

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2022.11.010

基于精确播深控制目标的播种单体田间台架试验

丁启朔^{1,2} 尤勇^{1,2} 邢全道³ 徐高明^{1,2} 梁磊^{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;

3. 江苏省农垦农业发展股份有限公司, 南京 210031)

摘要: 为了探明长江中下游稻麦轮作区单体精播技术的适配性及其农艺效应, 揭示基于区域土壤力学特征的精密播种机设计原则, 以 2BMYFQ 型免耕播种机单体为例开展田间台架播种试验, 提出符合农机-农艺融合原则的 4 个精播主控目标和技术要素, 探讨 2 种耕作处理方式 (免耕、旋耕)、3 个预定播深 (2.5、4.0、6.0 cm) 和 3 个下压力 (0.6、1.0、1.2 kN) 因子组合下的种子播深、土壤物理变化及小麦出苗效果。结果表明, 播种单体与土壤力学性质交互影响并导致播深变化差异显著, 土壤力学变异造成高达 37.61% 的播深变异, 基于线性弹力张紧特征的下压力控制技术在不合理耕作方式组合下的精确播深控制目标无法实现。现有试验单体既存在土壤对双圆盘开沟器支撑力过大导致的限深轮虚支撑, 也存在土壤支撑力不够且限深轮过度下陷导致农学意义上过深的种子位。单体造成种子位土壤压实状况也受耕作方式及下压力影响, 并最终反映为出苗率的变化。综合比较发现, 稻田原茬免耕、预定播深 4 cm、下压力 1.2 kN 工况下, 实际播深与预定播深差异较小, 播深稳定性高, 出苗率高, 但种沟侧壁压实程度大; 在旋耕条件时最优播深为预定播深 4 cm 和下压力 1.0 kN 组合; 旋耕处理的单体播深控制整体效果优于免耕。因此智能精密播种技术应首先探明土壤力学条件和农艺播深目标的合理下压力控制策略, 实现基于“播种单体-土壤力学关系”的单体创新设计和智能化土壤力学在线检测系统是区域精播技术的关键。

关键词: 播种单体; 播种深度; 下压力; 台架试验

中图分类号: S223.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2022)11-0100-08

OSID:



Field Bench Test of Seeding Unit Based on Precise Seeding Depth Control Objective

DING Qishuo^{1,2} YOU Yong^{1,2} XING Quandao³ XU Gaoming^{1,2} LIANG Lei^{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

3. Jiangsu Provincial Agriculture Reclamation and Development Corporation, Nanjing 210031, China)

Abstract: The mechanisms governing the precision of seeding depth and the related agronomic outcomes are site-specific. Regional soil mechanics in the Yangtze River Basin plays a role in affecting the relationship between the seeding unit and the soil, which is a key consideration for machine design. Using four technical objectives for evaluation, a field bench experiment was conducted in the field using a market available seeding unit (2BMYFQ) to illustrate the tool-soil interactions. Two tillage treatments (i. e. no-till and rotary till), three depth settings (i. e. 2.5 cm, 4.0 cm and 6.0 cm) and three downward forces (i. e. 0.6 kN, 1.0 kN and 1.2 kN) were adopted in the experiment. Seeding depth, soil properties after seeding and seedling establishment rate were measured. Results showed that the interactions between the seeding unit and soil mechanics affected seeding depth significantly. The maximum seeding depth variation was 37.61%. Results showed that linear elastic force depth control assembly plus the poorly managed seedbed made it impossible for precision seeding depth control. The mechanisms leading to the poorly controlled seeding depth were identified, including both the void soil support and the over sinkage of the ground wheel. Meanwhile, the seeding unit affected soil mechanics significantly, which in due resulted into non-uniform seedling establishment rate. Results indicated that the combination of the no-till, 4 cm depth setting and 1.2 kN downforce provided the best precision of the

收稿日期: 2021-12-21 修回日期: 2022-04-03

基金项目: 江苏省农业生态保护与资源利用项目(2021-SJ-100-03)和江苏省农垦农业机械科技专项(NK202033-202034)

作者简介: 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

seeding depth. While in the tilled soil, 4 cm depth setting and 1.0 kN led to the best result. Overall, the depth control performance in the tilled seedbed condition was higher than that in no-tilled soil. The research result indicated that suitable downforce selection was inherently related to both soil mechanics and agronomically defined seeding depth. Inter-relationship between the seeding unit and soil mechanics as well as on-line soil monitoring system for downforce control were key measures for precision seeding in a given agricultural zone.

Key words: seeding unit; seeding depth; downforce; bench test

0 引言

中国的小麦播种机产品类型丰富,不同类别播种机的设计差异及地域特色明显。其中,长江中下游区域用于稻茬小麦播种的机具多为全幅、宽幅、条带撒播或旋播等轻简机械化特点,相关产品(如黄鹤、豪丰、良友、欣田、清淮等)多采用复式作业的全幅旋耕或表土浅旋处理。生产中集约化稻麦轮作制周年机具下地次数多,机具压实和微地貌破坏严重^[1],因此,应研发播种行或苗带的单体仿形机具才可有效适配微地貌变异,单体仿形方式播种机设计是实现精确种植农艺要求的首选技术,而探明单体精确播种技术在稻麦轮作区所受诸多因素的影响规律是推动精播机理论与技术发展的关键。

在农机-农艺融合的新背景下,区域适应性的单体精播技术应兼顾农机和农艺的多方面要求,相关科学问题涉及:播种单体在不同土壤力学属性和苗床物理条件的适应性;单体的各设计参数及相互间耦合关系及其对精播质量的影响;区域农业的精播农艺要求,如精确播深要求下的单体允许变异范围;播种单体设计参数间的组合及单体-土壤力学耦合的精播农艺效果(如出苗率)。

前期农机-农艺融合的精播技术研究表明,播种单体或开沟器的设计参数、土壤条件、地表秸秆等因子影响精播质量^[2],也影响种子出苗、作物长势和产量^[3]。因此,精确播种技术的关键是将每粒种子以理想播深置于土壤中,促进种-土接触,提高种子出苗率和苗高一一致性^[4],从而降低株间竞争^[5],构建合理群体结构^[6],实现高产和生态效应^[7]。

针对当前稻茬麦种植技术多为等深撒播和宽幅条播的现状^[8],难以满足精确农艺要求^[9],江苏农垦集团等大范围应用的新型播种机也面临精播技术突破的瓶颈^[10]。将全幅作业转变为单体精播显然更利于地表仿形和精确控深,从而最大化降低大田环境的复杂干扰(地表起伏、留茬、秸秆覆盖等),提高精播质量。

近年来播种单体的地表仿形精播技术出现了较多创新,相关学者提出了单体的平行四连杆动力学模型^[11]、开沟深度数学模型^[12]、以拉格朗日方程解

析的弹簧四杆仿形机构深度稳定性模型^[13]等单体动力学和理论。单体的主动仿形方面,也研发出基于力反馈的四连杆液压电控仿形播深控制系统^[14]、基于气囊压力控制的四连杆仿形播深控制系统^[15]等,配合使用多种传感器,实时获取微地貌、单体下压力等监测数据并实现动态控制。

不过,对各类播种单体控制及播深精确控制技术的研究较少重视不同农业区具体田间环境下的单体精播农机-农艺融合与适配性。由于不同的农业生态区影响机械化耕播的土壤力学特点所决定的单体精播性能的差异性,因此需要着重研究播种单体在长江中下游区域水稻土的下压力控制,同时结合农艺效果作为定量指标,以市场成熟的单体产品为研究对象,探究该区代表性稻麦轮作制的播种单体下压力及播深精确控制及效果,深入探讨基于农机-农艺融合的上述 4 方面的技术特征,量化单体精播力学及精确播深控制的系统行为与效应,以期对稻麦轮作制的稻茬麦精确播种单体设计提供基础数据和参考。

1 研究方法

1.1 试验地概况

田间试验于 2020 年 11 月水稻收获后进行,位于南京市六合区八百桥(118°59'E,31°98'N),地势平坦,该地区常年稻麦轮作,土壤类型为壤质粘土,属于长江中下游地区代表性稻麦轮作区。小麦供试品种为宁麦 13,0~20 cm 土层物理参数见表 1。试验前人工清除地表留茬,后将稻茬田进行 2 种耕作处理(免耕、旋耕)。免耕对应保护性耕作生产模式,旋耕处理为常规稻茬麦种植的耕作方式。

表 1 0~20 cm 土层基础物理参数

Tab. 1 Basic physical properties in 0~20 cm soil layer

土层深度/cm	容重/(g·cm ⁻³)	含水率/%	孔隙度/%
0~5	1.24	18.57	53.04
5~10	1.22	23.28	53.89
10~15	1.34	24.62	49.51
15~20	1.55	21.00	41.56

1.2 试验方法

试验所用免耕播种单体为大华宝来 2BMYFQ 系列产品,为市场成熟的中位仿形单体产品

(图1a),为实现精确控制及测试,将单体挂接在土壤耕作原位综合测试平台上^[16](图1b),试验平台提供牵引动力。测试过程车水平匀速运动,牵引速度0.5 m/s,较低的牵引速度有利于减小速度因子对播种质量的影响^[17]。

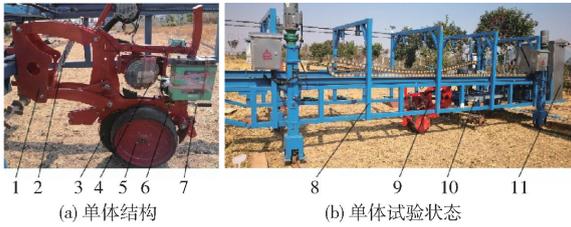


图1 田间原位综合试验平台

Fig.1 Field in situ comprehensive test platform

1.平行四杆机构 2.下压力控制弹簧 3.开沟器 4.电驱动精确排种器 5.限深轮 6.限深块 7.摇柄 8.试验台 9.播种单体 10.牵引小车 11.控制柜

试验前标定理论开沟深度与摇柄位置关系(图2a),将带刻度的木方(间隔1 cm)置于限深轮下方,调节摇柄,使刻度表数值与理论开沟深度(即开沟器底端至限深轮与木材接触平面的距离)一一对应,标定结果如表2所示。单体下压力则由被

动仿形的弹簧位置调节,并进行单体下压力标定(图2b)^[18],得到弹簧下压力控制的3个挡位(低、中、高)分别对应0.6、1.0、1.2 kN。

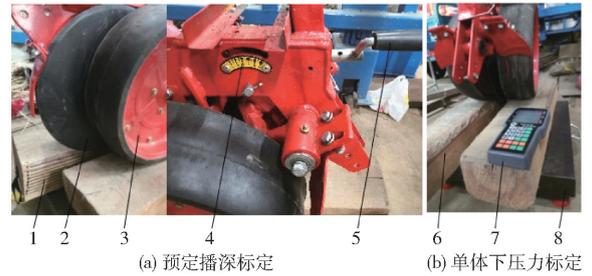


图2 预定播深与单体下压力标定

Fig.2 Calibration of predetermined sowing depth and monomer downpressure

1.刻度尺 2.开沟器 3.限深轮 4.摇柄刻度 5.摇柄 6.限深轮支撑架 7.电子秤显示器 8.电子秤

为保障精确排种的可靠性,使用电驱动精确排种器进行精确排种。为了保持种沟形态并便于后续测试,拆除覆土器,播后先将标杆横置跨越播种沟,得到原始地貌高程基准,后测取各点的播深数据、土壤硬度等数据。完成测试工作后人工覆土盖籽,后续按照农艺统计方法测取出苗率等数据。

表2 开沟深度与单体刻度表数值对应关系

Tab.2 Corresponding relationship between furrow depth and monomer scale

序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
摇柄刻度	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5	5.5	6
理论开沟深度/cm	0.7	1.6	2.5	3.2	4.0	5.1	6.0	7.1	8.0	9.2	10

理论开沟深度(即预定播深)设2.5、4.0、6.0 cm共3个水平;单体下压力设0.6、1.0、1.2 kN 3个水平,共9个组合,3次重复,随机区组试验。试验在一块长50 m、宽10 m试验地进行,每次测试的有效行程为5 m,去除前后各1 m的非稳定工作区,取中间3 m为试验数据采集区,为避免各行交互影响,行距为40 cm,小麦播后遵照农学常规进行田间管理。

1.3 测试项目与方法

1.3.1 实际播深

为保证试验测试单体下压力和播种深度的准确性,测取单体作业后的实际开沟深度,用于考察单体在水稻土条件下的播种深度控制效果,实际播深反映出单体限深轮的地表接触平面与种沟底部的距离,也称为实际开沟深度。根据NY/T 1768—2009《免耕播种机质量评价技术规范》计算实际播深的平均值、标准差和变异系数。

1.3.2 土壤紧实度

播种单体的播深控制主要依靠限深轮,单体下压力的加载导致限深轮对种沟两侧(即种沟侧壁)

土壤产生一定挤压作用,易造成种沟侧壁压实。播种作业完成后,采用TJSD750II型土壤紧实度测定仪(浙江托普仪器有限公司),沿沟壁两侧限深轮作业轨迹各均匀选取5个点测取0~15 cm土层的紧实度,各测点间隔20 cm(图3)。

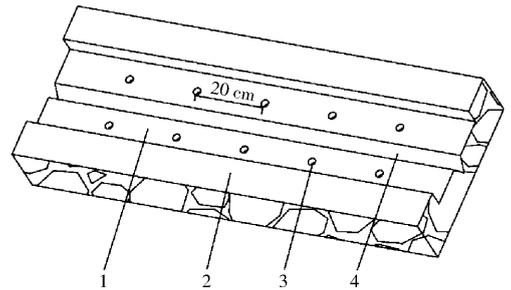


图3 土壤紧实度样点示意图

Fig.3 Schematic of soil compactness sample points

1.限深轮轨迹 2.地表 3.样点 4.种沟

1.3.3 单体限深轮下陷量

实际作业过程发现,水稻土条件的单体限深轮会下陷,因此,播种作业完成后,以原地表为基准,测量限深轮的下陷量,分别在种沟两侧选取5个点测定,测量点之间间隔20 cm,并计算其平均值。

1.3.4 出苗率

播后 7 d 进行出苗率统计, 每个处理取 0.5 m 作为一个测试单位, 3 次重复^[19], 出苗率为出苗数与播种数的百分比。

1.4 数据统计与分析

采用 Excel 2003 处理数据和 SPSS 23 统计软件中最小显著性差异检验法 (LSD) 进行方差分析和多重比较, 用 origin 2018 进行绘图。

2 结果与分析

2.1 不同技术参数组合对实际播深的影响

水稻土的不同耕作处理影响苗床紧实度, 与免耕地土壤紧实状态相比, 旋耕地松软, 因此从图 4 中 2.5 cm 预定播深与实际播深的对比发现 (图中不同大写字母表示相同单体下压力下不同预定播深间差异显著, 不同小写字母表示相同预定播深下不同单体下压力间差异显著, 下同), 3 个下压力都造成限深轮的下陷, 限深轮下陷导致实际播深高于预定播深, 而且下压力的逐步增加也造成实际播深超出预定播深更大 (即统计均值线高出虚线部分)。此外, 从表 3 中对比发现, 旋耕地实际播深变异系数明显低于免耕地。

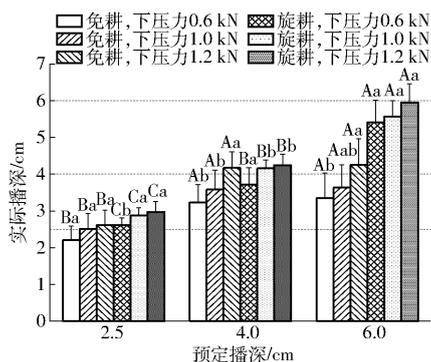


图 4 不同技术参数组合对实际播深的影响

Fig.4 Influence of different technical parameter combinations on actual sowing depth

图 4 显示在一个确定的预定播深-下压力组合内同时出现了实际播深低于或者高于预定播深的情况 (即, 实际播深均值高于或低于虚线)。下压力 0.6 kN 的 3 个预定播深条件都出现实际播深达不到预期的情况, 表明此时的张紧弹簧-土壤支撑力关系导致免耕地精确控深失效。在机械设计原理上, 则体现为弹簧预设挡位提供的压缩量及下压力严重不足, 双圆盘开沟器在紧实化免耕地所受土壤的支撑力很容易高于预设下压力, 从而导致弹簧在初始压缩量的基础上发生进一步弹性变形。可见, 现有产品基于线性刚度的下压弹簧设计难于合理匹配该工况的“单体-土壤力学关系”, 基于水稻土的土壤

力学条件设计非线性专用弹簧是实现部分工况下精确播深控制的一个重要方式。

表 3 不同技术参数组合对实际播深平均值及变异系数的影响

Tab.3 Influences of different technical parameter combinations on mean value of actual sowing depth and variation coefficient

预定播深/ cm	下压力/ kN	指标			
		免耕地播 深平均值/ cm	免耕地播 深变异 系数/%	旋耕地播 深平均值/ cm	旋耕地播 深变异 系数/%
		0.6	2.20	17.72	2.61
2.5	1.0	2.51	16.66	2.88	7.25
	1.2	2.62	15.25	2.97	9.65
4.0	0.6	3.23	15.11	3.72	12.25
	1.0	3.58	14.72	4.16	5.50
6.0	1.2	4.17	10.35	4.24	7.17
	0.6	3.35	20.34	5.41	11.10
6.0	1.0	3.63	17.03	5.57	7.70
	1.2	4.25	18.78	5.94	8.62

图 4 进一步表明, 对所有预定播深、下压力及耕作处理而言, 下压力的增加导致实际播深逐渐增加。但在免耕地条件下, 除 1.2 kN 的实际播深基本能够高于预定播深外, 其他处理都难以达到预定播深, 其中的极端情况发生在免耕地的预定播深 6 cm 处理, 该处理的每一个结果虽较前一处理 (4 cm) 都有所增加, 但实际播深距离预定目标差距太大, 3 个下压力所得实际播深的均值变差高达 37.61%, 完全无法实现“单体-土壤力学关系”条件下的精确播种目标。

近年来 NIELSEN 等^[20]研发出 iGPS 精确播深控制系统, 可以实现在 55 mm 目标播深工况下的播深变差控制在 ± 1.2 mm 之间。本文所得结果表明, 单体下压力、限深轮下陷、开沟器所受土壤支撑力、限深轮虚支撑等多重动力学行为和发生机制同时影响播深的精确控制, 任何的精确播深控制策略都需要基于田间真实工况, 表明单体产品针对保护性耕作 (免耕播种) 的农艺适应性及其对南方水稻土等工况的匹配性至关重要。

AHMAD 等^[21]在南方水稻土条件的圆盘开沟器试验表明, 种沟深度从 3 cm 增加到 9 cm 所需下压力从 660.5 N 增加到 1 241 N, MAGALHAES 等^[22]使用齿状圆盘得到播深 70 mm 条件下下压力变化范围为 1.5 ~ 2.1 kN, 这些前期研究成果与本文所得结果基本相近。然而就免耕播种机的整机设计看, 一个 12 行播种机需要下压力 14.4 kN, 这进一步为稻茬麦的轻量化播种装备研制提出了限定条件。稻作

制或粘性土需要轻量化播种机^[10],在农机轻量化趋势下,合理的播深控制必然需要拖拉机的重心转移设计,才能达成拖拉机播种机组的机组牵引力学合理性,然而现有的单体产品仅提供简单悬挂方式,长江中下游区域现有的播种机产品也较少考虑下压力与播深控制的机械设计动力学问题。

WANG等^[23]针对北方旱作的双圆盘开沟器研究发现,W型种沟、种沟回土、松散粗糙的种沟壁、回落沟底的大土堡等要素显著影响播种深度一致性。本文针对南方水稻土的试验过程没有出现这些现象,即使在已耕地碎土条件下,双圆盘开沟器形成了较为整齐的种沟壁且V型沟形干净整洁(图5),表明高湿粘重水稻土具有良好的双圆盘开沟性能,以及相较于旱作制土壤条件更为稳定的播深控制。



图5 免耕地(左)与旋耕地(右)种沟沟形

Fig.5 Gully shape of no-arable land and rotary cultivated land

图6解析了现有弹簧-平行四杆机构播种单体播深精确控制原理(T 为弹簧拉力, N ; G_0 为除限深轮外单体质量,kg; G_1 为限深轮质量,kg; F_{r1} 为地面

对单体的水平阻力, N ; F_{w1} 为地面对单体垂直作用分力, N ; F_{r2} 为地面对限深轮的水平阻力, N ; F_{w2} 为地面对限深轮垂直作用分力, N ; h 为下陷量,cm; H 为实际播深,cm; F 为限深块对限深轮支臂的作用力, N),表明在不同预定播深-下压力-土壤力学组合下,实现精确播深的实时在线判断和控制是非常复杂的智能农机装备研究课题。理想的工作状态(图6b)在田间的高度动态工况下难于维持:要么单体因土壤紧实度增加造成对(双圆盘)开沟器过大的向上支撑,从而令限深轮虚支撑,实际播深达不到要求(图6a);要么会因水稻土软烂,地面无法提供可靠的限深支撑力,导致限深轮下陷明显,虽然按照国标规定的测试方法所得播种深度稳定,但是因地表下陷严重,造成实质性的农学意义上种子位过深(图6c)。3种动态情况都能够在图7所示的限深轮下陷量数据与图4所示数据的关系中体现出来。因此,长江中下游区域湿烂地精播技术更需要进一步重视播种机行进过程中土壤对开沟器的支撑力动态信息。土壤力学的状态与空间变异需要下压力的实时同步跟进,不足的下压力无法淹没土壤对开沟器支撑力干扰导致的播深不足,过大的下压力又会造成限深轮的深陷,从而导致种子位实际深度超过预定播深。明析两种影响播深精确性的发生机理所需的非线性刚度弹簧、土壤力学在线检测、新型开沟器设计等技术装备都需要深入研究。

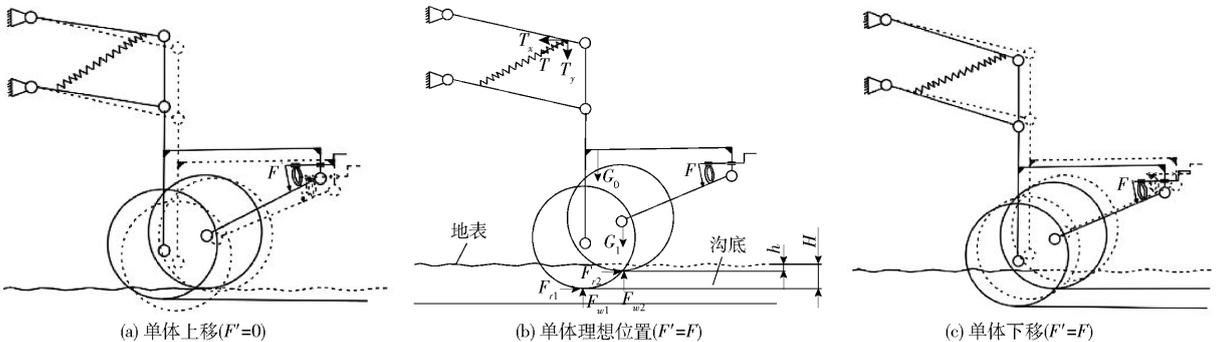


图6 播种单体不同状态下限深块受力示意图

Fig.6 Stress diagrams of seeding monomer at different lower limits

图7为不同技术参数组合对限深轮下陷量的影响结果。试验结果表明耕作方式和下压力对下陷量的影响十分显著($p < 0.05$),预定播深对下陷量的影响不显著。免耕条件下,下陷量在0.28~0.75 cm之间,变化较小。然而,旋耕条件下,下陷量在3.41~8.35 cm之间,随着单体下压力的增加下陷量逐渐增大。

2.2 不同技术参数组合对土壤紧实度的影响

图8显示不同耕作方式和不同预定播深-下压力组合下限深轮对种沟侧壁0~15 cm土层土壤紧

实度的影响结果,不同预定播深-下压力组合均提高了种沟侧壁土壤紧实度。预定播深一定时,下压力与土壤紧实度成正比;下压力一定时,预定播深的增加对土壤紧实度有减小趋势。对于不同耕作方式,随着土层深度的增加土壤紧实度变化趋势也有所区别。免耕地中(图8a),土壤紧实度随土层深度的增加总体呈“增大-减小-递增”变化趋势,在0~7.5 cm表层土壤产生一个波峰变化,且峰值都大于1 MPa,7.5 cm以下土层土壤紧实度都呈递增趋势;旋耕地中(图8b),土壤紧实度随土层深度的增加总

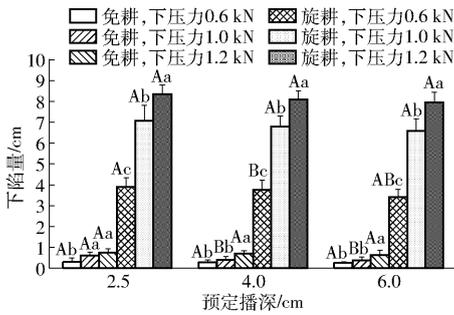


图 7 不同技术参数组合对限深轮下陷量的影响

Fig. 7 Influence of different technical parameter combinations on sag of depth gauge wheel

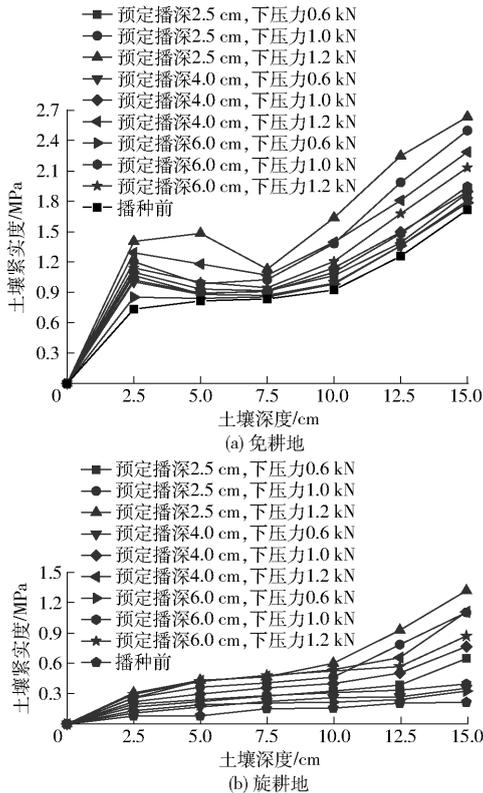


图 8 不同技术参数组合下 0~15 cm 土壤紧实度变化曲线

Fig. 8 Change curves of soil compactness in 0~15 cm under different combinations of technical parameters

体呈递增趋势。

对所有预定播深、下压力以及耕作处理方式而言,单体控深机构中的限深轮在播种作业过程中对种沟侧壁土壤产生了压实作用,提高了种沟侧壁土壤紧实度,这与 HANNA 等^[24]研究结果相一致,下压力对 0~15 cm 土层的土壤紧实度都相应高于播种前土壤紧实度,单体下压力越大产生的相应土壤紧实度越大。特别情况下,免耕地中下压力在 0~7.5 cm 土层范围内土壤紧实度变化曲线产生了一个“波峰”变化,且峰值较高,可能在该层产生了一个压实影响域。其原因可能是单体下压力在播种作业过程中对种沟侧壁土壤产生了一定的压实作用,表层以下土壤受单体下压力影响小(图 9)。柏建

彩^[25]针对水稻土的压实研究也表明,表层土对加载压力有一定的抵消作用,但与免耕地表现出的局部“波峰”现象不同,旋耕地的种沟侧壁压实随着土层深度的增加逐渐增大。

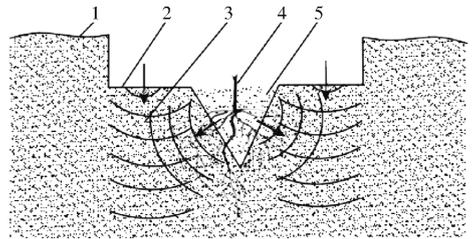


图 9 限深轮与开沟器形成的种沟侧壁压实影响域示意图

Fig. 9 Schematic of compaction area of seed ditch side wall formed by depth gauge wheel and ditch opener
1. 地表 2. 压实面 3. 压实影响域 4. 小麦 5. 种沟

2.3 单体不同工作参数组合对出苗率的影响

前人研究表明,过高的单体下压力产生的种沟侧壁压实会影响种子根系生长^[26]。本研究显示,免耕地单体下压力造成不同程度的种沟侧壁压实导致不同处理的出苗率差异显著(表 4,表中不同大写字母表示相同单体下压力下不同预定播深间差异显著,不同小写字母表示相同预定播深下不同单体下压力间差异显著)($p < 0.05$)。试验研究发现土壤紧实度增加至 2 MPa 时,根系长度显著减小^[27],结合图 8 所示土壤紧实度数据可见,水稻土种沟壁的紧实化影响稻茬麦的生长,因此,长江中下游区域水稻土条件的精确播种技术所面临的农机-农艺融合更加困难。

表 4 不同技术参数组合的种子出苗率

Tab. 4 Seed emergence rate of different technical parameter combinations

预定播深/cm	下压力/kN	免耕地出苗率/%	旋耕地出苗率/%
2.5	0.6	(65.38 ± 3.1) ^{Aa}	(71.79 ± 4.8) ^{Ba}
	1.0	(64.10 ± 6.5) ^{Aa}	(75.64 ± 3.1) ^{Ba}
	1.2	(67.95 ± 3.6) ^{Aa}	(74.36 ± 4.8) ^{Ba}
4.0	0.6	(69.23 ± 3.1) ^{Ba}	(76.92 ± 5.4) ^{Aa}
	1.0	(70.51 ± 4.8) ^{Bab}	(82.05 ± 3.6) ^{Ab}
	1.2	(74.07 ± 3.0) ^{Bb}	(80.77 ± 3.1) ^{Bb}
6.0	0.6	(67.95 ± 4.8) ^{ABa}	(55.13 ± 1.8) ^{Ca}
	1.0	(71.79 ± 3.6) ^{Ba}	(51.28 ± 1.8) ^{Ca}
	1.2	(70.51 ± 3.6) ^{Aa}	(46.15 ± 6.3) ^{Aa}

表 4 也反映了耕作方式和预定播深对种子出苗率的显著影响。前人研究表明,过浅或过深的播深都不利于种子出苗^[28]。本试验发现,预定播深对出苗率有显著影响,且预定播深 4 cm 的整体出苗效果最好,且旋耕地较免耕地提高 12.12%,无论是较浅的预定播深 2.5 cm 还是较深的预定播深 6 cm,出苗率都明显下降。免耕地中,预定播深 4 cm 较预定播

深 2.5 cm 和 6.0 cm 出苗率分别提高 8.30%、1.71%；旋耕地中，预定播深 4 cm 较预定播深 2.5 cm 和 6 cm 的出苗率分别提高 8.09%、36.37%。表明预定播深较浅，容易造成种子晾干，易受冻害，出苗率低，这与郑亭等^[29]研究一致。预定播深较深，导致播种阻力加大，播深合格率低，易出现断垄现象，此外也易出现闷种、烂籽现象，降低了种子出苗率。因此，水稻土条件下，精确播种技术应将每粒种子置于精确控制的土层中，提供种子最理想的萌发环境，是获得较高出苗的关键因素。此外，除了免耕地预定播深 6 cm 的情况特殊外，旋耕处理的种子出苗率整体高于免耕地，这主要是旋耕改善了土壤结构，降低了土壤紧实度，创建了适宜的地表微气候，利于种子出苗^[30-31]。可见，在今后开发新型免耕复式精密播种机时，必须充分考虑到机具的前置合理耕作工艺环节。

3 结论

(1) 播种单体与土壤力学性质交互影响对精播农艺要求不同。原茬免耕和旋耕条件下的最优播深

分别为预定播深 4 cm、下压力 1.2 kN 以及预定播深 4 cm、下压力 1.0 kN，实际播深与预定播深差异较小，播深稳定性高，且旋耕处理的单体播深控制整体效果优于免耕。

(2) 播种单体在不同土壤力学属性和苗床物理条件的适应性不同。对所有预定播深、下压力以及耕作处理方式而言，限深轮在播种作业过程中对种沟侧壁土壤产生了土壤压实作用，在免耕地 0 ~ 7.5 cm 表层土壤紧实度曲线呈“波峰”变化，且峰值大于 1 MPa。

(3) 播种单体不同设计参数间的组合对精播农艺效果不同。对所有预定播深、下压力以及耕作处理方式而言，预定播深 4 cm 出苗率最高，且旋耕地较免耕地提高 12.12%。

(4) 针对长江中下游区域稻麦轮作制的稻茬田播种单体试验表明，耕作方式、农艺播深目标、单体下压力等多方面技术参数都影响到种子位的准确性和小麦出苗率，表明在该区域实现精确控深目标的精密播种技术的复杂性和单体设计所需考虑因素的多样性。

参 考 文 献

- [1] 梁磊,陈信信,孙克润,等. 长江下游稻麦轮作区机收对土壤扰动的影响特征[J]. 南京农业大学学报,2020,43(1):186-193. LIANG Lei, CHEN Xinxin, SUN Kerun, et al. Effects of harvester on soil disturbance in rice-wheat rotating areas in the lower reaches of Yangtze River region[J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 2020, 43(1):186-193. (in Chinese)
- [2] BIANCHINI A, MAGAIHAES P S G. Evaluation of coulters for cutting sugar cane residue in a soil bin [J]. Biosystems Engineering, 2008, 100(3):370-375.
- [3] BURCE M E C, KATAOKA T, OKAMOTO H, et al. Seeding depth regulation controlled by independent furrow openers for zero tillage systems[J]. Engineering in Agriculture, Environment and Food, 2013, 6(1):13-19.
- [4] 何进尚,袁汉民,张维军,等. 密度、播种深度对宁夏引黄河区早熟冬小麦的影响[J]. 江苏农业科学,2017,45(24):63-67. HE Jinshang, YUAN Hanmin, ZHANG Weijun, et al. Effects of planting density and sowing depth on early maturing winter wheat in Ningxia Yellow River irrigation area[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2017, 45(24):63-67. (in Chinese)
- [5] 张作为,史海滨,刘德平,等. 小麦/向日葵间作群体水盐运移机理及种间竞争能力研究[J]. 农业机械学报,2018,49(3):243-251. ZHANG Zuwei, SHI Haibin, LIU Deping, et al. Water and salt migration mechanism and competitive ability in wheat-sunflower intercropping system [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(3):243-251. (in Chinese)
- [6] 孔令英,赵俊晔,于振文,等. 宽幅播种条件下种植密度对小麦群体结构和光能利用率的影响[J]. 麦类作物学报,2020,40(7):850-856. KONG Lingying, ZHAO Junye, YU Zhenwen, et al. Effect of planting density on population structure and light use efficiency of wheat under wide-width sowing conditions[J]. Journal of Triticeae Crops, 2020, 40(7):850-856. (in Chinese)
- [7] 赵广才,郝德有,常旭虹,等. 小麦立体匀播技术[J]. 农业科技通讯,2015(7):184-186. ZHAO Guangcai, HAO Deyou, CHANG Xuhong, et al. Technology of three-dimensional uniform sowing of wheat[J]. Bulletin of Agricultural Science and Technology, 2015(7):184-186. (in Chinese)
- [8] 罗伟文,顾峰玮,吴峰,等. 全秸硬茬地碎秸行间集覆小麦播种机设计与试验[J]. 农业机械学报,2019,50(12):42-52. LUO Weiwen, GU Fengwei, WU Feng, et al. Design and experiment of wheat planter with straw crushing and inter-furrow collecting mulching under full amount of straw and root stubble cropland[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(12):42-52. (in Chinese)
- [9] 刘富玺. 试验小区的小麦精密播种装备及测试评价[D]. 南京:南京农业大学,2019. LIU Fuxi. Test plot evaluation of precision seeding equipment of wheat[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2019. (in Chinese)
- [10] 朱松,何彦平,刘天星,等. 粘土地稻茬麦轻型反旋控深播种机研究[J]. 农业开发与装备,2021(7):42-46. ZHU Song, HE Yanping, LIU Tianxing, et al. Research on light counter rotary control deep seeder for rice and wheat in clay soil [J]. Agricultural Development and Equipments, 2021(7):42-46. (in Chinese)

- [11] 张守勤,胡树荣,马成林. 精密播种单体的动力学分析[J]. 农业机械学报,1984,15(4):26-33.
ZHANG Shouqin,HU Shurong,MA Chenglin. The dynamic analysis of the precision drill unit[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,1984,15(4):26-33. (in Chinese)
- [12] 蒋金琳,龚丽农,王明福. 免耕播种机单体工作性能试验研究[J]. 农业工程学报,2000,16(5):64-66.
JIANG Jinlin,GONG Linong,WANG Mingfu. Study on the working performance of the no-tillage planter unit[J]. Transactions of the CSAE,2000,16(5):64-66. (in Chinese)
- [13] 白晓虎,李芳,张祖立,等. 基于 ADAMS 的免耕播种机仿形机构弹簧参数优化[J]. 干旱地区农业研究,2014,32(6):268-272.
BAI Xiaohu,LI Fang,ZHANG Zuli,et al. Parameter optimization for the profiling mechanism spring of no-till planter based on ADAMS[J]. Agricultural Research in the Arid Areas,2014,32(6):268-272. (in Chinese)
- [14] 付卫强,董建军,梅鹤波,等. 玉米播种单体下压力控制系统设计与试验[J]. 农业机械学报,2018,49(6):68-77.
FU Weiqiang,DONG Jianjun,MEI Hebo,et al. Design and test of maize seeding unit downforce control system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2018,49(6):68-77. (in Chinese)
- [15] 高原源,王秀,杨硕,等. 播种机气动式下压力控制系统设计与试验[J]. 农业机械学报,2019,50(7):19-29,83.
GAO Yuanyuan,WANG Xiu,YANG Shuo,et al. Design and test of pneumatic downforce control system for planting[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2019,50(7):19-29,83. (in Chinese)
- [16] 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)
- [17] FATTAHI S H,KHODAEI M,NAVID H. Evaluation of corn planter under travel speed, working depth, pressure wheel and cone index[J]. CIGR Journal,2015,17(4):73-80.
- [18] 白慧娟,方宪法,王德成,等. 玉米播种机播深和压实度综合控制系统设计与试验[J]. 农业机械学报,2020,51(9):61-72.
BAI Huijuan,FANG Xianfa,WANG Decheng,et al. Design and test of control system for seeding depth and compaction of corn precision planter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2020,51(9):61-72. (in Chinese)
- [19] 李海康,丁启朔,孙克润,等. 稻茬小麦单粒精播的幼苗密度效应[J]. 江苏农业学报,2019,35(6):1316-1322.
LI Haikang,DING Qishuo,SUN Kerun,et al. Seedling density effects of post-paddy wheat under precision seeding[J]. Jiangsu Journal of Agricultural Sciences,2019,35(6):1316-1322. (in Chinese)
- [20] NIELSEN S K,NORREMARK M,GREEN O. Sensor and control for consistent seed drill coulter depth[J]. Computers and Electronics in Agriculture,2016,127:690-698.
- [21] AHMAD F,DING W,DING Q,et al. 3-D DEM modeling of single disc furrow opener draft force in no-till paddy soil[J]. International Agricultural Engineering Journal,2015,24(2):17-29.
- [22] MAGAIHAES P S G,BIANCHINI A,BRAUNBECK O A. Simulated and experimental analyses of a toothed rolling coulter for cutting crop residues[J]. Biosystems Engineering,2007,96(2):193-200.
- [23] WANG W,DIAO P,JIA H,et al. Design and experiment evaluation of furrow compaction device with opener for maize[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering,2020,13(2):123-131.
- [24] HANNA H M,STEWART B L,ALDINGER L. Soil loading effects of planter depth-gauge wheels on early corn growth[J]. Applied Engineering in Agriculture,2010,26(4):551-556.
- [25] 柏建彩. 使用土压力传感技术的水稻土应力传递特性研究[D]. 南京:南京农业大学,2014.
BAI Jiancai. Stress transmission of paddy soil with soil stress sensors[D]. Nanjing:Nanjing Agricultural University,2014. (in Chinese)
- [26] RAPER R L,KIRBY J M. Soil compaction:how to do it,undo it,or avoid doing it[M]. American Society of Agricultural and Biological Engineers,2006.
- [27] BENGOUGH A G,MCKENZIE B M,HALLETT P D,et al. Root elongation,water stress,and mechanical impedance;a review of limiting stresses and beneficial root tip traits[J]. Journal of Experimental Botany,2011,62(1):59-68.
- [28] 易峰,钱双,许泽华,等. 不同播种深度对小麦生长及其产量的影响研究[J]. 上海农业科技,2019(3):55-57.
YI Feng,QIAN Shuang,XU Zehua,et al. Effects of different sowing depth on wheat growth and yield[J]. Shanghai Agricultural Science and Technology,2019(3):55-57. (in Chinese)
- [29] 郑亭,樊高琼,王秀芳,等. 耕作方式、播深及覆土对机播套作小麦苗素质的影响[J]. 农业工程学报,2011,27(5):164-168.
ZHENG Ting,FAN Gaoqiong,WANG Xiufang,et al. Effect of tillage managements,sowing depth and soil-covering on the seedlings quality of mechanical sowing wheat under intercropping condition[J]. Transactions of the CSAE,2011,27(5):164-168. (in Chinese)
- [30] 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)
- [31] 聂胜委,张浩光,张巧萍,等. 立式旋耕对小麦生长季土壤紧实度及产量的影响[J]. 农业资源与环境,2021,38(1):36-42.
NIE Shengwei,ZHANG Haoguang,ZHANG Qiaoping,et al. Effects of vertical rotary on wheat yield and soil compaction during wheat growing seasons[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment,2021,38(1):36-42. (in Chinese)