doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.11.012

马铃薯种植机分层施肥开沟器设计与试验

杨然兵[1,2]　杨红光[1]　连政国[1,3]　张　还[1]　郭　栋[1]　郑媛媛[1]

(1. 青岛农业大学机电工程学院, 青岛 266109; 2. 山东省主要农作物机械化生产装备协同创新中心, 青岛 266109;
3. 山东省根茎类作物生产装备工程技术研究中心, 青岛 266109)

摘要: 针对目前我国马铃薯种植机普遍存在的肥料定位不精确问题,结合马铃薯根系分布规律和一垄二行种植模式特点,提出了一种基于曲面排肥与 V 型防堵结构的分层施肥技术,设计了深度可调式分层施肥开沟器,研究了土壤与开沟部件之间运动关系,并对肥料在曲面分肥板上的运动规律进行了理论分析;以下层排肥量稳定性变异系数为试验指标进行了单因素试验,确定了排肥器最佳槽轮工作长度;在此条件下,以排肥轴转速和曲面分肥板斜面倾角为试验因素,上层排肥盒左右侧排肥一致性变异系数为试验指标进行了通用旋转组合试验,运用 DPS 和 Matlab 软件进行回归方程显著性分析和参数优化,得出最佳因素组合为排肥轴转速 20.5 r/min,曲面分肥板斜面倾角 15°,此时上层排肥盒左右侧排肥一致性变异系数为 3.30%。最优参数下的重复试验结果表明,平均上层排肥盒左右侧排肥一致性变异系数为 3.71%,试验值与理论值相近;田间排肥性能试验结果表明,该开沟器作业流畅,排肥性能满足马铃薯施肥要求。

关键词: 马铃薯; 种植机; 开沟器; 分层施肥

中图分类号: S223.2　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2018)11-0104-10

Design and Experiment of Separated Layer Fertilization Furrow Opener for Potato Planter

YANG Ranbing[1,2]　YANG Hongguang[1]　LIAN Zhengguo[1,3]　ZHANG Huan[1]　GUO Dong[1]　ZHENG Yuanyuan[1]

(1. *College of Mechanical and Electrical Engineering, Qingdao Agricultural University, Qingdao* 266109, *China*
2. *Shandong Provincial Collaborative Innovation Centre of Mechanized Production Equipment for Staple Crops, Qingdao* 266109, *China*
3. *Shandong Provincial Engineering Technology Research Center for Root Crops Production Equipment, Qingdao* 266109, *China*)

Abstract: Aiming at the inaccuracy of fertilizer location in potato planter popularized in China, combined with the distribution law of potato root system and the planting pattern characteristics of one ridge two rows for potato, and the separated layer fertilization technology based on surface drainage and V type anti blocking structure was proposed. The design and analysis of separated layer fertilization furrow opener and a depth adjustable separated layer fertilization furrow opener was developed. The motion relationship between the soil and furrow opener was studied, and the movement process of fertilizer on curved surface fertilizing plate was analyzed. The variation coefficient of the stability of the lower layer was experimented by single factor bench test, and the optimum working length of groove wheel was 50 mm. Under the condition of optimum working length of groove wheel, the quadratic universal rotary assembly experiment of two factors were carried out with the rotation speed of manure shaft and the curved surface angle of fertilizing plate as experimental factors, the variation coefficient of the stability of left and right sides for upper layer fertilizing box as experimental index. The saliency analysis of regression equation and parameter optimization were obtained by using the DPS and Matlab software. The results showed that the rotation speed of fertilizing shaft of 20.5 r/min and the curved surface angle of fertilizing plate of 15° were the best combination factors, which led to the variation coefficient of the stability of left and right sides for upper layer fertilizing box of 3.30%. Five repeated experiments were carried out under the optimal

收稿日期: 2018-05-18　修回日期: 2018-06-21

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0200607)、山东省农机装备研发创新计划项目(2017TH002)和山东省协同创新中心资金项目(2115002)

作者简介: 杨然兵(1979—),男,教授,博士,主要从事农业机械化技术研究,E-mail: yangranbing@163.com

通信作者: 连政国(1964—),男,教授,主要从事农业机械化技术研究,E-mail: zglian64@126.com

parameters. The results showed that the average variation coefficient of the stability of left and right sides for upper layer fertilizing box was 3.71%, and the experimental value was similar to that of the theoretical value. Meanwhile, the field performance experiment showed that the performance of separated layer fertilization furrow opener completely met the relevant standards of potato planting.

Key words: potato; planter; furrow opener; separated layer fertilization

0　引言

机械化施肥作为马铃薯种植的重要环节，其作业性能将直接影响后期产量。然而现阶段我国推广应用的马铃薯种植机施肥方式较为单一，普遍存在肥料定位不精确问题[1-3]。精准施肥技术是解决农作物化肥过量施用的一个重要技术手段[4]。在欧美等国家农业生产中，围绕精准施肥农田信息采集、变量施肥分析决策、精准施肥智能化作业装备等方面开展了系统化研究，但针对分层施肥技术研究未见报道。

国内近年来在精准施肥技术装备方面的研究力度不断加大。李辉等[5]研制了一种垂直分层开沟器，姚万生等[6]研制了一种组合式开沟器，这两种开沟器都可以实现种肥的分层播施，但是其施肥量和施肥深度不能调节。针对上述问题，王云霞等[7]研制了一种排肥量可调式玉米分层施肥器；顿国强等[8-10]设计了一种针对大豆的调比控位分层施肥装置。但是由于马铃薯一垄二行种植模式和根系分布规律与其他农作物（玉米、小麦和大豆等）不同，以上这些施肥装置不能直接应用到马铃薯种植机上。

本文结合马铃薯根系分布规律和一垄二行马铃薯种植特点，设计一种可以实现肥料分层分施的开沟装置，以减少化肥施用量和提高马铃薯产量。

1　马铃薯种植特点与施肥农艺要求

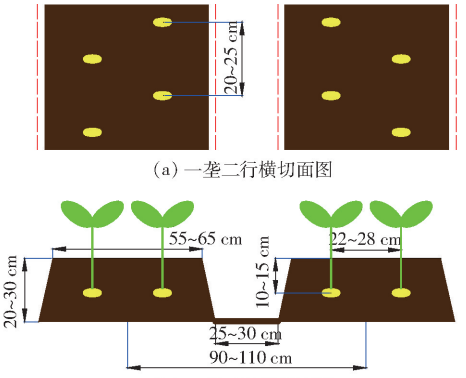
1.1　马铃薯种植特点

我国马铃薯种植模式主要为垄作模式，同时又可细分为一垄一行和一垄二行。图 1 所示为本设计采用的一垄二行种植模式。

1.2　马铃薯施肥农艺要求

我国现有马铃薯种植机种肥播施方式主要是侧位分施。如图 2 所示，针对一垄二行种植模式，其播施方式为将肥料施于两行中间，肥料与种子的相对位置主要通过横向间距 a 和纵向间距 b 来控制，一般情况下 a 由二行马铃薯行距决定，b 取 5 ~ 8 cm 为宜。

按照马铃薯需肥规律和根系分布特点，提出一种分层施肥方案。即：将化肥分成 2 层来进行播施，



(a) 一垄二行横切面图

(b) 一垄二行纵切面图

图 1　马铃薯一垄二行种植模式

Fig. 1　Planting pattern of one ridge two rows for potato

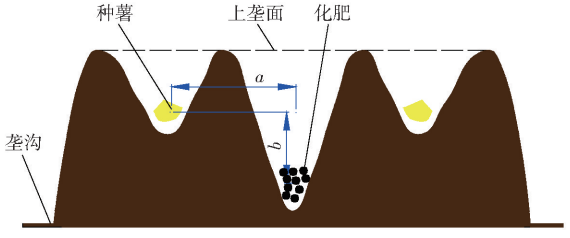


图 2　现有施肥方式

Fig. 2　Existing methods of fertilization

下层播施肥料较多，上层播施肥料较少，上层肥料与下层肥料施用量比例为 3∶7。其中上层肥料实现左、右分施，让每侧 15% 左右的肥料接近种薯，保证种薯生长所需养分，尽可能提高肥料利用率。其播施方式如图 3 所示，肥料与种子的相对位置主要通过下层肥料与种子之间的横向间距 a、纵向间距 b 以及上层肥料与种子之间的横向间距 c、纵向间距 d 来控制，一般情况下 a 由二行马铃薯行距决定，b 取 5 ~ 8 cm 为宜，c 在 3 ~ 5 cm 可调，d 在 0 ~ 3 cm 可调。

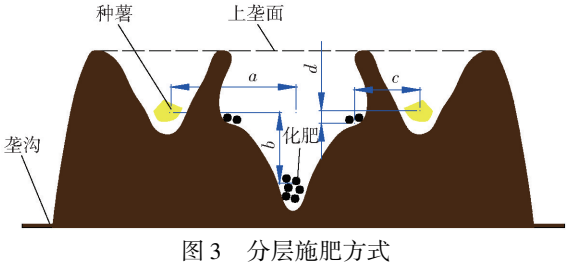


图 3　分层施肥方式

Fig. 3　Methods of separated layer fertilization

2　分层施肥开沟器设计

2.1　开沟器整体结构

组合式分层施肥开沟器整体结构如图 4 所示。

主要由前铲体、分土板、安装连板、上层导肥管、下层导肥管、曲面分肥盒、V 型防堵口等组成。

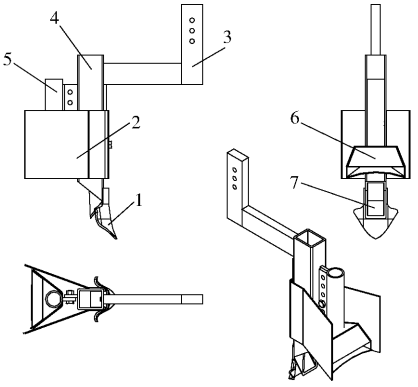


图 4 分层施肥开沟器结构图

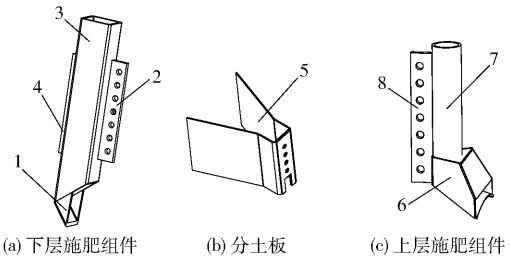
Fig. 4 Structure diagram of separated layer fertilization furrow opener

1. 前铲体 2. 分土板 3. 安装连板 4. 上层导肥管 5. 下层导肥管 6. 曲面分肥盒 7. V 型防堵口

依据一垄二行马铃薯种植农艺要求,种薯块与肥料并非同沟分层排布,而是在两行种薯块中间进行开沟施肥作业。在同沟分层施肥的基础上,对锄铲式开沟器进行了改进,创新设计了一种组合式开沟器,利用滑切式开沟器回土结构实现下层肥料的覆土掩埋作业[11-12],同时利用开沟器凿型曲面结构实现上层肥料沿曲面排肥盒两个尾角侧向分施。

分层施肥开沟器通过安装连板与种植机机架特定连接部件进行连接,并通过安装连板上部的定位孔调节下层开沟施肥深度;为方便连接安装,结合种植机机架尺寸,设计的安装连接板由两块长为 150 mm、宽为 40 mm、厚为 18 mm 的钢板焊接而成。下层导肥管底部设计的 V 型防堵结构,可以有效防止施肥口下部雍土;为方便加工防堵口选用与下层导肥管相同的方管切割加工而成,其尺寸为长 35 mm、高 40 mm,同时为保证肥料可以顺利从防堵口中下落,将 V 型防堵口与下层导肥管斜面呈 130°焊接。下层导肥管和曲面排肥盒通过其背面焊接的带孔连接板与上层导肥管后面焊接的连接板通过螺栓连接,并可调整上层施肥深度。

如图 5a 所示,设计的下层施肥组件主要由下层导肥管、前带孔连接板、后带孔连接板和 V 型防堵口等组成。下层导肥管采用长方管切割焊接而成,长边为 280 mm,短边为 242 mm,前后两块带孔连接板均由钢板加工而成。如图 5b 所示,为方便加工和安装将分土板设计成左右两块,利用正面圆孔与下层施肥组件前带孔连接板通过螺栓配合。如图 5c 所示,设计的上层施肥组件主要由上层导肥管、带孔连接板和曲面排肥盒组成。上层导肥管由外径为 32 mm、壁厚为 2 mm 的圆管加工而成,为方便调整和焊接其长度设计为 130 mm。



(a) 下层施肥组件 (b) 分土板 (c) 上层施肥组件

图 5 分层施肥开沟器组件

Fig. 5 Assembly of separated layer fertilization furrow opener

1. V 型防堵口 2. 后带孔连接板 3. 下层导肥管 4. 前带孔连接板 5. 分土板 6. 曲面排肥盒 7. 上层导肥管 8. 带孔连接板

2.2 土壤在分层施肥开沟器分土板上运动学分析

开沟器分土板作为继前铲体之后与土壤直接作用的部件,土壤在其上的运动规律对下层肥料的回土覆盖和上层肥沟的创建均有重要影响,为此需对土壤在分土板上的运动特性进行分析。

设计的组合式开沟器安装在种植机排肥器下方机架上,随着拖拉机向前运动,开沟器前铲体入土,并对土壤进行切削破碎,为下层肥料创造适宜的肥沟;同时独特的 V 型防堵结构可以防止回土堵塞下层出肥口,下层排肥组件上安装的分土板与前铲体适宜的安装位置,可有效保证下层肥料的回土覆盖,同时也能为上层肥料创造良好的肥沟和提供充足的回土,对上层肥料进行覆盖。

开沟器在工作过程中,前铲体将土壤切碎,在种植机前进速度作用下,分土板下部土壤回落,对底层肥料进行覆盖,同时前铲体与分土板之间落差形成了上层肥沟;分土板一方面起到保护曲面排肥盒不受土壤堵塞作用,另一方面起到倒土和为上层肥料提供回土覆盖的功能。为满足曲面排肥盒作业需求并考虑到整个开沟器结构尺寸,分土板侧面外倾角设计为 150°,其角度远远大于土壤的摩擦角,土壤颗粒可在重力的作用下回落入肥沟内;同时为保证分土板能更好地实现分土功能,设计分土板高度为 130 mm。前铲体上沿土壤可沿分土板侧面向后运动。若将土壤颗粒看作散粒体,假设没有其他外力作用的情况下,土壤颗粒只存在与分土板侧面的相互作用力[13-16],则在开沟过程中开沟器运动为匀速运动。

如图 6 所示,以接触面上一点为例,土壤颗粒主要受到分土板侧面支持力 F_N、自身重力 mg 和分土板侧面带来的摩擦力 F_F 等相互作用,其所受合力为 F_R。把分土板侧面对土壤颗粒的支持力分解为沿接触面方向和与速度方向相同的两个分力 F_{N1}、F_{N2},土粒颗粒在接触面上滑动,由于切向应力大于摩擦阻力,所以分土板接触面对土壤有滑切作用。土壤

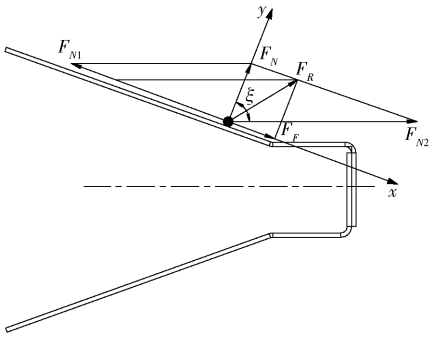


图 6　土壤颗粒在分土板侧面运动分力示意图

Fig. 6　Motion of soil particles on side of soil partition plate

颗粒受到合力作用,其方向如图中所示,土壤颗粒的绝对运动方向也沿着此方向。此时土壤颗粒的运动微分方程为

$$\begin{cases} m\dfrac{\mathrm{d}^2x}{\mathrm{d}t^2}=F_N(\tan\xi-\tan\psi) \\ m\dfrac{\mathrm{d}^2y}{\mathrm{d}t^2}=0 \\ F_N=\dfrac{mg}{2\tan\zeta} \end{cases} \tag{1}$$

式中　ξ——前进速度方向与法线夹角,(°)

ψ——土壤颗粒与分土板侧面间摩擦角,一般取 15°~38°

m——土壤颗粒自身质量,kg

ζ——土壤自然休止角,(°)

土壤颗粒在分土板接触面上位移与速度方程为

$$\begin{cases} x=\dfrac{gt^2}{4}\dfrac{\tan\xi-\tan\psi}{\tan\zeta} \\ v_x=\dfrac{gt}{2}\dfrac{\tan\xi-\tan\psi}{\tan\zeta} \end{cases} \tag{2}$$

当土壤颗粒运动到分土板边缘时,此临界位置作用在土壤颗粒上的力主要为分土板侧面对土壤颗粒的摩擦力,使土壤颗粒沿着前进速度方向运动;同时还有边缘土层对接触面土壤颗粒作用力,此时满足

$$\begin{cases} m\dfrac{\mathrm{d}^2x}{\mathrm{d}t^2}=F_N(\tan\psi_1-\tan\psi) \\ m\dfrac{\mathrm{d}^2y}{\mathrm{d}t^2}=0 \\ v_x=\dfrac{gt}{2}\dfrac{\tan\psi_1-\tan\psi}{\tan\zeta} \end{cases} \tag{3}$$

式中　ψ_1——土壤颗粒间的摩擦角,(°)

若把上一过程的最终状态当作此过程的初始状态,则可求得

$$\begin{cases} v_o=\dfrac{gt}{2}\dfrac{\tan\psi_1-\tan\psi}{\tan\zeta}\sin\xi \\ v_x=\dfrac{gt}{2}\left(\dfrac{\tan\psi_1-\tan\psi}{\tan\zeta}+\dfrac{\tan\psi_1-\tan\psi}{\tan\zeta}\sin\xi\right) \end{cases} \tag{4}$$

式中　v_o——土壤颗粒初始速度,m/s

则土壤颗粒脱离分土板侧面的瞬间速度为

$$v_x=\sqrt{\frac{xg[\tan\psi_1-\tan\psi+(\tan\psi_1-\tan\psi)\sin\xi]}{\tan\zeta}}$$

当土壤颗粒运动到分土板边缘后,进入了回土过程。在回土过程中,首先是边缘的土壤颗粒下落,紧接着是自然休止角范围内的土壤颗粒下落。

2.3　颗粒肥料在曲面排肥盒上运动学分析

曲面分肥盒作为上层施肥组件关键部件,对上层肥料分施效果有重要影响。为探明颗粒肥料落入曲面排肥盒之后的运动轨迹和影响左右侧分肥效果,需对颗粒肥料在曲面排肥盒上的运动学特性进行分析。

如图 7 所示,曲面排肥盒主要由底部曲面分肥板、后挡板、上挡板和侧面护板组成,各部分零件全部采用厚度为 2 mm 的钢板拼焊而成。工作过程中肥料通过与上挡板圆孔焊接的第二导肥管,落入底面曲面分肥板上,然后肥料实现左右分施,最后落入肥沟中。

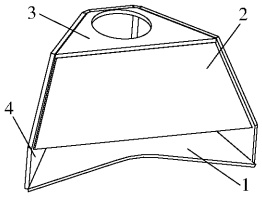


图 7　曲面排肥盒结构图

Fig. 7　Structure of curved surface fertilizing box

1. 曲面分肥板　2. 后挡板　3. 上挡板　4. 侧面护板

颗粒肥料在下落过程中,受肥料之间相互作用力、自身重力及曲面分肥板斜面倾角等影响,其落入到底部曲面分肥板上之后的运动具有不确定性。为此需通过理论和试验相结合的方法,研究分析肥料从上层导肥管落入底面曲面分肥盒之后的运动轨迹。如图 8 所示,以单个颗粒肥料为研究对象,其运动轨迹主要分为 4 种情况。

第 1 种如图中绿色线条所示,其运动轨迹为 $A_1\rightarrow A_2\rightarrow A_3\rightarrow A_4\rightarrow A_5\rightarrow A_6$;此情况下颗粒肥料首先落到曲面分肥板上,然后弹起碰到上面后挡板,再次落到曲面分肥板上,随着动能减小,颗粒肥料在分肥板曲面上滑动或滚动,直至落入肥沟。

第 2 种如图中红色线条所示,其运动轨迹为 $B_1\rightarrow B_2\rightarrow B_3\rightarrow B_4\rightarrow B_5\rightarrow B_6$;由于受肥料间相互作用力影响,60% ~70% 颗粒肥料的运动是这种情况。此情况下颗粒肥料都是在曲面分肥板上运动,落入曲面分肥板上的颗粒肥料,在曲面分肥板上被弹起一下或数下,随着动能减小,颗粒肥料在分肥盒曲面上滑动或滚动,直至落入肥沟。

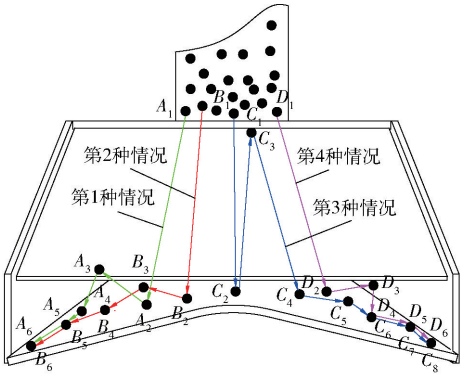


图 8 颗粒肥料在曲面排肥盒中运动轨迹

Fig. 8 Movement trajectory of fertilizer in curved surface fertilizing box

第 3 种如图中蓝色线条所示,其运动轨迹为 $C_1\rightarrow C_2\rightarrow C_3\rightarrow C_4\rightarrow C_5\rightarrow C_6\rightarrow C_7\rightarrow C_8$;由于受肥料间相互作用力的影响,只有少数颗粒肥料的运动是这种情况。此情况下颗粒肥料所具有的动能较大,落入曲面分肥板上的颗粒肥料,在曲面分肥板上被弹起碰到上挡板,然后下落,继续在曲面分肥板上被弹起一下或者数下,随着动能减小,颗粒肥料在分肥盒曲面上滑动或滚动,直至落入肥沟;同时由于这种情况下颗粒肥料具有较大动能,部分处于 C_4 位置的颗粒肥料,有可能再次被弹起,碰触到侧面护板和后挡板上,然后再次被弹回曲面分肥板,进而继续在曲面分肥板上被弹起一下或者数下,随着动能减小,颗粒肥料在分肥板曲面上滑动或滚动,直至落入肥沟。

第 4 种如图中紫色线条所示,其运动轨迹为 $D_1\rightarrow D_2\rightarrow D_3\rightarrow D_4\rightarrow D_5\rightarrow D_6$;此情况下颗粒肥料首先落到曲面分肥板上,然后弹起碰到侧面挡板,再次落到曲面分肥板上,随着动能减小,颗粒肥料在分肥盒曲面上滑动或滚动,直至落入肥沟。

综上所述 4 种情况,落入曲面分肥盒中的颗粒肥料,其最后的运动都可归结为颗粒肥料在曲面分肥板上的运动,运动状态主要包括滑动和滚动。由于颗粒肥料在曲面分肥板上的正压力受初始速度和位置等因素影响,颗粒肥料的滑动、滚动以及滚-滑转化等运动状态也受摩擦因素和初始速度等影响,且颗粒肥料在曲面分肥板上的运动状态转化较为复杂。

如图 9 所示,为了简化分析颗粒肥料在曲面分肥板上的滑动与滚动运动,选取曲面分肥板顶点 A 处的颗粒肥料为研究对象,并作为颗粒肥料初始位置,忽略颗粒肥料外形尺寸,重量为 mg,曲面分肥板曲率半径为 R,曲面分肥板斜面倾角为 Σ,同时假设此位置处颗粒肥料在水平方向上的速度为 v。

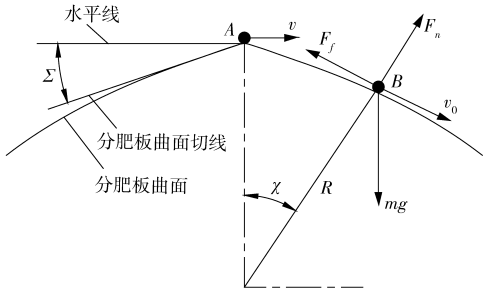


图 9 颗粒肥料在曲面分肥板上运动分析

Fig. 9 Motion analysis of fertilizer on curved surface fertilizing plate

颗粒肥料在光滑曲面分肥板上由 A 滑动到 B,在此位置上还将受到摩擦力 F_f 作用,记摩擦因数 $\mu=\tan\varphi$,其中 φ 为摩擦角,则滑落过程中受到的摩擦力 $F_f=\mu F_n$,且满足

$$m\frac{\mathrm{d}v_0}{\mathrm{d}t}=mg\sin\chi-\mu F_n \tag{5}$$

$$mv_0^2/R=mg\cos\chi-F_n \tag{6}$$

式中 v_0——肥料在 B 处位置上的速度,m/s

χ——肥料由 A 位置滑到 B 位置的角度,(°)

F_n——肥料在曲面分肥板上所受支持力,N

将式(6)代入式(5)消去支持力 F_n 之后,满足

$$\frac{\mathrm{d}v_0^2}{\mathrm{d}\chi}-2\mu v_0^2=2gR(\sin\chi-\mu\cos\chi) \tag{7}$$

化简求得

$$v_0^2=\mathrm{e}^{2\mu\chi}(v^2-gRF(\chi,\varphi)) \tag{8}$$

当 $0\leqslant v_0^2/(gR)\leqslant\cos\chi$ 时,则式(8)中存在关系

$$F(\chi,\varphi)=\frac{-2}{\cos\varphi}\int_0^{\chi}\mathrm{e}^{-2\mu\beta}\sin(\beta-\varphi)\,\mathrm{d}\beta=$$

$$\frac{2\mathrm{e}^{-2\mu\varphi}}{(1+4\mu^2)\cos\varphi}[\mathrm{e}^{-2\mu\beta}(2\mu\sin\beta+\cos\beta)]_{-\varphi}^{\chi-\varphi}$$

式中 β——积分变量

由上面分析可知,在不同摩擦因数和不同初速度下,颗粒肥料的下滑速度是不同的,且下滑速度也受曲面分肥板斜面倾角的影响。下滑过程中若曲面倾角较小,则此时重力势能下降较慢,同时重力法向的分力将会引起较大摩擦力,此时颗粒肥料动能将减小;后期滑动过程中若出现重力势能的减小超过摩擦力所做功时,则速度增加。若颗粒肥料初速度较低,则可能会出现肥料在曲面分肥板上停止的现象,但此时倘若存在微小扰动,使下滑力稍大于摩擦力,则颗粒肥料最终还是会脱离曲面分肥板而落入肥沟。

当颗粒肥料在曲面分肥板上滚动时,可将颗粒肥料近似为圆形颗粒物体[17-18],由于滚动阻力对运动过程影响极为复杂,且数值较小,为简化分析,忽略滚动阻力对颗粒肥料运动的影响,此时颗粒肥料

受到扰动将克服摩擦力，沿曲面分肥板曲面滚动而下，同时滚动半径 $r<R$，转动惯量为 J，角速度为 ω，则满足关系

$$m\frac{\mathrm{d}v_0}{\mathrm{d}t}=mg\sin\chi-F_f \tag{9}$$

$$mv_0^2/(r+R)=mg\cos\chi-F_n \tag{10}$$

$$J\frac{\mathrm{d}\omega}{\mathrm{d}t}=F_f r \tag{11}$$

当曲面分肥板斜面倾角较小时，颗粒肥料的运动为纯滚动。此时满足关系

$$v_0=(r+R)\frac{\mathrm{d}\chi}{\mathrm{d}t}=\omega r \tag{12}$$

然而当角度 χ 较大后，颗粒肥料所受正压力 F_n 较小，在滑脱时减小到零，则颗粒肥料在曲面分肥板上一定会出现滑动现象。

从式(9)和式(11)中消去摩擦力，并结合式(12)可以得出

$$\left(m+\frac{J}{r^2}\right)\frac{\mathrm{d}v_0}{\mathrm{d}t}=mg\sin\chi \tag{13}$$

为简化计算，将转动惯量记为

$$J=kmr^2 \tag{14}$$

式中　k——转动惯量系数

将式(13)回代入式(9)得到摩擦力计算公式为

$$F_f=\frac{k}{1+k}mg\sin\chi \tag{15}$$

由式(15)可知，当曲面分肥板斜面倾角小于 $\arctan(\mu(1+k)/k)$ 时，颗粒肥料在曲面分肥板上运动为纯滚动。此时摩擦力并不消耗能量，而是只将少量重力势能转化为转动所需的动能。由式(13)可以看出，纯滚动和没有摩擦力作用下的滑动类似，只是在纯滚动作用下加速度减小为 $g\sin\chi/(1+k)$。

当颗粒肥料在曲面分肥板上出现滚-滑转化运动时，由于在此时摩擦力仍满足 $F_f=\mu F_n$，所以与前面分析类似，若将积分边界条件改变为起滑点 $\chi=\chi_R$，则可以得到类似于式(8)的结果，即

$$v_0^2=\mathrm{e}^{2\mu\chi}[v_R^2\mathrm{e}^{-2\mu\chi_R}-g(r+R)H(\chi,\varphi)] \tag{16}$$

同时式(16)中满足

$$H(\chi,\varphi)=\frac{-2}{\cos\varphi}\int_{\chi_R}^{\chi}\mathrm{e}^{-2\mu\beta}\sin(\beta-\varphi)\,\mathrm{d}\beta$$

由上面分析可知，颗粒肥料落入曲面分肥盒之后在曲面分肥板上的运动存在多种情况，且运动较为复杂。同时颗粒肥料在曲面分肥板上的滑动、滚动以及滚-滑转化等运动形式受颗粒肥料自身特性、落入曲面分肥板上的初始速度和位置、颗粒肥料与曲面分肥板之间摩擦角和曲面分肥板斜面倾角等因素综合影响。

3　试验

为验证设计装置的性能，采用室内和室外相结合的方式进行试验。对于下层排肥部分选定影响较大的排肥轴转速和槽轮工作长度为因素，下层排肥量稳定性变异系数为指标进行单因素试验；上层排肥部分结合前面分析，选定排肥轴转速和曲面分肥板斜面倾角为因素，上层左右侧排肥一致性变异系数为指标进行二因素五水平通用旋转组合试验。

3.1　试验条件

试验在青岛农业大学工程楼实验室进行，试验用肥选择马铃薯种植常用的硫酸钾复合肥，总养分大于等于 45%(15% N,15% P,15% K)，肥料外形为颗粒状，肥料容重(密度)为 987 g/L，肥料自然休止角为 26.1°。试验仪器主要包括自制试验台、深圳欣宝瑞仪器有限公司生产的 DT6236B 型转速测量表、上海舜宇恒平科学仪器有限公司生产的数显式电子秤(精度为 0.1 g)。

3.2　试验评价指标

将每次试验排肥器 1 min 内排肥量进行称量记录，每组试验重复 5 次，计算变异系数

$$V_\mathrm{b}=\frac{S}{\overline{X}}\times100\% \tag{17}$$

其中

$$\overline{X}=\frac{\sum X}{M}$$

$$S=\sqrt{\frac{\sum(X-\overline{X})^2}{M-1}}$$

式中　X——每次排肥量，g　　S——标准差，g

$\overline{X}$——平均排肥量，g

M——测定次数

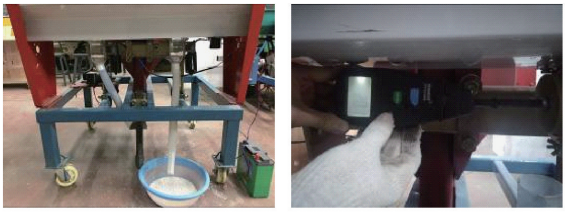
V_b——变异系数，%

3.3　试验方案和结果分析

3.3.1　下层排肥量稳定性试验

结合电动施肥器特点和排肥量需求，槽轮工作长度选 20、30、40、50、60、70 mm 6 个水平，排肥轴转速选取 15、20、25、30、35、40 r/min 6 个水平，通过单因素试验分析各个因素变化对试验指标的影响，并计算获取最小排肥量变异系数。通过电动机调速器旋钮改变排肥轴转速，并用转速测量表进行速度标定；通过电动排肥器自带蝶形螺母调节工作长度。试验照片如图 10 所示。

将试验数据进行统计与计算处理，结果如表 1 所示。当槽轮工作长度分别为 20、30、40、50、60、70 mm 时，下层排肥量稳定性变异系数与排肥轴转速之间关系如图 11 所示。



(a) 试验台架 (b) 转速测定

图 10 下层排肥性能试验

Fig. 10 Performance experiment of lower layer fertilizer

表 1 下层排肥量稳定性变异系数计算结果

Tab. 1 Calculation results of variation coefficient of lower layer fertilizer %

槽轮工作长度/cm	排肥轴转速/(r·min⁻¹)					
	15	20	25	30	35	40
20	1.31	0.68	0.98	1.33	0.65	0.65
30	1.41	0.84	0.66	0.71	0.65	1.06
40	0.93	0.66	1.10	0.83	0.65	0.75
50	0.65	0.91	0.67	0.65	0.76	0.83
60	1.58	0.71	0.65	0.66	0.64	1.36
70	0.72	0.64	0.93	1.03	1.22	0.64

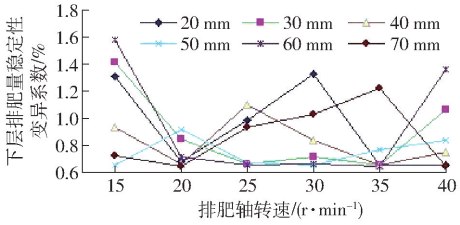


图 11 不同槽轮工作长度下下层排肥量稳定性变异系数与排肥轴转速关系曲线

Fig. 11 Relationship between stability variation coefficient of fertilizer and rotation speed of manure shaft at different working lengths of grooves

通过图 11 可以看出,当槽轮工作长度分别为 20、30、40、60、70 mm 时,下层排肥量稳定性变异系数受排肥轴转速变化影响较大,最大平均下层排肥量稳定性变异系数出现在槽轮工作长度为 20 mm 和 60 mm 时,其值均为 0.93%。而当槽轮工作长度为 50 mm 时,下层排肥量稳定性变异系数随排肥轴转速变化较小,最小平均变异系数为 0.75%。

3.3.2 上层排肥盒左右侧排肥一致性试验

通过试验验证曲面排肥盒性能。通过前面分析,试验取槽轮工作长度为 50 mm,同时考虑到因素对排肥性能的影响程度和试验的可操作性,选取排肥轴转速和曲面分肥板斜面倾角为试验因素,以上层排肥盒左右侧排肥一致性变异系数为试验指标。通过更换不同倾角的曲面分肥盒来实现曲面分肥板斜面倾角的调节;同时利用硬质塑料袋分别对曲面排肥盒左右侧排出的肥料进行收集与称量。图 12 所示为试验用 5 种不同曲面倾角的分肥盒,图中 1 是斜面倾角为 16°的曲面分肥盒;图中 2 是斜面倾角为 15.5°的曲面分肥盒;图中 3 是斜面倾角为 14°的曲面分肥盒;图中 4 是斜面倾角为 12.5°的曲面分肥盒;图中 5 是斜面倾角为 12°的曲面分肥盒。试验过程如图 13 所示。

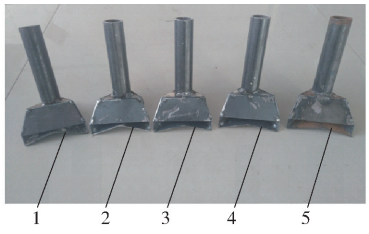
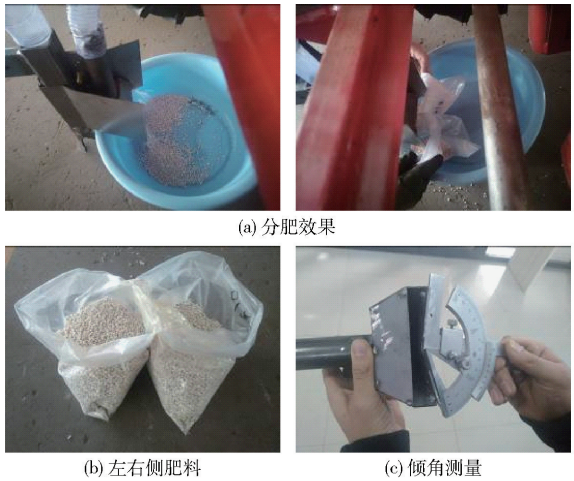


图 12 5 种不同曲面倾角分肥盒

Fig. 12 Five kinds of fertilizing boxes with different angles of curved surface



(a) 分肥效果

(b) 左右侧肥料 (c) 倾角测量

图 13 曲面分肥试验过程

Fig. 13 Experiment process of curved surface fertilization

通过预试验发现,设计的曲面排肥盒当排肥量超过 3 kg 时会出现堵塞现象,因此在槽轮工作长度为 50 mm 的条件下,不宜选择较大的排肥轴转速(由于上层肥料距离种薯较近,需肥量非常小,实际工作中的排肥量远小于 3 kg/min)。结合前面的下层排肥性能试验结果和曲面分肥盒结构特性,选取排肥轴转速范围为 10~22 r/min,曲面分肥板斜面倾角范围为 12°~16°。试验因素编码如表 2 所示。为了方便转速测量和分肥盒加工,取表中括号内圆整值。

表 2 因素编码

Tab. 2 Coding of factors

编码	因素	
	排肥轴转速 Z_1/(r·min⁻¹)	曲面分肥板斜面倾角 Z_2/(°)
1.414	22	16
1	20.24(20)	15.41(15.5)
0	16	14
-1	11.76(12)	12.59(12.5)
-1.414	10	12

试验共计 13 组，每组重复 5 次取平均值，结果如表 3 所示，表中 z_1 为排肥轴转速编码值，z_2 为曲面分肥板斜面倾角编码值，V_2 为上层排肥盒左右侧排肥一致性变异系数。

表 3　试验方案与结果

Tab. 3　Experimental project and results

试验号	z_1	z_2	V_2/%
1	1	1	7. 66
2	1	−1	10. 41
3	−1	1	4. 19
4	−1	−1	9. 09
5	−1. 414	0	3. 83
6	1. 414	0	7. 85
7	0	−1. 414	12. 28
8	0	1. 414	6. 72
9	0	0	4. 73
10	0	0	4. 42
11	0	0	4. 52
12	0	0	4. 53
13	0	0	4. 59

利用 DPS 软件对表 3 中试验结果进行回归方程、系数处理与分析，得到方差分析结果如表 4 所示。

表 4　试验结果方差分析

Tab. 4　Variance analysis of experiment results

变异来源	平方和	自由度	均方	F
z_1	13. 716 1	1	13. 716 1	449. 025 3
z_2	30. 081 8	1	30. 081 8	984. 791 7
z_1^2	3. 244 0	1	3. 244 0	106. 197 9
z_2^2	43. 927 2	1	43. 927 2	1 438. 054 0
z_1z_2	1. 155 6	1	1. 155 6	37. 831 9
回归	89. 773 1	5	17. 954 6	587. 783 6
剩余	0. 213 8	7	0. 030 5	
失拟	0. 161 9	3	0. 054 0	4. 162 0
误差	0. 051 9	4	0. 013 0	
总和	89. 986 9	12		

注：$F_{0.01}(5,7)=7.46$；$F_{0.01}(3,4)=16.69$；$F_{0.01}(1,7)=12.25$。

由表 4 知，$F_S=4.162\ 0<F_{0.01}(3,4)$，$F_H=587.783\ 6>F_{0.01}(5,7)$，回归方程和试验数据拟合较好。取显著水平 $\alpha=0.01$，得到上层排肥盒左右侧排肥一致性变异系数编码值回归方程为

$$V_2=4.558\ 0+1.309\ 4z_1-1.939\ 1z_2+0.682\ 9z_1^2+2.512\ 9z_2^2+0.537\ 5z_1z_2 \quad (18)$$

由上述回归方程可知试验因素对上层排肥盒左右侧排肥一致性变异系数影响次序大小为：曲面分肥板斜面倾角、排肥轴转速。

采用降维法将曲面分肥板斜面倾角置于零水平，由式(18)可得因素 z_1 与指标 V_2 的数学模型为

$$V_2=4.558\ 0+1.309\ 4z_1+0.682\ 9z_1^2 \quad (19)$$

同样将排肥轴转速置于零水平，由式(18)可得因素 z_2 与指标 V_2 数学模型为

$$V_2=4.558\ 0-1.939\ 1z_2+2.512\ 9z_2^2 \quad (20)$$

利用 Matlab 软件，由式(19)、(20)绘制各因素对试验指标的影响曲线，如图 14 所示。

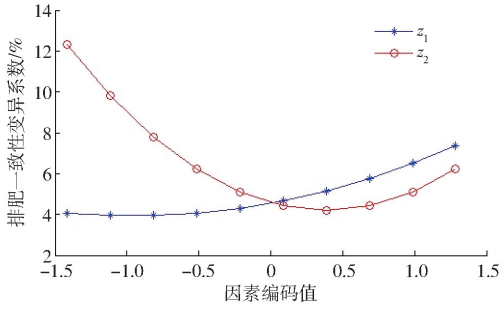


图 14　单因素对试验指标影响曲线

Fig. 14　Effect curve of single factor on experiment index

由图 14 可知，在试验范围内随着排肥轴转速的不断增大，上层排肥盒左右侧排肥一致性变异系数呈逐渐增大的趋势；随着曲面分肥板斜面倾角的增大上层排肥盒左右侧排肥一致性变异系数呈先迅速减小后逐渐增大的趋势。同时由式(18)可以看出，排肥轴转速和曲面分肥板斜面倾角交互作用对试验指标影响较大。为了更好地研究两因素交互作用对试验指标的影响规律，利用 Matlab 软件绘制因素影响三维等值线图，如图 15 所示。

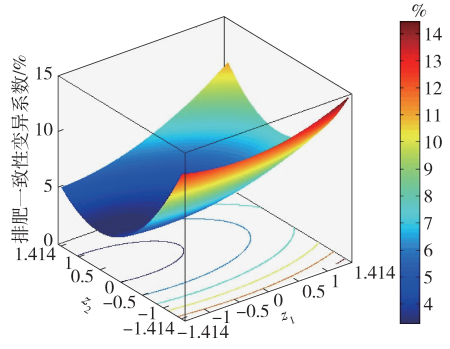


图 15　两因素交互作用对试验指标影响曲面

Fig. 15　Effect surface of interaction of two factors on experiment index

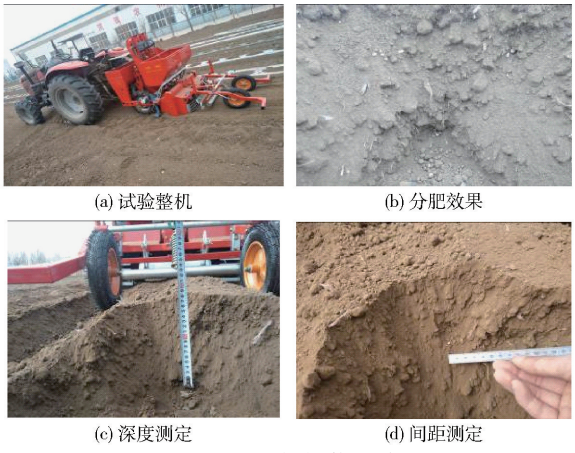
由图 15 可知，在排肥轴转速一定的情况下，上层排肥盒左右侧排肥一致性变异系数随着曲面分肥板斜面倾角的增大呈先缓慢减小后快速增大的趋势；在曲面分肥板斜面倾角一定的情况下，上层排肥盒左右侧排肥一致性变异系数随着排肥轴转速的增大呈现缓慢减小后逐渐增大的趋势。

结合上面回归方程，通过非线性规划原理，创建目标函数，并利用 Matlab 软件进行优化[19-22]，获得最优参数组合。将优化结果代入公式进行转换，得到试验指标取最小值时各因素的最优值，圆整结果

为排肥轴转速 20.5 r/min、曲面分肥板斜面倾角 15°,此时上层排肥盒左右侧排肥一致性变异系数为 3.30%。为验证最优参数可靠性,进行 5 次重复试验,结果表明平均上层排肥盒左右侧排肥一致性变异系数为 3.71%,试验值与理论值相近,排肥量一致性变异系数满足国家标准要求。

3.4 田间排肥性能试验

为了进一步验证所设计开沟器的可靠性,将试制的分层施肥开沟器安装在青岛洪珠公司生产的一垄二行马铃薯种植机上进行田间排肥性能试验。试验在洪珠试验基地进行,试验地尺寸约 100 m × 80 m;拖拉机为东方红-554 型拖拉机,作业挡位为低Ⅱ挡;土壤类型为壤土,地形平坦,且已旋耕;土壤含水率 18% 左右;肥料与前述试验用肥相同。试验仪器主要有量程 0 ~ 150 mm 钢直尺,量程 0 ~ 15 m 钢卷尺等。田间试验如图 16 所示。



(a) 试验整机 (b) 分肥效果

(c) 深度测定 (d) 间距测定

图 16 田间性能试验

Fig. 16 Performance experiment in field

试验开沟器理论开沟深度为 20 cm,施肥作业完成后,任取一行 15 个测量点挖开垄面,轻轻用细毛刷在土层断面上刷露出化肥颗粒,用钢直尺和卷尺对开沟深度及肥料位置等进行测量,结果如表 5 所示。由表 5 可知,该开沟器平均开沟深度为 19.1 cm;下层基肥施在离沟底很近的层面,平均深度为 18.1 cm;上下层肥料平均间距为 9.2 cm;上层种肥平均深度为 8.9 cm;下层基肥平均宽度为 2.9 cm;上层种肥左侧平均宽度为 2.1 cm;上层种肥右侧平均宽度为 2.0 cm。开沟器作业性能稳定,满足马铃薯种植开沟与施肥作业需求[23]。

表 5 肥料位置测量结果

Tab. 5 Results of fertilizer position measurement

cm

序号	开沟深度	上层肥料				下层肥料	
		深度	左侧宽度	右侧宽度	左右侧间距	深度	宽度
1	18.9	8.9	2.3	2.0	7.1	18.5	3.3
2	19.3	8.7	2.1	2.1	6.7	18.0	3.1
3	18.8	9.0	2.3	1.8	7.1	18.4	2.9
4	19.2	8.9	1.9	2.1	6.9	17.8	3.1
5	19.3	9.2	2.3	1.7	6.9	18.2	2.7
6	18.9	8.6	2.0	1.9	7.3	18.0	3.0
7	19.1	8.9	2.1	2.2	7.1	17.9	2.9
8	18.7	8.7	2.2	2.4	6.6	18.2	2.4
9	19.5	8.4	1.8	2.0	6.7	18.0	3.1
10	19.2	9.0	1.9	2.1	7.0	18.4	3.0
11	18.9	8.9	2.2	1.8	7.2	17.8	2.8
12	19.3	8.8	2.3	1.7	7.1	17.5	2.9
13	19.4	9.1	2.1	2.2	6.9	18.1	3.2
14	19.1	9.3	2.3	2.1	6.7	18.4	2.7
15	18.9	8.9	1.9	2.0	7.0	17.9	2.5

4 结论

(1)针对我国马铃薯种植机普遍存在的肥料定位不精确问题,结合马铃薯根系分布规律和一垄二行马铃薯种植特点,提出了一种基于曲面排肥与 V 型防堵结构的分层施肥技术,研制了一种深度可调式分层施肥开沟器。研究了土壤与开沟部件之间的运动关系,并对肥料在曲面分肥板上的运动规律进行了分析。

(2)通过单因素试验,确定了排肥器最佳槽轮工作长度为 50 mm;在此条件下,以排肥轴转速和曲面分肥板斜面倾角为试验因素,上层排肥盒左右侧排肥一致性变异系数为试验指标进行了二次通用旋转组合试验。建立了排肥轴转速、曲面分肥板斜面倾角与上层排肥盒左右侧排肥一致性变异系数之间的回归方程。优化得出最佳排肥轴转速为 20.5 r/min,曲面分肥板斜面倾角为 15°。

(3)最优参数组合下的重复试验结果表明,平均上层排肥盒左右侧排肥一致性变异系数试验值与理论值相近;同时田间排肥性能试验结果表明,该开沟器作业流畅,排肥性能完全满足马铃薯施肥作业要求。

参 考 文 献

1 杨青林, 桑利民, 孙吉茹, 等. 我国肥料利用现状及提高化肥利用率的方法[J]. 山西农业科学, 2011, 39(7):690 - 692.
YANG Qinglin, SANG Limin, SUN Jiru, et al. Current situation of fertilizer use in China and the method to improve chemical fertilizer utilization efficiency[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2011, 39(7):690 - 692. (in Chinese)

2 戴飞, 辛尚龙, 赵武云, 等. 全膜面覆土式马铃薯播种联合作业机设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(3):76 - 83. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20170309&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.03.009.

DAI Fei, XIN Shanglong, ZHAO Wuyun, et al. Design and experiment of combined potato planting machine for covering soil on top of full film surface[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(3): 76 - 83. (in Chinese)

3 孙伟, 刘小龙, 张华, 等. 马铃薯施肥播种起垄全膜覆盖种行覆土一体机设计[J]. 农业工程学报,2017,33(20):14 - 22.
SUN Wei, LIU Xiaolong, ZHANG Hua, et al. Design of potato casingsoil planter in all-in-one machine combined with fertilizing, sowing, ridging, complete film mulching and planting line covering[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(20): 14 - 22. (in Chinese)

4 王秀, 赵春江, 孟志军, 等. 精准变量施肥机的研制与试验[J]. 农业工程学报, 2004, 20(5):114 - 117.
WANG Xiu, ZHAO Chunjiang, MENG Zhijun, et al. Design and experiment of variable rate fertilizer applicator[J]. Transactions of the CSAE, 2004, 20(5):114 - 117. (in Chinese)

5 李辉, 吴建民, 孙伟. 垂直分层种施开沟器的设计与试验研究[J]. 甘肃农业大学学报, 2010, 45(2):143 - 146.
LI Hui, WU Jianmin, SUN Wei. Experimental study and design on furrow opener of vertical stratified application of fertilizer and seed[J]. Journal of Gansu Agricultural University, 2010, 45(2):143 - 146. (in Chinese)

6 姚万生, 薛少平, 朱瑞祥, 等. 组合式下位分层施肥播种开沟器的研制[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2008, 36(8):223 - 228.
YAO Wansheng, XUE Shaoping, ZHU Ruixiang, et al. Development of the combined layered fertilizing-seeding ditcher[J]. Journal of Northwest A &F University(Natural Science Edition), 2008, 36(8):223 - 228. (in Chinese)

7 王云霞, 梁志杰, 崔涛, 等. 玉米分层施肥器结构设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(增刊): 163 - 169. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=2016s025&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.S0.025.
WANG Yunxia, LIANG Zhijie, CUI Tao, et al. Design and experiment of layered fertilization device for corn[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(Supp.): 163 - 169. (in Chinese)

8 东北农业大学. 比例分层施肥装置: 201210295972.9[P]. 2012 - 08 - 20.

9 顿国强, 陈海涛, 冯夷宁, 等. 基于 EDEM 软件的肥料调配装置关键部件参数优化与试验[J]. 农业工程学报,2016, 32(7):36 - 42.
DUN Guoqiang, CHEN Haitao, FENG Yining, et al. Parameter optimization and test of key parts of fertilizer allocation device based on EDEM software[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(7): 36 - 42. (in Chinese)

10 顿国强, 陈海涛, 冯夷宁, 等. 调比控位分层施肥装置设计与试验[J]. 东北农业大学学报, 2015, 46(12): 86 - 93.
DUN Guoqiang, CHEN Haitao, FENG Yining, et al. Design and test of adjustable ratio and control position separated layer fertilization device[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2015, 46(12): 86 - 93. (in Chinese)

11 顾耀权, 贾洪雷, 郭慧, 等. 滑刀式开沟器设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2013, 44(2):38 - 42. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/read er/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20130208&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.02.008.
GU Yaoquan, JIA Honglei, GUO Hui, et al. Design and experiment of sliding knife furrow openner[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(2):38 - 42. (in Chinese)

12 贾洪雷, 王万鹏, 陈志,等. 农业机械触土部件优化研究现状与展望[J/OL]. 农业机械学报,2017,48(7):1 - 13. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20170701&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.07.001.
JIA Honglei, WANG Wanpeng, CHEN Zhi, et al. Research status and prospect of soil-engaging components optimization for agricultural machinery[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(7):1 - 13. (in Chinese)

13 赵淑红, 刘宏俊, 张先民, 等. 滑推式开沟器设计与作业性能优化试验[J]. 农业工程学报, 2016,32(19):26 - 34.
ZHAO Shuhong, LIU Hongjun, ZHANG Xianmin, et al. Design and optimization experiment of working performance of sliding push opener[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(19): 26 - 34. (in Chinese)

14 李宝筏. 农业机械学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2003.

15 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.

16 王庆杰, 姚宗路, 高焕文, 等. 楔刀型免耕开沟器设计与试验[J]. 机械工程学报, 2008, 44(9): 177 - 182.
WANG Qingjie, YAO Zonglu, GAO Huanwen, et al. Design and experiment on a wedge shaped no-tillage opener[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2008, 44(9): 177 - 182. (in Chinese)

17 吕金庆, 衣淑娟, 陶桂香, 等. 马铃薯播种机分体式滑刀开沟器参数优化与试验[J]. 农业工程学报, 2018, 34(4): 44 - 54.
LÜ Jinqing, YI Shujuan, TAO Guixiang, et al. Parameter optimization and experiment of splitter sliding-knife opener for potato planter[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(4): 44 - 54. (in Chinese)

18 RICHARD B, KEITH N. Shigley's mechanical engineering design[M]. Westlake Village: McGraw-Hill Higher Education, 2010.

19 MAO X, YI S J, TAO G X, et al. Experimental study on seed-filling performance of maize bowl-tray precision seeder[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2015,8(2): 31 - 38.

20 任露泉. 试验优化设计与分析[M]. 北京: 高等教育出版社, 2003.

21 SZCZEPANIAK J, PAWLOWSKI T, GRZECHOWIAK R, et al. Experimental tests and computer simulations of a combination tractor/potato planter: the identification and optimization of parameters[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2015, 31(5): 126 - 136.

22 刘晓鹏, 肖文立, 马磊,等. 油菜联合直播机组合式船型开沟器设计与开沟质量试验[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(11):79 - 87. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20171110&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.11.010.
LIU Xiaopeng, XIAO Wenli, MA Lei, et al. Design and ditching quality experiment on combined ship type opener of direct rapeseed seeder[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017,48(11):79 - 87. (in Chinese)

23 GB/T 6242—2006　种植机械 马铃薯种植机 试验方法[S]. 2006.