

2BH-3型玉米行间播种机设计与试验*

贾洪雷^{1,2} 姜鑫铭¹ 郭明卓¹ 赵佳乐¹ 王福兰¹ 王立春^{1,3}

(1. 吉林大学生物与农业工程学院, 长春 130025; 2. 吉林大学工程仿生教育部重点实验室, 长春 130025;
3. 吉林省农业科学院, 长春 130124)

摘要: 针对玉米等行距留茬覆盖行间(沟台)互作种植模式的农艺要求,设计了2BH-3型行间播种机,可在行间一次完成施肥、播种、覆土和镇压等作业。为了解决行间播种机纵向尺寸过大的问题,设计了多功能行走轮,可同时实现仿形、限深、传动、覆土、镇压和碎土等功能。应用 EDEM 软件对内倾面光滑和有“V”型凸起的行走轮镇压效果进行离散元仿真分析,仿真结果表明:内倾面有“V”型凸起的行走轮接地压力更大,镇压过的土壤孔隙率相对缩小 6.38%~6.93%。田间试验结果表明:播种的粒距合格率为 89.8%,漏播率为 2.3%,重播率为 7.9%,种肥垂直距离为 3.99 cm,排肥量不稳定性变异系数和各行不一致性变异系数分别为 2.35% 和 1.62%。

关键词: 玉米 行间播种机 多功能行走轮 仿真 试验

中图分类号: S223.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)03-0083-07

Design and Experiment of Type 2BH-3 Inter-row Seeder

Jia Honglei^{1,2} Jiang Xinming¹ Guo Mingzhuo¹ Zhao Jiale¹ Wang Fulan¹ Wang Lichun^{1,3}

(1. College of Biological and Agricultural Engineering, Jilin University, Changchun 130025, China
2. Key Laboratory of Bionic Engineering, Ministry of Education, Jilin University, Changchun 130025, China
3. Jilin Academy of Agricultural Sciences, Changchun 130124, China)

Abstract: A type 2BH-3 inter-row seeder for maize was designed to meet the agro-technical requirements of stubble mulching and row (ridge)-inter-row (furrow) tilling alternately, which can perform inter-row operations including fertilizing, seeding, covering and rolling at a time. In order to reduce the longitudinal length of the inter-row seeder, a multifunctional road wheel was designed, which can serve multiple functions such as land following, depth limit, transmission, soil covering, rolling and soil breaking. The discrete element simulation was conducted to compare the rolling effects of the two road wheels, one with a smooth inclined plane and the other with V-shaped ridges, by using EDEM software. The simulation results showed that the road wheel with V-shape ridges had higher ground pressure, making the porosity of soil decrease by 6.38%~6.93%. Field tests showed that the qualification rate of seed spacing was 89.8%, the miss seeding rate was 2.3%, the multiples rate was 7.9%, the average vertical distance between seed and fertilizer was 3.99 cm, the coefficient of variation of instability of fertilizing between rows was 2.35% and the coefficient of variation of inconsistency was 1.62%.

Key words: Maize Inter-row seeder Multifunctional road wheel Simulation Experiment

引言

我国东北黑土区与乌克兰平原、美国密西西比

河流域并称世界三大黑土区^[1],是我国重要的粮食基地。吉林省中西部地区处于该区腹地,其耕作模式的发展在该区具有较好的代表性。

收稿日期: 2014-04-13 修回日期: 2014-05-18

* “十二五”国家科技支撑计划资助项目(2012BAD04B02, 2011BAD16B10)

作者简介: 贾洪雷, 教授, 博士生导师, 主要从事保护性耕作技术与全程机械化研究, E-mail: jiah1@vip.163.com

通讯作者: 王立春, 研究员, 主要从事玉米耕作栽培与作物施肥研究, E-mail: wlc1960@163.com

传统耕作方式作业次数多,土壤扰动频繁;每年有近 7 个月的时间耕地处于裸露休闲状态,风蚀水蚀严重;过量施用化肥、农药导致土壤板结。这些因素造成了东北黑土区土层变薄,从原来的 70 ~ 80 cm 降至 20 ~ 30 cm,甚至露黄;土壤有机质严重下降,从原来的 7% ~ 10% 降至 2% ~ 3%;土壤容重增加^[2-3]。从国内外研究实践可知,实施保护性耕作技术是保护黑土区耕地和生态环境的有效途径^[4-7]。

以吉林省为例,已形成了多种适于本地区的保护性耕作模式,主要有东北垄作蓄水保墒三年轮耕法、玉米宽窄行交替休闲种植模式和玉米等行距留茬覆盖行间(沟台)互作种植模式等^[8-11]。玉米等行距留茬覆盖行间互作种植模式要求在次年播种时不动原行上(垄台)的留茬,在行间(垄沟)进行播种,现有的农具不能满足其农艺要求,因此本文设计一种行间播种机。

1 耕作工艺与整机结构特点

1.1 耕作工艺

当年秋收后,对行间进行浅旋(耕深 70 mm 以内),次年春播时,在已备好的种床进行施肥播种,原行上仍保留上一年的根茬,自然腐烂还田,对耕地起到保护作用,如图 1 所示。行上与行间交替种植就形成了等行距留茬覆盖行间互作种植模式。

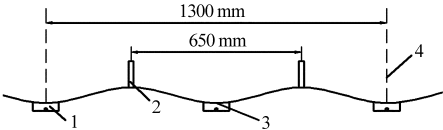


图 1 行间播种示意图
Fig. 1 Schematic diagram of inter-row seeding
1. 种床 2. 行上留茬 3. 行间 4. 拖拉机行走轮

1.2 整机结构

2BH-3 型行间播种机配套 18.4 kW(25 马力)的拖拉机跨两垄(垄宽为 1 300 mm)作业,机具横梁上有 3 组播种单体,行间播种机结构如图 2 所示,主要技术参数见表 1。

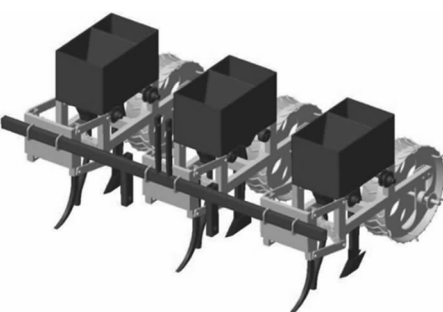


图 2 行间播种机结构示意图
Fig. 2 Schematic diagram of inter-row seeder

表 1 行间播种机主要技术参数	
Tab. 1 Technical parameters of inter-row seeder	
参数	数值
整机质量/kg	160
外形尺寸(长×高×宽)/mm×mm×mm	1 800×1 370×850
配套动力/kW	14.7~22.1
作业行数	3
行距/mm	600~700(可调)
最大播种量/(kg·hm ⁻²)	40
最大施肥量/(kg·hm ⁻²)	600
施肥深度/mm	30~50(种下)
播种深度/mm	30~50
作业速度/(km·h ⁻¹)	2~6

1.2.1 机具横向配置

为保留上一年的根茬,对于跨两垄(轮距 1 200 ~ 1 400 mm)作业的中小功率拖拉机,行间播种需配置奇数行作业的机具,即行数为 $2n+1$ ($n=1,2,3\cdots$),如 3 行、5 行、7 行等。

1.2.2 机具的纵向配置

传统播种作业不保留根茬,地轮可布置在两个播种单体之间,但行间播种的农艺要求地轮需要与播种单体纵向排列在一条直线上,实现保留根茬的行间播种。

多个专用工作部件(如地轮、施肥开沟器、播种开沟器、覆土器、仿形轮、镇压轮等)沿机具纵向排列,造成机身过长,转弯半径大,地头浪费严重;机具重心靠后,加大了对拖拉机悬挂装置的负荷;机具结构复杂、成本高。因此,本文设计一种多功能行走轮,可同时实现仿形、限深、传动、覆土、镇压和碎土等功能,解决了上述难题。

1.3 行走装置的主要功能

播种单体主要由施肥开沟器、播种开沟器、种肥箱和行走装置等组成,其中最主要的工作部件是行走装置,如图 3 所示。

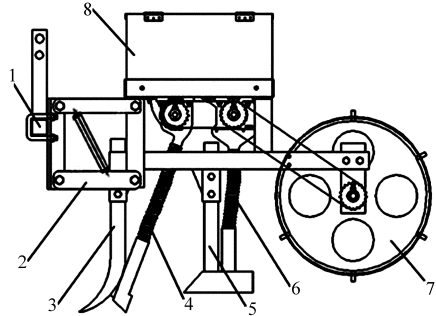


图 3 播种单体结构示意图
Fig. 3 Schematic diagram of seeder unit
1. 机架 2. 平行四连杆 3. 施肥开沟器 4. 导肥管 5. 播种开沟器 6. 导种管 7. 多功能行走轮 8. 种肥箱

2BH-3 型行间播种机作业时,行走轮受到土壤

的摩擦阻力而产生转动,固定在轮轴上的链轮通过链条带动排种和排肥链轮转动,实现排种和排肥,为保证排种、肥的可靠性,行走轮的外缘焊有防滑刺;行走轮与开沟器底部有一定高度差并可调,可实现限深功能;行走轮通过轮轴上的连接板与平行四连杆连接,使其具有仿形功能;行走轮采用内倾结构,实现覆土和镇压;行走轮的内倾面上设计有“V”型凸起,增强了对土壤的劈裂、撞击与切割作用,实现碎土。

行走装置集仿形、限深、传动、覆土、镇压和碎土 6 种功能于一体,代替地轮、仿形轮、覆土器、镇压轮等诸多工作部件,极大地化简了整机结构,较好地解决了行间播种机纵向尺寸过大的问题。

2 行走装置设计

行走装置主要由行走轮、连接机构(平行四连杆)、固定机构和压力调节机构等组成,如图 4 所示。

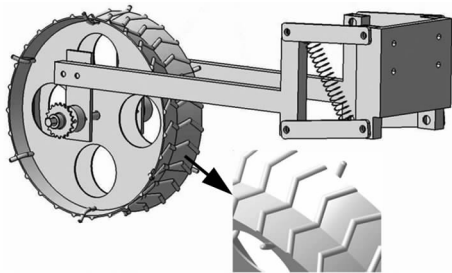


图 4 行走装置结构示意图
Fig. 4 Schematic diagram of road wheel

2.1 行走轮直径的确定

行走轮直径对滑移率及镇压效果有很大影响,直径过小,滑移率大,易造成推土壅土,同时镇压效果不好,根据经验以及机具大小、安装位置的限制,设计行走轮直径 $D = 550\text{ mm}$ 。

2.2 行走轮宽度及轮缘内倾角的确定

行走轮宽度及轮缘内倾角的确定主要从保证行走轮的覆土功能来考虑,这与播种开沟器开出的沟型和覆土厚度密切相关。本机采用窄形开沟器,开出的种沟剖面如图 5 所示。

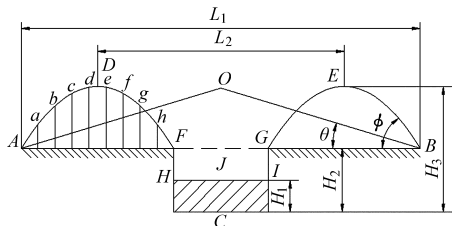


图 5 种沟剖面图
Fig. 5 Sectional drawing of seed trench

种沟开出后会有一部分回土(图 5 中 HI 下面阴

影部分),另有一部分土壤堆于种沟两侧,形成土堆。土堆最边缘堆土与地面的夹角为 ϕ 。图中 AO 及 BO 相交于 O 点, O 点为行走轮内倾面的交点,则 AO (或 BO)与地面夹角 θ 为内倾角。为保证一定的覆土厚度,内倾角 θ 应满足 $0 < \theta < \phi$ 。

在图 5 中,以 A 点为坐标原点,水平方向为 x 轴,垂直方向为 y 轴,在沟型图上选取 $A, B, \dots, H, I$ 共 9 个点,得到各点坐标依次为 $(x_A, y_A), (x_B, y_B), \dots, (x_H, y_H), (x_I, y_I)$ 。在曲线 ADF 上等节距选取 $a, b, \dots, g, h$ 共 8 个点,得到各点坐标依次为 $(x_a, y_a), (x_b, y_b), \dots, (x_g, y_g), (x_h, y_h)$ 。

幅宽

$$L_1 = \sqrt{(x_B - x_A)^2 + (y_B - y_A)^2} \approx x_B - x_A \quad (1)$$

垄距

$$L_2 = \sqrt{(x_E - x_D)^2 + (y_E - y_D)^2} \approx x_E - x_D \quad (2)$$

入土深度

$$H_1 = |y_C - y_H| \quad (3)$$

沟深

$$H_2 = y_C \quad (4)$$

要确定行走轮内倾角 θ 的大小,先应确定曲线 ADF (或 BEG)的方程。通过土槽试验来确定沟形的相关数据。试验在吉林大学工程仿生教育部重点实验室土槽进行。开沟深度为 5 cm , $0 \sim 15\text{ cm}$ 土壤含水率为 21.52% ,坚实度为 1.23 MPa 。开沟器开沟后,在沟形较好处挖出断面进行测量,结果见表 2。

根据表 2 数据计算得出, $L_1 = 23.1\text{ cm}$, $L_2 = 15.4\text{ cm}$, $H_1 = 2.84\text{ cm}$, $H_2 = 5.2\text{ cm}$ 。

行走轮的宽度过宽会导致镇压强度不能满足农艺要求,过窄会造成镇压力过大,导致下陷。其宽度要大于开沟宽度而小于播种行距,根据开沟试验及其他镇压轮参数,确定其宽度为 23 cm 。

根据表 2 中的试验数据,求出曲线 ADF 的拟合曲线,如图 6 所示,曲线方程为

$$y_{ADF} = -0.126x^2 + 1.508x + 0.166 \quad (0 < x < 8) \quad (5)$$

行走轮作业时沟形两侧的堆土,最终将被挤压到 J 区域和 $\triangle AOB$ 区域内。由于这两个区域内的土壤坚实度要大于两侧堆土的土壤坚实度,所以两侧堆土的剖面积要大于 J 区域和 $\triangle AOB$ 区域的剖面积,即

$$2S_{ADF} > S_{\triangle AOB} + S_J \quad (6)$$

$$S_{ADF} = \int_0^8 (-0.126x^2 + 1.508x + 0.166) dx = 28.08\text{ cm}^2 \quad (7)$$

表 2 沟形上参考点坐标值
Tab.2 Coordinates of reference point

参考点	样本 1 坐标值	样本 2 坐标值	样本 3 坐标值	平均值
A	(0,0)	(0,0)	(0,0)	(0,0)
B	(23.5, -1.6)	(23.3, -1.7)	(22.1, -1.2)	(23,1.17)
C	(12.7, -5.2)	(12.9, -4.9)	(11.4, -5.5)	(12.33, -5.2)
D	(4.4,2.2)	(4.9,1.8)	(3.5,2.9)	(4.27,2.3)
E	(19.7,2.0)	(19.2,2.7)	(20.1,1.8)	(19.67,2.17)
F	(8.0, -0.2)	(7.7, -0.3)	(8.5, -0.3)	(8.07, -0.27)
G	(14.4, -0.8)	(13.8, -0.9)	(14.7, -0.8)	(14.3, -0.83)
H	(9.1, -2.9)	(9.6, -3.1)	(8.9, -2.8)	(9.2, -2.93)
I	(14, -2.9)	(12.5, -3.1)	(13.6, -2.8)	(12.47, -2.93)
a	(1,1.6)	(1,0.9)	(1,1.4)	(1,1.3)
b	(2,1.9)	(2,2.3)	(2,1.5)	(2,1.9)
c	(3,2.1)	(3,1.9)	(3,2.5)	(3,2.17)
d	(4,2.7)	(4,2.3)	(4,2.3)	(4,2.43)
e	(5,2.2)	(5,2.1)	(5,1.8)	(5,2.03)
f	(6,1.7)	(6,2.1)	(6,2.1)	(6,1.97)
g	(7,1.8)	(7,1.4)	(7,1.9)	(7,1.7)
h	(8,1.4)	(8,1.7)	(8,1.2)	(8,1.43)

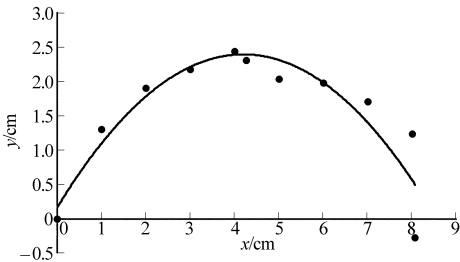


图 6 ADF 的拟合曲线
Fig.6 Fitting curve of ADF

$$S_{\triangle AOB} = \frac{1}{2} \times 23 \times 11.5 \tan \theta = 132.25 \tan \theta \quad (8)$$

$$S_J = (H_2 - H_1) (X_I - X_H) = 7.72 \text{ cm}^2 \quad (9)$$

从式(6)~(9)可得 $\theta < 20^\circ$ 。土槽开沟试验时, 0~15 cm 土层含水率为 21.52%, 春播时土壤含水率要低于此值, 开沟器回土量会更大, 根据实际要求, 将行走轮内倾面的倾斜角确定为 13° 。

为了减少行走轮打滑并具有碎土作用, 在内倾面上设计了“V”型凸起, 高度为 10 mm。凸起尖端在周围方向形成了锯齿状的刃部, 在碾压土壤时会产生应力集中而压碎土壤。

2.3 仿形机构(连接机构)尺寸的确定

控制好播种机开沟深度是设计播种单体的关键, 所以仿形机构是播种机的关键部件之一。该行走装置中的连接机构就是平行四杆仿形机构, 主要参数如图 7 所示。

从图 7 可知, 上下仿形量和总仿形量与上下拉杆长度的关系为

$$h_1 = L(\sin \alpha_0 + \sin \alpha_1) \quad (10)$$

$$h_2 = L \sin(\alpha_0 + \alpha_2) - L \sin \alpha_0 \quad (11)$$

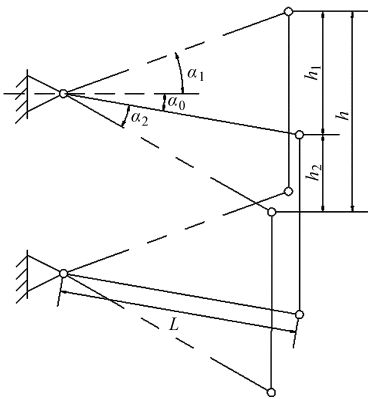


图 7 平行四连杆结构示意图
Fig.7 Schematic diagram of parallel four-bar linkage

$$h = h_1 + h_2 = L(\sin \alpha_1 + \sin(\alpha_0 + \alpha_2)) \quad (12)$$

式中 α_0 ——设计耕深无仿形时牵引角, ($^\circ$)
 α_1 ——最小播深时上仿形牵引角, ($^\circ$)
 α_2 ——最大播深时下仿形牵引角, ($^\circ$)
 h ——总仿形量, cm h_1 ——上仿形量, cm
 h_2 ——下仿形量, cm

通常, 播种机的上、下仿形量都在 8~12 cm, 由于本机是在上一年秋后浅旋过的土地上播种, 地表起伏较小, 所以上、下仿形量均选为 8 cm。而本机播深为 3~5 cm 之间, 这样最小播深的上仿形量与最大播深的下仿形量之和为 24 cm, 上仿形角 α_1 在 $15^\circ \sim 20^\circ$ 间选择, 下仿形角 α_2 在 $15^\circ \sim 30^\circ$ 间选择。

如果确定 $\alpha_0 = 0^\circ, \alpha_1 = 15^\circ, \alpha_2 = 30^\circ$, 则

$$L = \frac{h}{\sin \alpha_1 + \sin(\alpha_0 + \alpha_2)} = \frac{24}{\sin 15^\circ + \sin 30^\circ} = 31.63 \text{ cm} \quad (13)$$

取上、下杆长为 32 cm,前、后杆长为 15 cm。

2.4 传动比计算

本机采用行走轮传动,排种器轴上的链轮由固定在行走轮轴上的链轮直接带动(为一级传动),排肥器由排种器轴上的链轮带动。行走轮通过弹簧加压,保证行走轮与地面的紧密接触,行走轮边缘采用防滑刺和触土表面上的凸起加大行走轮与地面的附着力,提高行走轮传动的可靠性。

排种器的传动比为

$$i = \frac{(1 + \delta) \pi D}{Za} \tag{14}$$

式中 δ ——行走轮的滑移率, %
 Z ——排种器的型孔数
 a ——播种株距, mm

设计中选择行走轮轮轴上的链轮、排种链轮和排肥链轮齿数相同,均为 19 齿,可采用更换链轮或排种轮的方式调整其株距。取 $\delta = 14\%$, $Z = 9$, $a = 200\text{ mm}$, $D = 550\text{ mm}$,则 $i \approx 1.094$,取 $i = 1$ 。

3 行走轮镇压效果离散元仿真

本文设计的多功能行走轮内倾面有“V”型凸起,为了验证其良好的镇压效果,采用离散元法建立行走轮与地面系统力学模型^[12-15],研究行走轮内倾面表面与土壤之间相互作用引起的土壤形态变化,分析比较内倾面光滑和有“V”型凸起的行走轮的工作性能。

首先建立松散土壤状态下的土槽模型和行走轮模型,如图 8 所示;根据行走轮的受力、转速等参数进行过程模拟;从土壤间的接触力、位移场和孔隙率 3 方面分析比较这 2 种行走轮的镇压效果。参数选择如下:轮宽 $b = 230\text{ mm}$,轮半径 $r = 275\text{ mm}$,前进速度为 1.7 m/s ,两种行走轮除触土表面有差异外,其他参数均相同。

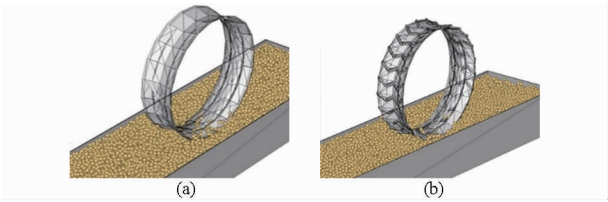


图 8 行走轮与土壤模型

Fig. 8 Model of road wheel and soil

(a) 光滑表面行走轮 (b) 凸起表面行走轮

图 9 为两种行走轮与土壤颗粒作用过程接触力场示意图。从图中可以看出,行走轮与土壤颗粒的接触力随深度的增加,接触力分布范围变大,接触力值变小。阴影较浓的位置,表示该处的接

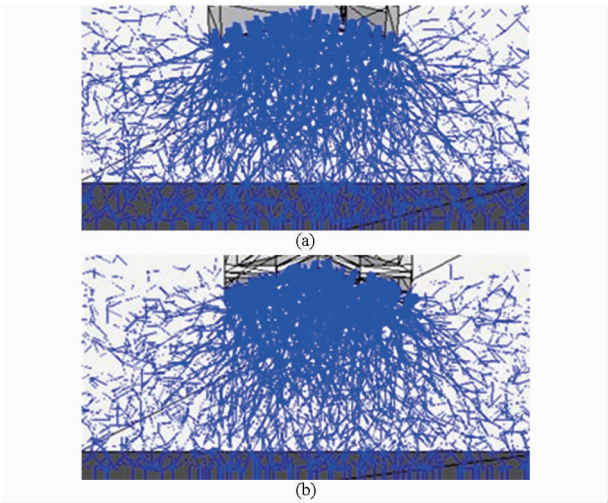


图 9 接触力场示意图

Fig. 9 Schematic diagram of contact force field

(a) 光滑表面行走轮 (b) 凸起表面行走轮

触应力较大。其中光滑表面行走轮与土壤颗粒的接触力随深度增加,衰减缓慢;凸起表面行走轮与土壤颗粒的接触力主要集中在颗粒表层,随深度增加,衰减较快。

图 10 为两种行走轮与土壤颗粒作用过程位移场示意图。图中线条的长度代表土壤颗粒位移的大小,箭头的方向代表土壤颗粒的位移方向。中间部分即种子下方土壤颗粒流动位移较大,两侧土壤颗粒流动位移相对比较小,其中凸起表面行走轮对土壤颗粒的位移影响明显比光滑表面行走轮要大。

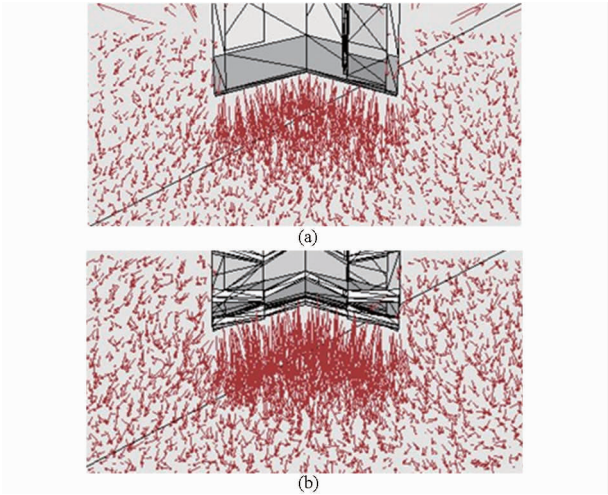


图 10 位移场示意图

Fig. 10 Schematic diagram of displacement field

(a) 光滑表面行走轮 (b) 凸起表面行走轮

两种行走轮镇压过的同一位置,土壤孔隙率 n 有明显不同,如图 11 所示。在同一位置,凸起表面行走轮镇压过的土壤孔隙率明显小于光滑表面行走轮镇压过的土壤孔隙率,相对缩小了 $6.38\% \sim 6.93\%$,满足东北地区播种后重镇压的农艺要求。

4 田间试验

2BH-3 型行间播种机田间试验于 2012 年 5 月 13 日在吉林农业大学农场进行。试验地前茬作物为玉米,平均垄距 66 cm,土壤含水率 5 cm 处 12.74%、10 cm 处 14.37%、15 cm 处 17.26%,土壤坚实度 5 cm 处 0.82MPa、10 cm 处 1.06MPa、15 cm 处 1.16Mpa,作业速度为 1.7m/s。试验结果见表 3~6。

通过试验结果可以看出,播种的粒距合格率为 89.8%,漏播率为 2.3%,重播率为 7.9%,种肥垂直

距离为 3.99 cm,排肥量不稳定性变异系数和各行

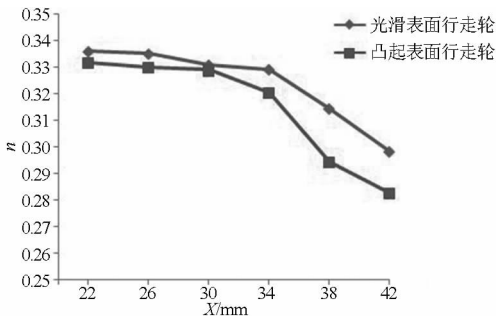


图 11 土壤孔隙率曲线
Fig. 11 Curve of soil porosity

表 3 播种性能测定结果
Tab. 3 Results of seeding performance measurement

行次	播种方式	滑移率/ %	要求粒距/ cm	播种性能						
				粒距平均 值/cm	标准差/ cm	变异 系数/%	漏播率/ %	重播率/ %	合格率/ %	种子破碎 率/%
1	点播	7.6	20.0	21.7	2.45	11.3	2.1	8.1	89.8	1.1
2	点播	7.6	20.0	20.4	2.61	12.8	2.5	7.4	90.1	0.7
3	点播	7.6	20.0	21.2	2.34	11.0	2.2	8.3	89.5	0.8
平均值				21.1	2.47	11.7	2.3	7.9	89.8	0.87

表 4 播种深度测定结果
Tab. 4 Results of seeding depth measurement

行次	深度/cm										要求 深度/cm	平均值/ cm	标准差/ cm	变异 系数/%
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10				
1	5.3	5.2	5.1	5.0	5.3	4.8	5.9	4.5	5.2	5.2	5	5.15	0.37	7.2
2	4.7	5.2	4.8	5.3	5.7	5.4	5.2	5.6	5.0	5.7	5	5.26	0.35	6.7
3	5.4	4.9	5.2	4.7	5.2	5.5	5.0	5.5	5.8	4.7	5	5.19	0.37	7.1
平均值											5	5.20	0.36	6.9

表 5 种肥距离测定结果
Tab. 5 Results of distance between seed and fertilizer measurement

行次	距离/cm										要求 距离/cm	平均值/ cm	标准差/ cm	变异 系数/%
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10				
1	3.9	3.7	4.4	4.3	3.5	3.6	4.8	3.6	4.3	3.9	4	4.00	0.43	10.8
2	3.8	4.0	3.7	4.2	3.9	3.5	4.3	3.9	3.9	4.0	4	3.92	0.23	5.9
3	4.1	4.0	3.8	3.6	4.4	4.2	4.1	3.9	3.9	4.4	4	4.04	0.25	6.2
平均值											4	3.99	0.30	7.5

表 6 排肥性能测定结果
Tab. 6 Results of fertilizing performance measurement

次数	排种量/g			不稳定性变异			各行不一 致性变异
				系数/%			
	1	2	3	1	2	3	
1	656	670	647				1.75
2	649	665	658				1.22
3	644	682	643	2.59	1.82	2.65	3.38
4	679	693	683				1.05
5	681	691	687				0.73
平均值				2.35			1.62

不一致性变异系数分别为 2.35% 和 1.62%。各项指标均达到了国家相关标准的要求,具有较好的播种和施肥性能。

5 结论

(1)为适应玉米等行距留茬覆盖行间(沟台)互作种植模式的农艺要求,研制了 2BH-3 型行间播种机,可在行间一次完成施肥、播种、覆土和镇压等作业。田间试验结果表明,该机能够满足玉米等行

距留茬覆盖行间(沟台)互作种植模式的农艺要求。

(2)为了解决行间播种机纵向尺寸过长的问题,设计了多功能行走轮,可同时实现仿形、限深、传动、覆土、镇压和碎土等功能。根据种沟形状的分析

和沟形曲线的拟合确定了行走轮的主要参数:直径 550 mm,宽度 230 mm,内倾角 13°,内倾面设计有“V”型凸起。平行四连杆上下杆长度为 320 mm,前

后杆长度为 150 mm。

(3)应用 EDEM 软件对内倾面光滑和有“V”型凸起的行走轮镇压效果进行离散元仿真分析。仿真结果表明,内倾面有“V”型凸起的行走轮接地压力更大,镇压过的土壤孔隙率比内倾面光滑的行走轮镇压过的小,相对缩小了 6.38%~6.93%。

参 考 文 献

1 范昊明,蔡强国,陈光,等. 世界三大黑土区水土流失与防治比较分析[J]. 自然资源学报,2005,20(3):387-393.
Fan Haoming,Cai Qiangguo,Chen Guang,et al. Comparative study of the soil erosion and control in the three major black soil regions in the world[J]. Journal of Natural Resources,2005,20(3):387-393. (in Chinese)

2 刘文新,张平宇,马延吉. 东北地区生态环境态势及其可持续发展对策[J]. 生态环境,2007,16(2):709-713.
Liu Wenxin,Zhang Pingyu,Ma Yanji. Situation of and countermeasures for eco-environment in northeast China[J]. Ecology and Environment,2007,16(2):709-713. (in Chinese)

3 方淑荣. 吉林省黑土流失的成分分析及防治对策[J]. 吉林农业科学,2006,31(6):22-24,40.
Fang Shurong. Analysis on the reasons of black-soil erosion in Jilin Province and countermeasures[J]. Journal of Jilin Agricultural Sciences,2006,31(6):22-24,40. (in Chinese)

4 范如芹,梁爱珍,杨学明,等. 耕作方式对黑土团聚体含量及特征的影响[J]. 中国农业科学,2010,43(18):3767-3775.
Fan Ruqin,Liang Aizhen,Yang Xueming,et al. Effect of tillage on soil aggregates in black soils in northeast China[J]. Scientia Agricultura Sinica,2010,43(18):3767-3775. (in Chinese)

5 贾洪雷,马成林,李慧珍,等. 基于美国保护性耕作分析的东北黑土区耕地保护[J]. 农业机械学报,2010,41(10):28-34.
Jia Honglei,Ma Chenglin,Li Huizhen,et al. Tillage soil protection of black soil zone in northeast of China based on analysis of conservation tillage in the United States[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2010,41(10):28-34. (in Chinese)

6 Voorhees W B,Lindstrom M J. Long-term effects of tillage method on soil tilth independent of wheel traffic compaction[J]. Soil Science Society of America Journal,1984,48(1):152-156.

7 Lal R,Griffin M,Apt J,et al. Managing soil carbon[J]. Science,2004,304(16):393.

8 贾洪雷,马成林,刘昭辰,等. 北方旱作农业区蓄水保墒耕作模式研究[J]. 农业机械学报,2007,38(12):190-194,207.
Jia Honglei,Ma Chenglin,Liu Zhaochen,et al. Overview of study on the tillage mode of water storage and soil moisture conservation for dry farming region in northern China[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2007,38(12):190-194,207. (in Chinese)

9 刘武仁,郑金玉,罗洋,等. 玉米宽窄行种植技术的研究[J]. 吉林农业科学,2007,32(2):8-10,13.
Liu Wuren,Zheng Jinyu,Luo Yang,et al. Research on planting technique with wide/narrow row alternation for maize[J]. Journal of Jilin Agricultural Sciences,2007,32(2):8-10,13. (in Chinese)

10 郑金玉,罗洋,郑洪兵,等. 关于改进东北春玉米现行耕法的思考[J]. 吉林农业科学,2010,35(4):1-5.
Zheng Jinyu,Luo Yang,Zheng Hongbing,et al. Considerations on improvement of tillage of maize in northeast of China[J]. Journal of Jilin Agricultural Sciences,2010,35(4):1-5. (in Chinese)

11 贾洪雷,王刚,姜铁军,等. 1GH-3 型行间耕整机设计与试验[J]. 农业机械学报,2012,43(6):35-41,160.
Jia Honglei,Wang Gang,Jiang Tiejun,et al. Design and experiment of 1GH-3 inter-row tillage machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2012,43(6):35-41,160. (in Chinese)

12 Tanaka H,Momozu M,Oida A,et al. Simulation of soil deformation and resistance at bar penetration by the distinct element method[J]. Journal of Terramechanics,2000,37(1):41-56.

13 Momozu M,Oida A,Yamazaki M,et al. Simulation of a soil loosening process by means of the modified distinct element method [J]. Journal of Terramechanics,2002,39(4):207-220.

14 马征,李耀明,徐立章. 农业工程领域颗粒运动研究综述[J]. 农业机械学报,2013,44(2):22-29.
Ma Zheng,Li Yaoming,Xu Lizhang. Summarize of particle movements research in agriculture engineering realm[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2013,44(2):22-29. (in Chinese)

15 于建群,钱立彬,于文静,等. 开沟器工作阻力的离散元法仿真分析[J]. 农业机械学报,2009,40(6):53-57.
Yu Jiangqun,Qian Libin,Yu Wenjing,et al. DEM analysis of resistances applied furrow openers[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2009,40(6):53-57. (in Chinese)