

稻麦秸秆旋耕作业中受力与位移分析

郭俊¹ 姬长英¹ Chaudhry Arslan^{1,2} 方会敏¹ 张庆怡¹

(1. 南京农业大学工学院, 南京 210031; 2. 费萨拉巴德农业大学建筑与环境工程系, 费萨拉巴德 38000)

摘要: 常见稻麦秸秆在实际作业过程中与刀具作用发生2种变形: 挤压秸秆发生弯曲变形和剪切秸秆发生剪切变形, 根据2种变形设置弯曲试验和剪切试验, 分别测试15~30 mm/min加载速率下弯曲强度和剪切强度。试验结果表明, 小麦秸秆抗弯强度随着加载速率增加而减小; 水稻秸秆抗弯强度随着转速增加, 表现为先增加后减小。小麦秸秆剪切强度随着加载速率增加, 表现为先增加后减小; 水稻秸秆剪切强度随着加载速率增加而增加。其次在田间试验中, 根据2种变形设置横纵向秸秆以及180~280 r/min的刀轴转速, 并对其反旋作业。采用同位素示踪法, 即根据标记秸秆前后坐标变化值来代替机具在幅宽范围内纵横向秸秆的位移变化, 将得到的标记点坐标在三维坐标系中用Matlab绘制成曲线, 该曲线形状与旋耕刀片在刀轴上排列相似。耕作后位移和坐标结果表明: 水稻秸秆位移大于小麦秸秆位移, 水稻秸秆标记点位移变化较小麦秸秆标记点位移变化均匀; 2种秸秆排列方式对应2种分布情况: 纵向标记秸秆坐标在X轴上以零点对称分布, 横向标记秸秆坐标在X、Z轴上两侧对称分布。基于以上因素考虑, 实际作业中, 选择刀轴转速230 r/min以及改变秸秆在田间排列方式, 以使秸秆还田效果达到更佳。

关键词: 稻麦秸秆; 旋耕作业; 弯曲强度; 剪切强度; 示踪法; 位移; 位置

中图分类号: S233.1; S216.2 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2016)10-0011-08

Stress and Displacement Analyses of Rice and Wheat Straws in Rotary Tillage Process

Guo Jun¹ Ji Changying¹ Chaudhry Arslan^{1,2} Fang Huimin¹ Zhang Qingyi¹

(1. College of Engineering, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210031, China

2. Department of Structures and Environmental Engineering, University of Agriculture Faisalabad, Faisalabad 38000, Pakistan)

Abstract: Because of two kinds of deformation with tool under general process of tillage, i. e., bending deformation with straw extrusion and shear deformation with straw shear, at loading speeds of 15 ~ 30 mm/min, and also on two different positions of straw for measuring the displacement in the soil, which was horizontal and vertical with down-rotary speeds of 180 ~ 280 r/min with the help of color straw labeled and arranged in lines and paralleled to the rotor axial. The original and final positions of straw tracers were drawn with Matlab software. It was found that the shape of final positions was similar to the arrangement of rotary blades attached to the rotor. The results revealed that the bending strength of wheat straw was decreased with increase of loading speed, and that of rice straw was increased at initial stage and then decreased with the increase of loading speed. It was obvious that the shear strength of rice straw was increased, and for wheat straw it was also increased at initial stage and then decreased with the increase of loading speed. The comparisons and conclusions of experiment were drawn as follows: the displacement and fluctuation of rice straw were greater compared with those of wheat straw, and the straw arrangement mode was corresponding through two types of straw distribution, the coordinate position of vertical straw and horizontal straw was symmetrically distributed on the X axis and X and Z axes,

收稿日期: 2016-03-11 修回日期: 2016-04-16

基金项目: 国家自然科学基金项目(51275250)和江苏省2015年度普通高校研究生科研创新计划项目(KYLX15_0564)

作者简介: 郭俊(1986—), 男, 博士生, 主要从事农业工程技术研究, E-mail: gj_njau@163.com

通信作者: 姬长英(1957—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事农业机械理论与技术研究, E-mail: chyji@njau.edu.cn

respectively. Based on these findings, the rotational speed of 230 r/min can be chosen, meanwhile, adjusting the operation type and straw arrangement in the field can help to achieve a good effect of straw returning to field.

Key words: rice and wheat straws; rotary tilling work; bending strength; shearing strength; tracer method; displacement; position

引言

秸秆还田技术^[1-4]是秸秆禁烧与土壤培肥的一项重要措施,但在稻麦轮作体系中,由于农忙季节紧,稻作秸秆还田往往来不及腐解就要插秧,大量秸秆淹水腐解会产生硫化氢、有机酸等伤害秧苗根系^[5-7]。秸秆还田技术要求耕作后秸秆被埋覆在地表以下并均匀分布。在实际作业过程中,稻麦秸秆与还田机械工作部件的相互作用是一个复杂过程,秸秆以一个合适的长度均匀分布在地表以下,这样既能保证土壤原有生物群落结构,又能使后种植农作物均匀吸收秸秆腐解在田间的有机肥。国内外研究者更加注重在农机具^[8-10]的改进,而对秸秆和土壤两方面共同来解决实际耕作中的问题,往往不够重视。

秸秆还田作为一项农田生态系统中养分循环利用^[11],实现农业可持续发展的重要农业措施,已被国内外研究实践所证实。稻麦秸秆的力学特性接近,但2种秸秆可能因含水率、长度、排列方式不同,从而导致其在作业过程中运动状态及位移不尽相同,最终导致其秸秆在后期腐解速度不同^[12]。本文通过还田机具与秸秆间作用机理,建立稻麦秸秆与刀具理论受力分析模型,秸秆不同排列方式决定其在耕作过程中发生弯曲还是剪切变形;利用反旋一体机对田间稻麦秸秆耕作,对比分析耕作后稻麦秸秆位移变化,从而了解秸秆腐解速度以及秸秆还田对土壤及生态环境的影响。

1 稻麦秸秆力学特性

植物秸秆作为特殊的生物材料,其理化性质和力学特性^[13-16],易受外界因素影响,尤其自然条件的影响。稻麦茎秆受外部持久载荷时表现出粘弹性性质,国内外学者^[17-21]已对稻麦秸秆做了大量力学性能研究。本试验中,由于加载时间较短,茎秆粘弹性影响较小,因此忽略了材料的粘弹性,仅对稻麦秸秆做了弯曲和剪切试验。

1.1 理论分析

(1) 弯曲试验

茎秆的弹性模量 E 用三点弯曲原理来测定,即

$$E = PL^3 / (48yI) \quad (1)$$

$$\text{其中} \quad I = \frac{\pi}{4} [ab^3 - (a-t)(b-t)^3] \quad (2)$$

式中 P ——跨中承受的载荷

L ——标距,即两支点间距离

y ——试件中点的弯曲挠度

I ——截面对中性轴的惯性矩

a ——秸秆椭圆截面长半轴

b ——秸秆椭圆截面短半轴

t ——秸秆壁厚

(2) 剪切试验

试件的剪切强度极限 τ 计算公式为

$$\tau = F_{\max} / A \quad (3)$$

式中 A ——试件的横截面积

F_{\max} ——最大剪力^[22]

1.2 试验方法与试验设计

试验采用美国 FTC 公司生产的 TMS-PRO 型质构仪,分别对稻、麦秸秆 3 个部位进行测定(图 1 中 N1、N2、N3 3 段),试验时各选取 20 根长度均为 15 cm 的水稻和小麦秸秆。水稻秸秆和小麦秸秆截面形状有所差异,本试验中将水稻和小麦秸秆截面统一简化为椭圆形状,得到秸秆几何参数如表 1 所示。测试方法:量取定长的小麦和水稻茎秆并进行编号,选择每个样本的中点为测试点,并用黑色记号笔标记,用数显游标卡尺量取每个样本标记处的外径,测其最大和最小处外径作为椭圆茎秆的长轴和短轴。

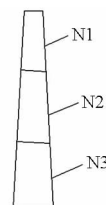


图 1 秸秆节间位置

Fig. 1 Internode positions of stalk

表 1 秸秆参数

Tab. 1 Straw parameters

参数	N1	N2	N3
截面长半轴 a	2.35	2.42	2.68
截面短半轴 b	2.41	2.52	2.78
壁厚 t	0.42	0.46	0.48

在质构仪上做弯曲试验^[23]时,由于小麦茎秆很

细且壁秆很薄,施加很小的载荷就会压扁,故试验时水稻和小麦茎秆均选择初始加载力为0.5 N;在质构仪上做剪切试验^[22]时,秸秆应该被缓慢剪断,试验中分别设置4个加载速度15、20、25、30 mm/min。最后由式(1)~(3)求出秸秆弯曲和剪切强度。

1.3 试验结果分析

稻麦秸秆弯曲强度和剪切强度的试验结果如表2、3所示。小麦秸秆弯曲强度随加载速率增加而递减,最大值为24.79 MPa,最小值为5.79 MPa;水稻秸秆弯曲强度随加载速率的增加在N1和N2段表现为先增加后递减,在N3段为逐渐递减,最大值为15.99 MPa,最小值为5.22 MPa。稻麦秸秆弯曲强度最大值均位于N3段,其加载速率为15 mm/min;稻麦秸秆弯曲强度最小值均位于N1段,其加载速率为30 mm/min。小麦秸秆剪切强度随加载速率的增加先增加后减小,最大值为22.94 MPa,最小值为8.16 MPa;水稻秸秆剪切强度随加载速率的增加而增加,最大值为17.43 MPa,最小值为6.56 MPa。稻麦秸秆剪切强度最大值均位于N3段,此时小麦秸秆加载速率为25 mm/min,水稻秸秆加载速率为30 mm/min,稻麦秸秆剪切强度最小值均位于N1段,其加载速率为15 mm/min。实际作业过程中,由于稻麦秸秆在田间排列方式不同,机具与秸秆间作用机理不同,一些秸秆通过挤压发生弯曲变形入土;一些秸秆通过剪切作用入土。

表2 稻麦秸秆在不同位置和加载速率下的弯曲强度

Tab.2 Bending strength for wheat and rice straw at different internode positions and loading rates

加载速率/ (mm·min ⁻¹)	小麦秸秆			水稻秸秆		
	N1	N2	N3	N1	N2	N3
15	22.18	20.67	24.79	10.64	13.95	15.99
20	14.63	12.64	16.23	10.88	14.04	12.67
25	7.72	8.64	9.44	7.35	8.22	8.03
30	5.79	6.82	7.08	5.22	6.16	7.62

表3 稻麦秸秆在不同位置和加载速率下剪切强度

Tab.3 Shear strength for wheat and rice straw at different internode positions and loading rates

加载速率/ (mm·min ⁻¹)	小麦秸秆			水稻秸秆		
	N1	N2	N3	N1	N2	N3
15	8.16	15.71	19.34	6.56	7.54	8.25
20	11.16	17.53	22.51	7.99	9.77	10.23
25	12.78	16.87	22.94	10.44	10.33	14.33
30	10.69	13.54	19.29	13.67	12.91	17.43

2 稻麦秸秆位移对比分析

2.1 田间试验设计

田间试验于2015年6月上旬和12月中旬在南京市江浦农场进行,土壤类型为粘性。根据GB/T 5668—2008《旋耕机》规定的试验方法,用土壤盒分别取地表向下0~5 cm、5~10 cm、10~15 cm土壤,每层取样量不少于30 g(去掉石块和植物残茬等杂质),得到各层土壤平均含水率,小麦地为23.6%、24.5%、27.1%;水稻田为30.2%、32.7%、36.3%,各层土壤平均圆锥指数,小麦地为63.42 kPa、168.66 kPa、350.44 kPa;水稻田为81.53 kPa、154.61 kPa、269.49 kPa。

试验设备采用江苏淮安楚州苏欣农机有限公司生产的反转秸秆还田一体机,以及自行搭建互相垂直的直角测定秸秆位置坐标台架,该台架主要用来测定秸秆在旋耕前后 x 、 y 及 z 向坐标变化,测量范围为0~200 cm,精度为1 mm。如图2所示。



图2 测定位置坐标台架示意图

Fig.2 Photos of frame for measuring positions

试验中采用了同位素法^[24]分别测试水稻和小麦秸秆在下反旋作业条件下位移变化,根据旋耕前后地表秸秆质量的变化测定秸秆的掩埋率,选取0.5 m×0.5 m框内秸秆质量作为标准,如图3所示。试验工况为收割机收获小麦后直接对平铺在地表的秸秆和留茬进行作业。试验田面积为60 m×200 m,旋耕机幅宽为2 m,选用180、230、280 r/min 3种转速作业,机具前进速度为0.5 m/s。2种作业方式分别进行3次重复试验。耕作完成后分别测试水稻和小麦秸秆的位移变化。

秸秆掩埋率为

$$R = \frac{M_1 - M_2}{M_1} \times 100\% \quad (4)$$

式中 M_1 ——耕作前地表秸秆质量

M_2 ——耕作后地表秸秆质量

2.2 秸秆位移测试方法

在未灭茬地表上排列标记红、绿色的秸秆(长15 cm),排列方式如图4所示。根据标记秸秆来测



图3 秸秆掩埋测定示意图

Fig. 3 Graph of measuring straw burying

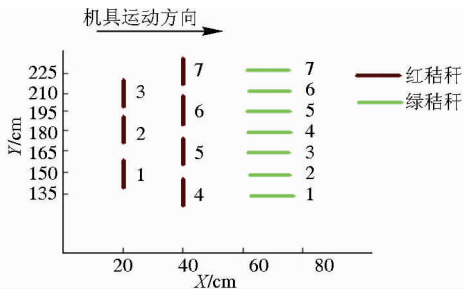


图4 秸秆布置方式

Fig. 4 Method of straw layout

定土壤和秸秆横、纵向位移变化情况^[25],红、绿秸秆和铝块各设7组,分别标有数字1~7。经过旋耕机作业后,一层一层拨出表面土壤,确定每个标记铝块的位置(在该过程中,对于其位置的确定,由于人为扰动因素较大,影响准确度,所以需轻拨),并通过自行设计的坐标标尺测出红、绿秸秆坐标值,根据旋耕前后各自坐标位置可以确定每个小面积内位移变化。由于收获机械作业后,秸秆在田间的分布是杂乱无序的,试验分别布置与刀辊平行和垂直秸秆,根据以上2种秸秆在三维空间中坐标值变化来反映机具幅宽范围内横、纵向秸秆的位移

变化。每组试验重复3次,将每次试验得到的7组数据取平均值,最后对3次试验数据取平均值,即得到各自位移。

2.3 小麦秸秆在耕作后位移分析

根据上述试验得到的结果可知,水稻秸秆位移均大于小麦秸秆位移且随着转速增加稻麦秸秆各标记点位移均在减小, x 方向上向反方向运动, y 方向变化很小, z 向上下运动。

空间坐标系中位移为

$$l = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 + (z_1 - z_2)^2} \quad (5)$$

式中 x_1, y_1, z_1 ——耕作前标记秸秆坐标

x_2, y_2, z_2 ——耕作后标记秸秆坐标

将式(5)得到位移结果如图5所示。纵向秸秆:小麦秸秆位移介于35~70 cm之间,最大位移为64.24 cm,最小位移为36.05 cm;水稻秸秆位移介于45~70 cm之间,最大位移为69.88 cm,最小位移为46.70 cm。横向秸秆:小麦秸秆位移介于25~60 cm之间,最大位移为53.16 cm,最小位移为27.68 cm;水稻秸秆位移介于40~70 cm之间,最大位移为64.90 cm,最小位移为42.80 cm。小麦秸秆沿刀辊轴向排列标记点位移波动较大(图5a、5b),而各水稻秸秆标记点位移变化较为稳定(图5c、5d)。小麦横向秸秆标记点5在3种转速下位移分别为45.79、45.21、44.97 cm,位移近似相等。基于两者位移的变化,结合第1节试验中稻麦秸秆力学性质可知,当加载速率大于20 mm/min时,秸秆弯曲强度减小,因此当机具旋耕速度增加到一定时,纵向排列(红)秸秆破坏形式主要为刀片的撞击破坏;当加载速率大于25 mm/min时,小麦秸秆剪切强度减小,而水稻秸秆剪切强度逐渐递增,因此机具旋耕速

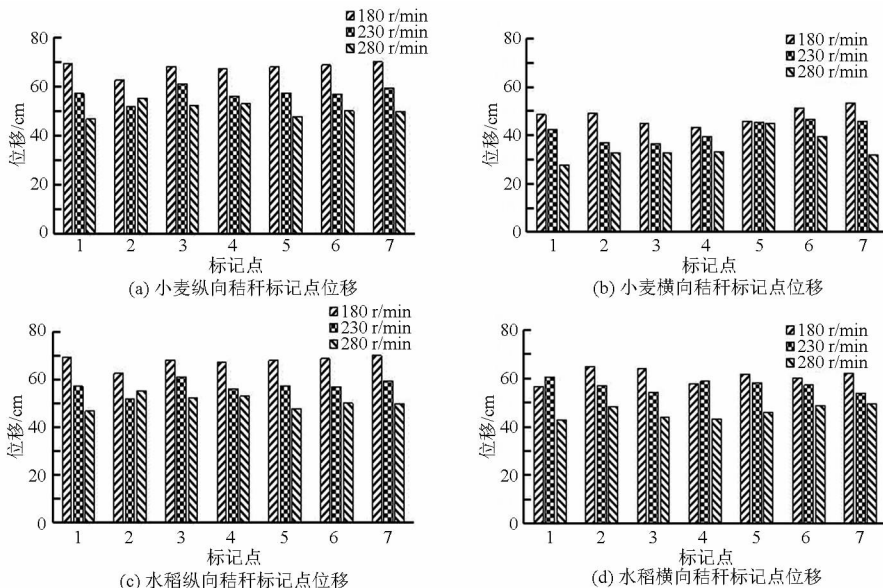


图5 秸秆位移变化

Fig. 5 Displacement change of straws

度在一定范围内,横向排列(绿)水稻和小麦秸秆与刀片之间发生剪切变形,并且剪切强度随之增加,由实际可知,当转速非常高时,刀片与秸秆之间还未来得及发生剪切变形,秸秆就被挤入土壤中,于是得到加载速率 25 mm/min 为临界速度^[26]。

2.4 稻麦秸秆位置分析

为了直观比较 3 种转速下稻麦秸秆位置分布情况,对其坐标进行了平移转换(红秸秆标记点 X 轴坐标向左平移 20 cm,绿秸秆标记点 X 轴坐标向左平移 70 cm),结果如图 6 所示,耕作后标记秸秆点

在坐标系中呈螺旋线排列,排列方式与刀片在刀辊上排列方式相似,且转速增加不会改变耕作后秸秆三维位置形状(与二维地表位置分布类似^[25])。小麦标记秸秆:Z 坐标轴方向变化范围为 ±20 cm,(相对地表),X 坐标轴方向变化范围为 ±30 cm,Y 坐标轴方向变化范围为 100 ~ 250 cm。水稻标记秸秆:Z 坐标轴方向变化范围为 ±15 cm,X 坐标轴方向变化范围为 ±40 cm,Y 坐标轴方向变化范围为 100 ~ 300 cm。由于土壤、秸秆含水率的差异使得标记点坐标有所差异,麦田耕深略大于稻田,水

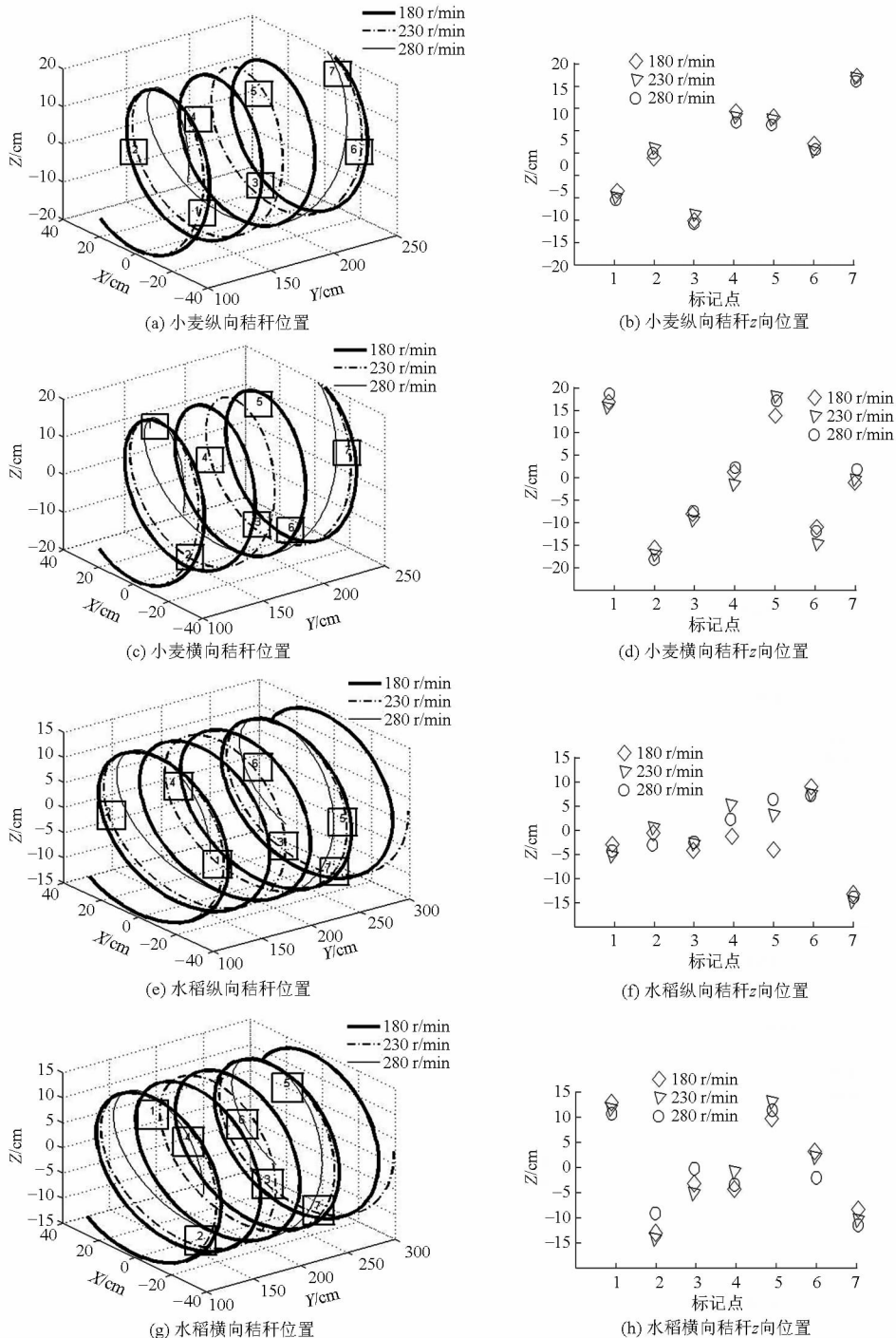


图 6 旋耕后秸秆三维坐标中位置分布

Fig. 6 Three-dimensional location distributions of straw in surface after rotary

稻标记秸秆 X 、 Y 坐标轴方向上变化均大于小麦标记秸秆。

由图 6a、6e 可知,纵向标记秸秆:耕作后标记点 X 轴坐标围绕零点对称排列,小麦标记点 X 轴坐标集中在 ± 30 cm 处,水稻标记点 X 轴坐标集中在 ± 40 cm 处, Y 轴坐标基本无变化;由图 6b、6f 可知, Z 轴坐标基本分布在零点两侧,小麦标记点 3、7 偏离零点位置较大,标记点 3 在 3 种转速下坐标为 -15 cm,标记点 7 的坐标介于 $15 \sim 20$ cm 之间,水稻标记点 6、7 偏离零点位置较大,标记点 6 坐标在 10 cm 左右波动,标记点 7 坐标介于 $-20 \sim -15$ cm 之间。对于图 6d、6h 中的横向标记秸秆:耕作后标记点 Z 轴坐标围绕零点对称排列,小麦标记点 1、2、5、6 位置偏离零点,标记点 1、5 坐标介于 $15 \sim 20$ cm 之间,标记点 2 坐标在 -15 cm 左右波动,标记点 6 坐标介于 $-15 \sim -10$ cm 之间;水稻标记点 1、2、5、7 位置偏离零点,标记点 1、5 坐标和小麦类似,介于 $10 \sim 15$ cm 之间,标记点 2 坐标介于 $-15 \sim -10$ cm 之间,在 3 种转速下标记点 7 坐标波动较大,介于 $-15 \sim -5$ cm 之间。由图 6c、6g 可知,标记点在 X 、 Z 轴上坐标值均匀分布, X 轴坐标和纵向标记秸秆相同, Z 轴坐标与纵向标记秸秆类似。由试验安排可知,秸秆标记点 Z 轴坐标表示作业过程中掩埋情况,秸秆标记点 X 、 Y 轴坐标表示作业过程中秸秆分布情况。

由于秸秆的排列方式不同,导致秸秆与刀片间相互作用机理不同,从而影响秸秆的掩埋和土壤的破碎,因此在耕作时,应尽量让田间的秸秆处于横向位置(刀辊轴向与秸秆平行)排列,以有利于秸秆和土壤均匀混合;而纵向排列秸秆在耕作过程中会出现聚集现象,不利于秸秆还田。

2.5 综合分析

由沿刀辊轴向上排列的标记秸秆的前后坐标变化可得到标记秸秆位移,根据以点代面的思想又可得到旋耕机作业区间范围内秸秆的位移变化情况。将图 5 中 3 种转速对应的 7 个横纵秸秆标记点位移平均,得到结果如表 3 所示。小麦纵向秸秆最大位移为 60.76 cm,横向秸秆最大位移为 47.96 cm;水稻纵向秸秆最大位移为 67.63 cm,横向秸秆最大位移为 61.07 cm。用变异系数^[26]衡量三维空间中位移变化的均匀性,由表 3 可知,纵向秸秆变异系数随着转速增加表现为先增加后减小,横向秸秆变异系数随转速增加表现为先减小后增加。并得到水稻、小麦秸秆的掩埋率如表 4 所示,稻麦秸秆的掩埋率均随转速增加而增加,小麦秸秆掩埋率高于水稻秸秆掩埋率。

表 3 稻麦秸秆区间位移

Tab. 3 Displacements of rice and wheat straws in range

秸秆种类	转速/ ($r \cdot \min^{-1}$)	纵向		横向	
		秸秆位移/cm	变异系数/%	秸秆位移/cm	变异系数/%
小麦	180	60.76 ^a	10.24	47.96 ^e	10.48
	230	49.16 ^b	11.28	41.83 ^e	3.80
	280	40.77 ^b	10.88	34.69 ^f	9.05
水稻	180	67.63 ^c	4.93	61.07 ^g	6.89
	230	57.03 ^c	7.23	57.12 ^g	5.55
	280	50.61 ^d	6.76	46.09 ^h	7.41

注:同一列数值后的不同小写字母表示处理间在 $p < 0.05$ 水平差异显著。

表 4 稻麦秸秆掩埋率

Tab. 4 Burying rates of rice and wheat straws %

转速/($r \cdot \min^{-1}$)	小麦	水稻
180	43.58	39.68
230	44.82	41.23
280	47.61	42.40

3 讨论

作业过程中,秸秆含水率、刀轴旋转速度、刀片在刀辊上的螺旋线形状、秸秆布置方式均影响秸秆还田效果,从而影响农田环境理化性质。由剪切试验和弯曲试验可知,加载速率过大或过小均影响秸秆弯曲强度和剪切强度,当加载速率大于 20 mm/min 时,秸秆弯曲强度减小;当加载速率大于 25 mm/min 时,小麦秸秆剪切强度减小,水稻秸秆剪切强度逐渐递增。结合上述室内试验和田间试验分析可知,实际作业中机具刀轴转速在 230 r/min 时,作业效果更佳;收割机田间作业时,应尽量让秸秆横向布置在田间;适当调整刀片在刀辊上螺旋线形状(单、双螺旋线,螺距等),可使秸秆在土壤中混合均匀。研究结果表明,稻麦秸秆在作业过程中,选择作业方式基本相同。

4 结论

(1)从理论模型分析可知:小麦秸秆 N1、N2 和 N3 段弯曲强度随加载速率增加而减小,水稻秸秆 N1 和 N2 段弯曲强度在一定范围内随加载速率增加而增加,当加载速率大于 20 mm/min 时,秸秆弯曲强度减小,N3 段弯曲强度随加载速率增加而减小,稻麦秸秆弯曲强度最大值均位于 N3 段;小麦秸秆剪切强度随加载速率增加而减小,N1、N3 段临界加载速率为 25 mm/min,N2 段临界加载速率为 20 mm/min,水稻秸秆剪切强度随加载速率增加而增加,同样稻麦秸秆剪切强度最大值均位于 N3 段。

(2)由田间试验得到纵向秸秆位移:小麦秸秆位移介于 35~70 cm 之间,最大位移为 64.24 cm,最小位移为 36.05 cm;水稻秸秆位移介于 45~70 cm 之间,最大位移为 69.88 cm,最小位移为 46.70 cm。横向秸秆位移:小麦秸秆位移介于 25~60 cm 之间,最大位移为 53.16 cm,最小位移为 27.68 cm;水稻秸秆位移介于 40~70 cm 之间,最大位移为 64.90 cm,最小位移为 42.80 cm。3 种转速下,稻麦秸秆位移随转速增加而减小,水稻秸秆位移大于小麦秸秆位移;耕作后标记秸秆在三维坐标系中呈螺旋线形状排列,改变旋耕机刀轴的旋转速度,只会改变其位移,并不会改变其螺旋形状。

(3)2 种排列方式对应 2 种分布情况:纵向排列标记秸秆 X 轴上坐标呈两侧对称分布,小麦标记点

X 轴坐标集中在 ± 30 cm 处,水稻标记点 X 轴坐标集中在 ± 40 cm 处, Y 轴坐标基本无变化, Z 轴坐标基本分布在零点两侧,并呈对称布置,小麦标记秸秆 Z 坐标变化范围为 ± 20 cm,水稻标记秸秆 Z 坐标变化范围为 ± 15 cm;横向排列标记秸秆在 X 、 Z 轴上呈两侧对称分布, X 轴坐标和纵向标记秸秆坐标类似,小麦标记点 X 轴坐标介于 $-30 \sim 30$ cm 之间,水稻标记点 X 轴坐标介于 $-40 \sim 40$ cm 之间, Y 轴坐标基本不变,小麦标记秸秆 Z 坐标轴介于 $-20 \sim 20$ cm 之间,水稻标记秸秆 Z 坐标轴 $-15 \sim 15$ cm 之间。标记点 X 、 Y 轴坐标表示作业过程中秸秆分布情况,标记点 Z 轴坐标表示作业过程中耕深情况,因此可得知:水稻秸秆的分布情况较小麦秸秆均匀,而小麦秸秆掩埋情况较水稻秸秆有优势。

参 考 文 献

- 1 WANG Xiaohua. Effects of ditch-buried straw return on soil organic carbon and rice yields in a rice-wheat rotation system[J]. CATENA, 2015,127: 56–63.
- 2 YANG Haishui, YANG Bing, DAI Yajun, et al. Soil nitrogen retention is increased by ditch-buried straw return in a rice-wheat rotation system[J]. European Journal of Agronomy, 2015(69): 52–58.
- 3 潘剑玲,戴万安. 秸秆还田对土壤有机质和氮素有效性影响及机制研究进展[J]. 中国生态农业学报, 2013, 21(5): 526–535.
- 4 解文艳,樊贵盛. 秸秆还田方式对旱地玉米产量和水分利用效率的影响[J]. 农业机械学报, 2011, 42(11): 60–68.
- 5 XIE Wenyang, FAN Guisheng. Effect of straw-incorporation on corn yield and water use efficiency in arid farming areas[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(11): 60–68. (in Chinese)
- 6 马宗国, 卢绪奎, 万丽, 等. 小麦秸秆还田对水稻生长及土壤肥力的影响[J]. 作物杂志, 2003(5): 37–38.
- 7 MA Zongguo, LU Xukui, WAN Li, et al. Effects of wheat straw returning on rice growth and soil nutrients[J]. Crops, 2003(5): 37–38. (in Chinese)
- 8 郝建华, 丁艳锋, 王强盛, 等. 麦秸还田对水稻群体质量和土壤特性的影响[J]. 南京农业大学学报, 2010, 33(3): 13–18.
- 9 HAO Jianhua, DING Yanfeng, WANG Qiangsheng, et al. Effect of wheat crop straw application on the quality of rice population and soil properties[J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 2010, 33(3): 13–18. (in Chinese)
- 7 金鑫, 蔡林运, 李刚华, 等. 小麦秸秆全量还田对水稻生长及稻田氧化还原物质的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2013(5): 80–85.
- 10 JIN Xin, CAI Linyun, LI Ganghua, et al. Effects of all wheat crop straw application on rice growth and redox substance in rice fields[J]. Soils and Fertilizers Sciences in China, 2013(5): 80–85. (in Chinese)
- 8 孔令德, 桑正中. 斜置旋耕刀的研制[J]. 农业机械学报, 2000, 31(6): 46–48.
- 9 KONG Lingde, SANG Zhengzhong. Development of an oblique rotary tillage blade[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2000, 31(6): 46–48. (in Chinese)
- 9 贾洪雷, 陈忠亮. 旋耕碎茬工作机理研究和通用刀辊的设计[J]. 农业机械学报, 2001, 32(4): 29–32.
- 10 JIA Honglei, CHEN Zhongliang. Study on working principle of rotary tillage and stubble cutting and design of universal knife roller[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2001, 32(4): 29–32. (in Chinese)
- 10 FANG Huimin, ZHANG Qingyi, CHANDIO F A, et al. Effect of straw length and rotavator kinematic parameter on soil and straw movement by a rotary blade[J]. Engineering in Agriculture, Environment and Food, 2016, 9(3): 235–241.
- 11 王德建, 常志州, 王灿, 等. 稻麦秸秆全量还田的产量与环境效应及其调控[J]. 中国生态农业学报, 2015, 23(9): 1073–1082.
- 12 WANG Dejian, CHANG Zhizhou, WANG Can, et al. Regulation and effect of 100% straw return on crop yield and environment[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2015, 23(9): 1073–1082. (in Chinese)
- 12 王允青, 郭熙盛. 不同还田方式作物秸秆腐解特征研究[J]. 中国生态农业学报, 2008, 16(3): 607–610.
- 13 WANG Yunqing, GUO Xisheng. Decomposition characteristics of crop-stalk under different incorporation methods[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2008, 16(3): 607–610. (in Chinese)
- 13 蔡中全. 水稻茎秆抗折力及其相关性状研究[D]. 南宁: 广西大学, 2008.

- CAI Zhongquan. A study on culm breaking-resistant strength and relevant culm traits of rice[D]. Nanning:Guangxi University, 2008. (in Chinese)
- 14 段传人,王伯初,王凭青. 水稻茎秆的结构及其性能的相关性[J]. 重庆大学学报,2003,26(11):38-40.
DUAN Chuanren, WANG Bochu, WANG Pingqing. The relationship between the structure and the property of rice stem[J]. Journal of Chongqing University,2003,26(11):38-40. (in Chinese)
- 15 MEYERS M. A dynamic behavior of materials[M]. New York:John Weley and Sons Inc,1994.
- 16 杜现军,李玉道,李法德,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, LI Fade, et al. Mechanical characteristics of cotton stalks[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2011,42(4):87-91. (in Chinese)
- 17 FARMAN Ali Chandio. Interaction of straw-soil-disc tool under controlled conditions [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University,2013.
- 18 袁志华,赵安庆,苏宗伟,等. 水稻茎秆抗倒伏的力学分析[J]. 生物数学学报,2003,18(2):234-237.
YUAN Zhihua, ZHAO Anqing, SU Zongwei, et al. Dynamic analysis of rice stem lodger resistance [J]. Journal of Biomathematics, 2003,18(2):234-237. (in Chinese)
- 19 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 Fen'e, 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)
- 20 ODOUGHERTY M J, HUBERT J A, DYSON A. A study of the physical and mechanical properties of wheat straw[J]. Journal of Engineering Research,1995,62:133-142.
- 21 郭维俊,王芬娥,黄高宝,等. 小麦茎秆力学性能与化学组分试验[J]. 农业机械学报,2009,40(2):110-114.
GUO Weijun, WANG Fen'e, HUANG Gaobao, et al. Experiment on mechanical properties and chemical compositions wheat stems[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2009, 40(2): 110-114. (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 李小城,刘梅英,牛智有,等. 小麦秸秆弯曲力学性能的测试[J]. 华中农业大学学报,2013,32(1):120-124.
LI Xiaocheng, LIU Meiyong, NIU Zhiyou, et al. Test of bending properties of wheat stalks[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2013,32(1):120-124. (in Chinese)
- 24 LIU J. Effect of tillage speed and straw length on soil and straw movement by a sweep [J]. Soil & Tillage Research, 2010, 109(1): 9-17.
- 25 郭俊,姬长英,方会敏,等. 正反转旋耕后土壤和秸秆位移试验分析[J]. 农业机械学报,2016,47(5):21-26.
GUO Jun, JI Changying, FANG Huimin, et al. Experimental analysis of soil and straw displacement after up cut and down cut rotary tillage[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2016, 47(5):21-26. (in Chinese)
- 26 王国林,桑正中. 旋耕碎土质量的分形描述[J]. 农业工程学报,1998,14(4):57-61.
WANG Guolin, SANG Zhengzhong. Fractal cold size distribution formed by rotary tillage[J]. Transactions of the CSAE,1998, 14(4):57-61. (in Chinese)