

水稻根茬-土壤复合体剪切特性试验

郑乐^{1,2} 罗锡文^{1,2} 曾山^{1,2} 王在满^{1,2} 刘春波^{1,2} 齐兴源^{1,2}

(1. 华南农业大学工程学院, 广州 510642; 2. 华南农业大学南方农业机械与装备关键技术教育部重点实验室, 广州 510642)

摘要: 为了降低稻茬地少耕免耕过程中的阻力,提高作业质量,同时为破茬开沟装置提供设计依据,采用自制的剪切试验装置在万能材料试验机上对水稻根茬-土壤复合体进行了剪切试验,对根茬-土壤复合体含水率、土壤容重、根茬-土壤复合体的当量直径、剪切位置、剪切速度、切刃刃角、切刃刃口形状7个因素进行了单因素试验。在单因素试验的基础上选取根茬-土壤复合体含水率、剪切速度、切刃刃角3个因素进行了正交试验。单因素试验结果显示:极限剪切应力与复合体的含水率呈二次多项式函数关系,与土壤容重呈幂函数关系,与根茬-土壤复合体直径呈二次多项式函数关系,与剪切速度呈对数函数关系,剪切位置距离根茬中心越远极限剪切应力越小,切刃刃角越小极限剪切应力也越小;在4种形状的刃口切刃中,凹圆弧切刃的极限剪切应力最小。正交试验结果表明:切割速度450 mm/min、含水率25%、切刃刃角15°时,极限剪切应力最小。

关键词: 水稻; 保护性耕作; 根土复合体; 剪切特性

中图分类号: S154.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2017)05-0063-09

Shear Characteristics of Rice Root – Soil Composite

ZHENG Le^{1,2} LUO Xiwen^{1,2} ZENG Shan^{1,2} WANG Zaiman^{1,2} LIU Chunbo^{1,2} QI Xingyuan^{1,2}

(1. College of Engineering, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China

2. Key Laboratory of Key Technology on Agricultural Machine and Equipment, Ministry of Education, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

Abstract: In order to reduce the rice stubble of minimum tillage and no tillage resistance in the process, improve the quality of work, and provide basis for the design of stubble breaking ditching device, the shear experiments on the universal material testing machine was tested on rice stubble and soil complex. Soil moisture content, soil bulk density, complex stubble soil composite equivalent diameter, cutting position, cutting speed, cutting edge angle and blade shape were tested by single factor test. Based on single factor experiment, the orthogonal experiment was carried out on three factors, including soil moisture content, shear rate and cutting edge angle. The results of single factor test showed that the relationship of ultimate shear force and water complex rate was two-order polynomial function, a power function relationship with soil bulk density, a two order polynomial function relationship with stubble and soil complex diameter, logarithmic relationship with shear velocity. The ultimate shear stress was decreased with the increase of shear distance from stubble, and it was also decreased with the decrease of cutting edge angle; among the four shapes of cutter blade, the ultimate shear stress of concave arc cutting blade was the least. The results of orthogonal test showed that the ultimate shear stress was the minimum when the cutting speed was 450 mm/min, the moisture content was 25% and the cutting edge angle was 15°.

Key words: rice; conservation tillage; root – soil composite; shear characteristics

引言

保护性耕作技术,特别是少耕免耕技术,是一种

先进的耕作技术^[1-2],已在世界各地广泛应用^[3],但大多都是在旱地作物生产中应用^[4-5],在水稻生产中可否利用少耕免耕技术,是一个具有重大

收稿日期: 2017-01-16 修回日期: 2017-02-20

基金项目: 公益性行业(农业)科研专项(201203059)、广东省科技计划支撑项目(2015A020208016)和国家重点研发计划项目(2016YFD0200606)

作者简介: 郑乐(1983—),男,博士生,主要从事水稻播种机械研究,E-mail: zhengle-xinong@163.com

通信作者: 罗锡文(1945—),男,教授,博士生导师,主要从事农业机械化研究,E-mail: xwluo@scau.edu.cn

意义的科学问题,尤其在南方双季稻产区^[6],早稻收割完后紧接着种植晚稻,农时紧张,因此,研究水稻茬地的保护性耕作很有必要,在稻茬地进行保护性耕作,首先要研究的是水稻根茬-土壤复合体的问题。

目前,关于根茬-土壤复合体的研究较多,相关研究主要集中在林木或草系植被固土机理^[7-8]、土壤侵蚀^[9-10]、荒漠化防治、水土保持等方面^[10-12]。但关于水稻根系结构的研究比较少见,川田信一郎^[13]曾进行水稻根系在土壤中分布的相关研究,徐信武^[14]通过试验测得了水稻秸秆的抗拉强度,孙占峰等^[15]测得了水稻秸秆的挤压、弯曲、破坏等特性,赵湛等^[16]对水稻单茎进行了切割试验,赵旭等^[17]研究了玉米根土复合体剪切性能,刘川顺等^[18]研究了香草根土复合体的抗剪强度,但水稻根茬-土壤复合体的力学相关研究未见相关文献报道。

本文测量分析水稻根茬的田间分布情况以及根系分叉形态的相关参数、水稻根茬的当量直径与其所包裹的土壤深度等结构特征。水稻根土复合体的物理性质对其抗剪性质有很大影响,包括土壤的组成、容重以及含水率和含根比例^[17,19-20]。在稻田中破茬开沟部件对土壤的作用主要表现为剪切破坏,因此,对水稻根茬-土壤复合体(以下简称根土复合体)进行剪切特性的研究是基础,本文拟通过试验研究获得在免耕播种时水稻根土复合体的最佳作业部位,从而为降低作业机具功耗、减少动土量提供设计依据。

1 研究区域自然概况与采样

研究试验区位于广州市增城区华南农业大学实验农场,属于亚热带海洋季风气候,是红壤土分布区,土壤的通气 and 蓄水性能良好。

试验田长 140 m、宽 120 m,测量内容包括土壤密度、含水率和土壤坚实度,每个测量点按照 0 ~ 50 mm、50 ~ 100 mm、100 ~ 150 mm、150 ~ 200 mm 分层取土。土壤含水率和干密度按照 GB/T 50123—1999 进行测量,同时使用 TYD-2 型数显土壤硬度仪测量土壤硬度。

2 试验装置、材料与方法

2.1 试验装置与设备

试验用仪器包括 WD-E 型精密微控电子式万能试验机(广州市广材试验仪器有限公司生产),采用 1 000 N 传感器,分辨率 1/120 000,力值精度 ± 0.5%,位移精度 ± 0.3%。试验加载速率 5 ~ 1 000 mm/min,数据采样速度 2 个/s。游标卡尺,米

尺,人工气候箱,TYD-2 型数显土壤硬度仪(浙江托普仪器有限公司生产),自制剪切装置,试验设定剪切时的采样频率为 40 Hz,起始力为 2 N; DHG-9030 型电热恒温鼓风干燥箱(上海索谱仪器有限公司),ALC 电子天平(量程:500 g,精度:1 mg,北京赛多利斯仪器系统有限公司)。实验室温度为 28.5℃,湿度为 58.5%。

水稻根土复合体是一种特殊的复合材料,目前还没有试验标准可供依照,本文参考其他材料试验装置^[12,21-23]和试验方法^[24-27],设计了一套剪切装置与万能材料试机组成一套试验系统^[17,23,28-29]。剪切装置由剪切底座和剪切刀具两部分组成,剪切刀具安装在万能材料试验机的上连接头,剪切底座四周由橡胶海绵围压成盒状,在盒底部与动刀对应的位置安装有与动刀对应的定刀,为保证剪切,定刀位于动刀正下方,剪切间隙控制在 0.05 mm 以内。由于农业机械的试验大田环境的特殊性,想要保证室内的测试条件与真实工作环境条件完全相同是比较困难的,为了最大限度地模拟田间环境,前期采用相关试验仪器获取相关试验参数:密度、含水率、温度、湿度等,各参数尽量保持与大田环境一致,同时采用土壤硬度仪在试验田找点测量获取数据,结合测试数据和自制的剪切设备调节相关参数,先根据前期获取的田间土壤硬度调整橡胶海绵组成的围压系统,使之与大田环境作业时的实际情况一致,动刀切割试样时,试样外侧包围有橡胶和海绵及液体,试样受到剪切作用后挤压围压系统,使得围压系统的压力同步变化,基本符合根土复合体在大田环境下的实际情况。

自制剪切装置如图 1 所示。

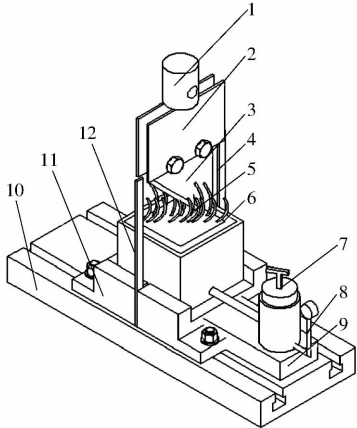


图 1 剪切试验装置

Fig. 1 Shear test device

- 1. 动刀支座连接头 2. 动刀安装座 3. 动剪切刀 4. 动刀导向支架 5. 水稻根茬-土壤复合体 6. 橡胶盒 7. 调节筒 8. 压力计 9. 压力滚筒支座 10. 试验台底座 11. 剪切底座 12. 定刀导向支架

剪切试验台上的动刀为往复式单面刃切刀,材质为 45 号钢,为提高抗磨能力进行淬火处理。试验过程中使用的 4 种刀具包括平刃口切刀、斜刃口切刀、凹圆弧刃口切刀和凸圆弧刃口切刀,如图 2 所示。

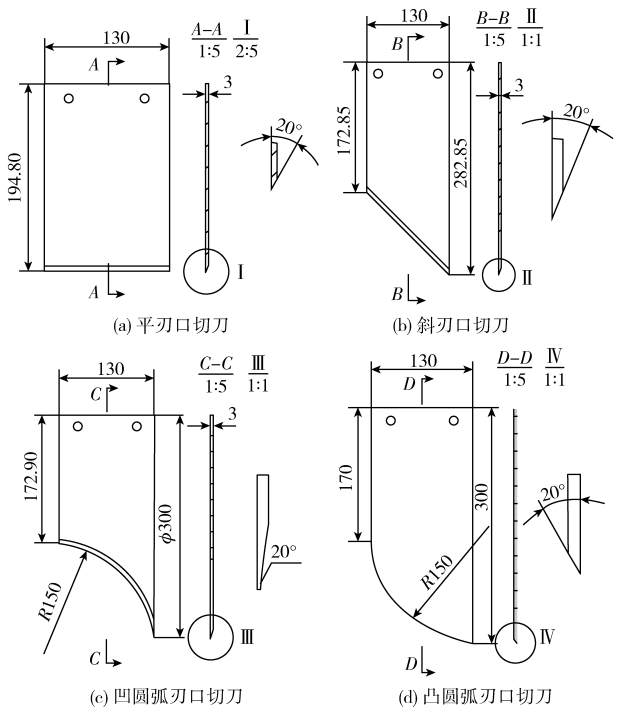


图 2 剪切刀片零件图

Fig. 2 Part drawings of blades

2.2 试验材料的制备

选取的水稻品种为黄花占,是一种感温型常规稻品种,早稻和晚稻均采用直播方式种植,播期分别为 2015 年 3 月 23 日和 2016 年 3 月 29 日,水稻收获后,随机挖掘完整的 200 株水稻植株,装入网袋后进行清洗,对清洗后的水稻根系长度和范围进行测量,如图 3a、3b、3c 所示。根据统计分析结果可知,绝大部分水稻的根系都分布在深度为 8~10 cm 范围的土层内。同时采用环刀法测试土壤的容重和含水率,试样获取后通过地表根茬分蘖数将试样分类,在试样中选取根茬分蘖数为 6~10、11~15、16~20、21~25、26~30、31~35 的试样各 20 个,进行编号。为了减少根茬地上部分对试验的影响,地上部的留茬高度统一为 100 mm。

水稻根系在不同时期变化差异非常显著,尤其与种植后期的田间水分管理密切相关,由统计分析结果可知,从水稻抽穗期开始,植株进入快速灌浆期,养分需求增大,由于营养胁迫部分根系开始失去活性^[30-32]。收获后水分与温度导致根系逐渐失去柔韧性变脆腐烂^[33-35],这与田间实际取样的情况一致,其具体表现如图 4 所示。剪切试验所需的水稻根土复合体采用田间随机取样方法,取样时为了最



图 3 试样制备

Fig. 3 Preparation of test pieces for testing



图 4 生育后期与收获后根系实物图

Fig. 4 Root pictures at late growth stage and after harvest

大限度地模拟机具作业时的试验状态,挖取时按照规格 300 mm×300 mm×200 mm 取成立方体,同时按同规格挖取无根系素土土样作为对照,所取试样立即使用塑料袋包裹并保存在与生长环境相似的试验箱直至试验使用。

2.3 极限剪切应力测定

根据复合材料力学理论计算剪应力,试验采用直接剪切方式进行,极限剪切应力计算式为

$$\tau_s = \frac{F_{\max}}{s}$$

式中 τ_s ——极限剪切应力

$F_{\max}$ ——最大剪切力

s ——切刀面积

经计算切刀面积为 $1.2 \times 10^{-4} \text{ m}^2$ 。

2.4 试验方法

剪切试验在 WD-E 型精密微控电子式万能试验机和自制剪切试验装置上进行,在大田作业环境中,工作部件的入土能力、入土深度等均需要通过试验获取相关设计依据,在结合农艺相关要求的情况下寻找合适的入土深度以及探求作业时遇到的阻力对后续机具设计节能减阻有着重要意义。为模拟机械作业环节时破茬刀具由地表茬地切入根茬土壤

内部的过程,试验前首先将剪切底座安装在试验机底部,将试验用的剪切刀具安装在万能材料试验机上连接头,试验时,试验机上连接头通过剪切动刀,和设定的加载速度做竖直向下运动,定刀与动刀共同配合作业直到根土复合体试样完全被切开。与计算机配套的分析软件自动记载试验过程中剪切刀的位移以及试样受到的剪切力。设置采样频率 20 Hz,单因素试验时每一水平重复试验 5 次,正交试验时每组重复 3 次。为了排除动定刀之间发生摩擦对试验的影响,当施加的载荷大于 3 N 时才开始记录试验曲线。

2.5 试验设计

本试验主要研究模拟机具作业时相关参数对稻茬极限剪切应力的影响。因影响因素较多,为了减少试验次数,将试验分为 2 组,第 1 组采用单因素试验:水稻根系的形状呈现纺锤形状^[13],与水稻根茬中心的距离不同,相当于根土复合体的含根比例也有所不同,因此将距离水稻根茬中心的剪切位置也

作为一个因素,剪切位置分别为通过水稻根茬中心和距离水稻根茬中心 20、40、60、80 mm。选取根土复合体含水率、土壤容重、根土复合体的根土混合比例、剪切位置、剪切速度、切刀刃角和切刀形状等 7 个试验因素,为了对照无根系情况,每组试验均安排了素土对照试验。试验前如果不破坏根茬复合体将无法获取根土混合比例,但是文献表明^[31-32,34-37],水稻的根系生长情况与地上部分相关,每株水稻地上的分蘖数越多地下根系越发达,故选取分蘖数作为水稻根土混合比例的表征。以根土复合体当量直径反映分蘖数。第 2 组试验模拟机具田间作业的实际情况,将根土复合体含水率、剪切速度、切刀刃角作为试验因素,采用正交试验设计安排试验。

2.5.1 单因素试验设计

单因素试验选取的因素和水平如表 1 所示。剪切位置分别为通过水稻根茬中心,以及距离水稻根茬中心 20、40、60、80 mm,表 1 中分别记为 I、II、III、IV、V。

表 1 单因素试验因素和水平
Tab.1 Factors and levels of single factor test

水平	因素						
	根土复合体 含水率/%	土壤容重/ (g·cm ⁻³)	根土复合体 当量直径/mm	剪切位置	剪切速度/ (mm·min ⁻¹)	切刀刃角/ (°)	切刀形状
1	10	1.0	40	I	20	10	平刃口切刀
2	15	1.2	60	II	50	15	斜刃口切刀
3	20	1.4	80	III	100	20	凸圆弧刃口切刀
4	25	1.6	100	IV	300	25	凹圆弧刃口切刀
5	30		120	V	500	30	

2.5.2 正交试验设计

在单因素试验的基础上,考虑到田间作业时水稻根茬的直径自然生长无法选择,剪切位置在机具具体作业时很难保证在某一固定位置,因此这些均不选为试验因素,选取根土复合体含水率、剪切速度、切刀刃角作为正交试验的因素。正交试验所选的因素与水平见表 2。试验时选取土壤容重为 1.4 g/cm³、根土复合体的平均当量直径为 80 mm、采用凹圆弧刃口切刀、剪切位置为水稻根茬中心。

表 2 正交试验因素与水平
Tab.2 Factors and levels of orthogonal test

水平	因素		
	根土复合体 含水率/%	剪切速度/ (mm·min ⁻¹)	切刀刃角 /(°)
1	15	50	15
2	20	250	25
3	25	450	35

3 试验结果与分析

3.1 单因素试验结果与分析

3.1.1 根土复合体含水率

进行根土复合体含水率试验时,土壤容重为 1.4 g/cm³、根土复合体的平均当量直径为 80 mm、切割速度为 100 mm/min,采用平刃口切刀,切刀刃角为 20°,剪切位置为水稻根茬中心;选取含水率分别为 10%、15%、20%、25%。

试验中发现,当含水率达到 30% 时,土壤颗粒的流动性太大,无法正常进行剪切试验,故舍去 30% 含水率的试验。

试验结果如图 5 所示,将根土复合体的含水率与极限剪切应力进行回归拟合,二者呈二次多项式函数关系, $R^2 = 0.928\ 6$ 。由试验结果可知,根土复合体的含水率对极限剪切应力的影响比较显著,根土复合体的极限剪切应力随着含水率的增加呈现先增大后减小的趋势,在含水率为 15% 时达到峰值,

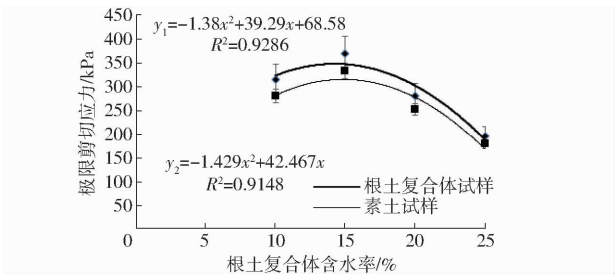


图 5 根土复合体含水率-极限剪切应力关系曲线
Fig. 5 Relationship curves of moisture content and ultimate shear stress of root - soil composite

随着含水率增加极限剪切应力呈减小趋势。根据有关学者^[9,11,28,30]的研究,根土复合体的抗剪切特性主要由 2 部分组成,一部分是土壤的粘聚力,另一部分是土壤的内摩擦角,胡文利等^[38]的研究结果表明,无论土壤中是否有根系存在,含水率越大,内摩擦角越小。含水率较小时,土壤颗粒之间连接比较松散,尚未形成较为致密的结构,土壤颗粒与根系的接触也比较松散,根土间的连接较弱。随着含水率的增加,土粒与水之间形成的结合水膜作用增强,土体的粘聚力增大。随着含水率的进一步增加,土壤颗粒周围的水膜变厚,通过水分子胶结的能力变弱,土壤颗粒与根系之间的联接咬合作用减弱,从而抵抗外界变形的能力减弱。

3.1.2 根土复合体土壤容重因素试验

进行土壤容重试验时,根土复合体含水率为 20%、根土复合体的平均当量直径为 80 mm、切割速度为 100 mm/min,采用平刃口切刀,切刀刃角为 20°,剪切位置为水稻根茬中心;选取容重分别为 1.0、1.2、1.4、1.6 g/cm³,每组试验重复 10 次。

由图 6 可以看出,随着土壤容重的增加,水稻根土复合体的极限剪切应力均值不断增加,呈幂函数关系。由于水稻属于须根系植物,因此水稻须根与包裹须根的土壤之间形成交错的黏合体,土壤的容重越大,土壤颗粒与根茬包裹之间的连接就越紧密,相当于复合体的当量密度也变大,因而抵抗外界剪切的能力增强^[7,9,11]。

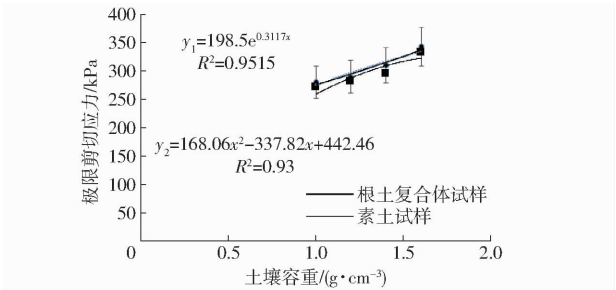


图 6 根土复合体土壤容重-极限剪切应力关系曲线
Fig. 6 Relationship curves of bulk density and ultimate shear stress of root - soil composite

3.1.3 水稻根茬直径对极限剪切应力的影响

进行水稻根茬直径试验时,根土复合体含水率为 20%、土壤容重为 1.4 g/cm³、切割速度为 100 mm/min,选取平刃口切刀,切刀刃角为 20°,剪切位置为水稻根茬中心;分别选取直径为 39.85、60.25、79.68、101.42、120.62 mm 的水稻根土复合体进行试验,每组试验重复 10 次。

由图 7 可以看出,水稻根土复合体在 40 ~ 80 mm 的范围内时,极限剪切应力的均值增长比较明显,呈二次多项式函数关系,直径超过 80 mm 后,素土极限剪切应力均值的生长速度逐渐变慢。在田间采样过程中也发现,地表根茬直径较小时,地下根系也比较稀疏,单位体积含根量也较少,根系对土壤的加筋效应就相对较弱,复合体抵抗剪切的能力随之下降。

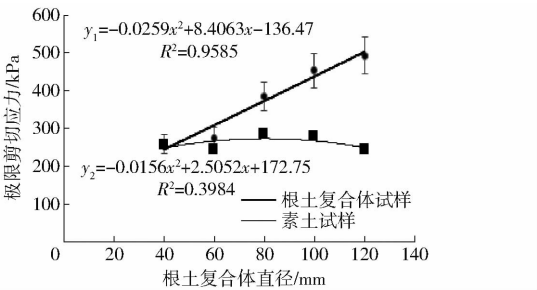


图 7 根土复合体直径-极限剪切应力关系曲线
Fig. 7 Relationship curves of equivalent diameter and ultimate shear stress of root - soil composite

3.1.4 切割位置对极限剪切应力的影响

进行切割位置试验时,根土复合体含水率为 20%、土壤容重为 1.4 g/cm³、切割速度为 100 mm/min,选取平刃口切刀,切刀刃角为 20°。切割位置及结果如图 8 所示。每组试验重复 10 次。

由图 9 可以看出,切割位置对极限剪切应力影响显著,呈二次多项式函数关系,由于水稻的根系为须根系,距离水稻根茬中心越近,水稻的根系越密集,相当于单位体积内的根系比例增加,土体内的加筋效应增强,水稻根土复合体抵抗外界剪切的能力增强。同理,距离水稻根茬中心越远,单位体积内的土体包裹的水稻根系就越少,切割的过程就越接近于素土切割,加筋效应就越不明显。

3.1.5 剪切速度对极限剪切应力的影响

进行剪切速度试验时,根土复合体含水率为 20%、土壤容重为 1.4 g/cm³,采用平刃口切刀,切刀刃角为 20°,剪切位置为水稻根茬中心;切割速度分别取 10、20、50、100、150、200、300、500 mm/min 进行试验,每组试验重复 10 次。

根据试验结果(图 10),将剪切速度对极限剪切应力均值进行曲线回归拟合, $R^2 = 0.9338$,呈对数

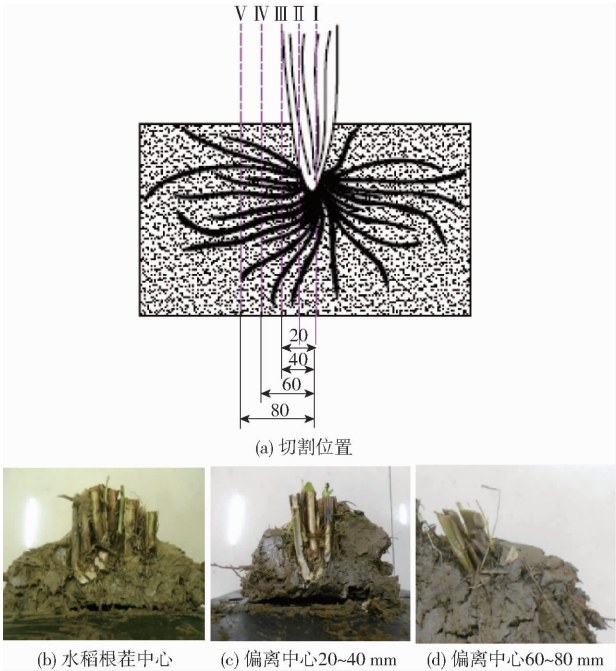


图 8 切割位置及结果

Fig. 8 Cutting location and results

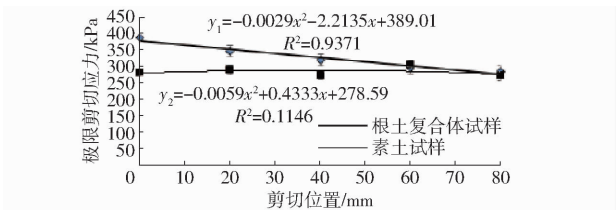


图 9 根土复合体剪切位置-极限剪切应力关系曲线

Fig. 9 Relationship curves of shear position and ultimate shear stress of root - soil composite

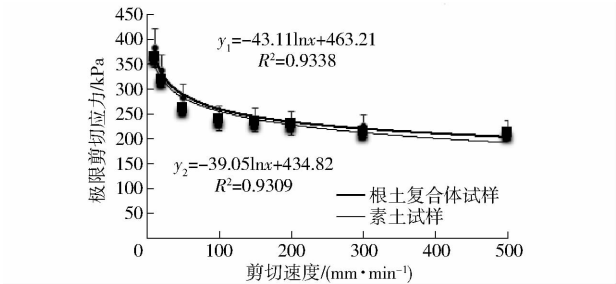


图 10 切刀剪切速度-极限剪切应力关系曲线

Fig. 10 Relationship curves of shear velocity and ultimate shear stress

函数关系,水稻根土复合体与剪切刀具的接触时间减少,在切割接触点传递变形的时间也随时减小,切割的过程变快,极限剪切应力的极值也随之减小。

3.1.6 切刀刃角对极限剪切应力的影响

进行切刀刃角试验时,根土复合体含水率为20%、土壤容重为1.4 g/cm³、切割速度为100 mm/min,采用平刃口切切刀,剪切位置通过水稻根茬中心;切刀刃角分别取10°、15°、20°、25°、30°。

试验结果(图11)表明,切刀刃角对极限剪切应

力影响显著,剪切刃角增大时,极限剪切应力的均值呈增加趋势,剪切刀的刃角越小,刀片越锋利,相当于剪切刀具的切入角度较小,根据试验观察,刃角10°时切割根土复合体的切面也比较平整,切割位置也较少出现震裂、碎散等现象。刃角越小越容易切开根土复合体,从而降低了作业的阻力,但在同样材质和金属热处理的情况下,剪切刃角小的刀片容易磨损,不同组成成分的土壤对切刀刃角磨损的影响也不同,如果在砂性土或者含有小石砾的土壤中作业,较小切刀刃角的切刀更容易磨损,致使阻力增大或崩刃损坏,影响剪切刀具的使用寿命。如仅以切割质量和田间作业阻力作为衡量指标,剪切刀的切刀刃角越小越好。但在实际的田间作业过程中,不仅要考虑作业质量还应同时考虑剪切刀具的使用寿命,权衡作业效果和作业成本后合理选用。

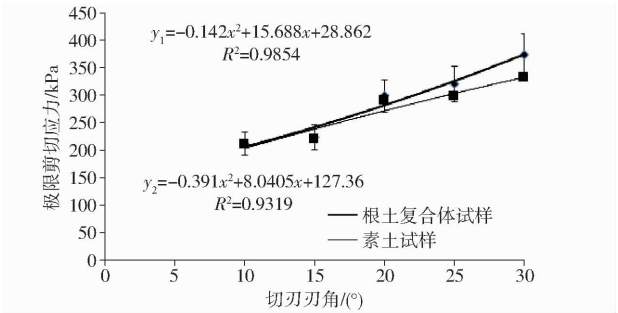


图 11 切刀刃角-极限剪切应力关系曲线

Fig. 11 Relationship curves of cutting edge blade angle and ultimate shear stress

3.1.7 切刀形状对极限剪切应力的影响

进行切刀形状试验时,根土复合体含水率为20%、土壤容重为1.4 g/cm³、切割速度为100 mm/min、切刀刃角为15°、剪切位置分别通过水稻根茬中心;选取4种刃型切刀。

试验结果(图12)表明,平刃口切刀与斜刃口切刀的极限剪切应力相差不明显,内外圆弧型切刀与直线型切刀差异较大,刃口曲线为凹圆弧时,极限剪切应力最小,从而对应的作业阻力也最小。分析切割过程可知,凸圆弧刃口切割时对上升的土壤和根茬复合体有向下挤压的趋势,相当于切刀的入土角增大,对应的极限剪切应力也增大,凹圆弧刃切割时,由于处于最大半径的土壤和根茬复合体先受到切刀挤压的会沿着刃口的方向向内侧滑动,相当于切刀的瞬时入土角减小,从而对应的切割阻力也减小。

3.2 正交试验结果与分析

正交试验的试验因素水平及试验安排如表3所示。

大田环境较为复杂,因此影响极限剪切的因素

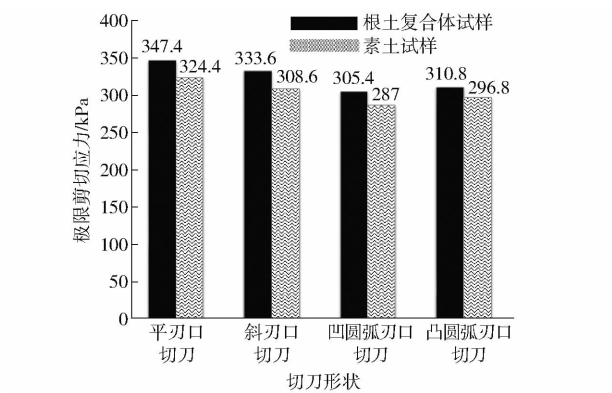


图 12 切刀形状对极限剪切应力的影响

Fig. 12 Effects of cutter shape on ultimate shear stress

表 3 正交试验安排与结果

Tab. 3 Orthogonal test arrangements and results

序号	因素			极限剪切应力 /kPa
	根土复合体 含水率 A	剪切速度 B	切刀刃角 C	
1	1	1	1	295
2	1	2	2	322
3	1	3	3	356
4	2	1	3	257
5	2	2	3	339
6	2	3	1	194
7	3	1	3	246
8	3	2	1	182
9	3	3	2	229
极差	39	7	29	
主次因素	A、C、B			

也较多,由于实际作业中,根茬切割位置很难人为控制准确,结合前期的单因素试验,选取根土复合体含水率、剪切速度和切刀刃角作为试验因素。

正交试验结果如表 3 所示,正交试验的结果与单因素试验结果一致,在 3 个因素中,根土复合体含水率的影响最大、切刀刃角次之、剪切速度最小。含水率对极限剪切应力的影响最为显著,极限剪切应力最小的参数组合为 $A_3B_3C_1$,由于该组试验未出现在正交试验结果中,故补充进行了一组试验,经试验测得极限剪切应力为 172 kPa。

4 结论

(1)采用自制的剪切装置和电子万能试验机对水稻根茬复合体的抗剪切性能进行了试验,结果表明,土壤含水率、土壤容重和根土复合体的含根比例对水稻根土复合体的抗剪切特性影响显著。单因素试验结果表明,水稻根土复合体的含水率从 10% 开始,剪切应力先随着含水率的增大而增大,在 15% 达到最大,之后随着含水率的增加而减小,表现出先增后减趋势,另外作业过程中剪切刀具距离根茬中心位置也对作业阻力影响显著,距离越远阻力越小。

(2)在设计 4 种不同刃口曲线的切刀中,平口切刀刃与斜口切刀刃对应的极限剪切应力差别不大,凹圆弧切刀和凸圆弧切刀对应的极限剪切应力都比直线型切刀降低 15% 左右,其中凹圆弧切刀的极限剪切应力值最小。在免耕破茬的过程中,选取合适形状的破茬刃口曲线能降低机器作业的阻力。

(3)正交试验结果表明:在含水率 25%、切割速度 450 mm/min、切刀刃角 15°时,极限剪切应力最小,为最佳组合。少免耕种植期不同,其根土复合体含水率也存在差异,从而也影响剪切阻力,因此选择较高含水率有利于减小耕作阻力。

参 考 文 献

1 王长生,王遵义,苏成贵,等. 保护性耕作技术的发展现状[J]. 农业机械学报, 2004,35(1):167-169.
WANG Changsheng, WANG Zunyi, SU Chenggui, et al. Development and application of protective farming technique[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2004,35(1):167-169. (in Chinese)

2 贾延明,尚长青,张振国. 保护性耕作适应性试验及关键技术研究[J]. 农业工程学报, 2002,18(1):78-81.
JIA Yanming, SHANG Changqing, ZHANG Zhenguo. Adaptability test and key technology research on conservation tillage[J]. Transactions of the CSAE, 2002,18(1):78-81. (in Chinese)

3 杨学明,张晓平,方华军,等. 北美保护性耕作及对中国的意义[J]. 应用生态学报, 2004,15(2):335-340.
YANG Xueming, ZHANG Xiaoping, FANG Huajun, et al. Conservation tillage systems in North America and their significance for China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2004,15(2):335-340. (in Chinese)

4 山仑. 旱地农业技术发展趋向[J]. 中国农业科学, 2002,35(7):848-855.
SHAN Lun. Development trend of dryland farming technologies[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2002,35(7):848-855. (in Chinese)

5 周兴祥,高焕文,刘晓峰. 华北平原一年两熟保护性耕作体系试验研究[J]. 农业工程学报, 2001,17(6):81-84.
ZHOU Xingxiang, GAO Huanwen, LIU Xiaofeng. Experimental study on conservation tillage system in areas of two crops a year in North China Plain[J]. Transactions of the CSAE, 2001,17(6):81-84. (in Chinese)

6 章秀福,王丹英,符冠富,等. 南方稻田保护性耕作的研究进展与研究对策[J]. 土壤通报, 2006,37(2):346-351.
ZHANG Xiufu, WANG Danying, FU Guanfu, et al. Research progress and developing strategy in paddy-field conservation tillage in the south of China[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2006,37(2):346-351. (in Chinese)

- 7 李建兴, 何丙辉, 湛芸, 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)
- 8 邓军涛, 张艳, 王娟娟. 黄土古土壤的抗剪强度特性[J]. 水土保持通报, 2015, 35(5):319–322.
DENG Juntao, ZHANG Yan, WANG Juanjuan. Shear strength characteristics of loess paleosol[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2015, 35(5):319–322. (in Chinese)
- 9 吕春娟, 陈丽华, 陈卫国, 等. 根土复合体的抗剪特性研究[J]. 灌溉排水学报, 2016, 35(3):13–19.
LÜ Chunjuan, CHEN Lihua, CHEN Weiguo, et al. Study on shear performance of soil–root composite[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2016, 35(3):13–19. (in Chinese)
- 10 郑力文. 林木根系对土壤性质的影响研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2015.
ZHENG Liwen. Effect of root system on soil properties[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2015. (in Chinese)
- 11 赵亮. 根土复合体抗剪强度试验研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2014.
ZHAO Liang. Experimental study on shear strength of root–soil composite[D]. Changsha: Central South University of Forestry and Technology, 2014. (in Chinese)
- 12 陈终达, 肖宏彬, 张春晓, 等. 根系分布方式对根–土复合体抗剪强度的影响[J]. 中南林业科技大学学报, 2016, 36(8):130–135.
CHEN Zhongda, XIAO Hongbin, ZHANG Chunxiao, et al. The impact of root distribution methods on the shear strength of root–soil composite[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2016, 36(8):130–135. (in Chinese)
- 13 [日]川田信一郎. 水稻的根系[M]. 申廷秀, 刘执钧, 彭望瑗, 译. 北京: 农业出版社, 1984.
- 14 徐信武. 稻草的热力学性能及稻草刨花板的吸湿特征[D]. 南京: 南京林业大学, 2003.
XU Xinwu. Thermomechanical properties of rice straw and hygroscopicity of rice straw-based particleboard[D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2003. (in Chinese)
- 15 孙占峰, 蒋恩臣. 稻草秸秆力学特性研究[J]. 东北农业大学学报, 2007, 38(5):660–664.
SUN Zhanfeng, JIANG Enchen. Study on mechanical properties of rice straw[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2007, 38(5):660–664. (in Chinese)
- 16 赵湛, 李耀明, 徐立章, 等. 超级稻单茎秆切割力学性能试验[J]. 农业机械学报, 2010, 41(10):72–75.
ZHAO Zhan, LI Yaoming, XU Lizhang, et al. Experiment on cutting mechanical property of single super rice stalk[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(10):72–75. (in Chinese)
- 17 赵旭, 张祖立, 黄秋波, 等. 玉米根土复合体剪切性能试验[J/OL]. 农业机械学报, 2013, 44(8):126–132. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20130822&flag=1&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.08.022.
ZHAO Xu, ZHANG Zuli, HUANG Qiubo, et al. Cutting performance of corn root–soil composite[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(8):126–132. (in Chinese)
- 18 刘川顺, 吴洪亮, 张路. 香根草根土复合体抗剪强度试验研究[J]. 武汉大学学报:工学版, 2012, 45(5):580–583.
LIU Chuanshun, WU Hongliang, ZHANG Lu. Experimental study of shear strength of soil rooted with vetiver roots[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2012, 45(5):580–583. (in Chinese)
- 19 郭维俊, 黄高宝, 王芬娥, 等. 小麦根系力学性能及微观结构研究[J]. 农业机械学报, 2010, 41(1):92–95.
GUO Weijun, HUANG Gaobao, WANG Fene, et al. Mechanical properties and micro-structure of wheat roots[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(1):92–95. (in Chinese)
- 20 王宏立, 张伟, 董晓威, 等. 玉米根茬剪切力学性能试验与分析[J]. 实验力学, 2014, 29(1):73–82.
WANG Hongli, ZHANG Wei, DONG Xiaowei, et al. Experiment and analysis of shear mechanical property of corn stubbles[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2014, 29(1):73–82. (in Chinese)
- 21 武涛, 马旭, 齐龙, 等. 玉米根茬根土分离装置[J/OL]. 农业机械学报, 2014, 45(6):133–139. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20140621&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.06.021.
WU Tao, MA Xu, QI Long, et al. Roots–soil separating device of corn stubble[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(6):133–139. (in Chinese)
- 22 李小城, 刘梅英, 牛智有. 小麦秸秆剪切力学性能的测试[J]. 华中农业大学学报, 2012, 31(2):253–257.
LI Xiaocheng, LIU Meiyong, NIU Zhiyou. Test of shear mechanical properties of wheat stalks[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2012, 31(2):253–257. (in Chinese)
- 23 蒋必凤, 李淑敏, 肖元平. 牛筋草根土复合体抗剪性能研究[J]. 山西建筑, 2016, 42(35):63–65.
JIANG Bifeng, LI Shumin, XIAO Yuanping. Research on the shear strength of *Eleusine indica* root soil composite[J]. Shanxi Architecture, 2016, 42(35):63–65. (in Chinese)
- 24 INCE A, UGURLUAY S, GUZEL E. Bending and shearing characteristics of sunflower stalk residue[J]. Biosystems Engineering, 2005, 92(2):175–181.

- 25 BAKEER B, TAHA I, EL-MOUSLY H, et al. On the characterisation of structure and properties of sorghum stalks[J]. Ain Shams Engineering Journal, 2013,4(2):265–271.
- 26 JOHNSON P C, CLEMENTSON C L, MATHANKER S K, et al. Cutting energy characteristics of *miscanthus* $\times$ *giganteus* stems with varying oblique angle and cutting speed[J]. Biosystems Engineering, 2012,112(1):42–48.
- 27 NAZARI G M, JAFARI A, MOHTASEBI S S, et al. Effects of moisture content and level in the crop on the engineering properties of alfalfa stems[J]. Biosystems Engineering, 2008,101(2):199–208.
- 28 高景. 拉伸-剪切复合载荷原位力学测试装置设计分析与试验研究[D]. 长春: 吉林大学, 2015.
GAO Jing. The design and experimental research on in-situ mechanical testing instrument combined tension and shear[D]. Changchun: Jilin University, 2015. (in Chinese)
- 29 刘薇, 杜文亮, 苏禹, 等. 植物根-土复合体原位剪切试验装置的设计与分析[J]. 农机化研究, 2017,39(1):82–86.
LIU Wei, DU Wenliang, SU Yu, et al. Design and analysis of a plant root soil composite in situ shear test devices[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2017,39(1):82–86. (in Chinese)
- 30 胡敏, 李为萍, 史海滨, 等. 布根方式及根系径级对根土复合体抗剪性能的影响[J]. 水土保持通报, 2012,32(1):42–44.
HU Min, LI Weiping, SHI Haibin, et al. Bulletin of soil and water conservation[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2012,32(1):42–44. (in Chinese)
- 31 陆定志. 杂交水稻根系生理优势及其与地上部性状的关联研究[J]. 中国水稻科学, 1987,1(2):81–94.
LU Dingzhi. Relationship between physiological heterosis of root and shoot system of hybrid rice shan-you 6[J]. Chinese Journal of Rice Science, 1987,1(2):81–94. (in Chinese)
- 32 何强, 邓华凤, 舒服, 等. 杂交水稻苗期发根性状与生育后期根系活力及穗部性状的关系[J]. 杂交水稻, 2006,21(3):75–77.
HE Qiang, DENG Huafeng, SHU Fu, et al. Correlation of rooting traits in seedling stage to activity of root system in late growth stage and panicle traits in hybrid rice[J]. Hybrid Rice, 2006,21(3):75–77. (in Chinese)
- 33 吴伟明, 宋祥甫, 孙宗修, 等. 不同类型水稻的根系分布特征比较[J]. 中国水稻科学, 2001,15(4):276–280.
WU Weiming, SONG Xiangfu, SUN Zongxiu, et al. Comparison of root distribution between different type rice[J]. Chinese Journal of Rice Science, 2001,15(4):276–280. (in Chinese)
- 34 王旭军. 不同类型水稻根系生理特性及其与地上部关系的研究[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2005.
WANG Xujun. Study on root physiological characteristics of different types of rice and its relationship to its aerial parts[D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2005. (in Chinese)
- 35 朱春生. 不同类型水稻根系形态特性及其与地上部关系的研究[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2005.
ZHU Chunsheng. Study on the morphological characteristics of root and their relation with upland parts between different types rice [D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2005. (in Chinese)
- 36 石庆华, 黄英金, 李木英, 等. 水稻根系性状与地上部的相关及根系性状的遗传研究[J]. 中国农业科学, 1997,30(4):61–67.
SHI Qinghua, HUANG Yingjin, LI Muying, et al. Studies on the heredity of root characteristics and correlation between the characteristics of roots and upperground parts in rice[J]. Scientia Agricultura Sinica, 1997,30(4):61–67. (in Chinese)
- 37 洛育. 黑龙江省水稻根系性状与地上部性状的关系[J]. 中国农学通报, 2010,26(14):165–168.
LUO Yu. Dependence relation of aerial part traits and root traits of rice in Heilongjiang Province[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2010,26(14):165–168. (in Chinese)
- 38 胡文利, 李为萍, 陈军. 不同含水率水平下根-土复合体抗剪强度试验研究[J]. 内蒙古农业大学学报:自然科学版, 2011,32(1):215–219.
HU Wenli, LI Weiping, CHEN Jun. The root-soil composite shear strength in different soil moisture levels[J]. Journal of Inner Mongolia Agricultural University: Natural Science Edition, 2011,32(1):215–219. (in Chinese)