doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2021.08.004

免耕播种机侧深分层施肥播种部件设计与试验

赵艳忠[1]　王　勇[1]　龚振平[2]　杨悦乾[1]　赵淑红[1]　苟金保[1]

(1.东北农业大学工程学院,哈尔滨 150030;2.东北农业大学农学院,哈尔滨 150030)

摘要:为减少追肥机具进地次数、最大限度地提高肥料利用率,针对因秸秆残茬分布不均、侧深施肥导致播种带两侧土壤紧实度不一致而引起免耕播种机横向稳定性差、掉垄的问题,设计了一种可以底肥侧位深施、口肥垂直分施的免耕播种机侧深分层施肥播种部件。以直斜错位双圆盘肥种沟开沟器的圆盘直径、圆盘夹角和圆盘倾角为试验因素,以前进阻力、侧向合力及开沟深度稳定性系数为试验指标,对影响机具横向稳定性和作业质量的参数进行分析和试验。结果表明,当圆盘直径为 352 mm、圆盘夹角为 14°、圆盘倾角为 7.5°时,肥种沟开沟器前进阻力为 585.96 N、侧向合力为 181.95 N、开沟深度稳定性系数为 91.46%。样机性能试验表明,种肥垂直距离合格率为 91.7%,种肥侧向距离合格率为 92.4%,播种深度变异系数为 10.7%,播种横向变异系数为 28.4%,满足侧深施肥播种质量要求。

关键词:免耕播种机;侧深施肥;横向稳定性;肥种沟开沟器;田间试验

中图分类号:S223.2　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2021)08-0040-11　　**OSID**:

Design and Experiment on Side Deep and Layered Fertilizing and Seeding Components of No-tillage Planter

ZHAO Yanzhong[1]　WANG Yong[1]　GONG Zhenping[2]　YANG Yueqian[1]　ZHAO Shuhong[1]　GOU Jinbao[1]

(1. *College of Engineering*, *Northeast Agricultural University*, *Harbin* 150030, *China*

2. *College of Agriculture*, *Northeast Agricultural University*, *Harbin* 150030, *China*)

Abstract: Aiming at the problems of straw stubble distribution inhomogeneity, inconsistent soil compaction on both sides of the seeding belt due to side deep fertilizing, which causes the problems of lateral instability and ridge-dropping of the no-tillage planter, at the same time, in order to lessen the number of times the topdressing equipment enters the ground and maximize the fertilizer utilization rate, the side deep and layered fertilizing and seeding components of no-tillage planter was designed, which could apply the base fertilizer laterally and deeply and distribute the seed manure vertically. Also, the field experiments were carried out on the parameters that affected the lateral stability of the no-tillage planter and the operating quality. The influence factors of the field experiments included the disc diameter, disc angle and disc dipping of staggered double disc fertilizer ditch opener. Evaluation indices included the forward resistance, lateral force and ditching depth stability coefficient. The results showed that when the disc diameter was 352 mm, the disc angle was 14°, and the disc dipping was 7.5°, the forward resistance of the staggered double disc fertilizer ditch opener was 585.96 N, the lateral force of the staggered double disc fertilizer ditch opener was 181.95 N, and the ditching depth stability coefficient was 91.46%. The prototype performance experiment results showed that the seed fertilizer vertical distance qualification rate was 91.7%, the seed fertilizer lateral distance qualification rate was 92.4%, the sowing depth variation coefficient was 10.7%, and the sowing width variation coefficient was 28.4%, which could satisfy the side deep fertilizing and sowing quality requirements.

Key words: no-tillage planter; side deep fertilizing; lateral stability; fertilizer ditch opener; field experiment

收稿日期:2021-03-05　修回日期:2021-04-28

基金项目:国家重点研发计划项目(2020YFD1000902)

作者简介:赵艳忠(1967—),女,副教授,主要从事保护性耕作机具研究,E-mail:yzzhao89723@163.com

通信作者:赵淑红(1969—),女,教授,博士生导师,主要从事田间农业机械及力学特性研究,E-mail:shhzh091@sina.com

0　引言

玉米是我国第二大粮食作物，提高玉米单产是保证国家粮食安全的重要途径[1]。正确的施肥方式对提高玉米产量至关重要，施肥位置对出苗率、化肥利用率以及作物根系发育产生直接影响[2-3]。随着轻简农业的逐步推广，缓控释肥因具有养分释放可控、省肥增产的特点而发展迅速[4]。但缓控释肥的养分释放特征较常规肥料差异很大，传统的种下施肥并不能提高其肥料利用率，甚至出现产量降低的情况。侧深施肥可以有效避免烧种现象，并且在施肥量较大的情况下能够保证出苗率，增产效果较好[5]。

近年来，国内外学者对侧深施肥技术进行了深入研究，设计研制了许多具有侧深施肥功能的播种机型。国外具有代表性的机型有美国 New Holland 公司生产的 P2082 型免耕播种机、John Deere1895 型条播机、挪威 Kverneland 公司研制的 2BQJ－6 重载型精量点播机[6-8]。国内播种作业不同于国外情况，通常所需的施肥量较大，且多为中小型机具，易出现因种肥混施或深施肥效果较差而引起的烧种问题，因此国内的播种机具常常设有侧深施肥装置。如吉林康达公司研制的 2BMZF 系列指夹式免耕播种机[9]通过调整施肥支臂的纵向与横向位置，可实现对施肥深度与侧向位置的灵活调整。DEBONT（德邦大为）生产的 2605 型气吸式精量免耕播种机[10]采用单圆盘施肥器，从而获得较大的侧深施肥深度。林静等[11]设计的 2BG－2 型玉米垄作免耕播种机将自研的双圆盘侧深施肥器与播种开沟器侧位配置，实现了侧深施肥。吕彬等[12]研制的大豆双行侧深施肥免耕播种机使用双圆盘开沟器进行双行播种，并在两播种行间施肥，发挥了玉米原茬垄作优势。李慧等[13]基于 ZBF－24 型谷物播种机设计了具有施肥与播种相对深度调整机构的分层侧深施肥播种机。徐云峰[14]设计的两行玉米免耕播种机利用较大的圆盘夹角使双圆盘开沟器分别开出肥沟和种沟，实现了种肥侧施。陈海涛等[15]设计的 2BMFJ 系列免耕覆秸精量播种机通过性能较好，可适应原茬地的侧深施肥播种作业。为实现侧深施肥，现有机具一般采用较大夹角的圆盘开沟器或施肥、播种开沟器侧位配置两种方式。因前者易引起种肥间距较近、土壤扰动大、肥料覆盖效果较差等问题，适用范围较小，故一般采用施肥、播种开沟器侧位配置。在免耕条件下采用侧深施肥，由于施肥部件与播种开沟部件不在同一条直线上，且侧深施肥部件先入土，导致该侧土壤变得疏松，从而加剧了因秸秆残茬分布不均而引起的播种机迂回前进、甚至掉垄的问题，严重影响了播种作业质量[16-17]。因此需对播种机结构及其侧深施肥播种部件进行优化设计。

本文设计一次进地可完成破茬开沟、底肥侧位深施、口肥垂直分施、精密播种、覆土镇压等作业工序的免耕播种机。对施肥播种单体进行结构设计，将传统双圆盘开沟器改进为直斜错位双圆盘肥种沟开沟器，以提高机具横向稳定性和播种精度。通过田间试验获得最佳的结构参数组合，以更好地满足播种作业性能要求。

1　侧深施肥农艺要求

在实际生产中，如果将大量底肥施于种子正下方，时常出现肥料烧种、抑制根系生长现象。采用侧深施肥，可以在避免烧种同时，满足作物中后期的肥料供应，减少追肥次数[18]。采用同层施肥，能够有效提高作物苗期的干物质和氮磷钾积累量[19]。因此，为提高化肥利用率，满足玉米生长的农艺要求，本次设计采用底肥侧位深施、口肥同层垂直分施的施肥方式。选择底肥的施入位置为种子侧方 5 cm、下方 5 cm 处，可获得较好的增产效果[20-21]。依据开沟器的回土深度，确定口肥的施入位置为种子正下方 1～2 cm（图 1），能够促进种子发芽出苗。

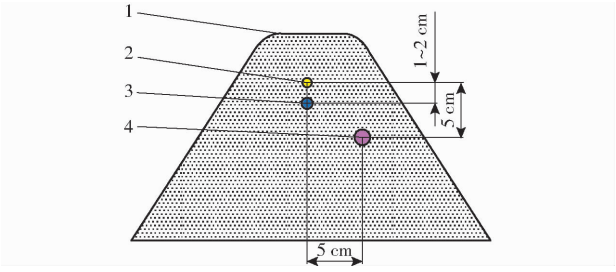

图 1　种肥位置示意图

Fig. 1　Schematic of seed fertilizer location

1. 地表　2. 种子　3. 口肥　4. 底肥

2　整机结构与工作原理

2.1　整机结构

如图 2 所示，整机由三点悬挂机架、限深轮、行走地轮、施肥播种单体及覆土镇压装置等组成，每个施肥播种单体包括施肥铲、直斜错位双圆盘肥种沟开沟器、护种板、排种器、排肥器、种箱、肥箱等。采用侧位深施底肥、垂直分施口肥的方式，避免肥料烧种问题。整机主要技术参数如表 1 所示。

2.2　工作原理

机具经三点悬挂机架挂接在拖拉机后悬挂处，施肥播种单体通过仿形机构连接到机架上。机具作业时，地轮在摩擦作用下转动，通过链传动驱动排

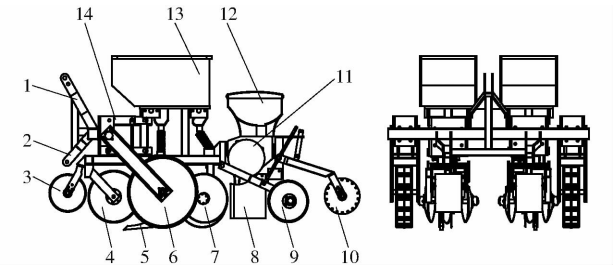

图 2 免耕播种机结构简图

Fig. 2 Structure diagram of no-tillage planter

1. 上悬挂点 2. 下悬挂点 3. 限深轮 4. 自位式破茬圆盘刀 5. 弧式施肥铲 6. 鼠笼形地轮 7. 直斜错位双圆盘肥种沟开沟器 8. 护种板 9. 覆土盘 10. 镇压轮 11. 排种器 12. 种箱 13. 肥箱 14. 仿形机构

表 1 免耕播种机主要技术参数

Tab. 1 Main technical parameters of no-tillage planter

参数	数值/类型
配套动力/kW	≥17.64
外形尺寸/(mm × mm × mm)	2 150 × 1 690 × 1 170
整机质量/kg	220
工作行数	2
适应行距/mm	600 ~ 700
施肥深度/mm	80 ~ 150(种侧 50)
播种深度/mm	40 ~ 70
机具前进速度/(km·h^{-1})	4.5
覆土厚度/mm	30 ~ 80
动力传递方式	地轮 + 链传动

肥、落种。安装在机架前部的限深轮和破茬圆盘刀预先对秸秆残茬进行压实切割,紧随其后的弧式施肥铲开出肥沟,底肥通过施肥铲、导肥管深施于种子侧下方,口肥通过导肥管落于直斜错位双圆盘肥种沟开沟器开出的肥种沟内,种子经排种器和护种板落在自然覆土的口肥之上,实现肥种垂直分施,随后覆土盘与镇压轮完成对种子的覆土镇压工作。

3 施肥播种部件设计

施肥播种单体主要由仿形机构、自位式破茬圆盘刀、弧式施肥铲、直斜错位双圆盘肥种沟开沟器、护种板、肥箱、种箱、排种器、落种管等组成,其土壤工作部件作业方式如图 3 所示。

弧式施肥铲与肥种沟开沟器的中心线横向相距 5 cm。调整施肥铲、开沟器的安装高度可方便改变底肥、口肥及播种深度。在施入口肥后,利用回土深度将种子与口肥隔开,防止口肥烧种。影响播种质量的关键部件为弧式施肥铲、肥种沟开沟器和护种板。

3.1 弧式施肥铲

为满足底肥侧位深施和入土能力要求,本文设计了一种弧式施肥铲,其主要由铲柄、铲尖、导肥舌组成,如图 4a 所示。铲柄高度 540 mm,选用 30 mm × 50 mm 的空心钢管,壁厚 4 mm,铲柄兼具导肥管作用,在铲柄底部为防止回土堵塞肥料下落,设置了斜面和导肥舌。铲尖采用圆弧形曲线设计且宽度仅为 20 mm,对地表及底层土壤的扰动小,回土性能好,可降低其作业后播种带两侧土壤紧实度的差异,其结构示意图如图 4b 所示,其主要参数有入土角 γ_1、入土隙角 η、曲率半径 ρ。经查阅文献[22 - 23],入土角取值一般为 25° ~ 55°,入土隙角取值一般为 5° ~ 14°。由于施肥铲的入土深度较大,为保证铲尖强度,确定入土角为 40°;为避免开沟过程中土壤提前回落,导致底肥达不到施肥深度,入土隙角不宜过大,确定入土隙角为 8°。

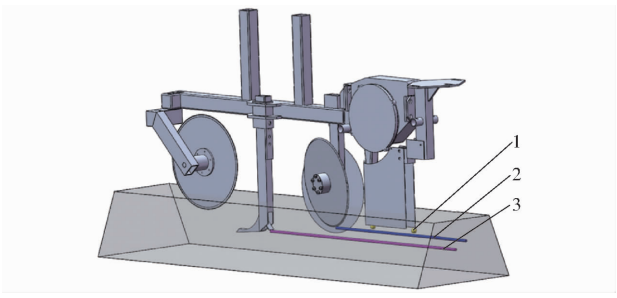

图 3 施肥播种单体作业方式

Fig. 3 Mode of fertilizing-sowing unit

1. 种子 2. 口肥 3. 底肥

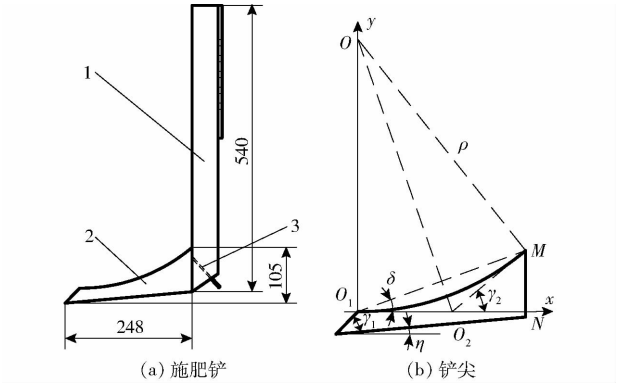

图 4 弧式施肥铲结构示意图

Fig. 4 Structure schematics of arc fertilizer shovel

1. 铲柄 2. 铲尖 3. 导肥舌

由图 4b 中几何关系可知,铲尖圆弧段所在圆的轨迹方程与铲尖尺寸分别为

$$x^2 + (y - \rho)^2 = \rho^2 \tag{1}$$

$$l_{MN} = l_{O_1N}\tan\delta \tag{2}$$

其中

$$\delta = \frac{1}{2}\gamma_1$$

铲尖高度与施肥铲入土深度均为 105 mm。铲尖斜面长度设置为 40 mm,由图 4b 可知,$\delta = 20°$。通过几何关系计算得 $l_{MN} = 79$ mm,代入式(2)中可得 $l_{O_1N} = 217$ mm,故 M 点坐标为(217 mm,79 mm)。代入式(1)可得 $\rho = 337.53$ mm,为方便加工,确定铲尖曲率半径 $\rho = 340$ mm。

3.2　直斜错位双圆盘肥种沟开沟器

3.2.1　圆盘受力分析

肥种沟开沟器作业时，其圆盘与土壤之间的相互作用可分为侧移推土与滚切土壤[24]。圆盘和土壤之间应力包括正应力 σ、侧面剪应力 τ、刃口切应力 q，如图 5 所示。为方便表达，将圆盘受力视为圆盘侧面正压力 N、圆盘侧面滚切力 T 和刃口切削力 Q 的合力。故圆盘受力可写为

$$\boldsymbol{F} = \boldsymbol{N} + \boldsymbol{T} + \boldsymbol{Q} \tag{3}$$

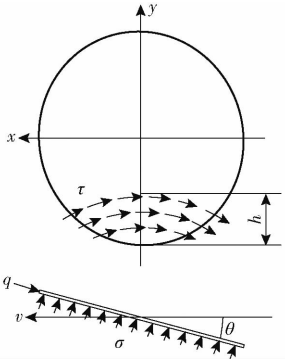

图 5　圆盘与土壤作用力

Fig. 5　Force of discs and soil

圆盘所受侧向力主要由圆盘侧面的正压力与滚切力在侧向方向上的分力组成。其中圆盘正压力为

$$N = \iint_S \sigma \mathrm{d}S = kgS \tag{4}$$

其中

$$S = \int_0^h 2\sqrt{2Rh - h^2}\,\mathrm{d}h = R^2 \arccos\frac{R-h}{R} - (R^2 - Rh)\sqrt{2Rh - h^2} \tag{5}$$

式中　k——土壤变形比压，kg/cm^2

g——重力加速度，取 9.8 m/s^2

S——圆盘与土壤接触面积，mm^2

h——圆盘入土深度，mm

R——圆盘半径，mm

其中侧面滚切力可根据库仑定律写为

$$T = C + N\tan\varphi_1 \tag{6}$$

式中　C——土壤粘附力

φ_1——圆盘侧面与土壤摩擦角，(°)

将圆盘正压力和侧面滚切力在侧向方向上投影，得圆盘侧向合力为

$$F_y = kgS\cos\alpha(\cos\theta + \sin\theta\tan\varphi_1) + C\sin\theta\cos\alpha \tag{7}$$

式中　θ——圆盘夹角，(°)

α——圆盘倾角，(°)

3.2.2　施肥播种部件水平面内受力分析

影响施肥播种单体横向稳定性的因素主要为各入土部件所受力引起的力矩。以施肥播种单体与三点悬挂架铰接点 O 为坐标原点建立坐标系，弧式施肥铲与双圆盘开沟器在水平面内的受力情况如图 6 所示。

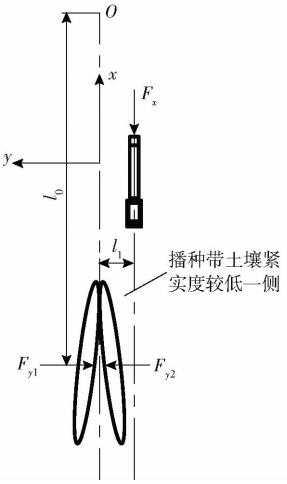

图 6　施肥播种部件在水平面内的受力

Fig. 6　Force of fertilizing and seeding components in horizontal plane

施肥铲前进阻力和两圆盘所受侧向力对点 O 的力矩为

$$\sum M_O = (F_{y1} - F_{y2})l_0 - F_x l_1 \tag{8}$$

其中，由于弧式施肥铲的铲尖宽度较小，其前进阻力 F_x 主要由铲尖的切土阻力 F_S、土壤与铲尖两颊面之间的粘附力 F_n 和摩擦力 F_f 组成[25]，即

$$F_x = F_S\cos(\gamma_1 + \eta) + F_n + F_f \tag{9}$$

其中

$$F_S = K_1 a h' \tag{10}$$

$$F_n = K_2 A\tan\varphi_2 \tag{11}$$

$$F_f = \mu N' \tag{12}$$

式中　K_1——切土比阻力

a——铲尖宽度，mm

h'——施肥铲入土深度，mm

K_2——粘附系数　　μ——摩擦因数

A——铲尖颊面面积，mm^2

φ_2——施肥铲与土壤摩擦角，(°)

N'——铲尖颊面正压力，N

分析图 6、式(8)可知，在侧深施肥条件下，会引起施肥铲一侧播种带的土壤紧实度降低，右侧圆盘一侧的土壤变形比压 k 与土壤粘附力 C 均小于左侧圆盘一侧，导致两圆盘的侧向力差值较大，引起施肥播种单体向施肥铲一侧偏转。同时由于前进阻力 F_1 的力臂 l_1 远小于圆盘侧向力的力臂 l_0，导致双圆盘开沟器侧向合力对铰接点的力矩有较大影响。为提高施肥播种单体的横向稳定性需尽量减小开沟器与单体铰接点间距、降低双圆盘开沟器的侧向合力。因此，综合考虑安装空间和机具重心位置，确定施肥铲柄与肥种沟开沟器导肥管前后相距 365 mm；由 3.2.1 节可知，圆盘侧向力与入土深度、圆盘直径、

圆盘夹角、圆盘倾角有关。为提高单体横向稳定性和降低开沟器侧向合力,可调整两侧圆盘的结构参数来实现,将左侧圆盘的圆盘夹角和圆盘倾角设置为0°,同时加大入土深度,借助左侧圆盘的土壤紧实度较高起到找正作用,提高开沟直线度和开沟深度稳定性,设计了直斜错位双圆盘肥种沟开沟器。其侧向合力为

$$F_{total} = k_1 g S_1 - k_2 g S_2 \cos\alpha(\cos\theta + \sin\theta) - C_1 \sin\theta\cos\alpha \tag{13}$$

式中 k_1——肥种沟左侧土壤变形比压

k_2——肥种沟右侧土壤变形比压

S_1——左侧圆盘与土壤接触面积

S_2——右侧圆盘与土壤接触面积

C_1——右侧圆盘一侧土壤粘附力

3.2.3 肥种沟开沟器结构

直斜错位双圆盘肥种沟开沟器由导肥管、直盘轴、斜盘轴、定位直圆盘、开沟斜圆盘等组成[26],如图7所示。开沟斜圆盘安装于土壤紧实度较低的施肥铲一侧,定位直圆盘竖直装配于斜圆盘前方20 mm、下方20 mm处。开沟斜圆盘与直圆盘间形成圆盘夹角和圆盘倾角。导肥管为30 mm×50 mm中空钢管,采用顶丝与单体梁联接,便于调整开沟器的入土深度。

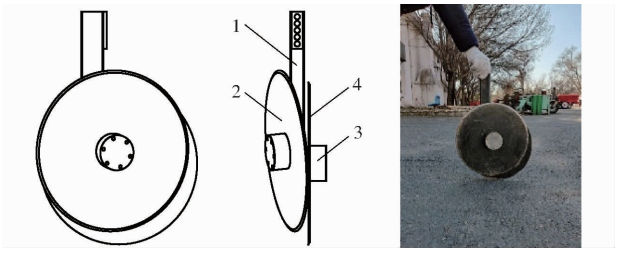

图7 直斜错位双圆盘肥种沟开沟器结构示意图

Fig. 7 Structure schematics of staggered double disc fertilizer ditch opener

1. 导肥管 2. 开沟斜圆盘 3. 轴承及轴承端盖 4. 定位直圆盘

由于定位直圆盘一侧土壤紧实度较高,较斜圆盘先入土且入土深,能够在破茬开沟的同时保持较高的开沟直线度,开沟斜圆盘仅起推移根茬、拓宽沟型作用,入土阻力较小。此外,定位直圆盘一侧可形成竖直侧壁,开沟斜圆盘有倾角,对该侧疏松土壤及较大土块具有压实重塑作用,可获得较为平整紧实的种沟侧壁,有利于种子顺利滑落沟底。在侧深施肥条件下,肥种沟开沟器的横向稳定性较好,开沟质量较高。

3.2.4 开沟器结构参数

(1)圆盘直径

为提高直斜错位双圆盘肥种沟开沟器的通过性能,应保证秸秆被定位直圆盘切断而不产生推移[27-29]。对圆盘与秸秆进行静力分析可知

$$f_1 + f_2 \geqslant F_N \tag{14}$$

式中 f_1——地表与秸秆间的摩擦力

f_2——圆盘与秸秆间摩擦力

F_N——圆盘对秸秆施加的水平推力

引入圆盘直径 D_p、秸秆直径 d、开沟器入土深度 h、秸秆与地表的摩擦角 φ_3、秸秆与圆盘的摩擦角 φ_4 等参数,通过几何关系对式(14)分解可得

$$\arccos\left(1 - \frac{2h + d}{D_p}\right) \leqslant \varphi_3 + \varphi_4 \tag{15}$$

依据玉米播种农艺要求,确定开沟器的入土深度为75 mm。经查阅,东北地区玉米秸秆平均直径为31 mm[30-31];秸秆与地表的摩擦角 $\varphi_3 = 30°$;为保证圆盘的切断能力,选取秸秆与圆盘摩擦角 $\varphi_4 = 33°$[32],经式(15)计算可得:$D_p \geqslant 335$ mm。考虑到安装空间,确定圆盘直径 D_p 取值范围为335~380 mm。

(2)圆盘聚点及夹角

开沟器聚点 M 为开沟斜圆盘在定位直圆盘内侧的交点,聚点位置常用聚点角 β 表示。本次设计使聚点位于地表上方,以便顺利切开土层,避免圆盘夹土和堵塞。β 取值范围为55°~75°[33],为保证免耕覆秸条件下开沟器的通过性能,β 取值为65°。依据《农业机械手册》[34],可得开沟宽度 b 为

$$b = \frac{D_p}{2}(1 - \cos\beta)\sin\theta \tag{16}$$

分析式(16)可知,在聚点位置夹角 β 一定时,开沟宽度 b 随着圆盘直径 D_p、圆盘夹角 θ 的增大而增大。综合相关文献和导肥管安装空间,选择圆盘夹角为11°~18°,计算得开沟宽度为20~38 mm,开沟宽度较小,引起的土壤扰动较小,满足玉米播种农艺要求。

(3)圆盘倾角

为方便表示开沟器的空间结构,可将其结构简化为四棱锥 $ABCDM$,如图8所示。平面 AMD、BMC 分别代表开沟斜圆盘和定位直圆盘,两平面汇交于聚点 M 处。分析图8中几何关系,引入圆盘直径 D_p 和开沟宽度 b,可得圆盘倾角为

$$\alpha = \arcsin\frac{l_{CD} - b}{D_p} \tag{17}$$

为容纳导肥管,上间距 l_{CD} 应大于45 mm。结合圆盘直径、开沟宽度的设计,代入式(17)中,可得圆盘倾角 α 为3°~9°。

3.3 护种板

护种板位于直斜错位双圆盘肥种沟开沟器后侧,为防止导种管堵塞引起漏播或断垄,护种板采用厚度为2 mm的铁板焊接而成,通过螺栓连接到机

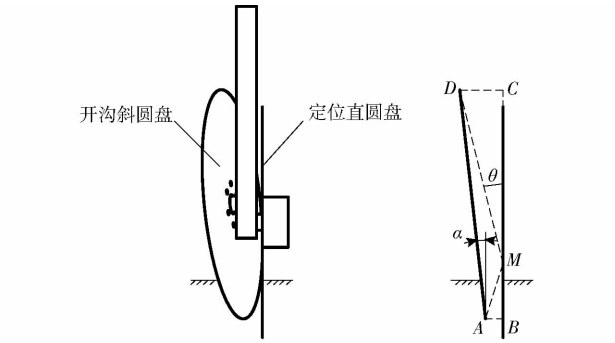

图 8　直斜错位双圆盘肥种沟开沟器简化结构图

Fig. 8　Simplified structure of staggered double disc fertilizer ditch opener

架上，如图 9 所示。护种板宽度为 50 mm，高度为 320 mm，上端圆弧形豁口，可容纳落种管，并与排种器形状适应，前端为三角形。作业时，护种板可将周围秸秆残茬推向两侧，种子在护种板内垂直下落于肥种沟内，不易出现挂草堵塞问题，播种均匀性较好，且在落种过程中不受风力影响，播种精度较高。

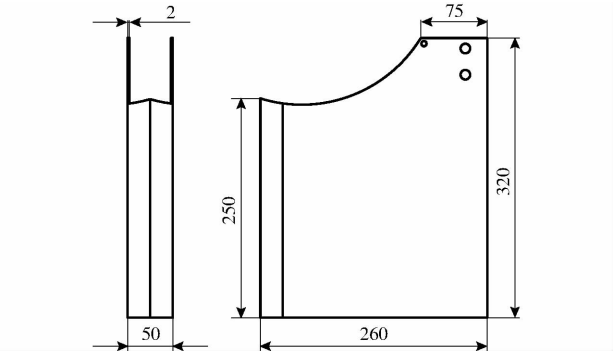

图 9　护种板结构图

Fig. 9　Structure diagram of seed guard plate

4　试验与结果分析

4.1　试验条件及仪器

试验于 2020 年 9 月在东北农业大学农学院试验地进行。试验地为平整后的马铃薯收获地，土壤类型为黑土，选取 100 m × 300 m 的地块作为试验区。试验前对试验区的土壤参数进行了测定，结果如表 2 所示。

表 2　土壤参数

Tab. 2　Soil parameters

土层深度/cm	土壤含水率/%	土壤坚实度/kPa	土壤容重/(g·cm^{-3})
0 ~ 5	12. 64	310	1. 19
5 ~ 10	15. 12	437	1. 28
10 ~ 15	16. 43	526	1. 33

试验仪器有约翰迪尔奔野 454 型拖拉机、自制的工作阻力测试装置(图 10)、直斜错位双圆盘肥种沟开沟器(由 5 种不同直径的圆盘、15 种不同夹角和倾角的立柱式导肥管装配组成)、数显式拉压力计(海宝仪器有限公司生产，HG - 10K 型和 HG - 30K 型，量程分别为 10、30 kN)、弧式施肥铲、烘箱、环刀组件、电子天平、SC - 900 型土壤硬度仪、钢卷尺、直尺等。



图 10　工作阻力测试装置

Fig. 10　Working resistance test device

1. 三点悬挂架　2. 弧式施肥铲　3. 前进阻力上传感器　4. 前进阻力下传感器　5. 限深轮　6. 开沟器连接架　7. 侧向合力上传感器　8. 侧向合力下传感器　9. 拉压力显示仪　10. 直斜错位双圆盘肥种沟开沟器

4.2　试验设计

4.2.1　试验因素与性能指标

由 3.2 节可知，施肥播种单体的横向稳定性和作业质量与直斜错位双圆盘肥种沟开沟器的圆盘直径、圆盘夹角、圆盘倾角有关，各因素编码如表 3 所示。

表 3　试验因素编码

Tab. 3　Coding of factors

编码	因素		
	圆盘直径 x_1/mm	圆盘夹角 x_2/(°)	圆盘倾角 x_3/(°)
- 1. 682	335. 0	11. 0	3. 0
- 1	344. 0	12. 5	4. 2
0	357. 5	14. 5	6. 0
1	371. 0	16. 5	7. 8
1. 682	380. 0	18. 0	9. 0

施肥播种单体的性能指标包括作业能耗、横向稳定性和播种深度稳定性等。经前期试验表明，护种板仅起保护落种作用，极少出现挂草、破坏沟型现象，故以开沟作业时前进阻力、侧向合力、开沟深度稳定性系数为目标函数。

4.2.2 试验指标计算方法

(1)前进阻力

在开沟过程中,读取前进阻力上传感器、下传感器的拉压力,计算公式为

$$y_1 = F_1 - F_2 \tag{18}$$

式中 F_1——前进阻力下传感器拉压力,N

F_2——前进阻力上传感器拉压力,N

(2)侧向合力

在开沟过程中,读取侧向阻力上传感器、下传感器的拉压力,计算公式为

$$y_2 = F_3 - F_4 \tag{19}$$

式中 F_3——侧向合力下传感器拉压力,N

F_4——侧向合力上传感器拉压力,N

(3)开沟深度稳定性系数

每组试验选取 50 m 的作业距离,去掉前后 5 m 距离,随机选取 10 个点,测量开沟深度。通过开沟深度平均值与标准差计算得到开沟深度稳定性系数。

4.2.3 试验方法

试验时将弧式施肥铲和直斜错位双圆盘肥种沟开沟器安装于工作阻力测试装置上,调整弧式施肥铲位于直斜错位双圆盘肥种沟开沟器斜盘侧方 5 cm、下方 5 cm。田间试验如图 11 所示。



图 11 侧深施肥条件下直斜错位双圆盘肥种沟开沟器田间试验

Fig. 11 Field experiment of staggered double disc fertilizer ditch opener under condition of side deep fertilizing

4.3 试验结果与分析

试验采用三因素五水平二次正交旋转组合试验进行设计,选取圆盘直径 x_1、圆盘夹角 x_2 和圆盘倾角 x_3 为试验因素,以前进阻力 y_1、侧向合力 y_2、开沟深度稳定性系数 U_j 为评价指标,共实施 23 组试验,试验方案与结果如表 4 所示,X_1、X_2、X_3 为因素编码值。

应用 Design-Expert 8.0.6 软件对表 4 中的试验数据进行多元回归拟合和方差分析,去除不显著项,进而得出各因素对前进阻力 y_1、侧向合力 y_2、开沟深度稳定性系数 U_j 影响的回归方程为

$$y_1 = 547.52 + 91.10X_1 + 57.13X_2 + 56.37X_3 - 61.60X_1X_3 + 83.04X_1^2 + 117.29X_2^2 \tag{20}$$

$$y_2 = 242.89 + 44.78X_1 - 51.62X_2 - 63.90X_3 + 47.70X_2X_3 + 50.83X_1^2 + 18.66X_2^2 \tag{21}$$

表 4 试验方案与结果

Tab. 4 Experiment layout and results

序号	因素			指标		
	X_1	X_2	X_3	y_1/N	y_2/N	U_j/%
1	-1	-1	-1	493.33	453.75	89.44
2	1	-1	-1	786.67	545.31	84.15
3	-1	1	-1	590.22	286.54	81.96
4	1	1	-1	922.63	326.25	80.43
5	-1	-1	1	829.76	182.25	89.84
6	1	-1	1	802.48	280.83	86.86
7	-1	1	1	803.83	181.95	85.48
8	1	1	1	964.09	271.44	87.45
9	-1.682	0	0	600.91	294.57	90.36
10	1.682	0	0	889.54	468.33	81.14
11	0	-1.682	0	719.71	382.34	88.64
12	0	1.682	0	964.52	198.59	81.45
13	0	0	-1.682	439.56	317.15	87.69
14	0	0	1.682	536.23	211.76	91.46
15	0	0	0	515.41	246.47	89.24
16	0	0	0	510.62	266.36	90.17
17	0	0	0	554.73	205.69	90.56
18	0	0	0	608.69	265.13	89.89
19	0	0	0	622.46	211.24	90.03
20	0	0	0	605.19	235.86	89.25
21	0	0	0	512.62	268.37	91.07
22	0	0	0	543.85	203.49	86.98
23	0	0	0	511.79	231.63	89.56

$$U_j = 89.53 - 1.71X_1 - 1.98X_2 + 1.46X_3 + 1.09X_1X_2 + 0.93X_2X_3 - 1.56X_1^2 - 1.81X_2^2 \tag{22}$$

为更直观分析评价指标与试验因素之间关系,利用 Design-Expert 8.0.6 软件得到响应曲面,根据上述回归方程和响应曲面图可知,圆盘直径、圆盘夹角、圆盘倾角之间存在交互作用。

由图 12a 可知,当圆盘倾角一定时,前进阻力 y_1 随着圆盘直径的增加呈增大趋势,最优的圆盘直径在 344 ~ 360 mm 范围内,原因是随着圆盘直径增加,开沟器在前进过程中的扰动域变大,导致前进阻力增加;当圆盘直径一定时,前进阻力 y_1 随着圆盘倾角的增加呈增大趋势,最优的圆盘倾角在 4.2° ~ 6°范围内,原因是随着圆盘倾角增加,开沟斜圆盘在前进过程中向外抛土量增大,导致前进阻力增加。在圆盘直径与圆盘夹角的交互作用中,影响前进阻力 y_1 的主要因素是圆盘直径。

由图 12b 可知,当圆盘倾角一定时,侧向合力 y_2 随着圆盘夹角的增加呈减小趋势,最优的圆盘夹角在 14° ~ 16.5°范围内,原因是定位直圆盘一侧土壤紧实度较高且入土深度较深,所受侧向力较大;随着圆盘夹角增加,开沟斜圆盘在前进过程中的扰动域变大,推土量增加,开沟斜圆盘所受侧向力增大。因两圆盘侧向力方向相反,导致开沟器的侧向合力减小。当圆盘夹角一定时,侧向合力 y_2 随着圆盘倾角的增加呈减

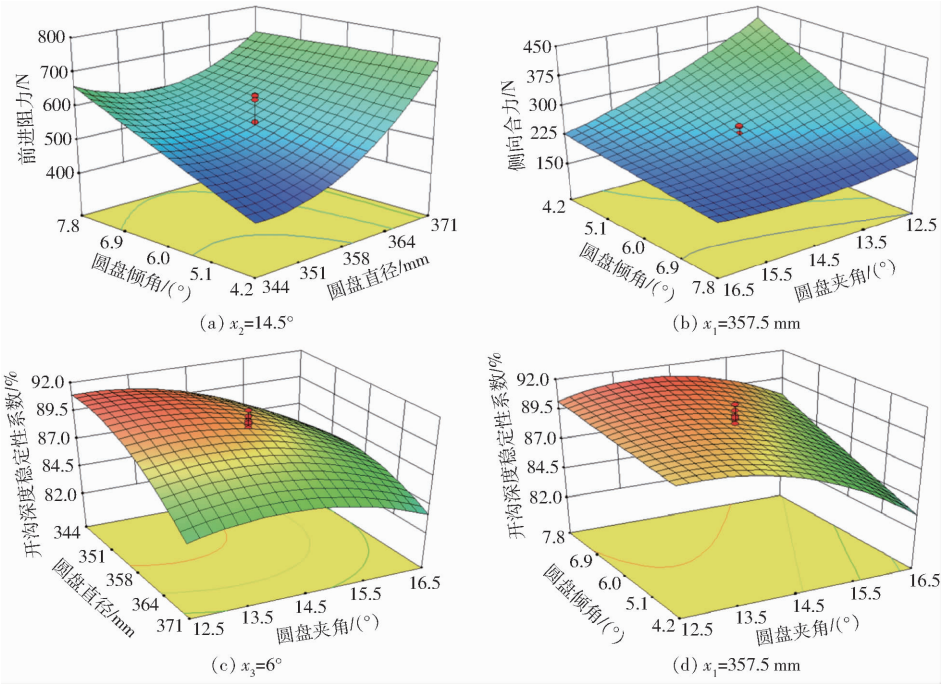

图 12　多因素试验响应曲面分析

Fig. 12　Response surface analyses of multi-factor experiment

小趋势，最优的圆盘倾角在 5.5°～7.8°范围内，原因是随着圆盘倾角变大，开沟斜圆盘与土壤接触面积增大，开沟斜圆盘所受侧向力变大，导致开沟器侧向合力减小。在圆盘夹角与圆盘倾角的交互作用中，影响侧向合力 y_2的主要因素是圆盘倾角。

由图 12c 可知，当圆盘夹角一定时，开沟深度稳定性系数 U_j随着圆盘直径的增加呈先增加后减小的趋势，最优的圆盘直径在 344～360 mm 范围内，原因是圆盘直径较小时，开沟器的破茬能力较差，未被切断的根茬拖动易破坏肥种沟形状，随着圆盘直径增加，开沟器的通过性能提高，开沟深度稳定性系数升高；当圆盘直径过大时，开沟斜圆盘扰动域较大，回土量较大，且试验地存在土壤结块现象，土壤易成块回流，回土量不均匀，导致开沟深度稳定系数降低；当圆盘直径一定时，开沟深度稳定性系数 U_j随着圆盘夹角的增加呈先增加后减小的趋势，最优的圆盘夹角在 12.5°～15°范围内，原因是圆盘夹角较小时，回土量较大，随着圆盘夹角变大，回土量减小，开沟深度稳定性系数升高，但当圆盘夹角过大时，会形成肥种沟沟底凸起，导致开沟深度稳定性系数降低。在圆盘直径与圆盘夹角的交互作用中，影响开沟深度稳定性系数 U_j的主要因素是圆盘夹角。

由图 12d 可知，当圆盘倾角一定时，开沟深度稳定性系数 U_j随着圆盘夹角的增加呈先增加后减小的趋势，最优的圆盘夹角在 13°～15°范围内；当圆盘夹角一定时，开沟深度稳定性系数 U_j随着圆盘倾角的增加呈缓慢上升的趋势，最优的圆盘倾角在 5.5°～7.8°范围内，原因是当圆盘倾角增大时，开沟斜圆盘向外抛土量随之增加，回土量降低，从而提高开沟深度稳定性系数。在圆盘夹角与圆盘倾角的交互作用中，影响开沟深度稳定性系数 U_j的主要因素是圆盘夹角。

4.4　参数优化与对比试验

4.4.1　参数优化

应用 Design-Expert 软件平台的 Optimization 模块对回归模型进行优化求解，优化目标为

$$\begin{cases} \min y_1(x_1,x_2,x_3) \\ \min y_2(x_1,x_2,x_3) \\ \max U_j(x_1,x_2,x_3) \\ \text{s.t.} \begin{cases} 344\ \text{mm} \leqslant x_1 \leqslant 360\ \text{mm} \\ 12.5° \leqslant x_2 \leqslant 16.5° \\ 4.2° \leqslant x_3 \leqslant 7.8° \end{cases} \end{cases} \tag{23}$$

经求解，获得最优参数组合为：圆盘直径为 352.78 mm、圆盘夹角为 14.03°、圆盘倾角为 7.53°，为便于加工将最优参数圆整后为：圆盘直径 352 mm、圆盘夹角 14°、圆盘倾角 7.5°，得到直斜错位双圆盘肥种沟开沟器的前进阻力为 585.96 N，侧向合力为 181.95 N，开沟深度稳定性系数为 91.46%。

4.4.2　对比试验

为验证优化结果的可靠性和开沟器的结构合理性，在侧深施肥条件下，对最优参数下直斜错位双圆盘肥种沟开沟器与传统对称式双圆盘开沟器（圆盘直径 340 mm、圆盘夹角 16°）进行对比试验，测量作

业过程中的前进阻力、侧向合力、开沟深度稳定性系数、开沟直线度均值和标准差,相同试验条件下重复验证 5 次,结果取平均值。

由表 5 可知,与传统双圆盘开沟器相比,直斜错位双圆盘肥种沟开沟器的前进阻力增加 19%,侧向合力降低 47%。前进阻力增加是由于定位直圆盘入土深度增加,圆盘与土壤接触面积和刃缘弧长变大,引起刃口切削力与侧面滚切力增大,同时开沟斜圆盘存在圆盘倾角,扰动域变大,向前推土量增大;侧向合力大幅降低,有效避免了施肥播种单体跑偏和掉垄的情况发生。开沟深度稳定系数提高 9.38 个百分点,开沟直线度均值降低 6.65 mm,标准差降低 2.05 mm。结果表明,肥种沟开沟器的横向稳定性较好、开沟质量较高。

表 5 对比试验结果

Tab. 5 Results of contrast experiment

开沟器类型	前进阻力/N	侧向合力/N	开沟深度稳定性系数/%	开沟直线度均值/mm	开沟直线度标准差/mm
直斜错位双圆盘肥种沟开沟器	556.33	196.61	93.08	9.91	3.08
传统对称式双圆盘开沟器	467.51	373.06	83.70	16.56	5.13

5 田间性能试验

为检验样机的田间作业性能,于 2020 年 10 月在东北农业大学农学院试验地进行田间试验。试验前对试验地条件进行测定,玉米秸秆覆盖量平均为 735.8 g/m^2,土壤含水率为 18.73%;土壤硬度为 545 kPa。试验时取 150 m 为一个工作行程,以文献[35-36]及 GB/T 20865—2007《免耕施肥播种机》作为评定标准,免耕播种机的作业质量如图 13、表 6 所示。试验结果表明机具的横向稳定性较好,施肥播种精度较高,满足免耕播种机作业性能要求。



图 13 田间性能试验

Fig. 13 Field performance experiment

表 6 样机性能试验结果

Tab. 6 Results of prototype performance experiment

测试项目	数值
粒距合格指数/%	87.3
种肥垂直距离合格率/%	91.7
种肥侧向距离合格率/%	92.4
播种深度变异系数/%	10.7
播种横向变异系数/%	28.4
机具掉垄次数	0
机具通过性/%	100

6 结论

(1)基于侧深施肥农艺要求,针对侧深施肥免耕播种作业中易出现偏摆或掉垄的问题,设计了一种可以底肥侧位深施、口肥垂直分施的免耕播种机侧深分层施肥播种部件,并对其施肥铲、开沟器、护种板等关键部件的结构参数进行理论分析和计算。

(2)通过施肥播种部件在水平面内的受力分析,得出影响其作业横向稳定性的主要因素为开沟器与铰接点的间距和侧向合力,据此确定施肥播种部件相对位置关系,并设计直斜错位双圆盘肥种沟开沟器,通过理论分析确定影响其侧向合力的主要结构参数及取值范围。利用响应曲面优化法,通过田间试验对侧深施肥条件下肥种沟开沟器结构参数进行优化设计,获得最佳参数组合为:圆盘直径 352 mm、圆盘夹角 14°、圆盘倾角 7.5°,此时前进阻力为 585.96 N、侧向合力为 181.95 N、开沟深度稳定性系数为 91.46%。

(3)通过对比试验可知,在侧深施肥条件下,直斜错位双圆盘肥种沟开沟器的侧向合力比传统对称式双圆盘开沟器降低 47%,开沟深度稳定性系数提高 9.38 个百分点,开沟直线度明显提高。所设计的直斜错位双圆盘肥种沟开沟器通过设置定位直圆盘可大幅减小非施肥铲一侧圆盘的侧向力,并起到找正作用,配合调整开沟斜圆盘的夹角与倾角,可以降低因播种带两侧土壤紧实度不同而引起的施肥播种部件水平面内的转动力矩,从而提高横向稳定性。由于增大了定位直圆盘的入土深度,故前进阻力有所增加。

(4)通过田间性能试验可知,样机作业过程中无掉垄堵塞情况,播种深度变异系数、横向变异系数分别为 10.7%、28.4%,种肥垂直与侧向距离合格率分别为 91.7%、92.4%,满足机具作业时的横向稳定性和施肥播种精度要求。

参 考 文 献

[1] 崔爱民,张久刚,张虎,等. 我国玉米生产现状及发展变革[J]. 中国农业科技导报,2020,22(7):10 - 19.
CUI Aimin, ZHANG Jiugang, ZHANG Hu, et al. Preliminary exploration on current situation and development of maize production in China[J]. Journal of Agricultural Science and Technology,2020,22(7):10 - 19. (in Chinese)

[2] ANTONIL P,REOGERIO B. Phosphorus and potassium distribution in soil following long-term deep-band fertilization in different tillage systems[J]. Soil Science Society of America Journal,2006,70(2):702 - 707.

[3] 马阳,吴敏,刘晓明,等. 夏玉米根系活性、养分吸收和产量对不同施肥方式的响应[J]. 中国土壤与肥料,2020(5):95 - 100.
MA Yang,WU Min, LIU Xiaoming, et al. Responses of root activity, nutrient uptake and yield of summer maize to different fertilization methods[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China,2020(5):95 - 100. (in Chinese)

[4] 杨绍林,樊仙,郭家文,等. 轻简高效栽培技术研究现状[J]. 甘蔗糖业,2017(5):52 - 60.
YANG Shaolin,FAN Xian,GUO Jiawen,et al. Current research of simplified and efficient cultivation techniques[J]. Sugarcane and Canesugar,2017(5):52 - 60. (in Chinese)

[5] 李志勇,王璞,MARION Boening-Zilkens,等. 优化施肥和传统施肥对夏玉米生长发育及产量的影响[J]. 玉米科学,2003(3):90 - 93,97.
LI Zhiyong, WANG Pu, MARION Boening-Zilkens, et al. Effects of the optimized fertilization and traditional fertilization on growth, development and yield of summer maize[J]. Journal of Maize Sciences,2003(3):90 - 93,97. (in Chinese)

[6] 王文君. 玉米优质种床构建关键技术及行间耕播机研究[D]. 长春:吉林大学,2019.
WANG Wenjun. Research on key technologies of constructing high-quality maize seedbed and its inter-row till-planter[D]. Changchun:Jilin University,2019. (in Chinese)

[7] GRISSO R B, HOLSHOUSER D, PITMAN R. Planter/drill considerations for conservation tillage systems[R]. Virginia Cooperative Extension, 2007:442 - 457.

[8] 格兰 2BQJ - 12 型精量播种机[J]. 农业机械,2015(12):42.

[9] 吉林康达 2BMZF - 6 免耕指夹精量施肥播种机[EB/OL]. http://www.Bchuayuan.com/cn/product/JL-KD-2BMZF-6-Tillage-Planter.html.

[10] DEBONT(德邦大为)2605 气吸式免耕精密播种机[EB/OL]. http://www.debont.com.cn/cn/product/22.html.

[11] 林静,刘安东,李宝筏,等. 2BG - 2 型玉米垄作免耕播种机[J]. 农业机械学报,2011,42(6):43 - 46,62.
LIN Jing,LIU Andong,LI Baofa,et al. 2BG - 2 type corn ridge planting no-till planter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2011,42(6):43 - 46,62. (in Chinese)

[12] 吕彬,杨悦乾,刘宏俊,等. 大豆双行侧深施肥免耕播种机关键部件设计与试验[J]. 大豆科学,2015,34(6):1047 - 1052.
LÜ Bin,YANG Yueqian,LIU Hongjun,et al. Design and experiment on twin-row soybean no-till planter[J]. Soybean Science, 2015,34(6):1047 - 1052. (in Chinese)

[13] 李慧,佟秋成,陈魁,等. 分层侧深施肥播种机的研发[J]. 中国农机化学报,2013,34(5):105 - 108.
LI Hui,TONG Qiucheng,CHENG Kui,et al. Research and development of layered and deep side fertilizing & precision seeding machine[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization,2013,34(5):105 - 108. (in Chinese)

[14] 徐云峰. 小型免耕播种机的设计与试验研究[D]. 北京:中国农业大学,2005.
XU Yunfeng. Design and experiment of the small no-tillage seeders[D]. Beijing:China Agricultural University,2005. (in Chinese)

[15] 陈海涛,查韶辉,顿国强,等. 2BMFJ 系列免耕精量播种机清秸装置优化与试验[J/OL]. 农业机械学报,2016,47(7):96 - 102.
CHEN Haitao,ZHA Shaohui, DUN Guoqiang, et al. Optimization and experiment of cleaning device of 2BMFJ type no-till precision planter[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2016,47(7):96 - 102. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no = 20160714&flag = 1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.07.014. (in Chinese)

[16] 高焕文,李洪文,姚宗路. 我国轻型免耕播种机研究[J]. 农业机械学报,2008,39(4):78 - 82.
GAO Huanwen,LI Hongwen,YAO Zonglu. Study on the chinese light no-till seeders[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2008,39(4):78 - 82. (in Chinese)

[17] 何进,李洪文,陈海涛,等. 保护性耕作技术与机具研究进展[J/OL]. 农业机械学报,2018,49(4):1 - 19.
HE Jin, LI Hongwen, CHEN Haitao, et al. Research progress of conservation tillage technology and machine[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2018,49(4):1 - 19. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no = 20180401&flag = 1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.04.001. (in Chinese)

[18] 刘艳芬,林静,李宝筏. 轻量化玉米垄作免耕播种机设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2017,48(11):60 - 69.
LIU Yanfen, LIN Jing, LI Baofa. Design and experiment on lightweight maize ridge planting no-tillage planter[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2017,48(11):60 - 69. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no = 20171108&flag = 1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.11.008. (in Chinese)

[19] 张晓雪,吴冬婷,龚振平,等. 施肥深度对大豆氮磷钾吸收及产量的影响[J]. 核农学报,2012,26(2):364 - 368.
ZHANG Xiaoxue,WU Dongting,GONG Zhenping,et al. Effect of fertilization depth on N,P and K absorption and yield in soybean[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences,2012,26(2):364 - 368. (in Chinese)

[20] 王贺. 华北平原砂质土壤夏玉米对肥料类型及施肥方法的响应研究[D]. 北京:中国农业科学院,2012.

WANG He. Summer maize response to fertilizer sources and their application methods in the sandy soils of North China Plain [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2012. (in Chinese)

[21] 宋秋来,张晓雪,周全,等. 侧向施肥距离对大豆氮磷钾吸收及产量的影响[J]. 大豆科学,2014,33(1):79 - 82.
SONG Qiulai, ZHANG Xiaoxue, ZHOU Quan, et al. Effect of lateral fertilization distance on N, P and K absorption and yield in soybean[J]. Soybean Science, 2014, 33(1): 79 - 82. (in Chinese)

[22] 赵淑红,刘宏俊,谭贺文,等. 仿旗鱼头部曲线型开沟器设计与性能试验[J]. 农业工程学报,2017,33(5):32 - 39.
ZHAO Shuhong, LIU Hongjun, TAN Hewen, et al. Design and performance experiment of opener based on bionic sailfish head curve[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(5): 32 - 39. (in Chinese)

[23] 赵淑红,周勇,刘宏俊,等. 玉米垄作深施肥免耕播种机关键部件设计与试验[J]. 东北农业大学学报,2015,46(11):102 - 108.
ZHAO Shuhong, ZHOU Yong, LIU Hongjun, et al. Design and experiment on ridge-till and deep fertilization no-till corn seeder [J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2015, 46(11): 102 - 108. (in Chinese)

[24] 张守勤,左春柽,马成林. 圆盘开沟器受力模型的研究[J]. 农业机械学报,1998,29(增刊):67 - 71.
ZHANG Shouqin, ZUO Chuncheng, MA Chenglin. The study on the model of disc coulter force[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 1998, 29(Supp.): 67 - 71. (in Chinese)

[25] 马延武. 播种机开沟器参数优化与试验研究[D]. 洛阳:河南科技大学,2018.
MA Yanwu. Optimization and experimental research on opener parameters of seeder[D]. Luoyang: Henan University of Science and Technology, 2018. (in Chinese)

[26] 龚振平,杨悦乾,赵艳忠. 一种配装在免耕播种机上的双圆盘直斜错位双圆盘肥种沟开沟器:201820672179.9[P]. 2018 - 12 - 07.

[27] 庄健,贾洪雷,马云海,等. 具有滑刀式缺口的圆盘开沟器设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2013,44(增刊1):83 - 88.
ZHUANG Jian, JIA Honglei, MA Yunhai, et al. Design and experiment of sliding-knife-type disc opener[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(Supp. 1): 83 - 88. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no = 2013s116&flag = 1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2013.S1.016. (in Chinese)

[28] 罗红旗,高焕文,刘安东,等. 玉米垄作免耕播种机研究[J]. 农业机械学报,2006,37(4):45 - 63.
LUO Hongqi, GAO Huanwen, LIU Andong, et al. Study on ridge-till and no-till corn planter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006, 37(4): 45 - 63. (in Chinese)

[29] 曹鑫鹏,王庆杰,李洪文,等. 玉米免耕播种机侧置切刀与拨茬齿盘组合清茬装置研究[J/OL]. 农业机械学报,2021,52(3):36 - 44.
CAO Xinpeng, WANG Qingjie, LI Hongwen, et al. Combined row cleaners research with side cutter and stubble clean disk of corn no-till seeder[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(3): 36 - 44. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no = 20210304&flag = 1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2021.03.004. (in Chinese)

[30] 王超,刘从京,李洪文,等. 非对称式大小圆盘开沟装置设计与试验[J]. 农业工程学报,2018,34(18):28 - 36.
WANG Chao, LIU Congjing, LI Hongwen, et al. Design and experiment of asymmetric large-small double discs ditching device [J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(18): 28 - 36. (in Chinese)

[31] 张军昌,闫小丽,薛少平,等. 秸秆粉碎覆盖玉米免耕施肥播种机设计[J/OL]. 农业机械学报,2012,43(12):51 - 55.
ZHANG Junchang, YAN Xiaoli, XUE Shaoping, et al. Design of no-tillage maize planter with straw smashing and fertilizing[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(12): 51 - 55. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no = 20121210&flag = 1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2012.12.010. (in Chinese)

[32] 刘燕,后之明. 窄刀板切削过程的三维双非线性有限元分析[J]. 农业机械学报,1987,18(3):18 - 26.
LIU Yan, HOU Zhiming. Three dimensional analysis of nonlinear finite element by a narrow blade cutting[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 1987, 18(3): 18 - 26. (in Chinese)

[33] 刘文政,何进,李洪文,等. 马铃薯微型种薯种植机双侧位深施肥装置设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2020,51(1):56 - 65.
LIU Wenzheng, HE Jin, LI Hongwen, et al. Design and experiment of double-side deep fertilizing device for potato micro-seed planter[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(1): 56 - 65. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no = 20200106&flag = 1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2020.01.006. (in Chinese)

[34] 中国农业机械化科学研究院. 农业机械设计手册[M]. 北京:中国农业科学技术出版社,2007.

[35] 贾洪雷,郑嘉鑫,袁洪方,等. 大豆播种机双 V 型筑沟器设计与试验[J]. 吉林大学学报(工学版),2017,47(1):323 - 331.
JIA Honglei, ZHENG Jiaxin, YUAN Hongfang, et al. Design and experiment of a double-V-shaped furrow opener of soybean seeder[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2017, 47(1): 323 - 331. (in Chinese)

[36] 王庆杰,何进,姚宗路,等. 驱动圆盘玉米垄作免耕播种机设计与试验[J]. 农业机械学报,2008,39(6):68 - 72.
WANG Qingjie, HE Jin, YAO Zonglu, et al. Design and experiment on powered disc no-tillage planter for ridge-tillage[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(6): 68 - 72. (in Chinese)