

基于复合指标与测试技术的旋耕秸秆还田质量评价研究

徐高明^{1,2} 汪小昆^{1,2} 何瑞银^{1,2} 丁启朔^{1,2}

(1. 南京农业大学工学院, 南京 210031; 2. 江苏省智能化农业装备重点实验室, 南京 210031)

摘要: 秸秆还田是土壤培肥与丰产增效的重要技术途径,对农业可持续发展具有重要的现实意义。但目前针对秸秆还田作业质量的测试评价研究仍十分有限,尤其缺乏耕整作业后的秸秆在土壤各层空间分布效果的综合定量评价。以生产环节的旋耕秸秆还田质量评价为例,利用2D数字图像法、3D逆向工程技术和Matlab计算模块等现代信息技术构建了一套秸秆还田作业质量的综合测试评价技术,所研发的测试评价技术针对秸秆在地表层和地下层的分布状态构建出融合单元格、埋覆率、深度方向、水平横向、水平纵向等多尺度水平的复合型评价指标,基于该技术及指标集评价分析了3 cm(T3)、5 cm(T5)、7.5 cm(T7.5)、10 cm(T10)、12.5 cm(T12.5)和15 cm(T15)6种不同长度秸秆经旋耕混埋后在土壤各层空间中的分布状态,结果表明,在地表层,各区间秸秆占比变异系数先减小后增大最后趋于平稳,T5处理的变异系数最小,为10.2%;随着秸秆切碎长度的增加,秸秆埋覆率减小,并呈对数关系,模型决定系数大于0.97。在地下层,沿深度方向分割,秸秆切碎长度越短,中下层(5~15 cm)秸秆占比越多,T3与T5处理秸秆占比分别为76.8%和71.7%,优于其他处理;沿水平方向分割,不同处理的变异系数无明显规律,但从整体而言,T3和T5处理的水平横向与水平纵向变异系数均不大于22.8%,分布均匀性明显优于其他处理;按单元格分割,各单元格的变异系数与无秸秆单元格占比都随秸秆切碎长度增加而逐渐增大,T3和T5处理的变异系数分别为73.6%与73.1%,无秸秆单元格占比均为15.7%,秸秆分布较均匀。综合分析表明,秸秆切碎长度对旋耕还田质量有显著影响,T3和T5处理的秸秆混埋效果较好,考虑能耗因素,半喂入收获机选择秸秆切碎长度5 cm为宜。

关键词: 旋耕; 秸秆还田; 空间分布; 测试评价; 复合指标

中图分类号: S233.1; S24 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2022)02-0058-10

OSID:



Performance Evaluation of Rotary Tillage Straw Returning Based on Composite Indicators and Measurement Techniques

XU Gaoming^{1,2} WANG Xiaochan^{1,2} HE Ruiyin^{1,2} DING Qishuo^{1,2}

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

2. Key Laboratory of Intelligent Agricultural Equipment of Jiangsu Province, Nanjing 210031, China)

Abstract: Straw returning is an important technical way to improve soil fertility and crop yield, bearing important practical significance for the sustainable development of agriculture. However, the comprehensive testing and evaluation methods for straw returning quality are still very limited, especially the quantitative description of the spatial distribution of tillage buried straws in soil profile. Taking the performance evaluation on straw returning of rotary tillage as an example, 2D digital image method, 3D reverse engineering technology and Matlab calculation program were used to construct the straw returning quality evaluation and test technology, including composite indicators of the cell, burying rate, depth direction, and horizontal direction. Based on the measure techniques and composite indicators, the spatial distribution of tillage buried straws with six different lengths, i. e. 3 cm (T3), 5 cm (T5), 7.5 cm (T7.5), 10 cm (T10), 12.5 cm (T12.5) and 15 cm (T15) was evaluated and analyzed. In the surface layer, the coefficient of variation of straw proportion in each interval was firstly decreased, and then increased, and finally stabilized, and the coefficient of variation of T5 treatment was 10.2%, which was the smallest. With the increase of straw cutting length, the straw coverage rate was decreased

收稿日期: 2021-01-20 修回日期: 2021-03-24

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0300908)和江苏省农业科技自主创新基金项目(CX(17)1002)

作者简介: 徐高明(1989—),男,博士生,主要从事土壤耕作与秸秆还田研究,E-mail: xgming55@163.com

通信作者: 丁启朔(1968—),男,教授,主要从事土壤-植物-机器系统科学研究,E-mail: qsding@njau.edu.cn

with a logarithmic relationship, and the coefficient of determination of the model was greater than 0.97. In the underground layer, the shorter the length of straw chopped along the depth direction was, the more the proportion of straw in the middle and lower layers (5 ~ 15 cm) was, and that for T3 and T5 treatments was 76.8% and 71.7%, respectively, which were better than other treatments. Along the horizontal direction, the coefficient of variation of different treatments had no absolute rule, but on the whole, T3 and T5 treatments' horizontal and longitudinal coefficient of variation were not more than 22.8%, and the distribution was uniform. The coefficient of variation of each cell and the proportion of non straw cells were increased gradually with the increase of straw chopping length. The coefficient of variation of T3 and T5 treatments were 73.6% and 73.1%, respectively, and the proportion of non straw cells was 15.7%. Comprehensive analysis showed that straw chopping length had a significant impact on the quality of rotary tillage. T3 and T5 treatments had a better effect on straw mixed burying. Considering the energy consumption, the straw chopping length of 5 cm was the best choice for semi feeding harvester.

Key words: rotary tillage; straw returning; spatial distribution; measurement evaluation; composite indicators

0 引言

秸秆还田是土壤培肥与丰产增效的重要技术途径^[1], 不仅可解决秸秆焚烧造成的环境问题^[2-3], 还可以增加土壤肥力与提高作物产量^[4-8], 对农业可持续发展和保障粮食安全具有重要的现实意义。秸秆在田间快速腐解能有效增加土壤有机质, 改善土壤孔隙结构, 促进微生物活力与作物根系的发育^[9-13]。

目前, 我国南方地区使用的秸秆还田方式主要有旋耕混埋还田^[14-15]、犁耕翻埋还田^[16-17]、开沟深埋还田^[18-19]和秸秆覆盖还田^[20-21]。与其他还田方式相比, 旋耕混埋还田的作业效率较高、功耗较低, 是农户广泛采用的一种秸秆还田方式。该还田方式是在旋耕松碎土层的同时, 将秸秆与土壤均匀混合并埋覆于地表以下^[22]。秸秆在土壤空间中分布越均匀, 其与土壤的接触面积越大, 越有利于秸秆迅速腐解而及时转化为有机肥被作物吸收^[23-26], 还有利于充分发挥秸秆改良土壤孔隙结构与土壤水分性状的作用^[27-29]。但目前针对秸秆还田作业质量的测试评价研究, 国内主要以秸秆埋覆率为单一指标^[30-33]; 国外相关文献报道较少, 多侧重于研究保护性耕作机具与秸秆的相互影响关系^[34-35]。上述研究都没有深入地描述耕作后的秸秆在土壤空间中的分布状态。目前, 少量有关秸秆位移及分布的研究尚处于探索阶段, 且大多为依靠离散元技术进行仿真分析^[36-39], 能够用于耕作后秸秆在土壤空间中分布效果的系统性定量评价指标与测试技术仍十分有限。鉴于此, 亟待构建一套适合复杂田间情况的秸秆还田作业质量综合测试评价技术。

秸秆还田作业质量的测试评价主要涉及耕后地表层和地下层秸秆分布的均匀性, 传统网格取样法^[40]对秸秆扰动大, 无法测量小区域内的地表层秸

秆分布均匀性, 且难以获取地下层秸秆的信息, 不能准确检测秸秆在土壤各层空间中的分布效果。近年来, 现代信息技术已广泛应用于大田作物系统检测研究^[41-45], 说明利用现代信息技术可以实现田间作物对象的精准检测。因此, 本文利用数码相机与秸秆空间坐标数字化仪, 结合 2D 数字图像法、3D 逆向工程技术和 Matlab 计算模块构建一套秸秆还田作业质量的综合测试评价技术, 针对秸秆在地表层和地下层的分布状态, 创建融合单元格、埋覆率、深度方向、水平横向、水平纵向等多尺度水平的复合型评价指标集, 并以旋耕秸秆还田质量评价为例, 评价分析 6 种切碎长度秸秆的旋耕混埋还田效果, 以期今后耕作机械秸秆还田质量的综合测试评价研究提供参考。

1 材料与方法

1.1 田间试验设计

田间试验于 2020 年 11 月中旬水稻收获后进行, 地点位于江苏省南京市六合区八百桥试验田 (32°25'N, 118°55'E), 土壤类型为黄棕壤质, 土壤性质是常年稻麦轮作形成的黏性水稻土。土壤 pH 值为 7.6, 土壤砂粒、壤粒和黏粒质量分数分别为 21.20%、39.67% 和 38.96%, 土壤含水率为 26.12%。旋耕试验设备采用田间原位耕作综合试验平台^[46], 由控制系统、牵引电动机、悬架导轨、多功能台车和升降电动机等组成, 其整体结构如图 1 所示。试验选用常规的 IT225 型旋耕刀, 旋耕深度为 10 cm, 耕幅为 50 cm, 刀辊转速为 280 r/min, 前进速度为 0.2 m/s。试验材料为秋季水稻秸秆, 半喂入收获机秸秆切碎长度范围为 3 ~ 15 cm, 为简化处理, 采用 3 cm (T3)、5 cm (T5)、7.5 cm (T7.5)、10 cm (T10)、12.5 cm (T12.5) 和 15 cm (T15) 共 6

种切碎长度的水稻主茎秆并染色处理;单个试验小区的面积划分为 $300\text{ cm} \times 50\text{ cm}$, 共有 18 个小区, 先将小区地表的秸秆全部清除干净, 然后再在每个小区上分别均匀铺放不同长度的秸秆, 秸秆量控制在 $7\,500\text{ kg/hm}^2$, 试验采用随机区组设计, 并进行 3 次重复, 耕作完测定秸秆土壤各层空间中分布的均匀



图 1 田间原位耕作综合试验平台
Fig. 1 Multi-purpose in-situ tillage tool testing platform
1. 控制系统 2. 牵引电动机 3. 悬架导轨 4. 多功能台车 5. 升降电动机

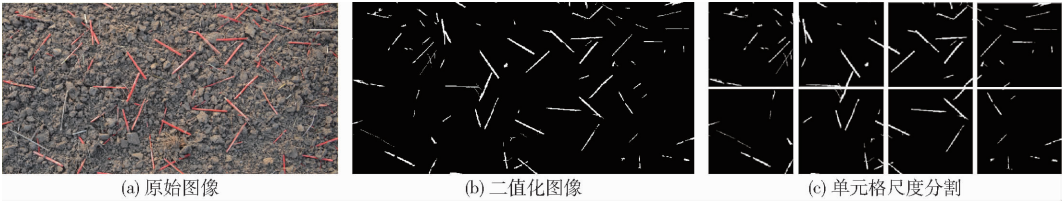


图 2 图像分割方法
Fig. 2 Method of dividing interval

(2) 秸秆埋覆率测试
旋耕后地表的秸秆埋覆率^[48]是衡量秸秆还田质量的重要指标之一, 秸秆埋覆率越高, 则秸秆还田质量越好。将 $0.5\text{ m} \times 0.5\text{ m}$ 的取样框置于耕作区, 用剪刀贴地面剪下样框内露出地表的秸秆并称其质量, 根据旋耕前后地表秸秆质量的变化测定秸秆埋覆率。

1.3 地下层秸秆分布的测试方法

(1) 土壤-秸秆混合体取样
测试前先对旋耕混埋还田后的土壤-秸秆混合体进行取样。旋耕后的地表平均抬升 5 cm 左右, 满足 15 cm 深度的取样要求。将 $30\text{ cm} \times 30\text{ cm} \times 15\text{ cm}$ 的钢制取样框放置于耕后的土壤上, 用剪刀依次剪断取样框周边伸出的秸秆并拨开, 再将取样框缓慢压入土壤, 直至取样框顶部与地表平齐。挖除取样框一侧的土壤, 将一块 $35\text{ cm} \times 35\text{ cm}$ 的钢板用铁锤击入取样框底部, 去除取样框周边土壤, 用钢板将取样框托起, 此时, 完成一个土壤-秸秆混合体的取样。待所有取样完成后, 一起带回实验室进行测量分析。

(2) 秸秆空间坐标测量
参考根系构型数字化仪^[45,49]测试原理设计了

性。秸秆分布得越均匀, 则秸秆还田质量越好。使用变异系数 C_v 评价地表层和地下层秸秆分布的均匀程度, 变异系数越小, 则秸秆分布越均匀。

1.2 地表层秸秆分布的测试方法

(1) 秸秆分布图像采集与测定
数字图像采集与测定参照文献[47]的方法, 该方法方便可靠, 能够快速无扰动定量各区域秸秆长度, 较人工划分网格测量法更为准确。使用 Canon A3300 型数码相机对旋耕后的地表秸秆进行垂直拍摄, 相机距离地面高度为 1 m , 拍摄时光圈调至 F3.2, 并在地表放置标尺用于图像预处理环节的秸秆长度标定, 以 $25\text{ cm} \times 25\text{ cm}$ 的单元格尺度将小区内 $100\text{ cm} \times 50\text{ cm}$ 的样方分割为 8 个子图像(图 2), 计算各子图像内的秸秆总长度, 以各子图像内秸秆占比的变异系数衡量秸秆在地表层分布的均匀性。采用自主编写的 Matlab 图像处理程序计算各分割区间的秸秆总长度。

秸秆空间坐标数字化仪(图 3)。该装置主要包括水平方向的弧形标尺和水平标尺, 以及铅垂方向的垂直标尺, 能够提供小于 1 mm 的测试分辨率, 操作使用方便, 稳定可靠。试验中采用的水稻主茎秆切段, 其含水率较高、长度较短, 不容易出现折弯, 可近似为直线段, 秸秆空间坐标数字化仪可通过测量秸秆头部和尾部两点的空间坐标来确定整段秸秆的空间



图 3 秸秆空间坐标数字化仪
Fig. 3 Space coordinate tester of straws
1. 弧形标尺 2. 水平标尺 3. 垂直标尺 4. 探针 5. 土样 6. 方形钢制取样桶 7. 底座

位置。测量时,用拨针自上而下逐层清除土壤,使秸秆头部露出土样后,综合转动弧形标尺并移动水平标尺和垂直标尺上的滑块,将探针落在秸秆头部位置,并依次读取弧形标尺、水平标尺和垂直标尺的读数 θ 、 X_1 、 Z_1 。重复上述操作继续测量秸秆尾部坐标,并进行下一根秸秆的测试,最后完成整个土壤-秸秆混合体中全部秸秆的测量。

(3) 秸秆分布模型构建与分割统计

先利用 Excel 2007 将秸秆空间坐标数字化仪获得的极坐标数据进行换算,得到秸秆的笛卡尔坐标

数据,再将数据以 *.ibl 格式导入 Pro/E 三维绘图软件,以线段表示秸秆,进行自动 3D 建模生成秸秆分布的三维立体模型(图 4a)。然后在多尺度下对三维立体模型进行分割,以 5 cm 单位尺度沿深度方向(图 4b)、水平横向(图 4c)和水平纵向(图 4d)进行等距离分割,以 5 cm × 5 cm × 5 cm 的单元格尺度(图 4e)进行整体空间分割。使用自主编写的 Matlab 程序自动统计各分割区间中的秸秆总长度(图 4f),并以各分割区间秸秆占比的变异系数衡量秸秆在地下层土壤空间中分布的均匀性。

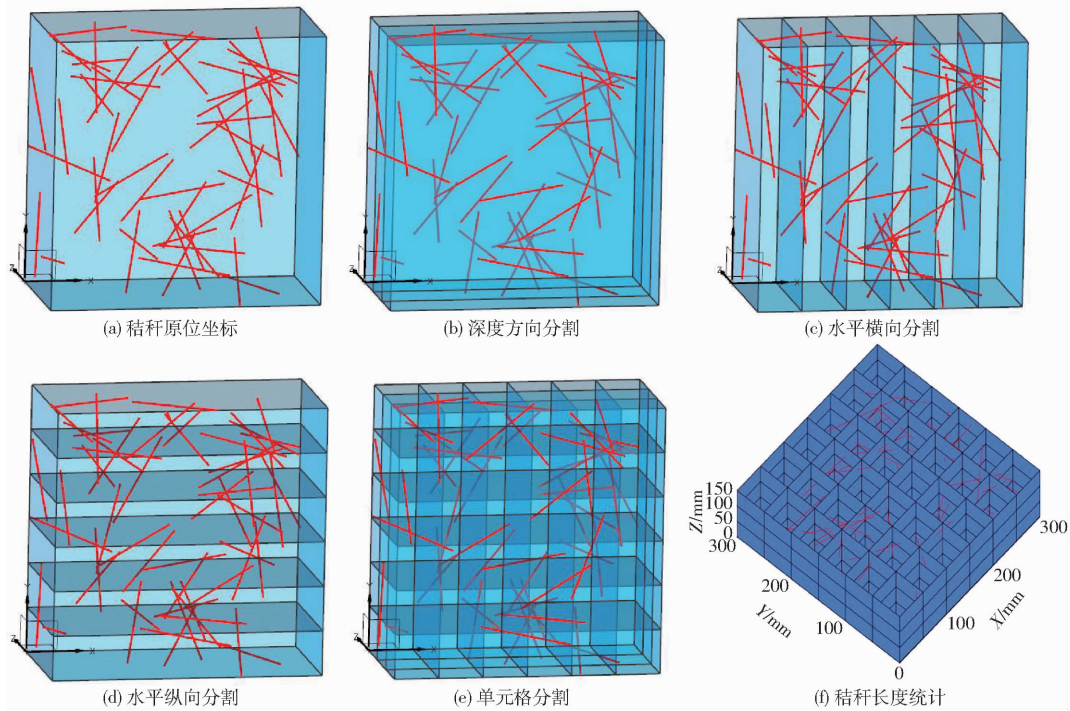


图 4 秸秆空间分布模型分割与统计

Fig. 4 Segmentation and calculation of straw spatial distribution model

2 结果与分析

2.1 不同长度秸秆在地表层的分布

2.1.1 秸秆在分割区间的分布效果

对图像进行精细分割分析能够高分辨率地反映秸秆在地表层的分布状态。图 5 所示为各子图像内秸秆占比的变异系数。由图 5(图中不同字母表示

差异显著,下同)可知,在单元格尺度分割下,随着秸秆切碎长度的增加,变异系数先减小后增大最后趋于平稳,T3 处理的变异系数最大,为 27.1%,T5 处理的变异系数最小,为 10.2%,其他 4 种处理下的变异系数相近,都为 18% 左右。可能是因为 3 cm 短秸秆在旋耕后的埋覆率高,地表残留的秸秆少且零星分布,导致各分割区间内的变异大,秸秆在地表分布相对不均匀;而随着秸秆切碎长度的逐步增加,秸秆埋覆率趋于平稳,秸秆在地表分布的均匀性变化也相对平稳。总的来说,除 T3 处理外,其他处理的变异系数都在 20% 以下,秸秆在地表层分布较均匀。其主要原因是,在旋耕混埋作业时,秸秆和土壤随旋耕刀一起沿螺旋线轨迹运动,扰动后的秸秆在地表层按一定规律分布,故分割区间的分布差异性较小。结果表明,秸秆在地表层的分布均匀性与秸秆切碎长度不是正相关关系,T5 处理的分布效果为最优。

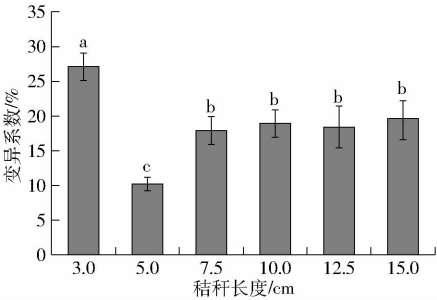


图 5 各子图像内秸秆占比的变异系数

Fig. 5 Coefficient of variation of straw proportion in different images

2.1.2 旋耕后地表的秸秆埋覆率

图 6 为不同切碎长度秸秆对旋耕后地表秸秆埋覆率的影响。由图 6 可知,在长度 3 ~ 15 cm 范围内,旋耕作业可将大部分秸秆埋入土壤中,秸秆埋覆率随切碎长度增加呈减小的趋势。T3 处理的秸秆埋覆率高达 94.5%, T5 处理的秸秆埋覆率为 88.1%, T12.5 与 T15 处理的秸秆埋覆率相差不大,分别只有 77.2% 和 76.7%。运用 Excel 2007 软件对测试结果进行拟合分析,不同数学模型拟合效果对比表明,使用对数方程拟合效果较好,模型决定系数 R^2 为 0.973 8。由方程曲线可知,半喂入收获机进行秸秆切碎时,需要控制秸秆在一定长度以下,这样才有利于后续旋耕作业将秸秆埋入土壤中,以实现高质量的秸秆还田。

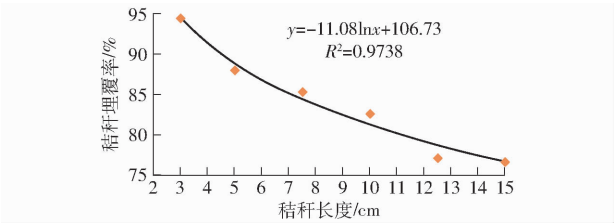


图 6 不同长度秸秆与埋覆率的关系
Fig.6 Relationship of straw length and burying rate

根据地表层秸秆各区域分布的均匀性和秸秆埋覆率,虽能够在一定程度上反映旋耕混埋后的秸秆还田效果,但无法定量描述秸秆在地下层土壤空间中的分布状态,不能准确全面地评价秸秆还田的质量。鉴于此,关于旋耕埋草的秸秆还田质量评价,还需要结合秸秆在地下层的分布效果进行综合分析。

2.2 不同长度秸秆在地下层的分布

图 7 为不同长度秸秆空间分布的三维立体模型,直观地反映了秸秆在地下层土壤空间中的分布状态。接下来对三维立体模型进行多尺度(单元格、深度方向、水平方向)分割,并测试与分析各区间秸秆分布的均匀性。

2.2.1 秸秆沿深度方向的分布效果

将秸秆空间分布模型分割为上层(0 ~ 5 cm)、中层(5 ~ 10 cm)和下层(10 ~ 15 cm),采用分层分割的方法评价秸秆沿深度方向的分布效果,秸秆中下层占比越高且各层秸秆占比变异系数越小,则秸秆沿土壤空间深度方向的还田质量越好。深度方向分割下的各层秸秆总长度和秸秆占比如表 1 所示。试验结果表明,随着秸秆切碎长度增加,埋入土壤中的秸秆总长度逐渐减小。在 0 ~ 5 cm 播种深度层, T3 与 T5 处理的土壤中秸秆量较少,减少了秸秆拥堵开沟器与架空种子的现象,有利于小麦播种作业。T3、T5 与 T7.5 处理的秸秆分别有 76.8%、71.7% 和 64.8% 被埋在中层和下层,明显优于其他 3 种处理,表明秸秆切碎长度在 7.5 cm 以下有较好的深埋效果。T12.5 与 T15 处理的秸秆分别仅有 17.5% 和 10.7% 被埋在下层,表明秸秆的切碎长度超过 12.5 cm 时,秸秆在旋耕后主要被埋在上层和中层,难以埋入到下层。

图 8 为深度方向分割下各层秸秆占比的变异系数。综合来看,沿深度方向分割, T3、T5、T7.5 与 T10 这 4 种处理的秸秆在上中下 3 层分布较均匀,各层秸秆占比的变异系数小于 30%,而 T15 处理的各层秸秆占比变异系数高达 60.2%。这是由于秸

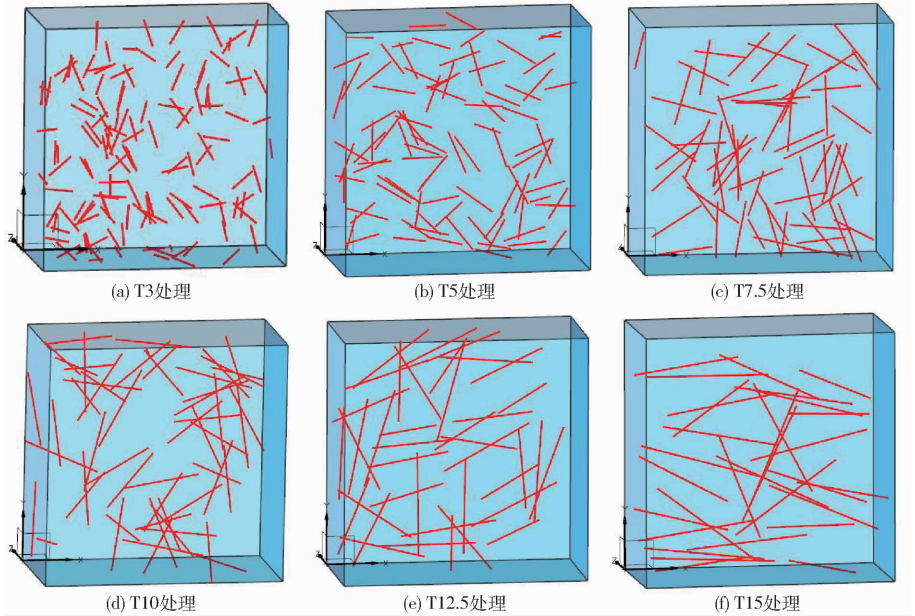


图 7 不同长度秸秆的空间分布
Fig.7 Spatial distributions of straw under different lengths

表 1 深度方向分割下各层秸秆分布占比

Tab.1 Proportion of vertical distribution of straw in different layers

深度/cm	各层秸秆总长度/cm						各层秸秆占比/%					
	T3	T5	T7.5	T10	T12.5	T15	T3	T5	T7.5	T10	T12.5	T15
0~5	1 080.7	1 273.5	1 501.3	1 575.4	1 649.7	1 881.6	23.2	28.3	35.2	38.1	42.3	48.8
5~10	1 964.7	1 768.5	1 582.3	1 542.4	1 567.8	1 557.4	42.1	39.3	37.1	37.3	40.2	40.5
10~15	1 617.2	1 458.0	1 181.4	1 017.2	682.5	411.0	34.7	32.4	27.7	24.6	17.5	10.7

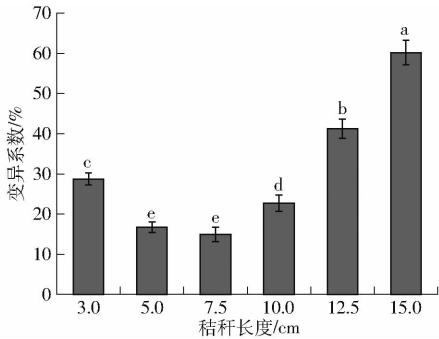


图 8 深度方向分割下各层秸秆占比的变异系数

Fig.8 Coefficient of variation of straw proportion in different layers

秆超过一定长度时,旋耕很难将秸秆埋入下层,导致各层秸秆分布不均匀。T3 处理的各层秸秆占比变异系数略高于 T5 处理,是因为该处理下的秸秆更多地被埋入中下层,而上层的秸秆较少,导致各层秸秆分布不够均匀,这说明秸秆沿深度方向的还田质量需要结合中下层秸秆占比和各层秸秆占比变异系数综合分析。

2.2.2 秸秆沿水平方向的分布效果

采用水平横向与水平纵向分割的方法测试评价不同长度秸秆沿水平方向的分布效果,各分割区间秸秆占比的变异系数越小,则秸秆沿土壤空间水平方向的还田质量越好。

图 9 为水平方向分割下各区间秸秆占比的变异系数。在水平横向分割中,不同长度处理下的各区间秸秆占比变异系数无绝对规律,其中,T3 与 T5 处理的变异系数较小,分别为 19.9% 和 18.2%,T15 处理的变异系数最大,为 43.5%。在水平纵向分割中,T3 与 T5 处理的变异系数明显小于其他处理,变异系数分别为 22.8% 与 20.2%,而其他处理下的变异系数在 40% 左右。综合分析表明,不同处理下,沿水平方向分布的变异系数无绝对规律,但整体而言,T3 与 T5 处理的横向分割与纵向分割变异系数均较小,说明半喂入收获机将秸秆切碎为 3 cm 或 5 cm 后再进行旋耕混埋还田,秸秆沿水平方向的分布效果较好,能够获得较高的秸秆还田质量。主要原因为 在秸秆旋耕混埋还田时,短的秸秆能够在旋耕刀的作用下向下运动进入土壤中,并伴随秸秆与土壤的搅拌混合,均匀地分布在土壤空间中;而长的

秸秆在旋耕搅拌的作用下,其运动位移小,与土壤未能进行充分地混合,导致在土壤空间中分布不均匀。

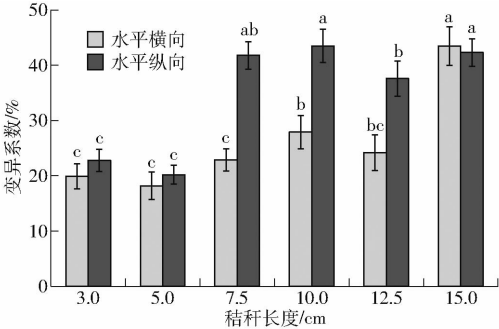


图 9 水平方向分割下各区间秸秆占比的变异系数

Fig.9 Coefficient of variation of straw proportion in different horizontal regions

2.2.3 秸秆在单元格的分布效果

对秸秆空间分布模型进行整体单元格尺度分割能够高分辨率地反映秸秆在土壤空间中的分布效果,各单元格秸秆变异系数越小且无秸秆单元格数量越少,则秸秆在整体单元格分割下的还田质量越高。

图 10 为整体单元格分割下的秸秆变异系数和无秸秆单元格占比。在单元格尺度分割下,随着秸秆切碎长度的增加,各单元格的秸秆变异系数与无

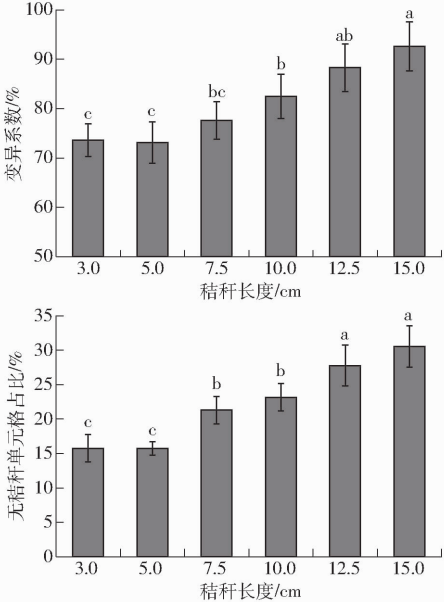


图 10 单元格分割下的秸秆分布效果

Fig.10 Spatial distributions of straw in cells under different lengths

秸秆单元格占比呈逐渐增大的趋势。T3 与 T5 处理的变异系数分别为 73.6% 与 73.1%,无秸秆单元格占比均为 15.7%,秸秆在土壤空间中的分布效果较优。而 T12.5 与 T15 处理的变异系数较大,分别为 88.3% 与 92.6%,且无秸秆单元格占比较高,有近 30% 单元格内无秸秆。变异系数与无秸秆单元格占比两项评价指标的变化趋势一致,说明以变异系数与无秸秆单元格占比的综合评价方法能反映秸秆在土壤空间中的分布效果。综合分析表明,收获机切碎秸秆长度为 3 cm 或 5 cm 时,秸秆在旋耕后能够均匀地分布在土壤空间中,秸秆还田质量较优。因此,在考虑能耗因素的情况下,半喂入收获机选择秸秆切碎长度 5 cm 为宜。

3 讨论

秸秆直接还田作为一种高效的秸秆管理手段^[50],是绿色与可持续农业研究的重要内容^[51]。但事实上目前用于定量描述秸秆还田作业质量的测试手段与评价指标仍然非常有限,现有秸秆还田质量测试评价方法 GB/T 5668—2008 仅规范了秸秆埋覆率的测试及评价方法,用秸秆埋覆率作为秸秆还田质量的单一评价指标已无法满足智慧农业精细耕作的要求,迫切需要开展关于秸秆还田作业质量的复合型评价指标集与测试技术的研究。

本文利用 2D 数字图像法、3D 逆向工程技术和 Matlab 计算模块构建的秸秆还田质量测试评价方法操作简单、稳定可靠,便于推广应用。该测试评价技术融合了单元格、埋覆率、深度方向、水平横向、水平纵向等多尺度水平的评价指标,能够准确全面地综合定量评价秸秆在地表层和地下层的分布效果。在地表层,有别于针对田间秸秆覆盖率进行大范围大尺度估算检测的多光谱遥感影像技术^[52]和无人机航拍技术^[41],本研究采用的 2D 数字图像法简单快捷,能够获取小区域尺度下的秸秆详细信息,适用于定量描述耕后地表残留秸秆分布的均匀性;后续也可扩展研究耕作幅宽区域下的地表秸秆残留量与分布均匀性以对比评价分析不同耕作机械的秸秆还田质量,乃至为耕作机具搭载机器视觉技术,进而自动调整机具工作参数(如耕作深度、刀轴转速等)来实

现精准秸秆还田。在地下层,文献[53]的分层取样称量法只能测量深度方向的秸秆分布效果,观测尺度单一,本研究利用 Pro/E 和 Matlab 虚拟工程技术能够自动测试评价分析秸秆在深度方向、水平横向、水平纵向和单元格等多尺度下的分布均匀性,且只需进行程序参数调整,理论上可实现秸秆在无限尺度下的分布效果分析。除水稻秸秆外,还可以用于多种作物秸秆(如小麦秸秆、玉米秸秆和油菜秸秆等)在地表层和地下层空间中分布效果的定量评价分析。

2D 数字图像法、3D 逆向工程技术和 Matlab 计算模块有着强大的图像识别、模型构建和计算分析能力,因此,将这些功能集成开发有利于建立田间作业质量的快速检测系统,以支撑耕作机具优化设计,从而提高秸秆还田质量,实现土壤肥力与作物产量增加,促进农业的可持续发展;也有利于扩展为耕作机具搭载机器视觉技术,以提高农机智能化水平,加快智慧农业的实施。

4 结论

(1)使用数码相机与秸秆空间坐标数字化仪,结合 2D 数字图像法、3D 逆向工程技术和 Matlab 计算模块构建的秸秆还田作业质量测试评价技术,融合了单元格、埋覆率、深度方向、水平横向、水平纵向等多尺度水平的复合型评价指标,可准确全面地评价秸秆在地表层和地下层的分布效果,能够实现秸秆还田作业质量的综合定量评价。

(2)以旋耕埋草的秸秆还田质量评价为例,在地表层,T5 处理的变异系数和秸秆埋覆率较优,分别为 10.2% 和 88.1%。在地下层,沿深度和水平方向分割,T3 与 T5 处理的变异系数较小,分布均匀性明显优于其他处理;按单元格分割,各单元格变异系数与无秸秆单元格随秸秆切碎长度增加而逐渐增大,T3 与 T5 处理的变异系数分别为 73.6%、73.1%,无秸秆单元格占比均为 15.7%,秸秆分布较其他处理更均匀。秸秆切碎长度对旋耕还田质量有显著影响,T3 和 T5 处理的秸秆混埋性能较好,考虑能耗因素,半喂入收获机选择秸秆切碎长度 5 cm 为宜。

参 考 文 献

[1] 杨帆,董燕,徐明岗,等. 南方地区秸秆还田对土壤综合肥力和作物产量的影响[J]. 应用生态学报, 2012, 23(11): 3040 - 3044.
YANG Fan, DONG Yan, XU Minggang, et al. Effects of straw returning on the integrated soil fertility and crop yield in southern China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2012, 23(11): 3040 - 3044. (in Chinese)
[2] 霍耀强,李敏,滕泽栋,等. 秸秆焚烧对哈尔滨空气质量的影响研究[J]. 环境污染与防治, 2018, 40(10): 1161 - 1166.
HUO Yaoqiang, LI Min, TENG Zedong, et al. Analysis on effect of straw burning on air quality in Harbin[J]. Environmental

- Pollution & Control, 2018, 40(10): 1161 – 1166. (in Chinese)
- [3] 马建行, 宋开山, 温志丹, 等. 基于 Landsat 8 影像的不同燃烧指数在农田秸秆焚烧区域识别中的应用[J]. 应用生态学报, 2015, 26(11): 3451 – 3456.
MA Jianhang, SONG Kaishan, WEN Zhidan, et al. Quantification of crop residue burned areas based on burning indices using Landsat 8 image[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015, 26(11): 3451 – 3456. (in Chinese)
- [4] 王红妮, 王学春, 黄晶, 等. 秸秆还田对土壤还原性和水稻根系生长及产量的影响[J]. 农业工程学报, 2017, 33(20): 116 – 126.
WANG Hongni, WANG Xuechun, HUANG Jing, et al. Effect of straw incorporated into soil on reducibility in soil and root system and yield of rice[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(20): 116 – 126. (in Chinese)
- [5] TAO Z, LI C, LI J, et al. Tillage and straw mulching impacts on grain yield and water use efficiency of spring maize in Northern Huang – Huai – Hai Valley[J]. The Crop Journal, 2015, 3(5): 445 – 450.
- [6] ZHANG P, WEI T, LI Y, et al. Effects of straw incorporation on the stratification of the soil organic C, total N and C:N ratio in a semiarid region of China[J]. Soil and Tillage Research, 2015, 153: 28 – 35.
- [7] LIU N, LI Y, CONG P, et al. Depth of straw incorporation significantly alters crop yield, soil organic carbon and total nitrogen in the North China Plain[J]. Soil and Tillage Research, 2021, 205: 104772.
- [8] LI Y, SONG D, DANG P, et al. Combined ditch buried straw return technology in a ridge-furrow plastic film mulch system: implications for crop yield and soil organic matter dynamics[J]. Soil and Tillage Research, 2020, 199: 104596.
- [9] 崔新卫, 张杨珠, 吴金水, 等. 秸秆还田对土壤质量与作物生长的影响研究进展[J]. 土壤通报, 2014, 45(6): 1527 – 1532.
CUI Xinwei, ZHANG Yangzhu, WU Jinshui, et al. Research progress on the effects of returning straw to fields on soil quality and crop growth[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2014, 45(6): 1527 – 1532. (in Chinese)
- [10] 丁奠元, 冯浩, 赵英, 等. 氨化秸秆还田对土壤孔隙结构的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2016, 22(3): 650 – 658.
DING Dianyuan, FENG Hao, ZHAO Ying, et al. Effect of ammoniated straw returning on soil pore structure[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2016, 22(3): 650 – 658. (in Chinese)
- [11] 张志毅, 熊桂云, 吴茂前, 等. 有机培肥与耕作方式对稻麦轮作土壤团聚体和有机碳组分的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2020, 28(3): 405 – 412.
ZHANG Zhiyi, XIONG Guiyun, WU Maoqian, et al. Effects of organic fertilization and tillage method on soil aggregates and organic carbon fractions in a wheat-rice system[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2020, 28(3): 405 – 412. (in Chinese)
- [12] YANG H, LI Y, ZHAI S, et al. Long term ditch-buried straw return affects soil fungal community structure and carbon-degrading enzymatic activities in a rice-wheat rotation system[J]. Applied Soil Ecology, 2020, 155: 103660.
- [13] EL-NAGGAR A, USMAN A, AL-OMRAN A, et al. Carbon mineralization and nutrient availability in calcareous sandy soils amended with woody waste biochar[J]. Chemosphere, 2015, 138: 67 – 73.
- [14] 张秀梅, 夏俊芳, 张居敏, 等. 水旱两用秸秆还田组合刀辊作业性能试验[J]. 农业工程学报, 2016, 32(9): 9 – 15.
ZHANG Xiumei, XIA Junfang, ZHANG Junmin, et al. Working performance experiment of combination blade roller for straw returning in paddy field and dry land[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(9): 9 – 15. (in Chinese)
- [15] CHEN J, ZHENG M, PANG D, et al. Straw return and appropriate tillage method improve grain yield and nitrogen efficiency of winter wheat[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2017, 16(8): 1708 – 1719.
- [16] 秦宽, 丁为民, 方志超, 等. 犁翻旋耕复式作业耕整机的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2016, 32(16): 7 – 16.
QIN Kuan, DING Weimin, FANG Zhichao, et al. Design and experiment of plowing and rotary tillage combined machine[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(16): 7 – 16. (in Chinese)
- [17] SOMMER R, RYAN J, MASRI S, et al. Effect of shallow tillage, moldboard plowing, straw management and compost addition on soil organic matter and nitrogen in a dry land barley/wheat-vetch rotation[J]. Soil and Tillage Research, 2011, 115 – 116: 39 – 46.
- [18] 林静, 张桐嘉, 田阳, 等. 秸秆深埋还田仿生开沟装置优化与试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(增刊): 50 – 59.
LIN Jing, ZHANG Tongjia, TIAN Yang, et al. Optimization and experiment on bionic deep-buried device for returning straw in field[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(Supp.): 50 – 59. (in Chinese)
- [19] 王秋菊, 焦峰, 刘峰, 等. 秸秆粉碎集条深埋机械还田模式对玉米生长及产量的影响[J]. 农业工程学报, 2018, 34(9): 153 – 159.
WANG Qiuju, JIAO Feng, LIU Feng, et al. Effect of straw pulverization and concentrated deep-buried into field on growth and yield of maize[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(9): 153 – 159. (in Chinese)
- [20] 章志强, 何进, 李洪文, 等. 可调节式秸秆粉碎抛撒还田机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2017, 48(9): 76 – 87.
ZHANG Zhiqiang, HE Jin, LI Hongwen, et al. Design and experiment on straw chopper cum spreader with adjustable spreading device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(9): 76 – 87. (in Chinese)
- [21] 顾峰玮, 胡志超, 陈有庆, 等. “洁区播种”思路下麦茬全秸秆覆盖地花生免耕播种机研制[J]. 农业工程学报, 2016, 32(20): 15 – 23.

- GU Fengwei, HU Zhichao, CHEN Youqin, et al. Development and experiment of peanut no-till planter under full wheat straw mulching based on “clean area planting”[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(20): 15–23. (in Chinese)
- [22] 张秀梅,张居敏,夏俊芳,等. 水旱两用秸秆还田耕整机关键部件设计与试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(11): 10–16.
ZHANG Xiumei, ZHANG Jumin, XIA Junfang, et al. Design and experiment on critical component of cultivator for straw returning in paddy field and dry land[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(11): 10–16. (in Chinese)
- [23] 范围,吴景贵,李建明,等. 秸秆均匀还田对东北地区黑钙土土壤理化性质及玉米产量的影响[J]. 土壤学报, 2018, 55(4): 835–846.
FAN Wei, WU Jinggui, LI Jianming, et al. Effects of straw return on soil physico-chemical properties of chernozem in Northeast China and maize yield therein[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2018, 55(4): 835–846. (in Chinese)
- [24] LI S, LI X, CHEN J, et al. Does straw return strategy influence carbon sequestration and labile fractions? [J]. Agronomy Journal, 2019, 111(2): 897–906.
- [25] LATIFMANESH H, DENG A, LI L, et al. How incorporation depth of corn straw affects straw decomposition rate and C&N release in the wheat-corn cropping system[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2020, 300: 107000.
- [26] GUERIF J, RICHARD G, DURR C, et al. A review of tillage effects on crop residue management, seedbed conditions and seedling establishment[J]. Soil & Tillage Research, 2001, 61(1): 13–32.
- [27] 王美佳,王洋,苏思慧,等. 秸秆还田对土壤水稳性团聚体及其碳分布的影响[J]. 干旱区研究, 2019, 36(2): 331–338.
WANG Meijia, WANG Feng, SU Sihui, et al. Effects of straw turnover on soil water-stable aggregates and soil carbon distribution[J]. Arid Zone Research, 2019, 36(2): 331–338. (in Chinese)
- [28] 赵宏波,何进,李洪文,等. 秸秆还田方式对种床土壤物理性质和小麦生长的影响[J]. 农业机械学报, 2018, 49(增刊): 60–67.
ZHAO Hongbo, HE Jin, LI Hongwen, et al. Effect of straw returning manners on seedbed soil physical properties and winter wheat growth[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(Supp.): 60–67. (in Chinese)
- [29] 宋洁,李志洪,赵小军,等. 秸秆还田对土壤微团聚体特征的影响[J]. 水土保持学报, 2018, 32(5): 116–120.
SONG Jie, LI Zhihong, ZHAO Xiaojun, et al. Effects of straw returning on soil micro-aggregate characteristics[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2018, 32(5): 116–120. (in Chinese)
- [30] 李永磊,宋建农,康小军,等. 双辊秸秆还田旋耕机试验[J]. 农业机械学报, 2013, 44(6): 45–49.
LI Yonglei, SONG Jiannong, KANG Xiaojun, et al. Experiment on twin-roller cultivator for straw returning[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(6): 45–49. (in Chinese)
- [31] 周勇,余水生,夏俊芳. 水田高茬秸秆还田耕整机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2012, 43(8): 46–49.
ZHOU Yong, YU Shuisheng, XIA Junfang. Design and experiment of cultivator for high straw returning in paddy field[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(8): 46–49. (in Chinese)
- [32] 祝英豪,张居敏,曾荣,等. 人字型水旱两用旋埋刀辊设计与试验[J]. 农业机械学报, 2019, 50(4): 49–57, 273.
ZHU Yinghao, ZHANG Jumin, ZENG Rong, et al. Design and experiment of herringbone type rotary blade roller for burying stubble in paddy field and dry land[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(4): 49–57, 273. (in Chinese)
- [33] 魏国梁,张青松,刘立超,等. 犁旋组合式油菜直播机扣袋装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(6): 38–46.
WEI Guoliang, ZHANG Qingsong, LIU Lichao, et al. Design and experiment of plowing and rotary tillage buckle device for rapeseed direct seeder[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(6): 38–46. (in Chinese)
- [34] LIU J, CHEN Y, LOBB D A, et al. Soil-straw-tillage tool interaction: field and soil bin study[J]. Canadian Biosystems Engineering, 2007, 49: 2.
- [35] LIU J, CHEN Y, KUSHWAHA R L. Effect of tillage speed and straw length on soil and straw movement by a sweep[J]. Soil and Tillage Research, 2010, 109(1): 9–17.
- [36] 陈青春,石勇,丁启朔,等. 正反转旋耕作业的秸秆混埋效果比较[J]. 农业工程学报, 2015, 31(9): 13–18.
CHEN Qingchun, SHI Yong, DING Qishuo, et al. Comparison of straw incorporation effect with down-cut and up-cut rotary tillage[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(9): 13–18. (in Chinese)
- [37] 周华,李栋,刘政源,等. 秸秆旋埋还田后空间分布效果仿真与试验[J]. 农业机械学报, 2019, 50(9): 69–77.
ZHOU Hua, LI Dong, LIU Zhengyuan, et al. Simulation and experiment of spatial distribution effect after straw incorporation into soil by rotary burial[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(9): 69–77. (in Chinese)
- [38] 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)
- [39] 方会敏,姬长英, AHMED A T, 等. 秸秆-土壤-旋耕刀系统中秸秆位移仿真分析[J]. 农业机械学报, 2016, 47(1): 60–67.
FANG Huimin, JI Changying, AHMED A T, et al. Simulation analysis of straw movement in straw-soil-rotary blade system

- [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(1): 60–67. (in Chinese)
- [40] BELAL E, OKINDA C, DING Q, et al. Mass-based image analysis for evaluating straw cover under high-residue farming conditions in rice-wheat cropping system[J]. Agricultural Research, 2017, 6(4): 359–367.
- [41] 刘媛媛,王跃勇,于海业,等. 基于多阈值图像分割算法的秸秆覆盖率检测[J]. 农业机械学报, 2018, 49(12): 27–35. LIU Yuanyuan, WANG Yueyong, YU Haiye, et al. Detection of straw coverage rate based on multi-threshold image segmentation algorithm[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(12): 27–35. (in Chinese)
- [42] CHEN X, DING Q, BLASZKIEWICZ Z, et al. Phenotyping for the dynamics of field wheat root system architecture[J]. Scientific Reports, 2017, 7(1): 37649.
- [43] CHEN X, LI Y, HE R, et al. Phenotyping field-state wheat root system architecture for root foraging traits in response to environment × management interactions[J]. Scientific Reports, 2018, 8(1): 2642.
- [44] 陈信信,丁启朔,李毅念,等. 稻茬麦根系构型可视化与三向分型维研究[J]. 农业机械学报, 2015, 46(3): 328–335. CHEN Xinxin, DING Qishuo, LI Yinian, et al. Visualization of post-paddy wheat rooting system and 3-D fractal dimensions [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(3): 328–335. (in Chinese)
- [45] 陈信信,丁启朔,丁为民,等. 基于虚拟植物技术的冬小麦根系 3D 构型测试与分析[J]. 中国农业科学, 2014, 47(8): 1481–1488. CHEN Xinxin, DING Qishuo, DING Weimin, et al. Measurement and analysis of 3D wheat root system architecture with a virtual plant tool kit[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2014, 47(8): 1481–1488. (in Chinese)
- [46] 杨艳山,丁启朔,丁为民,等. 田间原位综合耕作试验台设计与应用[J]. 农业机械学报, 2016, 47(1): 68–74. YANG Yanshan, DING Qishuo, DING Weimin, et al. Design and application of multi-purpose in-situ tillage tool testing platform[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(1): 68–74. (in Chinese)
- [47] 高雅,丁启朔,李毅念,等. 土壤结构的数字图像分析方法与指标[J]. 土壤通报, 2015, 46(3): 513–518. GAO Ya, DING Qishuo, LI Yinian, et al. A digital image processing tool and indices for soil structure[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2015, 46(3): 513–518. (in Chinese)
- [48] 王志山,夏俊芳,许绮川,等. 船式旋耕埋草机螺旋刀辊作业功耗试验[J]. 农业机械学报, 2010, 41(12): 44–47. WANG Zhishan, XIA Junfang, XU Qichuan, et al. Power consumption experiment of rotary tillage and stubble-mulch knife roller[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(12): 44–47. (in Chinese)
- [49] 韩秋萍,丁启朔,潘根兴,等. 基于 Pro/E 的土壤结构与小麦幼苗期根系关系模拟与分析[J]. 中国农业科学, 2010, 43(22): 4598–4604. HAN Qiuping, DING Qishuo, PAN Genxing, et al. Modeling and analyzing the relationship between soil structure and wheat seedling root with Pro/E[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2010, 43(22): 4598–4604. (in Chinese)
- [50] GUAN X K, WEI L, TURNER N C, et al. Improved straw management practices promote in situ straw decomposition and nutrient release, and increase crop production[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 250: 119514.
- [51] 穆心愿,赵霞,谷利敏,等. 秸秆还田量对不同基因型夏玉米产量及干物质转运的影响[J]. 中国农业科学, 2020, 53(1): 29–41. MU Xinyuan, ZHAO Xia, GU Limin, et al. Effects of straw returning amount on grain yield, dry matter accumulation and transfer in summer maize with different genotypes[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2020, 53(1): 29–41. (in Chinese)
- [52] 李志婷,王昌昆,潘贤章,等. 基于模拟 Landsat-8 OLI 数据的小麦秸秆覆盖度估算[J]. 农业工程学报, 2016, 32(增刊 1): 145–152. LI Zhiting, WANG Changkun, PAN Xianzhang, et al. Estimation of wheat residue cover using simulated Landsat-8 OLI datas [J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(Supp. 1): 145–152. (in Chinese)
- [53] AKBOLAT D, EKINCI K. Rotary tiller velocity effects on the distribution of wheat (*Triticum aestivum*) residue in the soil profile[J]. New Zealand Journal of Crop & Horticultural Science, 2008, 36(4): 247–252.