂姜黑土的孔隙度较低，颗粒之间的间距小，当含水量从 40% FC (含水量为 12.7%) 上升至 70% FC (含水量为 22.2%) 时，颗粒表面水膜逐渐增厚，润滑作用增强，从而导致黏聚力随含水量的增加而减小。这一研究结果与朱志坤等^[23]在山西地表黄土上的研究结果相似，而与倪九派等^[18]在三峡地区的研究结果并不一致。倪九派等人在容重为 1.6 g cm^{-3} 的黏质黄壤和钙质紫色土上发现，当土壤含水量从 5% 增加至 20% 时，黏聚力呈现先增加后减小的趋势，且黏聚力最大值分别出现在含水量 10% 和 15% 水平下。也有学者对 0 ~ 30 cm 耕层土壤的研究显示，当土壤含水量在 10% 附近时黏聚力达到最大值^[24]。本研究中只出现了黏聚力减小阶段，可能是因为在含水量 12.7% 的条件下已经是黏聚力接近峰值的时期，对于临界值之前的黏聚力增大阶段，需要在后续的实验过程中将初始含水量继续降低才能出现。此外，在土壤容重为 1.6 g cm^{-3} 、含水量为 12.7% 的条件下，本研究中的黏聚力 (39.61 kPa) 远小于倪九派等^[18]在黄壤 (111.5 kPa) 和钙质紫色

土 (97.5kPa) 上的结果, 这除了与测定方法有关之外, 还与土壤类型有密切关系。倪九派等的研究中两种土壤的黏粒及有机质含量均较高, 土壤颗粒间胶结作用也比较强, 因此具有较高的黏聚力。

一般而言, 土壤内摩擦角随容重增加呈线性^[16]或指数型^[13]增加, 随含水量的增加呈现出非线性下降的趋势^[25-26]。本研究中内摩擦角与容重近似呈线性正相关 (图 2)。土壤越密实, 颗粒间接触面积越大, 颗粒可以运动的孔隙空间越小, 因此摩擦强度越大。在沙壤土上的研究表明, 内摩擦角与容重间没有明显相关性^[27]。这可能是由于土壤类型不同, 且有机质含量差别较大所致。土壤含水量对内摩擦角的影响范围较小, 主要局限于低土壤含水量区域。在低含水量时, 砂姜黑土的摩擦系数远大于运动黏滞系数, 颗粒间紧密接触, 相对滑移难度高, 内摩擦角达到最大值。随着自由水含量增加, 砂姜黑土矿物层间水在土壤颗粒表面充当润滑剂的作用, 在高含水量时超过一半的水分保持在膨胀性粘土矿物层间, 尤其是容重大的土壤^[28], 咬合摩擦与滑动摩擦相应的减小; 同时, 土壤中过多的水分会分解水稳性团聚体, 颗粒间的相互移动变得容易, 综合表现为在土壤湿润初期, 内摩擦角迅速减小。土壤含水量在大于 20% 之后, 砂姜黑土内摩擦角变化趋于平稳, 仅在 1.51° 以内波动。Su 等^[29] 和 Cokca 等^[30] 的研究也得出同样结论, 即土壤含水量较高时滑动摩擦和咬合摩擦的影响可以忽略, 土壤孔隙基本上都被水分填充, 颗粒周围水膜厚度较大, 内摩擦角在这种情况下趋于稳定。

采用抗剪强度 PTFs 绘制 $\tau-\theta-\rho$ 的三维函数图 (图 5)。土壤湿度增加使土体内部软化, 抗剪强度急剧下降。相比于湿容重, 土壤含水量对最大剪应力的影响更为突出。本研究中, 黏聚力和抗剪强度的最小值出现在同一土壤物理条件下, 且二者与土壤含水量、湿容重的响应曲面相似, 因此, 抗剪强度变化主要取决于土壤黏聚力, 作为参数之一的内摩擦角的贡献则较小。由图 5 可知, 砂姜黑土含水量为 40% 且容重为 1.6 g cm⁻³ 时, 抗剪强度较大, 此时土壤结构更加稳定, 机械承载能力更强, 比较适合收获时农业机械作业; 对于种子出苗和作物生长来说, 为了营造疏松多孔的根系穿透条件, 保持适宜的土壤含水量及土块松散度是非常必要的, 在这样的情况下耕层土壤也容易受到剪切力的作用, 耕作能耗最小。

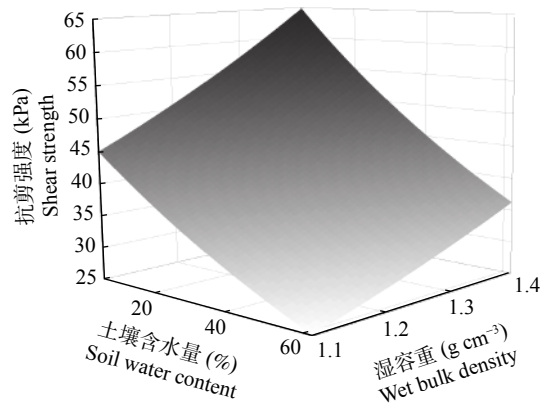


图 5 砂姜黑土抗剪强度预测曲面图

Fig.5 The predicted diagram of shear strength of Shajiang black soil

3.2 与已有土壤抗剪强度传递函数的综合比较

预测抗剪强度有助于确定不同生产时期土壤能够承受的车轮载荷, 适时进地作业。本文利用易于测定的土壤含水量和湿容重数据作为自变量, 通过多元回归分析方法建立了黏聚力、内摩擦角和抗剪强度的 PTFs, 与已有工作相比有两点改进 (表 3)。其一, 本研究构建的抗剪强度传递函数考虑了砂姜黑土干时收缩湿时膨胀的典型特性, 把湿容重作为自变量之一, 而其他研究^[18-19]均采用干容重, 这是本论文的创新点。其二, 倪九派等^[18]建立了黄壤和钙质紫色土 $c-\theta-\rho$ 和 $\phi-\theta-\rho$ 之间的函数关系, 两种土壤黏聚力的回归方程各含 9 个待定参数, 而内摩擦角各含有 7 个待定参数, 方程极为复杂, 不利于广泛利用。Wei 等^[19]也曾建立三峡地区紫色土 $c-\theta-\rho$ 和 $\phi-\theta-\rho$ 的回归方程, 形式相对简单, 但是与倪九派等^[18]和王楠等^[12]一样没有建立抗剪强度传递函数。Garcia 等^[10]采用 3 次多项式来构建了 $\tau-\theta-\rho$ 方程, 形式复杂。本研究结合 Mohr-Coulomb 公式, 建立了砂姜黑土抗剪强度传递函数, 该函数不但预测结果可信 ($R^2 = 0.942$), 而且仅含有 5 个待定参数, 传递函数较为简单, 有助于在砂姜黑土适耕性方面进行推广应用。

4 结论

本文分析了土壤含水量和容重对砂姜黑土耕层抗剪强度参数的影响, 黏聚力和内摩擦角与土壤含水量之间均呈指数衰减关系, 而与容重呈线性增加关系。运用多元回归拟合方法构建了以砂姜黑土湿容重、含水量为自变量的土壤抗剪强度的传递函数, 该传递函数充分考虑了砂姜黑土收缩膨胀的特性且形式比较简洁。该研究结果可为砂姜黑土结构改良

表 3 含水量和容重对土壤抗剪强度影响
Table 3 Effects of soil water content and bulk density on soil shear strength

供试土壤 Test soil	传递函数 Pedo-transfer function						来源 Source
	黏聚力 Cohesive force	R^2	内摩擦角 Internal friction angle	R^2	抗剪强度 Shear strength	R^2	
黄壤	$(-2.88 + 3789\ln\theta - 1578(\ln\theta)^2 + 210.4(\ln\theta)^3 + 316.8(\ln\rho) - 542.5(\ln\rho)^2)/(1 - 0.16\ln\theta + 78.67\ln\rho - 306.1(\ln\rho)^2) + 295.4(\ln\rho)^3$	0.977	$10.12 - 6.12\theta + 0.70\theta^2 - 0.04\theta^3 + 0.001\theta^4 + 50.16\rho - 15.18\rho^2$	0.973	—	—	倪九派等 ^[18]
紫色土	$(2.58 - 9.14\ln\theta - 4.88(\ln\theta)^2 - 0.81(\ln\theta)^3 + 16.08(\ln\rho) - 19.3(\ln\rho)^2)/(1 - 6.34\ln\theta + 13.48(\ln\rho)^2) - 9.59(\ln\rho)^3$	0.971	$6.27 - 5.67\theta - 0.69\theta^2 + 0.03\theta^3 - 0.001\theta^4 + 10.88\rho - 2.14\rho^2$	0.971	—	—	倪九派等 ^[18]
紫色土	$-39.88 + 3.86\theta + 54.95\rho - 0.17\theta^2$	0.832	$-1.19 - 1.06\theta + 30.79\rho - 0.97\theta\rho + 0.03\theta^2$	0.968	—	—	Wei等 ^[19]
黄棕壤	$\exp(0.53 + 2.85\rho) (-0.03\theta + 1.67)$	0.997	—	—	—	—	王楠等 ^[12]
沙壤土	—	—	—	—	$-80.22 + 2.07\rho\theta^2 - 38.60\rho^2 + 40.88\rho^2\theta - 4.41\rho^2\theta^2 - 5.52\rho^3\theta + 0.05\rho^3\theta^3$	0.706	Garcia等 ^[10]
砂姜黑土	$26.12\exp(0.58\rho - 3.76\theta)$	0.968	$15.43\exp(3.89\rho'/100\theta)$	0.856	$26.12\exp(0.58\rho - 3.76\theta) + \tan 15.43\exp(3.89\rho'/100\theta)$	0.942	本研究

注：表中“—”代表未建立方程，无数据， θ 为含水量， ρ 为容重， ρ' 为湿容重。

和适耕性判定提供科学依据。

参考文献：

- [1] Blanco H, Lal R, Owens L B, et al. Strength properties and organic carbon of soils in the north appalachian region[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2005, 69(3): 663 - 673.
- [2] 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.
- [3] Hemmat A, Ahilinategh N, Sadeghi M. Shear strength of repacked remoulded samples of a calcareous soil as affected by long-term incorporation of three organic manures in central Iran[J]. *Biosystems Engineering*, 2010, 107(3): 251 - 261.
- [4] Craig R. F. *Craig's Soil Mechanics*. Seventh edition[M]. University of Dundee UK: Spon Press, 2004
- [5] Sivarajan S, Maharlooei M, Bajwa S G, et al. Impact of soil compaction due to wheel traffic on corn and soybean growth, development and yield[J]. *Soil and Tillage Research*, 2018, 175: 234 - 243.
- [6] Silva R P, Rolim M M, Gomes I F, et al. Numerical modeling of soil compaction in a sugarcane crop using the finite element method[J]. *Soil and Tillage Research*, 2018, 181: 1 - 10.
- [7] Berisso F E, Schjønning P, Lamandé M, et al. Effects of the stress field induced by a running tyre on the soil pore system[J]. *Soil and Tillage Research*, 2013, 131: 36 - 46.
- [8] 张兴义, 隋跃宇. 土壤压实对农作物影响概述[J]. *农业机械学报*. 2005, 36(10): 161-164.
- [9] Wuddivira M N, Stone R J, Ekwue E I. Influence of cohesive and disruptive forces on strength and erodibility of tropical soils[J]. *Soil and Tillage Research*, 2013, 133: 40 - 48.
- [10] García A, Jaime Y N M, Contreras Á M Z, et al. Savanna soil water content effect on its shear strength-compaction relationship[J]. 2012, 12(2): 324-337.
- [11] Mouazena A M, Ramonb H, Baerdemaeker J D. Effects of bulk density and moisture content on selected mechanical properties[J]. *Biosystems Engineering*, 2002, 83(2): 217 - 224.
- [12] 王楠, 赵友朋, 郭晓平, 等. 土壤含水量和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.
- [13] 陈鸿宾, 陈学军, 齐运来, 等. 干密度与含水量对重塑红黏土抗剪强度参数影响研究[J]. *工程地质学报*. 2019, 27(5): 1035-1040.
- [14] 胡斐南, 魏朝富, 许晨阳, 等. 紫色土区水稻土抗剪强度的水敏性特征[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(3): 107 - 114.
- [15] 王晨洋, 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.
- [16] 王萌, 张吾渝, 常立君, 等. 含水量和干密度对青海重塑黄土强度影响研究[J]. *青海大学学报*, 2016, 34(2): 5 - 11.
- [17] 张健乐, 史东梅, 刘义, 等. 土壤容重和含水量对紫色土坡耕地耕层抗剪强度的影响[J]. *水土保持学报*, 2020, 34(3): 162 - 167.
- [18] 倪九派, 高明, 魏朝富, 等. 干湿循环条件下重庆地区三种土壤抗剪强度的动态变化[J]. *土壤学报*. 2013, 50(6): 1090-1101.
- [19] Wei J, Shi B, Li J, et al. Shear strength of purple soil bunds under different soil water contents and dry densities: A case study in the three gorges reservoir area, China[J]. *Catena*, 2018, 166(9): 124 - 133.
- [20] 熊鹏, 郭自春, 李玮, 等. 淮北平原砂姜黑土玉米产量与土壤性质的区域分析[J]. *土壤*, 2021, 53(2): 391 - 397.
- [21] 王玥凯, 郭自春, 张中彬, 等. 不同耕作方式对砂姜黑土物理性质和玉米生长的影响[J]. *土壤学报*. 2019, 56(6): 1370-1380.
- [22] 中华人民共和国水利部. GB/T 50123—1999 土工试验方法标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 1999.

- [23] 朱志坤. 干密度和含水量对太原重塑黄土强度及强度参数影响的研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2018.
- [24] 陈红星, 李法虎, 郝仕玲, 等. 土壤含水量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.
- [25] 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.
- [26] 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.
- [27] Schjønning P, Lamandé M, Keller T, et al. Subsoil shear strength – measurements and prediction models based on readily available soil properties[J]. *Soil and Tillage Research*, 2020, 200: 104638.
- [28] 史福刚, 张佳宝, 姚健. 砂姜黑土界限含水量及适耕性研究[J]. 河南农业科学, 2017, 46(12): 59 – 64.
- [29] Su z, qi d, guo x, et al. Characterization of the undrained shear strength of expansive soils of high water content[J]. *International Journal of GEOMATE*, 2018, 14(44): 176 – 182.
- [30] Cokca E, Erol O, Armangil F. Effects of compaction moisture content on the shear strength of an unsaturated clay[J]. *Geotechnical and Geological Engineering*, 2004, 22: 285.

Influence of Soil Water Content and Bulk Density on Shear Strength of Shajiang Black Soil and Its Pedo-transfer Function Construction

ZHANG Hong-xia^{1,2}, PENG Xin-hua^{1,2*}, GUO Zi-chun¹, GAO Lei¹,
CHEN Yue-ming^{1,2}, SHAO Fang-rong³

(1. Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100049, China; 3. Longkang Farm Co. Ltd., Anhui State Farms Group Huaiyuan, Anhui 233426, China)

Abstract: [Objective] Shear strength can reflect the stability of the cultivated soil structure as well as its suitability for work. When soil overburden pressure exceeds shear strength, soil structure is severely damaged, resulting in decreased farmland productivity. Shajiang black soil has a high soil bulk density, a high clay content and swelling clay minerals, and is classified as a Vertisol in USDA soil classification. It's typically characterized by structural obstacles like poor workability, which are closely related to soil shear strength. The key influencing factors of shear strength were investigated for establishing its pedo-transfer function to improve soil structure and workability given various undesirable traits of Shajiang black soil. [Method] Typical Shajiang black soil was selected to study the two key factors that affect the soil shear strength: the soil bulk density (ρ) was set at 1.2, 1.4 or 1.6 g cm⁻³ and soil water content (θ) was set at 100%, 85%, 70%, 55%, or 40% of field capacity, respectively. The Mohr-Coulomb formula was used to calculate shear strength parameters such as cohesive force (c) and internal friction angle (φ) using a direct shear apparatus. The effect of soil bulk density and water content on soil shear characteristics were investigated, and the pedo-transfer function of soil shear strength was established by multiple regression fitting. [Results] Our results indicate that: (1) The cohesive force (c) of Shajiang black soil decreased as the water content increased, but increased as the bulk density increased. The shrinkage and swelling properties of Shajiang black soil have been considered sufficiently, and the wet bulk density (ρ') is used as one of the independent variables to establish Pedo-transfer functions. The relationship was well fitted by the regression equation $c = a_1 e^{(b_1 \rho' - c_1 \theta)}$ ($R^2 = 0.984$, $P < 0.001$). (2) With increasing water content, the internal friction angle (φ) decreased at first and then stabilized. It showed that bulk density had a linear relationship with it. The relationship between $\varphi - \theta - \rho'$ was well fitted with equation of $\varphi = a_2 e^{(b_2 \rho' / \theta)}$ ($R^2 = 0.856$, $P < 0.001$). (3) Combined with the Mohr-Coulomb formula, the soil shear strength pedo-transfer function was finally established with $\tau = a_1 e^{(b_1 \rho' + c_1 \theta)} + \sigma \tan(a_2 e^{(b_2 \rho' / \theta)})$. This function could predict the shear strength of Shajiang black soil effectively ($R^2 = 0.870$, $P < 0.001$). [Conclusion] It can be concluded that soil water content is the most important factor influencing Shajiang black soil shear strength, and cohesive force has a greater impact on shear strength than the internal friction angle. The findings can be used as a guide for improving the structural stability and workability of Shajiang black soil.

Key words: Vertisol; Shear characteristics; Cohesive force; Internal friction angle; Soil structure pedo-transfer function