

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.08.022

玉米根土复合体剪切性能试验*

赵旭¹ 张祖立² 黄秋波¹ 张国梁³

(1. 辽宁科技大学机械工程及自动化学院, 鞍山 114051; 2. 沈阳农业大学工程学院, 沈阳 110866;
3. 河北农业大学林学院, 保定 071000)

摘要: 以玉米品种沈农 46 自然状态的根土复合体为试验材料, 在电子万能试验机和自制的试样周围压力系统上进行剪切力学性能试验。试验结果表明: 含水率是影响极限剪切应力的最显著自然因素, 极限剪切应力基本随着含水率增加而增大; 距离根茎中心约 20 mm 的竖直剖面极限剪切应力最大, 通过根茎中心的剖面次之, 对于大于 20 mm 的其他剖面, 距离根茎中心越远, 极限剪切应力越小, 结合垄作规格, 破茬刀在距离垄台中心 40 cm 左右的剖面进行作业是合理的; 在该剖面地表下 20 ~ 60 mm 位置, 玉米须根最发达, 抗剪切应力最大, 约为 5.20 ~ 7.15 MPa, 是破茬装置功率损耗最大的工作段。

关键词: 玉米 根土复合体 剪切性能 周围压力系统

中图分类号: S154.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2013)08-0126-07

Cutting Performance of Corn Root-soil Composite

Zhao Xu¹ Zhang Zuli² Huang Qiubo¹ Zhang Guoliang³

(1. School of Mechanical Engineering and Automation, University of Science and Technology Liaoning, Anshan 114051, China
2. College of Engineering, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China
3. College of Forestry, Agricultural University of Hebei, Baoding 071000, China)

Abstract: Taking natural root-soil composite of corn Shennong 46 as test material, cutting mechanical tests were carried out in the universal test machine and homemade pressure system around specimen. The results showed that moisture content was the key natural factor influencing ultimate shear stress, which increased with moisture content. The ultimate shear stress in vertical profile 20 mm away from root center was the largest, and the secondary was in vertical profile through root center. For vertical profiles more than 20 mm away from root center, the longer distance, the smaller ultimate shear stress. Combining with ridge-till specifications, reasonable cutting section for stubble-cutting disc was 40 cm away from ridge center. In the vertical section, the greatest shear stress existed at a depth of 20 ~ 60 mm from the surface of earth, was about 5.20 ~ 7.15 MPa. The maximum power was consumed in this depth range for rootstalk cutting mechanism.

Key words: Corn Root-soil composite Cutting performance Pressure system around specimen

引言

玉米免耕播种具有蓄水保墒、培肥地力以及节能省工、增收稳产等优点, 具有潜在的巨大应用前景。根茬切割是玉米免耕播种机具田间作业的重要

工作环节, 切割性能直接影响到播种效率和种床环境, 为此, 需要设计性能优良的破茬装置。但玉米根茬结构复杂, 与周围土壤结合紧密, 因此玉米根茬根土复合体的剪切性能是亟待研究的基础问题, 探索影响切割力的因素, 对于降低功率损耗、提高破茬质

收稿日期: 2012-06-29 修回日期: 2012-08-25

* 辽宁省科技厅农业攻关计划资助项目(2008206001)和辽宁省自然科学基金资助项目(20052127)

作者简介: 赵旭, 讲师, 主要从事现代机械设计理论与方法及保护性耕作机具研究, E-mail: 1982zhaoxu@163.com

通讯作者: 张祖立, 教授, 博士生导师, 主要从事现代机械设计理论与方法及农产品加工装备技术研究, E-mail: sauzhangzl@yahoo.com.cn

量和效率具有重要的意义。

目前,对玉米根土的研究主要集中在根系生长空间分布和土壤性状、含水率等影响因素与其关系^[1-6]。Barber等从玉米根长、鲜质量及茎质量方面对玉米根系的生长和分布进行了详细的研究^[7-8]。在国内,对玉米根系生态学特性和分布方面的研究比较成熟。朱献玳等利用池栽网架法和根系双向切片法研究了玉米根系的生长和分布规律^[9]。李少昆等得出根系在土壤中的纵向分布呈指数函数关系,横向分布呈S形曲线^[10]。戚廷香等对4个不同类型的玉米品种的根系分布动态及其干物质积累进行了研究,揭示了根在水平和垂直方向的伸展范围以及不同土层中的根密度^[11]。袁志华等测取了不同直径根系的最大拉力及抗拉强度,分析了玉米根系的拉伸特性^[12]。

自然状态下的玉米根茬根土复合体剪切特性的研究在国内外均未见报道。本文自制试样周围压力系统,测试自然状态的玉米根茬根土复合体的真实剪切特性,为免耕播种机破茬装置的设计提供基础理论数据。

1 试验设备

试验采用WDW-5E型微机控制电子式万能试验机、TS-4型土壤湿度密度仪、游标卡尺、米尺、螺旋测微器、人工气候箱以及自制剪切卡具等。对于玉米根茬剪切性能的试验方法,没有可循标准,本试验参照其他材料的剪切试验仪,设计剪切卡具安装在电子万能试验机上进行单剪方式试验。剪切卡具主要由动剪切片和试样周围压力系统构成,如图1所示。剪切刀片厚2 mm,刃口倾角30°,剪切刃采用弧形,以近似模拟圆盘刀切根茬复合体的实际情况。

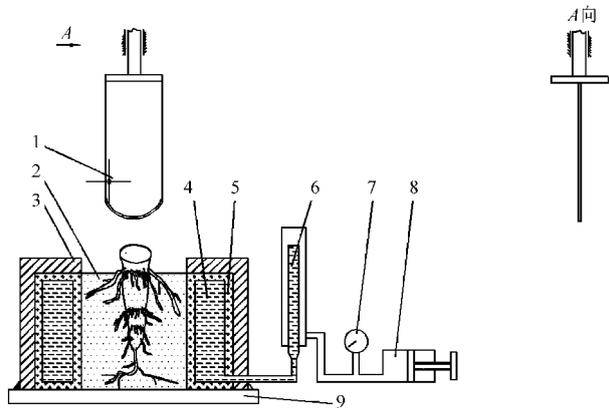


图1 剪切卡具

Fig. 1 Customized fixture for cutting

1. 动剪切片 2. 根土复合体 3. 承膜筒 4. 液体(水) 5. 橡胶膜 6. 体变管 7. 压力表 8. 调压筒 9. 底座

管、调压筒和压力表等组成。试样的圆柱面用橡胶膜包封,使试样圆柱面各方向受到均匀的液体压力,称为围压,其作用是在剪切试验过程中使试样土壤内部的挤压力与户外田地实际情况一致。工作原理如下:首先通过调压筒预定试样周围压力;试样受剪切时,土壤外胀挤压橡胶膜,使橡胶膜内液体向体变管流动,促使体变管膨胀,橡胶膜内液体压力升高,进而导致试样周围压力上升,即增加土壤间挤压力,这个动态过程符合圆盘刀在户外田地切割工作时的实际情况。

2 试验材料和方法

2.1 试验材料

试验所用的玉米根茬根土复合体采自辽宁省沈阳市沈阳农业大学试验田,玉米品种为沈农46,土壤属于东北黑壤,含水率(干基)为9.12%~23.75%,密度为0.95~1.43 g/cm³。

2.2 试样制备

根土复合体直接在试验田挖取,试样分3个日期获取,分别为2011-02-28、2011-03-25和2011-04-20,以获取不同含水率的试样;每个获取日期,分别在试验田3个不同区域各挖取50个试样,以获取不同密度的试样,同时检测最靠近地表的秸秆直径。在试样中选取秸秆直径为10、20和30 mm各12根,进行标号,为保证试样含水率恒定,将各日期获取试样分别放置在3个不同人工气候箱中保湿。试样的规格直径 D 为 $\phi 200$ mm,高 H 为200 mm。

通过TS-4型土壤湿度密度仪测定3个日期的土壤含水率(干基)分别为20%、15%和10%,3个区域的试样土壤密度分别为1.00、1.20和1.40 g/cm³。

2.3 剪切应力计算

由于试样为根土复合体,应按复合材料力学理论来计算剪应力,但考虑到本试验主要测定极限剪应力,因此可近似看作均匀材料,采用材料力学中的计算公式求极限剪应力

$$\tau = \frac{F}{S} \quad (1)$$

式中 F ——剪切力, N

S ——动剪切片刀刃作用面积,取0.000 2 m²

2.4 试验方法

将试样置于剪切卡具内,试验前用计算机预先设定加载速度为20 mm/min,试验通过动剪切片的向下运动使试样受到剪切力,计算机实时记录根茬复合体受到的力、动剪切片位移,直到试样被切透。

本试验主要检测自然因素和剪切部位对试样极

试样周围压力系统主要由橡胶膜、承膜筒、体变

限剪切应力的影响,为了减少试验次数,进行两部分试验。第一部分试验考虑自然因素,影响极限剪切应力的主要自然因素有土壤含水率、土壤密度和玉米根土的复合质量比例。剪切试验使用的试样是自然状态下的根土复合体,基于目前的试验条件,剪切试验前若不破坏根土复合体是无法测量根土复合质量比例的,剪切试验前也无法选择规定根土复合质量比例的试样,试验似难进行。但文献[10]表明,玉米根系分布与地上部分有关系,对于同一品种玉米,根系越发达(即根系质量越大),则秸秆直径越大,故可以用最靠近地表的秸秆直径来表征试样的根土复合体质量比例,即将最靠近地表的秸秆直径作为试验因素。本试验将土壤含水率、土壤密度和最靠近地表的秸秆直径3个自然因素作为试验因素。采用正交试验设计安排试验,表1为试验因素水平。

表1 试验因素水平

Tab.1 Factors and levels of experiment

水平	因素		
	干基含水率 $A/\%$	密度 $B/\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	秸秆直径 C/mm
1	10	1.40	10
2	15	1.20	20
3	20	1.00	30

在第1部分试验结果基础上,第2部分试验进行2个试验,分别是最显著自然因素和剪切剖面位置、最显著自然因素和纵向深度的两因素试验,以得出在最显著自然因素影响下,剪切剖面位置和纵向深度分别对试样极限剪切应力的影响。

3 试验结果与分析

3.1 自然因素对玉米根土复合体极限剪切应力的影响

3.1.1 影响根土复合体极限剪切应力的显著因素

土壤环境很复杂,影响抗剪强度的因素也较多,为了寻求影响根土复合体抗剪强度的主导因素,通过正交试验对不同状态的试样进行极限剪切应力试验。动剪切刀片运动轨迹通过根茎中心,针对每组试验进行5次重复试验,取平均值后录入正交试验表,如表2所示。

由正交试验结果分析可知,3个因素对玉米根土复合体极限剪切应力的影响相差不悬殊,含水率影响最大,秸秆直径(即根土复合比例)次之,影响最小的是土壤密度。干基含水率为10%、最靠近地表的秸秆直径为10 mm、土壤密度为1.00 g/cm³的试样极限剪切应力最小。含水率是影响根土复合体极限剪切应力的显著因素。

表2 极限剪切应力正交试验结果

Tab.2 Orthogonal experiment result of extreme cutting force

试验号	因素			极限剪切应力/MPa
	a	b	c	
1	1	1	1	3.40
2	1	2	2	6.05
3	1	3	3	5.55
4	2	1	2	8.00
5	2	2	3	7.10
6	2	3	1	5.80
7	3	1	3	6.85
8	3	2	1	6.90
9	3	3	2	5.95
\bar{y}_{j1}	5.00	6.10	5.35	
\bar{y}_{j2}	6.95	6.70	6.65	
\bar{y}_{j3}	6.55	5.75	6.50	
R_j	1.95	0.95	1.30	
R'_j	1.15	0.50	0.80	
优水平	a_1	b_3	c_1	
主次因素	$a、c、b$			

3.1.2 含水率对极限剪切应力的影响

由正交试验可知,土壤密度对极限剪切应力的影响最小,为了更明显地考察含水率对根土复合体的影响,将不同含水率试样在土壤密度定值、最靠近地表的的不同秸秆直径条件下的极限剪切应力进行对比分析。为满足结果分析,追加两因素试验6组,如表3所示,每组进行3次试验取平均值。根据追加试验和正交试验部分结果,绘制土壤密度1.40 g/cm³、不同秸秆直径条件下含水率对极限剪切应力影响柱状图,如图2所示。

表3 含水率影响追加试验

Tab.3 Additional experiment for moisture content effect

试验号	因素		极限剪切应力/MPa
	干基含水率 $A/\%$	秸秆直径 C/mm	
1	15	10	4.05
2	20	10	3.75
3	10	20	4.60
4	15	20	5.00
5	20	20	5.50
6	10	30	5.95

由图2可知,总体来说,对于相同秸秆直径范围内的根土复合体,极限剪切应力基本随着含水率增加而增大;对于较小秸秆直径的试样,当含水率达到一定值时,极限剪切应力反而降低,秸秆直径较小的根土复合体,当含水率达到一定值时,含水率对复合体粘聚力的促进作用低于对土体内摩擦的消减作用,而对于较大秸秆直径(即较大根土复合比例)的

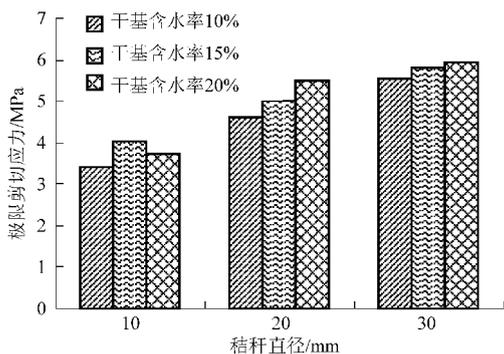


图 2 含水率对极限剪切应力的影响

Fig. 2 Effect of moisture content on extreme cutting force

复合体,则正好相反。秸秆直径越大,含水率对极限剪切应力的影响显著程度越小;在干基含水率 10% ~ 20% 范围内,极限剪切应力随秸秆直径的增加而增大,含水率越大,其随秸秆直径变化的幅度越小。

3.2 剪切位置对根土复合体极限剪切应力的影响

由正交试验可知,含水率是影响根土复合体极限剪切应力的最显著自然因素,为了研究不同剪切剖面位置对极限剪切应力的影响,可在秸秆直径 20 mm、土壤密度 1.2 g/cm³ 条件下,追加两因素(剪切剖面位置、含水率)试验。试验切割剖面位置选取 4 处,位置 I 通过根茎中心,位置 II 距离根茎中心 20 mm,位置 III 距离根茎中心 40 mm,位置 IV 距离根茎中心 60 mm,如图 3 所示。每组重复 3 次试样取平均值,试验结果如表 4 所示。

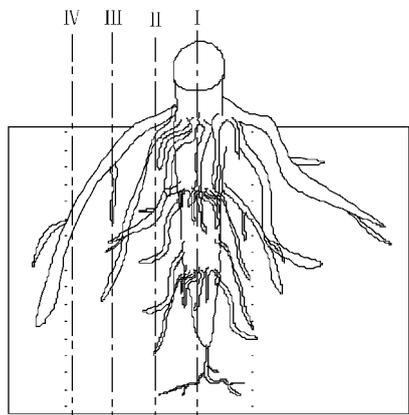


图 3 剪切剖面位置示意图

Fig. 3 Sketch of cutting profile

剪切剖面位置对根土复合体极限剪切应力的影响,如图 4 所示。可以看出,在秸秆直径、土壤密度和含水率相同条件下,剪切剖面位置 II 的极限剪切应力最大,位置 I 次之,位置 IV 的极限剪切应力最小。不同剪切剖面位置处,极限剪切应力随着含水率的增加而增加,但距离根茎中心最远的位置 IV,当含水率达到一定值时,极限剪切应力反而下降;对于不同剪切剖面位置,距离根茎中心越远,含水率对极限剪切应力的影响越小。

表 4 剪切位置影响追加试验

Tab. 4 Additional experiment for cutting profile effect

试验号	因素		极限剪切应力/MPa
	干基含水率 A/%	剪切位置 D	
1	10	I	1.15
2	10	II	7.15
3	10	III	5.25
4	10	IV	1.60
5	15	I	6.90
6	15	II	8.10
7	15	III	5.50
8	15	IV	4.25
9	20	I	7.40
10	20	II	8.85
11	20	III	5.85
12	20	IV	4.05

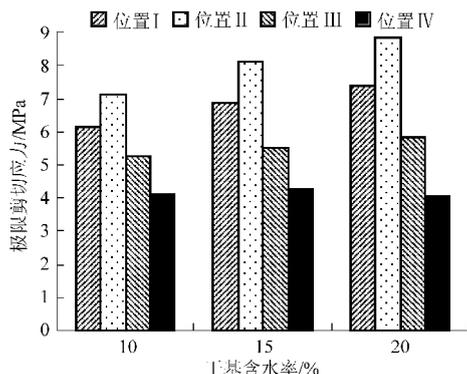


图 4 剪切剖面位置对根土复合体极限剪切应力的影响

Fig. 4 Effect of cutting profile on extreme cutting force

这种现象主要由根系分布决定。根系如图 5 所示,从复合材料的角度看,根土复合体可以看作是加筋土,根系可以看作是天然的柔性加筋材料,玉米根茬根系与土壤紧密地结合在一起,须根及其侧根的纵横交错,形成一个以玉米须根为增强纤维、土壤为基体的似圆锥形的多层笼状根土复合材料,有效增强根土复合体的抗剪应力等。根系近似呈圆锥形,玉米根系在位置 II 纵向界面内分布最发达,且剪切方向与须根生长方向近似垂直,需剪切大量粗壮须根,故位置 II 的极限剪切应力最大;在位置 I,切割方向与秸茎纤维方向、须根生长方向一致,主要单纯切割根茬秸茎和土壤,与位置 II 相比,根土复合体的加筋效果在此处不明显,故位置 I 的极限剪切应力比位置 II 处小;距离根茬中心越远的纵向剖面,根系越稀疏,根土聚集力也越小,故位置 IV 的极限剪切应力最小。须根越稀疏,含水率对根系增加根土复合体抗剪强度的促进作用就越小,但含水率对土壤间摩擦阻力的降低作用越明显,两者综合作用导致上述试验结果。

根据东北地区玉米垄作规格,垄底宽 120 ~

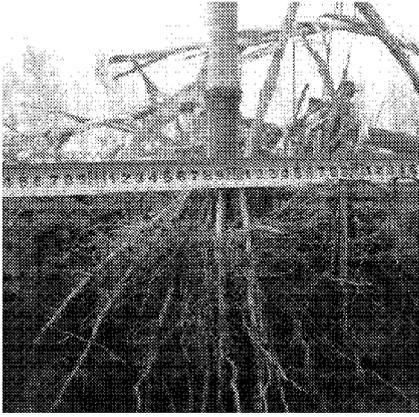


图5 田间玉米根系

Fig. 5 Corn root system in field

130 cm、垄顶宽 90 cm,玉米种子应播种在前茬垄台上,并结合上述试验结果,免耕播种机破茬刀应在位置Ⅲ处进行破茬作业,即距离垄顶中心 40 cm 左右处。

由上述分析可知,免耕播种机破茬刀在位置Ⅲ处进行破茬作业,含水率对其破茬极限剪切应力的影响较小,故免耕播种时间选择范围更宽,可以选择有利于种子发育的气温和含水率等自然因素,同时破茬工作阻力又较小。

3.3 剪切应力与纵向深度的关系

为试验探究位置Ⅲ处剪切力沿纵向深度的分布规律,首先进行试样纵向尺寸标定,如图 6 所示。在秸秆直径 30 mm、土壤密度 1.4 g/cm^3 、不同含水率条件下,通过万能试验机实时记录剪切力,得到剪切应力-纵向深度曲线,如图 7 所示。

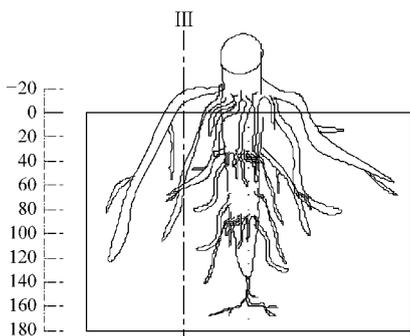


图6 试样纵向尺寸标定

Fig. 6 Longitudinal dimension calibration for specimen

由图 7 可见,在不同含水率条件下,剪切应力曲线变化趋势基本一致,可以分为 6 个阶段:①在试样加载初期,纵向深度 $-20 \sim 0 \text{ mm}$ (即地表以上),剪切应力曲线基本保持水平不变,剪切应力随着纵向深度的增加而缓慢增加。② 0 mm 点,剪切应力曲线近似呈竖直直线,剪切应力急剧突增,变化幅值大。③ $0 \sim 20 \text{ mm}$,剪切应力曲线非线性变化,剪切应力随纵向深度增加而增大,增长速率先逐渐变大,

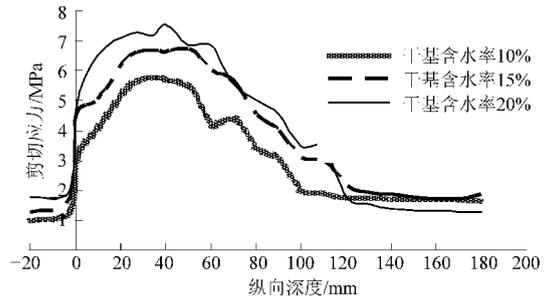


图7 剪切应力-纵向深度曲线

Fig. 7 Curves of cutting force and vertical depth

后又逐渐变小。④ $20 \sim 60 \text{ mm}$,剪切应力曲线基本在一定值域内轻微振荡,即该纵向深度区间的剪切应力最大。⑤ $60 \sim 120 \text{ mm}$,剪切应力曲线非线性递减变化。⑥ $120 \sim 180 \text{ mm}$,剪切应力曲线再次进入近似线性阶段,几乎呈水平线,剪切应力随着纵向深度的增加而极其缓慢递减,最终达到一定值。

纵向深度 $-20 \sim 0 \text{ mm}$ (即地表以上),仅切割地表的须根,所以剪切应力很小。刚接触地表即 0 mm 点,真正接触根土复合体,其抗剪力突增至较高值。地表以下,玉米根土复合体剪切应力-纵向深度曲线规律与玉米根须质量的垂直分布有密切关系,须根含量越多,则根土复合体的加筋效应就越明显,即抗剪切应力越大。

3.4 玉米须根质量的垂直分布测试

为探究须根含量的垂直分布规律,并进一步验证其分布规律是否与剪切应力-纵向深度曲线规律一致,进行玉米须根质量的垂直分布测试。取 3 个根深相近的玉米根茬样本进行玉米须根质量的垂直分布测试,将根茬自上向下依次分层切割,层间范围为 $0 \sim 20$ 、 $20 \sim 60$ 、 $60 \sim 120$ 和 $120 \sim 180 \text{ mm}$,切割层间范围与剪切力-纵向深度曲线的变化阶段一致,从各层中筛选出来玉米根茬,称其质量。将 3 个根茬试验数据进行均化处理,统计得出玉米根茬鲜根的质量垂直分布规律,如图 8 所示。在 $20 \sim 40$ 、 $40 \sim 60 \text{ mm}$ 深的土层中,玉米须根质量分别占总质量的 23.51% 和 24.22%, $0 \sim 20 \text{ mm}$ 深的土层中,其质量占总质量的 13.75%, $20 \sim 60$ 、 $60 \sim 80 \text{ mm}$ 深的土层中,其质量分别占总质量的 19.12% 和 9.73%,其余土层中,其质量比例均不超过的 2%。随着深度的增大,须根含量先急剧增加,峰值在一定深度范围内维持,随后又缓慢减少,当深度大于 120 mm ,须根含量极少。近 50% 的玉米须根都集中于 $20 \sim 60 \text{ mm}$ 深的土壤中,玉米须根质量的垂直分布规律与剪切应力-纵向深度曲线基本一致,说明须根的垂直分布是剪切应力纵向变化的最主要影响因素。

因此,在 $20 \sim 60 \text{ mm}$ 深处,玉米须根最发达,根

土复合体的抗剪切应力最大,是免耕破茬刀功率损耗最大的工作段。

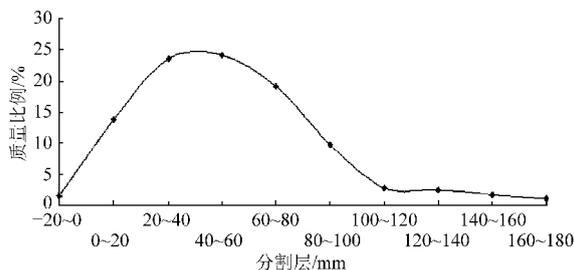


图8 须根质量分布测试结果

Fig. 8 Test results of fibrous roots' mass distribution

4 结论

(1) 由正交试验分析结果可知,3个自然因素对玉米根土复合体极限剪切应力的影响相差不悬殊,含水率影响最大,秸秆直径(即根土复合比例)次之,影响最小的是土壤密度。

(2) 含水率对极限剪切应力影响的追加两因素试验表明,总体来说,对于相同秸秆直径范围内的根土复合体,极限剪切应力基本随着含水率增加而增大;但对于较小秸秆直径的试样,当含水率到一定值时,极限剪切应力反而降低;秸秆直径越大,含水率对极限剪切应力的影响显著程度越小。

(3) 剪切位置对极限剪切应力影响试验表明,

不同剪切剖面的极限剪切应力不同,位置II(距离根茎中心20 mm)的极限剪切应力最大,位置I(通过根茎中心)次之,对于距离根茎中心大于20 mm的位置,距离越远,极限剪切应力越小,同时含水率对极限剪切应力的影响越小。根据上述试验结果,结合东北地区玉米垄作规格,破茬刀在距离垄台中心40 cm左右的剖面进行作业是合理的,含水率对其破茬极限剪切应力的影响较小,故免耕播种时间的选择范围更宽,可以选择有利于种子发育的气温和含水率等自然因素,同时破茬工作阻力又较小。

(4) 剪切应力随纵向深度呈非线性变化,在纵向深度0~20 mm,剪切应力先急剧增大,达到最大值后,剪切应力在一定深度范围内(20~60 mm)轻微振荡,剪切应力最大值出现在纵向深度20~60 mm处;纵向深度60~120 mm,剪切应力曲线非线性递减变化,纵向深度120 mm以下,剪切应力又回复到最小值,保持不变。

(5) 玉米须根质量分布测试试验表明,玉米须根质量的垂直分布规律与剪切应力-纵向深度曲线基本一致,说明须根的垂直分布是剪切应力纵向变化的最主要影响因素。在20~60 mm深处,玉米须根最发达,根土复合体的剪切应力最大,是免耕破茬刀功率损耗最大的工作段。

参 考 文 献

- Durieux R P, Kamprath E J, Jackson W A, et al. Root distribution of corn: the effect of nitrogen fertilization [J]. *Agron*, 1994, 86(6): 958~962.
- Shalhevet J, Huck M G, Schroeder B P. Root and shoot growth responses to salinity in maize and soybean [J]. *Agron*, 1995, 87(4): 512~516.
- Qin R, Stamp P, Walter R. Impact of tillage and banded starter fertilizer on maize root growth in the top 25 centimeters of the soil [J]. *Agron*, 2005, 97(10): 674~683.
- Chassot A, Richner W. Root characteristics and phosphorus uptake of maize seedlings in a bilayered soil [J]. *Agron*, 2002, 94(4): 118~127.
- 刘晶淼, 安顺清, 廖荣伟, 等. 玉米根系在土壤剖面中的分布研究[J]. *中国生态农业学报*, 2009, 17(3): 517~521.
Liu Jingmiao, An Shunqing, Liao Rongwei, et al. Temporal variation and spatial distribution of the root system of corn in a soil profile [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2009, 17(3): 517~521. (in Chinese)
- 宋凤斌, 刘胜群. 不同耐旱性玉米根系解剖结构比较研究[J]. *吉林农业大学学报*, 2008, 30(4): 377~381.
Song Fengbin, Liu Shengqun. The comparative study on root anatomical structure of maize genotypes different in tolerance to drought [J]. *Journal of Jilin Agricultural University*, 2008, 30(4): 377~381. (in Chinese)
- Barber S A. Effect of tillage practice on corn zea mays morphology [J]. *Agron*, 1971, 63(5): 724~726.
- Mengel D B, Barber S A. Development and distribution under field conditions [J]. *Agron*, 1974, 66(10): 341~344.
- 朱献耿, 陈学留, 刘益同, 等. 玉米根系的生长及其在土壤中的分布 [J]. *莱阳农学院学报*, 1991, 8(1): 15~19.
Zhu Xiandai, Chen Xueliu, Liu Yitong, et al. Root growth and distribution in soil of maize [J]. *Journal of Laiyang Agricultural College*, 1991, 8(1): 15~19. (in Chinese)
- 李少昆, 涂华玉, 张旺峰, 等. 玉米根系在土壤中的分布及与地上部分的关系 [J]. *新疆农业科学*, 1992, 56(3): 99~103.
Li Shaokun, Tu Huayu, Zhang Wangfeng, et al. The distribution in the soil and aerial parts of maize roots [J]. *Xinjiang Agricultural Sciences*, 1992, 56(3): 99~103. (in Chinese)
- 戚廷香, 梁文科, 阎素红. 玉米不同品种根系分布和干物质积累的动态变化研究 [J]. *玉米科学*, 2003, 11(3): 76~79.
Qi Tingxiang, Liang Wenke, Yan Suhong. Study on dynamic variation of root distribution and dry matter accumulation of different maize varieties [J]. *Journal of Maize Sciences*, 2003, 11(3): 76~79. (in Chinese)
- 袁志华, 苏宗伟, 李祥付, 等. 玉米根系的拉伸特性研究 [J]. *河南农业科学*, 2009, 46(10): 51~52.
Yuan Zhihua, Su Zongwei, Li Xiangfu, et al. Studies on stretching property of corn roots [J]. *Journal of Henan Agricultural*

- Sciences, 2009, 46(10): 51 ~ 52. (in Chinese)
- 13 宋维峰, 陈丽华, 刘秀萍. 根系与土体接触面相互作用特性测试[J]. 中国水土保持科学, 2006, 4(2): 62 ~ 65.
Song Weifeng, Chen Lihua, Liu Xiuping. Experiment on characteristic of interface between root system and soil[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2006, 4(2): 62 ~ 65. (in Chinese)
- 14 刘秀萍, 陈丽华, 宋维峰. 林木根系与黄土复合体的抗剪强度试验研究[J]. 北京林业大学学报, 2006, 28(5): 67 ~ 72.
Liu Xiuping, Chen Lihua, Song Weifeng. Study on the shear strength of forest root - loess composite[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2006, 28(5): 67 ~ 72. (in Chinese)
- 15 刘秀萍, 陈丽华, 宋维峰. 林木根系与黄土复合体的三轴试验[J]. 林业科学, 2007, 43(5): 54 ~ 58.
Liu Xiuping, Chen Lihua, Song Weifeng. Travail tests on root - soil composite[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2007, 43(5): 54 ~ 58. (in Chinese)
- 16 Baets S D, Poesen J, Reubens B. Root tensile strength and root distribution of typical Mediterranean plant species and their contribution to soil shear strength[J]. Plant Soil, 2008, 305(8): 207 ~ 226.
- 17 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)
- 18 杜现军, 李玉道, 颜世涛, 等. 棉秆力学性能试验[J]. 农业机械学报, 2011, 42(4): 87 ~ 91.
Du Xianjun, Li Yudao, Yan Shitao, et al. Mechanics characteristics of cotton stalks[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(4): 87 ~ 91. (in Chinese)
- 19 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)
- 20 王芬娥, 黄高宝, 郭维俊, 等. 小麦茎秆力学性能与微观结构研究[J]. 农业机械学报, 2009, 40(5): 92 ~ 95.
Wang Fene, Huang Gaobao, Guo Weijun, et al. Mechanical properties and micro-structure of wheat stems[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(5): 92 ~ 95. (in Chinese)
- 21 王俊发, 马浏轩, 邵东伟. 玉米根茬收获机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2012, 43(6): 68 ~ 72.
Wang Junfa, Ma Liuxuan, Shao Dongwei. Design and experiment of maize root stubble harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(6): 68 ~ 72. (in Chinese)
- 22 王继利, 贾庆祥, 杨新义. 基于坐标变换的玉米根茬三维模型建立[J]. 农业机械学报, 2011, 42(11): 158 ~ 163.
Wang Jili, Jia Qingxiang, Yang Xinyi. 3-D modeling of corn root based on the coordinate transformation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(11): 158 ~ 163. (in Chinese)

~~~~~

(上接第 142 页)

- 8 皇才进, 刘贤, 杨增玲, 等. 秸秆热值近红外光谱模型的外部验证结果间的统计比较分析[J]. 光谱学与光谱分析, 2009, 29(5): 1 264 ~ 1 267.  
Huang Caijin, Liu Xian, Yang Zengling, et al. Statistical comparison of independent validation results for near infrared spectroscopy models predicting calorific value of straw [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2009, 29(5): 1 264 ~ 1 267. (in Chinese)
- 9 ASTM E711—87 Standard test method for gross calorific value of refuse-derived fuel by the bomb calorimeter[S]. 2004.
- 10 Maurel V B, Ahumada E F, Palagos B, et al. Critical review of chemometric indicators commonly used for assessing the quality of the prediction of soil attributes by NIR spectroscopy [J]. Trends in Analytical Chemistry, 2010, 29(9): 1 074 ~ 1 081.
- 11 Lomborg C J, Holm-Nielsen J B, Popiel P O, et al. Near infrared and acoustic chemometrics monitoring of volatile fatty acids and dry matter during co-digestion of manure and maize silage[J]. Bioresource Technology, 2009, 100: 1 711 ~ 1 719.
- 12 Demirbas A. Combustion characteristics of different biomass fuels [J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2004, 30(2): 219 ~ 230.
- 13 Allica J H, Mitre A J, Bustamante J G, et al. Straw quality for its combustion in a straw-fired power plant[J]. Biomass and Bioenergy, 2001, 21(4): 249 ~ 258.
- 14 Jenkins B M, Baxter L L, Miles T R, et al. Combustion properties of biomass [J]. Fuel Processing Technology, 1998, 54(1 ~ 3): 17 ~ 46.
- 15 Burns D A, Ciurczak E W. Handbook of near-infrared analysis [M]. 2nd ed. New York: Marcel Dekker, 2001: 431 ~ 433.
- 16 严衍禄. 近红外光谱分析基础与应用[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2005: 195 ~ 202.
- 17 Brimmer P J, Hall J W. Method development and implementation of near-infrared spectroscopy in industrial manufacturing support laboratories[M]//Williams P C, Norris K Eds. Near-Infrared Technology in the Agricultural and Food Industries, 2nd ed. St. Paul, MN American Association of Cereal Chemists Inc.: St. Paul, MN, 2001: 187 ~ 198.
- 18 de Ahumada E F, Garrido-Vara A, Guerrero J E, et al. Comparison of static versus dynamic NIR analysis of compound feedstuffs [C]//Proceedings of the 11th International Conference, Zaragoza, Spain, 2005: 635 ~ 637.