

# 玉米精密播种技术研究进展

杨丽 颜丙新 张东兴 张天亮 王云霞 崔涛

(中国农业大学工学院, 北京 100083)

**摘要:** 简述了玉米精密播种技术在农业生产中的重要意义,指出采用精密播种技术是规模化生产实现节本增效的重要手段。从精密播种的不同功能实现角度,将玉米精密播种技术归纳为播种粒距均匀性控制技术和播深一致性控制技术两方面。详细阐述了保证播种粒距均匀的玉米单粒精密排种技术、种子平稳运移技术、种子精确定位技术和排种器驱动技术;分析了保证播深一致的必要性,阐述了播深一致性控制技术的研究历程。结合玉米精密播种技术国际研究动态,综述了玉米精密播种技术在智能化方面的最新研究进展,并结合我国生产现状指出了未来玉米精密播种技术的发展方向。

**关键词:** 玉米;精密播种;智能化;研究进展

**中图分类号:** S223.2<sup>+</sup>3    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1000-1298(2016)11-0038-11

## Research Progress on Precision Planting Technology of Maize

Yang Li Yan Bingxin Zhang Dongxing Zhang Tianliang Wang Yunxia Cui Tao

(College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

**Abstract:** Maize could be used as food, animal feed, as well as industrial materials, so it has become to be the most important crop all over the world. The potential yield of maize is more than 27 mt/hm<sup>2</sup>, but the statistical data from FAO shows that farmer's actual average yield is only one fourth of that. Precision planting is one of an effective method to increase maize yield, so as to decrease this gap. Precision planting technology has a critical effect on agricultural production and is the key to decrease cost and increase benefit for scaled farmer's production, international machinery companies are paying more and more attention and investing a lot on invention or innovation of precision planters, so new precision planting technologies and devices, such as high speed metering systems, down force depth control units, are developing very fast, and they are widely accepted and used by individual farmers in the world. According to the various functions realized by precision planting, precision planting technologies were classified into the following categories: control technology of seed spacing uniformity, control technology of sowing depth uniformity, and intelligent integration of precision planting. On the seed spacing uniformity, technologies of single seed sowing, seed delivery and seed monitoring were elaborated. The significance of sowing depth uniformity was analyzed, and its development process was generalized. In terms of the application in intelligence, a comprehensive review of the existing research advances was presented. Finally, the development direction of precision planting technology was pointed out based on the current situation of China.

**Key words:** maize; precision planting; intelligentization; research progress

收稿日期: 2016-10-09 修回日期: 2016-10-28

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(51575515)、国家玉米产业技术体系项目(CARS-02)和农业部土壤-机器-植物系统技术重点实验室项目

**作者简介:** 杨丽(1975—),女,副教授,博士,主要从事农业装备智能化和玉米生产全程机械化研究,E-mail: yl\_hb68@126.com

**通信作者:** 张东兴(1958—),男,教授,博士生导师,主要从事农业装备和玉米生产全程机械化研究,E-mail: zhangdx@cau.edu.cn

## 引言

玉米精密播种是指用精密播种机依据农艺要求的播种密度,按照一致的行距、均匀的粒距和精确的深度将玉米种子播入土壤中并准确定位的过程,可节省种子、减少间苗作业,同时达到苗齐、苗全、苗壮的效果,既节约成本又提高产量。随着规模化生产进程的加快,作物种植逐渐从过去单纯追求高产向产量与效益并重、效益优先的方向发展,玉米精密播种技术因其具有突出的节本增效优点,得到高度重视和广泛应用。

玉米精密播种技术的重点是在保证播种密度前提下,实现粒距均匀和播深一致。GRIEPENTROG<sup>[1]</sup>指出均匀的粒距通过减小作物间对光、水分和养分的竞争来提高产量;GAN 等<sup>[2]</sup>研究发现,播深不均匀导致出苗不一致,因不育植株增加而造成减产。要实现播种后粒距均匀一致,精密排种技术是关键,种子的平稳运移和精确定位技术以及排种器的驱动技术是重要保障。要实现播种深度均匀一致,播种单体精确仿形及其下压力的实时检测和调控是关键。随着人们对播种装备技术水平需求的提高,以及 GPS、GIS、农田信息采集等技术的发展,精密播种机械逐渐向智能化方向发展,播种作业参数的实时检测、调控、显示与传输,根据田间肥力、产量、光照等条件进行变量播种等智能化播种技术越来越成为精密播种研究的热点。

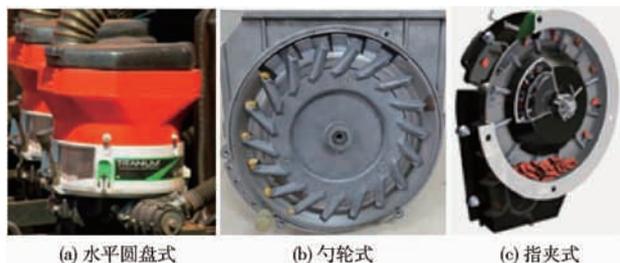
本文从播种粒距均匀性控制技术、播种深度一致性控制技术和精密播种智能化技术 3 方面的研究进展进行综述,对我国玉米精密播种技术的发展前景和趋势加以展望。

## 1 玉米播种粒距均匀性控制技术

要保证玉米播种后粒距均匀,首先排种器本身要精准,能够产生均匀有序的种子流,达到不重不漏;其次要将排种器排出的种子平稳运移到种沟,尽量避免在输送过程中的碰撞;并能将种子在着床瞬间实时固定住,避免种子在种沟里弹跳;同时排种器的驱动方式也会对粒距均匀性产生影响。因此控制播种粒距均匀性包括精密排种技术、种子平稳运移技术、种子精确定位技术和排种器驱动技术。

### 1.1 精密排种技术

精密排种技术的载体是排种器。最先实现玉米精密排种的是机械式排种器。机械式精密排种器主要依靠容腔实现种子取种和携种。目前常用的机械式精密排种器有水平圆盘式、勺轮式和指夹式(图 1)。



(a) 水平圆盘式

(b) 勺轮式

(c) 指夹式

图 1 机械式排种器

Fig. 1 Mechanical seed-metering device

水平圆盘式排种器利用种子自重填充到旋转的排种盘型孔中,随排种盘转动到刮种器时,多余种子被清除,保留的种子转动至排种口,在自重和推种器作用下完成排种。由于其结构的特殊性,种子从囊入型孔经刮种器和推种器排出,均存在遭受外力作用而导致种子破损的可能性<sup>[3]</sup>。廖庆喜等<sup>[4]</sup>发现种子破损是由推刮种装置施力不均及种子外形变化大造成的,为此设计了一种滚珠式推刮种器,将破损率由 4.673% 降低到 1.442%。为了改善水平圆盘式排种器的性能,廖庆喜等<sup>[5]</sup>还就影响排种性能的关键因素:型孔数量、动盘厚度、转速等进行了研究,并通过试验发现型孔数 28、动盘厚度 6 mm、转速 17 r/min 为水平圆盘排种器的最优参数组合,播种农大 108 号玉米种子时的合格指数、重播指数和漏播指数分别为 90.71%、8.58% 和 0.71%。水平圆盘式排种器动盘型孔的尺寸主要根据种子的大小确定,由于玉米种子大小形状差异很大,播种前需要对其进行包衣及丸粒化加工处理,成本较高,因此水平圆盘式排种器通用性较差,实际生产中使用越来越少。

相对水平圆盘式排种器,勺轮式排种器对种子外形尺寸要求不十分严格。其利用舀勺作为容腔,排种盘通过充种区时,小勺舀取 1~2 粒种子,随着小勺转动,多余种子在重力作用下滑落,当小勺到达排种器顶端时,种子在自重作用下通过隔板开口落入与小勺同步转动的导种叶轮的槽内,种子随导种叶轮转到排种器底部,完成排种。丁曼琦<sup>[6]</sup>根据种子外形尺寸,按照舀勺宽度应大于 0.5 倍种子长度、小于 1.5 倍种子厚度的原则,将玉米勺轮的宽度设为 7 mm,以保证勺内玉米种子不掉落、多余种子不能稳定停留在勺内,试验台试验证明在 8 km/h 时粒距合格指数可达 93.4%。目前我国小型玉米播种机具大多使用勺轮式排种器,但在实际田间作业条件下,机组前进速度一般应控制在 3~4 km/h,否则会因振动、地表不平等导致舀勺内种子滑落,造成严重漏播。

指夹式排种器利用指夹的夹持作用携种,与勺

轮式排种器相比,能有效避免种子在运送过程中因机具振动等引起的掉落,降低漏播率,提高播种精度。指夹夹持参数直接影响种子的破损率。王金武等<sup>[7]</sup>发现指夹弹簧丝径为 0.77 mm,排种器转速小于 19.2 r/min 时,合格指数为 86.9%,种子破损率仅有 0.4%。李洪刚<sup>[8]</sup>基于人类手指取种机理设计了仿生指夹排种器,田间作业速度 8 km/h 时,合格指数 95.8%,破损率为 0。耿端阳等<sup>[9]</sup>创新设计了一种伸缩指夹式排种器,在夹持力 0.87 N、指夹器开启行程 16 mm、排种器转速 45 r/min 时其株距合格指数、漏播率、重播率分别是 95.4%、1.9%、2.7%。目前广泛使用的指夹式排种器以美国 Precision Planting 和 Kinze 公司为代表。Precision Planting 公司通过对指夹的优化设计,有效解决了扁平种子易脱离指夹、圆形种子易重播等问题;通过在指夹卸种口壳体处增加缓冲垫的方法,解决了种子“射入”导种带室造成的碰撞和反弹漏播问题;通过在每个导种带室增加种子固定孔,确保每粒种子在导种带室内的位置一定,以保证投种间距一致性<sup>[10]</sup>。Kinze 公司通过改进清种毛刷和优化颠簸

器,降低重播率,提高单粒率;通过优化设计卸种口形状,减少碰撞破损和反弹漏播<sup>[11]</sup>。由于指夹式排种器在夹持玉米种子运行过程中会破坏种子包衣,所以在实际播种作业时需要用滑石粉等拌种,以降低对种子的磨损破坏。指夹式精密播种机在美国市场占有率不足 10%。在我国则正逐渐取代勺轮式排种器,得到越来越广泛的推广应用。

由于机械式排种器整体上存在作业速度不高、对种子形状和尺寸要求严格、播种单粒率有待改善等问题,20 世纪 50 年代欧美国家开始研究气力式精密排种器。气力式排种器借助气流作用充种、清种或携种,与机械式排种器相比,对种子形状和大小一致性要求不严格,更易于实现高速、精密播种。刘佳等<sup>[12]</sup>通过试验发现,气吹式排种器对玉米种子形状和大小变异的适应性较强,同时分级的种子对气吹式排种器各项质量指标的影响不显著。GIL 等<sup>[13]</sup>证实气吸式排种器在排种均匀性上优于机械式排种器,更适合高速、精密作业。气力式精密排种器主要有气吸式、气吹式、气压式、中央集排式等,如图 2 所示。

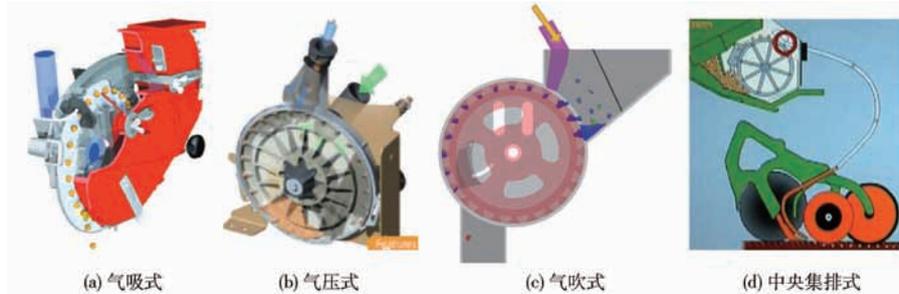


图 2 气力式排种器

Fig. 2 Pneumatic seed-metering device

气吸式排种器利用负压气流将种子吸附在排种盘的型孔上,在清种区将多余的种子清掉,单粒种子随排种盘转动至排种口,因失去气流吸附而脱离排种盘完成排种。寻找最优结构和工作参数是气吸式排种器研究的重点。张建平等<sup>[14]</sup>用蒙特卡罗模拟方法研究了气吸式排种器结构参数对其排种均匀性的影响,结果表明粒距变异系数随排种盘吸孔数和投种高度增加而增加、随投种角和投种半径增大而减小,排种频率越高变异系数也越大。ALI<sup>[15]</sup>发现作业速度对气吸式排种器作业性能有影响,速度越快,漏播率增加,合格指数下降。刘文忠等<sup>[16]</sup>通过单因素试验发现排种盘转速和空气室真空度对气吸式排种器作业效果影响显著,与粒距合格指数相关系数在 0.96 以上。气吸排种器由于其突出的优势,在大豆、玉米等中耕作物的精播中得到广泛应用,并逐渐引入小籽粒作物的播种中。YASIR 等<sup>[17]</sup>将气

吸式排种器运用到小麦播种机;ZHANG 等<sup>[18]</sup>运用气吸式排种器进行水稻直播以提高播种精度;YU 等<sup>[19]</sup>设计了一种谷物气吸式精密排种器,并优化了其结构参数。但气吸式排种器结构复杂,需要气流压力也较大,一般在 5 kPa 以上,极易因真空室密封问题而造成漏播。

气压式排种器的空气室和种子室共用一个腔室,利用正压气流将种子压附在排种盘的型孔上。与气吸式排种器相比,所需气流压力低,结构也更简单。贺俊林等<sup>[20]</sup>设计了一种新型气压式精密排种器,该排种器合理气流压力为 1.08 ~ 1.28 kPa;王浩等<sup>[21]</sup>结合勺轮式排种器的特点设计了一种气压组合勺式玉米精密排种器,气流压力为 0.8 kPa 时,合格指数达 98%;史嵩等将排种盘型孔与搅种装置融合,设计了气压组合孔式玉米精密排种器,阐述了正压气流与导槽结合提高排种器充种性能的原理,台

架试验表明:前进速度 10 km/h 时,漏播率为 1.74%。史嵩等<sup>[22-24]</sup>还以新设计的排种器为模型通过仿真和试验发现,增强排种盘对种群的扰动可以在一定程度上提高排种器的充种性能。

气吹式排种器利用重力充种、气流清种、型孔存种和封闭空间携种。相比气吸式排种器,其优势在于对种子形状和大小的适应性更强<sup>[12]</sup>,所需气流压力更低,无需严格密闭,使用寿命更长<sup>[25]</sup>。气吹式排种器以 Beaker 公司为代表。MURSEC 等<sup>[26]</sup>研究表明:Beaker 气吹式排种器播种甜菜时,最佳作业速度为 10 km/h。我国自 1989 年引进 Beaker 公司气吹式排种器,开始全面了解气吹式排种器<sup>[27]</sup>。胡树荣等<sup>[28]</sup>发现锥孔顶角、锥孔深度、气流方向和孔壁夹角、底孔直径、气体流量影响气吹式排种器的作业效果。刘佳等<sup>[29]</sup>通过试验探究了气吹式排种器播种玉米适宜的吹气压力范围,台架试验发现:吹气压力高于 2.5 kPa 时播种质量较好,且一直呈上升趋势;8 kPa 时合格指数达到 97.28%;2.5~4.5 kPa 范围内合格指数在 90% 左右,漏播指数低于 1.2%;田间试验合格率达到 93.18%。

中央集排式排种器利用一个具有多行型孔的滚筒代替单个排种盘,变传统一器一行为一器多行,解决了单个排种器固定于播种单体上,因振动而影响播种性能的问题<sup>[30-31]</sup>。Amazone 公司研发的中央集排式播种机作业速度可达 15 km/h<sup>[32]</sup>。祁兵<sup>[33]</sup>结合集中排种与气流送种的原理设计了一种中央集排气式玉米精密排种器,对充种型孔直径、作业速度进行了双因素试验,结果表明:孔径为 4.5 mm 时作业效果最好,平均合格指数为 97.9%。

气力式播种机由于其优越的性能,尤其是可以实现高速作业前提下的高质量精密播种,所以在欧美等发达国家的个体农场,以及发展中国家的规模农场中得到快速发展及广泛应用。

## 1.2 种子平稳运移技术

种子从离开排种器到落入种床,由匀速圆周运动到有初速度的自由落体,再到最后的碰撞停止,这个过程中每个步骤对粒距均匀性都有影响。种子平稳运移技术是通过研究种子从离开排种器到接触种床过程中的运动情况,控制种子在下落过程及落地时的角度和速度,减少接触碰撞,最终接近或达到排种器排种精度的效果,将种子一粒一粒运送到种床。

常用的种子输送装置是导种管。利用导种管的约束作用改变种子下落轨迹或速度,减小着地碰撞。后弯抛物线形导种管可部分抵消播种机的前进速度,减少种子的弹跳,保证粒距准确性。刘建英等<sup>[34]</sup>借助离散元模拟种子经导种管下落到种床的过程,发现当免耕播种机作业速度为 1.389 m/s 时,最佳导种管高度应为 500 mm。廖庆喜等<sup>[35]</sup>研究发现导种管管径对播种性能的影响极为显著,增大管径能减少种子的碰撞;管长和管倾斜度的交互作用对重播指数、漏播指数和合格指数有影响。严荣俊<sup>[36]</sup>通过台架试验发现,投种高度对播种质量影响显著,为此设计了一款直线曲线组合导种管,达到了与低位投种相当的播种质量。随着播种机作业速度的提高,仅从改变导种管外形已无法克服种子与种床之间因较大相对速度造成的弹跳问题<sup>[37]</sup>。为了解决高速作业条件下落种过程中因剧烈碰撞造成的粒距变异的问题,LIU 等<sup>[38]</sup>基于二次投种原理,设计了隔板式输种装置(图 3a)并进行仿真研究,发现利用二次投种方法将种子运移到种床,有望减小甚至消除种子与种床之间的碰撞弹跳。康建明等<sup>[39]</sup>设计了带式导种装置(图 3b),用输种带、拨片和种道护板将从排种器落下的每粒种子护送至近地的投种点再使种子落入种沟,可以矫正种子粒距,大幅提高播种质量。陈学庚等<sup>[40]</sup>设计开发了一种与取种盘转速、播种机行走速度相关,且传动与投种机构一

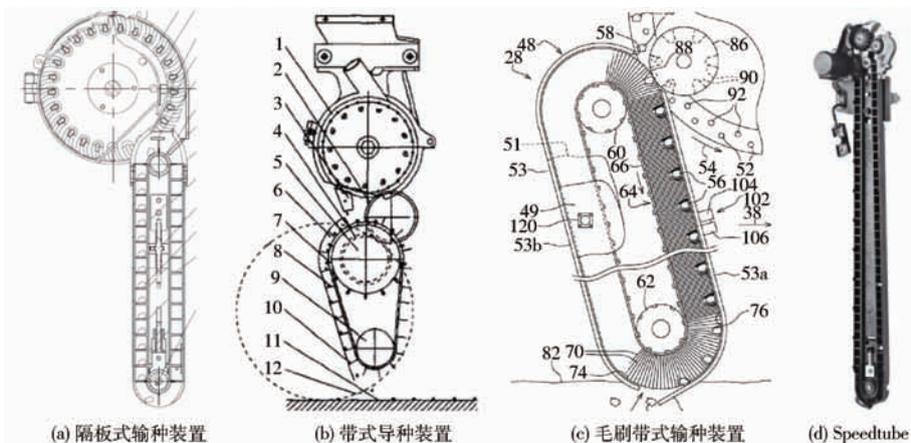


图 3 种子输送机构

Fig. 3 Seed delivery mechanism

体的带式导种装置,并确定了该气吸式排种器带式导种装置的主要结构参数。John Deere 公司<sup>[41]</sup>研发了毛刷带式输种装置(图 3c)用于将种子运送到种沟,通过实时调整毛刷带的转速,可使种子落入种床的水平分速度与播种机前进速度抵消,达到零速投种。Precision Planting 公司<sup>[42]</sup>研发的 Speedtube(图 3d)安装在排种口处,采用相对旋转的取种轮将种子转移至传动带上的隔断,并运送到种沟,传动带与播种机前进速度匹配,保证在种子落地平稳性。对于高速播种而言,基于二次投种方法的输种装置是保证播种粒距均匀的重要手段,也是目前精密播种领域研究的热点。

### 1.3 种子精确定位技术

种子从导种管或输送机构脱落后,由于有初速

度,在着床瞬间会在种床上弹跳而造成异位,影响播种粒距均匀性。为了解决弹跳异位的问题,不同形式的种子实时定位机构相继研发出来。Precision Planting 公司研发了一种塑料压种舌,用于将种子实时导入并压在沟底,试验表明:使用压种舌可减小种子在种沟内的弹跳,降低变异系数,加强种子与土壤的接触,降低漏播率<sup>[37]</sup>,使玉米增产 7%,每公顷约增产 145 kg<sup>[43]</sup>。另外有不少播种机采用压种轮进行种子定位,Vaderstad 公司采用软质橡胶轮作为压种轮,Monosen 公司采用大直径金属轮作为压种轮,Amazone 公司采用大直径橡胶轮作为压种轮(图 4)。这些定位机构都能对种子在落地瞬间的弹跳起到有效的抑制作用,目前在大型高速精密播种机、特别是气力式播种机上应用普遍。



图 4 种子定位机构

Fig. 4 Seed firmer device

### 1.4 排种器驱动技术

常用的排种器驱动方式是由地轮通过链轮链条驱动,其优点是制造和安装精度要求低、价格便宜。但由于链条磨损后易发生振动和跳齿,对播种均匀性造成较大影响,因此由地轮通过万向轴、软轴结合锥齿轮的排种器驱动方式相继研发出来,在一定程度上能缓解由于链条传动造成的播种粒距不均匀。但随着作业速度的提高,地轮打滑现象趋于明显,其对播种粒距均匀性的影响凸显出来<sup>[44]</sup>。为了解决机械式驱动方式的弊端,YANG 等<sup>[45]</sup>研发了排种器的电机直驱技术(图 5a),采用直流电机通过周向传动的方式驱动排种器,通过触摸屏输入目标株距信息,通过传感器检测地轮转速进而计算播种机前进速度,根据播种机前进速度和目标株距控制排种器转速,试验表明:电机直驱排种器在各试验速度下合格指数均明显高于机械传动排种器。KAMGAR 等<sup>[46]</sup>设计了一款电机驱动系统,试验证明该系统能提高排种合格指数,降低漏播和变异系数。SINGH 等<sup>[47]</sup>设计了一款秋葵电控排种系统,通过电路控制直流电机带动排种器作业,试验证明其作业速度越慢,株距越大,精度越高。唐尧华<sup>[48]</sup>利用霍尔元件对拖拉机前轮测速,根据拖拉机行走速度控制排种器转速,田间试验表明,电机驱动排种器在免耕地和已耕地变异系数均小于地轮传动。李剑峰<sup>[49]</sup>采用光电式转速传感器测量播种机作业速度,并根据测

得速度动态调节电机转动,从而控制排种器工作,以提高作业精度。Precision Planting 公司研发的电驱式排种系统,采用直流电机驱动排种盘,采用测速雷达获取播种机前进速度,根据测取的速度实时调控排种盘的转速,该电驱式排种系统已用于实际生产(图 5b)。电驱排种器由于其适宜高速高精度播种作业的良好特性,在精密播种技术的发展中必将取代机械驱动式排种器。

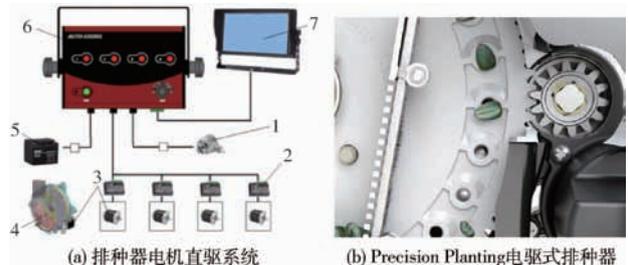


图 5 电驱式排种器及驱动原理示意图

Fig. 5 Electric drive seed-metering device and drive principle diagram

1. 转速检测传感器 2. 驱动器 3. 步进电动机 4. 排种器
5. 直流电源 6. 控制器 7. 触摸屏

## 2 播深一致性控制技术

播种深度影响种子萌发、出苗及后期生长发育<sup>[50-51]</sup>(图 6)。不一致的播种深度,会影响出苗整齐度,造成大小苗现象,进而影响产量。普渡大学的一项研究表明,出苗不一致会造成 314 kg/hm<sup>2</sup> 的减

产。曹慧英等<sup>[52]</sup>研究播深对夏玉米冠层结构和光合特性的影响发现,播种深度过深、过浅或不一致均会造成出苗不齐,降低群体密度和整齐度,导致植株在群体内所处的光照、温度、CO<sub>2</sub>浓度等环境条件不一致,进而影响植株和果穗形态、降低收获穗数和植株干物质的积累,最终降低产量。Precision Planting 公司的一项研究表明,迟于相邻种子 48 h 出苗的玉米种子,对产量贡献极小,几乎等同于杂草。也就是说,希望播下的种子最好在 2 天内集中出苗,这就对播种深度一致性提出了较高的要求。

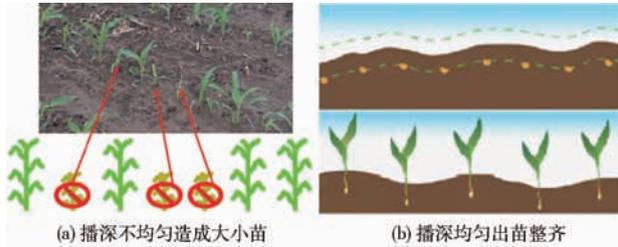


图 6 播深一致性对出苗整齐度的影响

Fig. 6 Effect of sowing depth uniformity on emergence uniformity

播深的形成是由开沟器开沟、土壤回流和覆土镇压共同作用的结果,其中开沟器开沟深度的一致性是最主要的影响因素。开沟深度控制方法是通过仿形机构带动开沟工作部件随地形起伏运动实现的。常见的仿形机构是平行四连杆与仿形轮相结合的结构,主要包括平行四连杆、仿形轮、拉簧和仿形调节机构。平行四连杆由于自身的运动特点,带动开沟器在上下仿形的过程中也始终保持做平行运动,从而保证开沟器的入土角始终不变;仿形轮的功能是在平行四连杆和拉簧的作用下,贴着地表滚动并带动开沟器上下浮动,即使是在起伏不平的地表上也能很好地与地表仿形,从而达到控制播深的目的。YANG 等<sup>[53]</sup>设计了一种具有单侧同位仿形功能的播种单体,用于麦茬地的玉米免耕播种,在播种速度 8 km/h 时,播深变异系数为 9.2%。CUI 等<sup>[54]</sup>设计了一种同位仿形半低位投种单体,经过分析确定了仿形轮直径及其支臂长度、仿形轮挡块长度和倾角等关键部件的结构参数,使得播深有较大的调节范围,最小播深为 40 mm,最大播深为 90 mm,能满足大多数情况的播种需求。

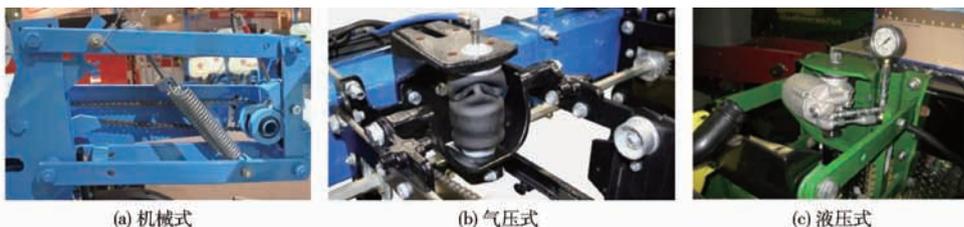


图 7 播深调节装置

Fig. 7 Down force controller

为了保证仿形轮始终与地面紧密贴合,机械式仿形压力调节机构(图 7a)需根据地表状况调节弹簧。由于土壤条件、地表状况千差万别,所需的拉簧个数和预紧力也不同,使用、调整起来很不方便,而且最重要的是不能实时检测并调控仿形轮的对地压力。Precision Planting 公司的一项研究表明:如果仿形机构的下压力过小,会导致植株的根系过浅;如果下压力过大,则会造成根系附近土壤的过度压实,限制根系生长,两者都会导致产量损失。为解决这一问题,相继研发了气力式(图 7b)和液压式(图 7c)仿形压力调节机构。

Precision Planting 公司<sup>[55]</sup>研发了一种 20/20 AirForce 仿形机构压力调节系统,采用空气囊取代弹簧,采用传感器实时检测播种单体的对地压力,根据检测结果实时调控空气囊的压力,使得播种单体与地面紧密贴合保证播种深度一致性,同时又不土壤过度压实,试验表明采用该系统可使玉米每公顷增加 500 kg 的产量。黄东岩等<sup>[56]</sup>为保证免耕播种机在秸秆覆盖地作业时播种深度的一致性,设计了一种播种深度控制系统,采用压电薄膜传感器检测限深轮的胎面形变量来反映播种单体的对地压力,通过控制四连杆间的空气弹簧来调节播种单体的对地压力,从而保证播种深度一致,试验结果表明,作业速度为 5 ~ 8 km/h 时,播深合格率达 90%。

由于气压式压力调节机构的反应速度较慢,AgLeader 公司又研发了一种液压式仿形机构压力调节系统,采用液压缸取代空气囊,使压力调节机构的反应时间从 20 s 减少到 1 s,连续 4 年的试验结果表明,采用该系统可使玉米每 hm<sup>2</sup> 增加 547 kg 的产量<sup>[57]</sup>。WEATHERLY 等<sup>[58]</sup>设计了一种播深自动调节装置,通过监测表层干土高度实时反馈调节播深,保证播深一致性,其播深调节范围为  $\pm 2.5$  cm,误差为  $\pm 0.24$  cm。SUOMI 等<sup>[59]</sup>设计了一种播深自动控制系统,在单圆盘开沟器上安装传感器,利用液压缸作为播深调节执行机构,试验表明在作业速度 10 km/h 时,可将播深控制在预设播深的  $\pm 10$  mm 内。

依据经验通过调节弹簧位置来实现播种单体下压力调节的方式,虽然能够获得较好的播深一致性,

但难以与土壤实际条件匹配,从而影响玉米发芽后的出苗及根系的发育。而播深自动调控系统则能够实现理想的播深和合理的土壤压实,该项技术已成精密播种技术研究的重点内容之一。

### 3 精密播种智能化技术

随着 GPS、GIS、传感与检测、信息处理、自动控制等技术在精密播种领域的运用,精密播种机械逐渐向智能化方向发展。采用 GPS 导航的播种机,在大幅度降低驾驶员劳动强度的同时,可以使播种行更直,为机械化收获创造有利条件;取消机械式划线器,不仅降低制造成本,而且使衔接行更规范,利于机械化低损收获。GPS、排种器电驱技术及自动控制技术结合,可以实现已播区域排种器的实时关断,有效避免重播,可以实现弯道路径播种时内外株距均匀一致,从而实现节约良种、尽可能挖掘产量潜力(图 8)。其中,播种作业参数的实时检测、调控、显示与传输、根据田间肥力进行变量播种等是研究的热点。

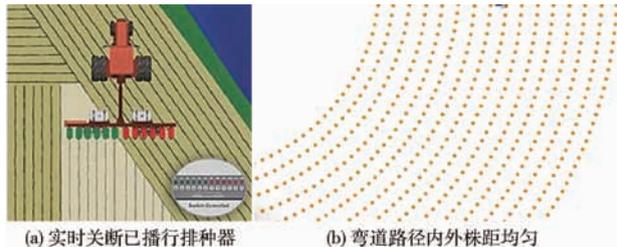


图 8 基于智能控制技术的播种作业

Fig. 8 Seeding result based on intelligent control technology

#### 3.1 播种作业参数实时监控

对播种质量参数的监测是目前研究最多也最成熟的领域,主要是利用传感器获取种子运动信息,统

计合格指数、漏播指数、重播指数等。宋鹏等<sup>[60]</sup>以光电传感器作为排种质量监测元件,通过记录相邻种子下落时间间隔判断是否出现漏播、重播现象,并发出报警,可用于直径大于 2 mm 的种子监测。周利明等<sup>[61]</sup>提出一种基于微电容信号获取与分析的排种性能监测方法,通过电容传感器获取种子运动信息,并根据相邻种子的电容脉冲峰值间隔和脉冲积分面积来获取播种作业状况下的播种量、漏播量、重播量等参数,对这 3 个参数的监测精度分别为 94.6%、93.5% 和 88.1%。纪超等<sup>[62]</sup>设计了基于反射式红外光电感应的播种机排种监测系统,台架试验结果表明,系统对播种总量、漏播量、重播量的监测精度分别为 98.5%、95.1%、85.6%;模拟灰尘粘附工况,系统对播种总量监测精度达 98.1%,具备良好的抗尘效果。和贤桃等<sup>[63]</sup>设计了一种玉米排种质量自动检测仪,采用伺服电动机驱动排种器,采用光电传感器检测下落的玉米种子,通过触摸屏设置播种参数和显示检测结果(图 9a),可实现单粒率、漏播率、重播率、播种量、作业速度等参数的实时显示,并能对排种情况进行动画模拟。Precision Planting 公司<sup>[64]</sup>为了克服灰尘对光学传感器检测精度的影响,研发出一种基于高频无线电波的排种质量监测方法,可安装在导种管末端,对播种质量参数的检测更加精准,同时利用 GPS 定位技术实现作业速度、播种面积、播种量的统计,并通过显示屏实时显示(图 9b),方便工作人员实时了解播种作业状态。AgLeader 公司<sup>[65]</sup>的智能监测系统(图 9c)可实时检测并显示播种质量、株距一致性、滑移率、种植密度等参数,以地图形式显示,方便作业人员直观了解播种作业质量。

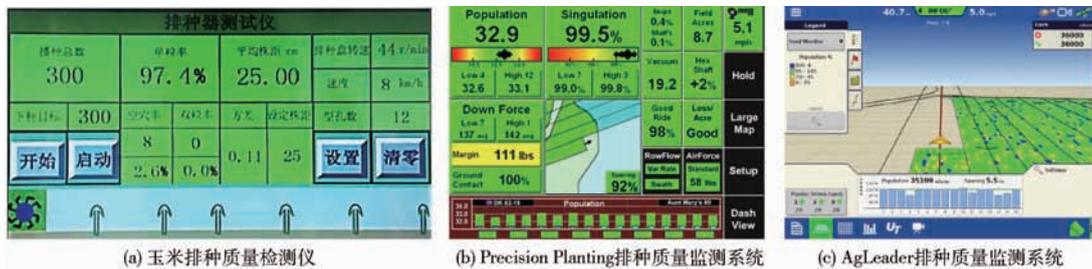


图 9 播种质量参数监测与显示

Fig. 9 Detection and display of sowing quality

对播种单体下压力监测与控制的研究也越来越受到重视。Precision Planting 公司研发的播种机下压力监控系统(图 10a)可实时监测各播种行的下压力,并统计下压力最大值与最小值,超过设定范围及时调整,避免下压力不足导致播深不一致或下压力过大造成种床压实的情况,控制精度达到 98%。AgLeader 公司<sup>[66]</sup>研发的液压下压力系统(图 10b)

能实现单行独立下压力设定和调节,压力调节响应时间为 1 s。FULTON 等<sup>[67]</sup>试验发现机具作业过程中随土壤状况和地形的变化,需同时控制设定播深和下压力才能保证种子深度,播深下压力控制反应时间应在 0.5 s 内。CASEiH 的 DeltaForce 下压力控制系统(图 10c)每秒进行 200 次下压力监测,5 次下压力调节,可应对实时变化的土壤状况和地表起伏,

提供更精确的播深<sup>[68]</sup>。

### 3.2 变量播种技术

变量播种是近年来精密播种技术领域的一项革新,是根据处方图包含的土壤肥力信息、产量信息、气候信息并结合 GPS 定位技术,实时改变播种密度,从而有效利用土地资源、最大限度挖掘产量潜力,并尽可能节约良种,达到节本增效的目的(图 11)。AgLeader 公司的一项研究表明,变量播种可使玉米平均每公顷增加 943 kg 产量。John Fulton 等综合土壤 4~8 年的产量分布图、土壤电传导技术、土壤排水和蓄水能力的高程数据以及土壤有机质、光照条件的图像,按照土壤状况调节播种密度,试验发现玉米每公顷增产 490 kg,大豆每公顷增产 200 kg。正因为变量播种技术巨大的增产潜力,世界先进的播种机生产厂家竞相投入研发。Graham 设计了一套变量播种系统,该系统借助安卓系统控

制无刷电机驱动的排种器,可实现各行按照处方图独立变量播种<sup>[69]</sup>。Kinze 公司的 4900MHP 是世界首款实现两种作物品种切换的精密处方播种机。两种作物种子储存在不同种箱中,并分别与两个同步电驱气吸排种器连通,可根据处方图瞬时切断或启动其中一个排种器,并能实现播种密度的调节<sup>[70]</sup>。美国在变量播种领域最具代表的是 Case 公司,其生产研制的 Flexi-coil 变量施肥播种机,在播种前可以对种子、肥料排量进行校准,并且可完成多种作物的变量播种、施肥<sup>[71]</sup>,其 ASC 系统可及时切断已播行的种子或肥料,避免重复作业<sup>[72]</sup>。

我国变量播种技术的研究相对于发达国家起步较晚,尚处于探索研究和初步试验阶段。和贤桃<sup>[44]</sup>设计的电驱玉米精密排种器控制系统,采用在地轮轴上安装旋转编码器的方式监测播种机前进速度,结合株距大小实时控制电动机转速,作为变量排种载体。

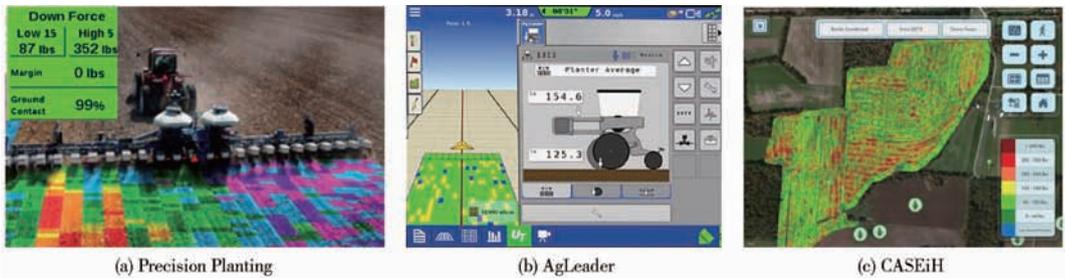


图 10 播种单体下压力的监测与控制  
Fig. 10 Monitoring and control of down force

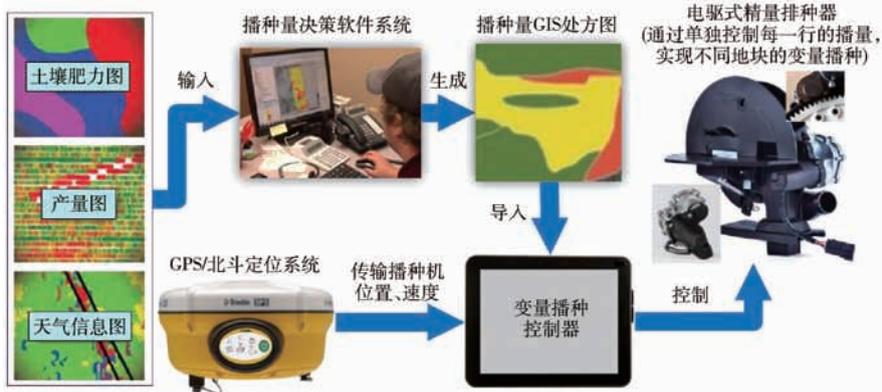


图 11 变量播种原理图  
Fig. 11 Principle of variable seeding

## 4 结束语

精密播种技术在发达国家经过几十年的研究已经日臻成熟,其涵盖的领域也逐步拓宽,从最开始注重研究精密排种技术、关注播种行内粒距均匀,逐渐发展到关注播深一致,再到根据地力情况进行变量播种,无不体现出科技人员在精密播种技术领域的研究和技术推广,始终以最大限度的挖掘产量潜力和节约生产成本为目标,也就是以增加农民的经济

收益为第一目标。科学技术研究始终建立在农民是生产主体、经济高效是生产目标的认识上,这也是美国种植业始终保持盈利的重要原因。

我国精密播种技术的研究相对滞后,智能化播种技术刚刚起步,这其中固然有技术相对落后的原因,更多的是受复杂的种植制度、分散的土地经营、农民对新技术的接受程度等的影响,导致精密播种领域的一些新技术难以用于生产实践,也间接阻碍了我国精密播种技术的发展进程。但随着规模化生

产进程的加快,以及现代种植户对经济收益的追求,精密播种机械会得到越来越广泛的应用,这将会促进我国精密播种技术的进步。现阶段我国精密播种技术的研发应以实际生产需求为目标,根据不同区域、不同种植制度、不同经营规模研发相应的精密播种技术和播种机械。高密度是作物获得高产的主要

农艺措施,规模化经营主体又追求高速高效,因此,高速高密度精密播种将是我国精密播种技术的研究重点,同时带 GPS 定位、自动导航、播种质量监控、变量播种等的智能型精密播种机也将是我国精密播种技术的发展方向。

### 参 考 文 献

- GRIEPENTROG H W. Seed distribution over the area [C] // Ag Eng Oslo 98. International Conference on Agricultural Engineering, 1998: 66 - 74.
- GAN Y, STOBBE E H. Effect of variations in seed size and planting depth on emergence, infertile plants, and grain-yield of spring wheat[J]. Canadian Journal of Plant Science, 1995, 75(3): 565 - 570.
- 廖庆喜,高焕文. 玉米水平圆盘精密排种器种子破损试验[J]. 农业机械学报, 2003,34(4): 57 - 59.  
LIAO Qingxi, GAO Huanwen. Experimental study on corn seed damaging in a horizontal plate precision metering[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2003,34(4): 57 - 59. (in Chinese)
- 廖庆喜,高焕文,舒彩霞. 水平圆盘精密排种器新型推刮种器[J]. 农业机械学报, 2004,35(1): 60 - 64.  
LIAO Qingxi, GAO Huanwen, SHU Caixia. Study on new-type pusher and ejector of horizontal plate precision metering[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2004,35(1): 60 - 64. (in Chinese)
- 廖庆喜,高焕文. 玉米水平圆盘精密排种器排种性能试验研究[J]. 农业工程学报, 2003,19(1): 99 - 103.  
LIAO Qingxi, GAO Huanwen. Experimental study on performance of horizontal disc precision meter for corn seed[J]. Transactions of the CSAE, 2003,19(1): 99 - 103. (in Chinese)
- 丁曼琦. 垂直勾轮式排种部件的试验研究[J]. 农机化研究, 1988(1): 36 - 43.
- 王金武,唐汉,周文琪,等. 指夹式精密玉米排种器改进设计与试验[J]. 农业机械学报, 2015,46(9): 68 - 76.  
WANG Jinwu, TANG Han, ZHOU Wenqi, et al. Improved design and experiment on pickup finger precision seed metering device [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015,46(9): 68 - 76. (in Chinese)
- 李洪刚. 仿生指夹式排种器[D]. 长春:吉林大学, 2010.  
LI Honggang. Bionic pinch of metering device[D]. Changchun: Jilin University, 2010. (in Chinese)
- 耿端阳,李玉环,孟鹏祥,等. 玉米伸缩指夹式排种器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2016,47(5): 38 - 45.  
GENG Duanyang, LI Yuhuan, MENG Pengxiang, et al. Design and test on telescopic clip finger type of metering device [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016,47(5): 38 - 45. (in Chinese)
- Precision Planting LLC. Improve planter performance where it counts in the meter [EB/OL]. (2016 - 10 - 4) [2016 - 10 - 4]. <http://www.precisionplanting.com/#products/precisionmeter/>.
- KINZE Manufacturing Inc. Finger pickup seed meters[EB/OL]. (2016 - 10 - 4) [2016 - 10 - 4]. <http://www.kinze.com/feature.aspx?id=4c8e725a-f616-4532-9001-06ed2a2b0b38&name=finger+pickup+seed+meters>.
- 刘佳,崔涛,张东兴,等. 玉米种子分级处理对气力式精密排种器播种效果的影响[J]. 农业工程学报, 2010,26(9): 109 - 113.  
LIU Jia, CUI Tao, ZHANG Dongxing, et al. Effects of maize seed grading on sowing quality by pneumatic precision seed-metering device[J]. Transactions of the CSAE, 2010,26(9): 109 - 113. (in Chinese)
- GIL E C R. Working quality of spacing drills, effects of sowing speed and type of seed [C] // 1996 International Conference on Agricultural Engineering, 1996: 57 - 58.
- 张建平,李飞雄. 气吸式排种器排种均匀性的 Monte Carlo 模拟[J]. 农业工程学报, 1994,10(1): 56 - 62.  
ZHANG Jianping, LI Feixiong. The Monte Carlo simulation on release homogeneity of suction-type metering device [J]. Transactions of the CSAE, 1994,10(1): 56 - 62. (in Chinese)
- ALI MUSA B. Seeding uniformity for vacuum precision seeders[J]. Scientia Agricola, 2008,65(3): 318 - 322.
- 刘文忠,赵满全,王文明,等. 气吸式排种装置排种性能理论分析与试验[J]. 农业工程学报, 2010,26(9): 133 - 138.  
LIU Wenzhong, ZHAO Manquan, WANG Wenming, et al. Theoretical analysis and experiments of metering performance of the pneumatic seed metering device[J]. Transactions of the CSAE, 2010,26(9): 133 - 138. (in Chinese)
- YASIR S H, LIAO Q, YU J, et al. Design and test of a pneumatic precision metering device for wheat [J]. Agricultural Engineering International: CIGR Journal, 2012, 14(1): 16 - 25.
- ZHANG G Z, ZANG Y, LUO X W, et al. Design and indoor simulated experiment of pneumatic rice seed metering device[J]. International Journal of Agricultural & Biological Engineering, 2015,8(4): 10 - 18.
- YU H, ZHAO X, LIU Z, et al. Study on negative-pressure precision millet seed-metering device[J]. Advance Journal of Food Science & Technology, 2015,7(2): 139 - 143.
- 贺俊林,裘祖荣. 新型气压式精密排种器的试验研究[J]. 农业工程学报, 2001,17(2): 80 - 83.
- 王浩,张晋国,赵晓坤,等. 气压组合勺式玉米精密排种器[J]. 农机化研究, 2015(9): 88 - 91.  
WANG Hao, ZHANG Jinguo, ZHAO Xiaokun, et al. Pneumatic-spoon combined corn precision seed-metering device[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2015(9): 88 - 91. (in Chinese)
- 史嵩. 气压组合孔式玉米精密排种器设计与试验研究[D]. 北京:中国农业大学, 2015.  
SHI Song. Design and experimental research of the pneumatic maize precision seed-metering device with combined holes [D]. Beijing: China Agricultural University, 2015. (in Chinese)

- 23 史嵩,张东兴,杨丽,等. 气压组合孔式玉米精密排种器设计与试验[J]. 农业工程学报, 2014,30(5): 10-18.  
SHI Song, ZHANG Dongxing, YANG Li, et al. Design and experiment of pneumatic maize precision seed-metering device with combined holes[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(5): 10-18. (in Chinese)
- 24 史嵩,张东兴,杨丽,等. 基于 EDEM 软件的气压组合孔式排种器充种性能模拟与验证[J]. 农业工程学报, 2015,31(3): 62-69.  
SHI Song, ZHANG Dongxing, YANG Li, et al. Simulation and verification of seed-filling performance of pneumatic-combined holes maize precision seed-metering device based on EDEM[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(3): 62-69. (in Chinese)
- 25 TURAN J, VIŠACKI V, MEHANDŽIĆ S, et al. Sowing quality indicators for a seed drill with overpressure[J]. Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis, 2014, 62(6): 1487-1492.
- 26 MURSEC B, VINDIS P, JANZEKOVIC M, et al. Testing of quality of sowing by pneumatic sowing machines[J]. Journal of Achievements in Materials & Manufac Turing Engineerin, 2008,26(1):81-88.
- 27 张守勤,马旭,姜梦山. 气吹式排种器的改进与性能试验[J]. 粮油加工与食品机械, 1991(2): 11-13.
- 28 胡树荣,马成林,李慧珍,等. 气吹式排种器锥孔的结构参数对排种质量影响的研究[J]. 农业机械学报, 1981,12(3): 21-31.  
HU Shurong, MA Chenglin, LI Huizhen, et al. Effects of conical hole design parameters on seed-metering performance-a study on the pneumatic seed-metering device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 1981,12(3): 21-31. (in Chinese)
- 29 刘佳,崔涛,张东兴,等. 气吹式精密排种器工作压力试验研究[J]. 农业工程学报, 2011,27(12): 18-22.  
LIU Jia, CUI Tao, ZHANG Dongxing, et al. Experimental study on pressure of air-blowing precision seed-metering device[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(12): 18-22. (in Chinese)
- 30 祁兵,张东兴,杨丽,等. 集排式精密排种器清种装置设计与性能试验[J]. 农业工程学报, 2015,31(1):20-27.  
QI Bing, ZHANG Dongxing, YANG Li, et al. Design and experiment of cleaning performance in a centralized pneumatic metering device for maize[J]. Transactions of the CSAE, 2015,31(1): 20-27. (in Chinese)
- 31 祁兵,张东兴,崔涛. 中央集排气送式玉米精密排种器设计与试验[J]. 农业工程学报, 2013,29(18):8-15.  
QI Bing, ZHANG Dongxing, CUI Tao. Design and experiment of centralized pneumatic seed metering device for maize[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(18): 8-15. (in Chinese)
- 32 Werke H Dreyer GmbH & Co. EDX precision airplanter overview[EB/OL]. (2016-10-4)[2016-10-4]. <http://www.amazone.net/1262.asp>.
- 33 祁兵. 中央集排气送式精密排种器设计与试验研究[D]. 北京:中国农业大学, 2014.  
QI Bing. Design and experiment of a centralized metering device [D]. Beijing: China Agricultural University, 2014. (in Chinese)
- 34 刘建英,张鹏举,刘飞. 离散元模拟导种管高度对排种性能的影响[J]. 农机化研究, 2016(1): 12-16.  
LIU Jianying, ZHANG Pengju, LIU Fei. The discrete element simulation guide tube height effects on seeding performance[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2016(1): 12-16. (in Chinese)
- 35 廖庆喜,舒彩霞. 精播机输种管对排种均匀性影响的试验研究[J]. 湖北农业科学, 2004(4): 126-128.
- 36 严荣俊. 精密播种机导种管结构设计与试验研究[D]. 北京:中国农业大学, 2012.  
YAN Rongjun. The structural design and test on delivery tube of corn precision planer[D]. Beijing: China Agricultural University, 2012. (in Chinese)
- 37 STAGGENBORG S A. Effect of planter speed and seed firmers on corn stand establishment[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2004, 20(5): 573-580.
- 38 LIU Quanwei, YANG Li, ZHANG Dongxing, et al. Maize seed movement characteristic and seed-filling performance analysis in seed transportation and delivery unit based on ADAMS [C] // 2015 ASABE Annual International Meeting, ASABE Paper 152189856.
- 39 康建明,温浩军,王士国,等. 带式导种装置对排种均匀性影响的试验研究[J]. 中国农机化学报, 2015(5): 42-45.  
KANG Jianming, WEN Haojun, WANG Shiguo, et al. Experimental study on impact of belt type conductor delivery on seeding uniformit[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2015(5): 42-45. (in Chinese)
- 40 陈学庚,钟陆明. 气吸式排种器带式导种装置的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2012(22): 8-15.  
CHEN Xuegeng, ZHONG Luming. Design and test on belt-type seed delivery of air-suction metering device[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(22): 8-15. (in Chinese)
- 41 John Deere brochures online [EB/OL]. (2016-10-4)[2016-10-4]. [http://www.deere.com/en\\_US/docs/html/brochures/publication.html?id=a8b085ae#6](http://www.deere.com/en_US/docs/html/brochures/publication.html?id=a8b085ae#6).
- 42 Precision Planting speedtube [EB/OL]. (2016-10-4)[2016-10-4]. <http://www.precisionplanting.com/#products/speedtube/>.
- 43 The influence of planting depth and seed firmers on corn stands and yield[R]. Monsanto Learning Center at Scott, MS. 2013 DEMONSTRATION REPORT, 2013.
- 44 和贤桃. 电驱气力式玉米精密排种器控制系统设计[D]. 北京:中国农业大学, 2015.  
HE Xiantao. Design of the control system of motor-driving and pneumatic maize precision metering device [D]. Beijing: China Agricultural University, 2015. (in Chinese)
- 45 YANG L, HE X T, CUI T, et al. Development of mechatronic driving system for seed meters equipped on conventional precision corn planter. [J]. International Journal of Agricultural & Biological Engineering, 2015,8(4):1-9.
- 46 KAMGAR S, ESLAMI M J, MAHARLOUIE M M. Design development and evaluation of a mechatronic transmission system to

- improve the performance of a conventional row crop planter[J]. *International Journal of Agronomy and Plant Production*, 2013, 4(3): 480–487.
- 47 SINGH T P, MANE D M. Development and laboratory performance of an electronically controlled metering mechanism for okra seed[J]. *Agricultural Mechanization in Asia, Africa and Latin America*, 2011, 42(2): 63–69.
- 48 唐尧华. 基于拖拉机前轮转速的排种驱动系统的研究[D]. 保定: 河北农业大学, 2009.  
TANG Yaohua. Research on the planting drive system based on a tractor front-wheel speed[D]. Baoding: Hebei Agricultural University, 2009. (in Chinese)
- 49 李剑峰. 播种机排种自动控制系统的研究[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2006.  
LI Jianfeng. Research on auto-control system of planting for drill[D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2006. (in Chinese)
- 50 GUPTA S C, SCHNEIDER E C, SWAN J B. Planting depth and tillage interactions on corn emergence[J]. *SSSAJ*, 1988, 52(4): 1122–1127.
- 51 BERTI M T, JOHNSON B L, HENSON R A. Seeding depth and soil packing affect pure live seed emergence of cuphea[J]. *Industrial Crops and Products*, 2008, 27(3): 272–278.
- 52 曹慧英, 史建国, 朱昆仑, 等. 播种深度对夏玉米冠层结构及光合特性的影响[J]. *玉米科学*, 2016, 24(1): 102–109.  
CAO Huiying, SHI Jianguo, ZHU Kunlun, et al. Effects of sowing depth on canopy structure and photosynthetic characteristics of summer maize[J]. *Journal of Maize Sciences*, 2016, 24(1): 102–109. (in Chinese)
- 53 YANG Li, ZHANG Rui, LIU Quanwei, et al. Row cleaner and depth control unit improving sowing performance of maize no-till precision planter[J]. *Transactions of the CSAE*, 2016, 32(17): 18–23.
- 54 CUI Tao, ZHANG Dongxing, YANG Li, et al. Design and experiment of collocated-copying and semi-low-height planting-unit for corn precision seeder[J]. *Transactions of the CSAE*, 2012, 28(Supp. 2): 18–23.
- 55 Precision Planting Airforce[EB/OL]. (2016-10-4)[2016-10-4]. <http://www.precisionplanting.com/#products/airforce/>.
- 56 黄东岩, 朱龙图, 贾洪雷, 等. 基于压电薄膜的免耕播种机播种深度控制系统[J]. *农业机械学报*, 2015, 46(4): 1–8.  
HUANG Dongyan, ZHU Longtu, JIA Honglei, et al. Automatic control system of seeding depth based on piezoelectric film for no-till planter[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(4): 1–8. (in Chinese)
- 57 Hydraulic Down Force Features [EB/OL]. (2016-10-4)[2016-10-4]. <http://www.agleader.com/products/seedcommand/hydraulic-down-force/>.
- 58 WEATHERLY E T, JR C G B. Automatic depth control of a seed planter based on soil drying front sensing[J]. *Transactions of the ASAE*, 1997, 40(2): 295–305.
- 59 SUOMI P, OKSANEN T. Automatic working depth control for seed drill using ISO 11783 remote control messages[J]. *Computers & Electronics in Agriculture*, 2015, 116: 30–35.
- 60 宋鹏, 张俊雄, 李伟, 等. 精密播种机工作性能实时监测系统[J]. *农业机械学报*, 2011, 42(2): 71–74.  
SONG Peng, ZHANG Junxiong, LI Wei, et al. Real-time monitoring system for accuracy of precision seeder[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2011, 42(2): 71–74. (in Chinese)
- 61 周利明, 王书茂, 张小超, 等. 基于电容信号的玉米播种机排种性能监测系统[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(13): 16–21.  
ZHOU Liming, WANG Shumao, ZHANG Xiaochao, et al. Seed monitoring system for corn planter based on capacitance signal[J]. *Transactions of the CSAE*, 2012, 28(13): 16–21. (in Chinese)
- 62 纪超, 陈学庚, 陈金成, 等. 玉米免耕精密播种机排种质量监测系统[J]. *农业机械学报*, 2016, 47(8): 1–6.  
JI Chao, CHEN Xuegeng, CHEN Jincheng, et al. Monitoring system for working performance of no-tillage corn precision seeder[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(8): 1–6. (in Chinese)
- 63 和贤桃, 郝永亮, 赵东岳, 等. 玉米精密排种器排种质量自动检测仪设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2016, 47(10): 1–9.  
HE Xiantao, HAO Yongliang, ZHAO Dongyue, et al. Design and experiment of testing instrument for maize precision seed meter's performance detection[J]. *Transaction of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(10): 1–9. (in Chinese)
- 64 Precision seed spacing and depth control[EB/OL]. (2016-10-4)[2016-10-4]. <http://www.precisionplanting.com/#products/seedsense/>.
- 65 AgLeader Seed Command [EB/OL]. (2016-10-4)[2016-10-4]. <http://www.agleader.com/products/seedcommand/>.
- 66 AgLeader Hydraulic Down Force System [EB/OL]. (2016-10-4)[2016-10-4]. <http://www.agleader.com/products/seedcommand/hydraulic-down-force/>.
- 67 FULTON J P, PONCET A, MCDONALD T, et al. Considerations for site-specific implementation of active downforce and seeding depth technologies on row-crop planters[C]//Proceedings of the 73rd Conference LAND, TECHNIK-AgEng 2015, 2015: 139–145.
- 68 Delta Force [EB/OL]. (2016-10-4)[2016-10-4]. <http://www.caseih.com/northamerica/en-us/products/planting-seeding/2000-series-early-riser-planter>.
- 69 Electric variable-rate planting from an entrepreneur [EB/OL]. (2016-10-4)[2016-10-4]. <http://farministrynews.com/planters/electric-variable-rate-planting-entrepreneur>.
- 70 4900 MULTI-HYBRID PLANTER [EB/OL]. (2016-10-4)[2016-10-4]. <http://www.kinze.com/planter.aspx?id=4936fa23-aef1-423b-98dc-e612ffcc17af&name=4900+multi-hybrid+planter>.
- 71 庄卫东, 汪春, 王熙. Flexi-Coil 变量播种机使用设置的分析[J]. *农机化研究*, 2006(3): 56–57.  
ZHUANG Weidong, WANG Chun, WANG Xi. The analysis and operating setup for Flexi-Coil's variable planter[J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2006(3): 56–57. (in Chinese)
- 72 Case IH AccuSection Control System[EB/OL]. (2016-10-4)[2016-10-4]. <http://www.caseih.com/northamerica/en-us/products/planting-seeding/precision-air-carts>.