

罗锡文, 王在满, 曾山, 等. 水稻机械化直播技术研究进展 [J]. 华南农业大学学报, 2019, 40(5): 1-13.

LUO Xiwen, WANG Zaiman, ZENG Shan, et al. Recent advances in mechanized direct seeding technology for rice[J]. Journal of South China Agricultural University, 2019, 40(5): 1-13.

水稻机械化直播技术研究进展

罗锡文, 王在满, 曾山, 臧英, 杨文武, 张明华

(南方农业机械与装备关键技术教育部重点实验室/华南农业大学工程学院, 广东 广州 510642)

摘要: 水稻精量穴直播技术为水稻机械化生产提供了一种先进的轻简化栽培技术, 提高了水稻机械化种植水平。近十年来, 随着我国农村劳动力大量转移和农业生产成本的不断增加, 直播水稻发展很快。本文综述了国内外水稻机械化直播技术及机具的研究现状和发展动态, 详细介绍了由华南农业大学研究成功的水稻精量穴播技术体系和机具, 并对水稻机械化直播技术今后的研究方向进行了展望。

关键词: 水稻; 直播稻; 机直播; 精量播种

中图分类号: S223.23

文献标志码: A

文章编号: 1001-411X(2019)05-0001-13

Recent advances in mechanized direct seeding technology for rice

LUO Xiwen, WANG Zaiman, ZENG Shan, ZANG Ying, YANG Wenwu, ZHANG Minghua

(Key Laboratory of Key Technology on Agricultural Machine and Equipment, Ministry of Education/College of Engineering, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

Abstract: Mechanized rice direct seeding, which improves the level of rice mechanized planting, is a cost-effective and efficient approach for rice cultivation. Recently, rice direct seeding has rapidly increased owing to rural labour shortages and continuous increase of agricultural production cost. In this article, we analyzed the research and application progress of mechanized rice direct seeding at home and abroad, and introduced in detail the technical system and tools of rice precision hole sowing successfully studied by South China Agricultural University. The future research directions of rice precision hill-drop drilling technology and equipment were proposed.

Key words: rice; direct seeding rice; mechanized direct seeding; precision seeding

我国水稻常年种植面积 $3.0 \times 10^7 \text{ hm}^2$, 水稻生产全程机械化主要包括耕整地、种植、田间管理、收获和谷物干燥等环节。水稻生产全程机械化是提高水稻生产能力的重要物质基础和技术手段, 加快推进水稻生产全程机械化, 对于减轻农民劳动强度, 提高粮食产量, 保证粮食安全, 促进农业节本增效、提高农民收入, 促进农村劳动力转移、加快城市化和工业化进程都具有重要的意义。至 2016 年底, 我国水稻综合机械化水平为 79.2%, 其中, 耕、种、收水

平分别为 99.3%、44.5% 和 87.1%, 种植机械化水平相对较低。我国水稻种植区域广、气候差异大、土地集中程度不等, 形成了水稻种植品种多样、种植制度和种植方式复杂多样。经多年的努力, 已形成了以机插秧为主的多种机械化种植并存的发展格局, 但各地机械化水平差距较大。因此, 大力发展水稻生产全程机械化, 尤其是种植机械化是今后一段时间发展的重点。水稻机械化直播是一种轻简、高效、可持续发展的栽培方式^[1-9], 欧美国家的水稻种植都

收稿日期: 2019-05-25 网络首发时间: 2019-07-12 09:09:18

网络首发地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/44.1110.S.20190710.1109.004.html>

作者简介: 罗锡文 (1945—), 男, 教授, 中国工程院院士, E-mail: xwluo@scau.edu.cn

基金项目: 现代农业产业技术体系建设专项资金 (CARS-01-41); 公益性行业 (农业) 科研专项 (201203059)

采用机械直播。随着我国农村劳动力大量转移,直播水稻发展很快。本文分析了国内外水稻机械化直播技术及装备的研究现状及研究进展,为水稻机械化直播技术的应用提供参考。

1 国内外水稻机械化直播技术

1.1 国外直播技术研究状况

1.1.1 美国、澳大利亚以及欧洲等发达国家 美国等发达国家以机械直播(包括飞机撒播)为主^[10-11]。美国的水稻种植面积约 $1.1 \times 10^6 \text{ hm}^2$, 主要分布在密西西比河三角洲、墨西哥湾和加利福尼亚州^[12]。美国水稻种植 80% 采用机械旱直播, 20% 采用带水飞机撒播作业。美国从事水稻生产的农民仅有 6 000 人左右, 人均种植面积 180 hm^2 , 产量高达 8 t/hm^2 以上。美国的水稻产业以生产优质水稻著称, 实现了水稻生产全程机械化。

澳大利亚每年生产稻谷约 $1.0 \times 10^6 \text{ t}$, 产量高达 10 t/hm^2 。澳大利亚的水稻产区主要位于新南威尔士州的冲击平原。澳大利亚的水稻 80% 采用飞机撒播的方式, 人均种植面积 80 hm^2 。大动力直播机和飞机的应用使得播种能够在很短的时间内完成, 最大限度地避免了恶劣天气的影响; 机械化耕作、施肥和收获使水稻种植效率很高。在澳大利亚, 建立了完善的水稻生产技术体系, 研究人员、农艺师、操作人员、市场营销人员以及种植户联系紧密。高效先进的技术、装备和管理体系为水稻高产提供了保障。

欧洲水稻种植总面积约 $4.6 \times 10^5 \text{ hm}^2$, 产量约 6.5 t/hm^2 。其中, 以意大利的水稻种植面积最大, 约为 $2.4 \times 10^5 \text{ hm}^2$, 水稻年总产量约 $1.3 \times 10^6 \text{ t}$ 。意大利的水稻生产从土地耕整到种植、除草、收获等生产环节在 20 世纪 70 年代就已经全部实现了机械化作业, 60 年代后几乎 100% 采用机械化直播。

1.1.2 日本、韩国等亚洲国家 日本、韩国等亚洲国家以机械化插秧为主, 正逐步向机械化直播发展^[13]。日本的农业以水稻生产为主, 近 50% 的耕地用于种植水稻, 日本可称为“稻作之国”, 因此, 日本的农业机械化以水稻生产机械化为主。日本是一个人多地少的国家, 粮食生产非常重要。日本政府非常重视农业科技, 研究、开发和推广了大量适合本国农业条件的新技术和新机具, 水稻生产机械化技术居世界领先水平。日本水稻生产机械的研发主要由政府支持的生研机构和生产企业共同承担, 政府对生研机构进行支持, 研究新型和通用性技术, 企业进行产业化生产。目前, 插秧机普及率已达 99.8%, 联合收割机普及率达 91%, 共同育苗设施

为 17%, 共同干燥设施为 29%。近年来, 日本又重新开始了对水稻机械化直播技术的研究, 目的在于节省水稻生产的时间和人力、降低农业生产成本和保护农业生态环境。

韩国国土面积为 $9.9 \times 10^6 \text{ hm}^2$, 耕地面积为 $2.0 \times 10^6 \text{ hm}^2$, 水稻是韩国最主要的粮食作物, 一年一作。20 世纪 70 年代, 韩国的农业机械开始起步, 从日本引进水稻插秧技术; 80 年代, 随着工业化发展, 农村劳动力大量向城市转移, 农业人口妇女化和老龄化问题突出, 在政府政策的支持下, 农业机械化得到了全面发展, 动力机械逐步代替了人畜力劳动; 90 年代, 水稻移栽和收获机械技术得到大力发展, 水稻生产中的耕整、栽插、植保、收获、烘干、加工作业基本实现了机械化, 主要作业机械有拖拉机、半喂入联合收割机、水稻插秧机和其他农田专业化作业机械。目前, 韩国水稻育插秧已全面实现了机械化, 其中, 政府对农业机械化的促进政策起到了重要作用。1987 年开始, 先后研究成功节本省的工的水稻水旱直播栽培技术、幼苗机械移栽栽培技术和育苗自动化技术; 同时研发了水、旱直播机; 通过对插秧机进行技术改进, 开发了施肥、除草、插秧一体作业的多功能插秧机。2001 年至今, 研究稻作环保生产体系、免少耕直播、插秧技术和铺纸机械化栽培技术, 同时开发出了相应的水稻直播机^[14]。

马来西亚、泰国、菲律宾、印度等东南亚国家的水稻种植方式有从传统移栽向直播种植发展的趋势。在过去的 10 年中, 马来西亚的直播面积从几乎零增加到 50% 以上, 位于该国北部的 Muda 地区近 $1.0 \times 10^5 \text{ hm}^2$ 的水稻主要栽培方式为直播栽培。在菲律宾的旱季水稻中, 至少有 30% 以上种植面积采用直播, 而且直播面积正在迅速增加。在泰国, 直播稻面积约占水稻总面积的 34%, 且增长趋势未减。印度直播稻种植面积达 $1.2 \times 10^7 \text{ hm}^2$, 约占水稻总面积的 30%。

1.2 国内直播技术研究状况

据史书记载, 我国的水稻种植最初是采用直播方式, 到了汉朝才发明了育苗移栽。直播水稻是一种传统的水稻栽培方式, 从最早采用直播栽培至今已经有几千年的历史。近年来, 我国水稻机械化直播的发展速度较快, 这与国际上水稻种植机械化发展趋势相吻合^[15-18]。水稻机械化直播可分为机械水直播和机械旱直播。水稻水直播机主要应用在南方地区, 这种机型以芽种条播为主, 将稻种直接播在平整、没有积水的湿润泥土表面上。水稻旱直播机主要应用在北方稻区, 这种机型大多由小麦条播机改

装而成,以条播方式为主,在未灌水的田中直接播未发芽的稻种,这种方法对地块平整度的要求较高。

早期水稻水直播机的代表机型是上海沪嘉系列外槽轮式水稻条直播机,该机直接将芽种播到水田的泥浆上,由于采用外槽轮排种,又没有合适的清种机构,伤种率较高,播种均匀性较差,常有断垄现象发生,播后虽能成行,但未能成穴,播种量较大。广西大学研制了2BD-8型自走型分流水稻直播机^[19],该机器采用电磁振动排种器,属于条播方式,由于在水田中作业,电磁排种器的工作可靠性受到影响,当作业速度达到0.6 m/s时,播种合格率开始下降。南京市农业机械技术推广站采用非接触排种原理,研制了一种新型振动气流式水稻芽种直播机^[20],该机采用四轮通用底盘驱动,供种采用振动盒,用气流将芽长约5 mm的水稻芽种通过导种管吹入田间实现条播,播量可调,但鲜见大规模生产试验报告。浙江临海农民将东方红-18型喷雾机的喷粉装置改为喷种装置,研制出水稻喷撒直播机,将芽谷通过喷粉管喷播到田里,该机在浙江、安徽、湖北、江西等地均有应用,但该技术对水稻品种要求严格,播种量较大,播种不均匀。江苏昆山市农机推广站研制成功水稻带式精量条直播机,该机具具有大播量时均匀性好、结构简单、操作简便、能耗低等优点,但不适合高速作业,存在条直播机的一些共同缺点。目前,我国水稻生产中的机械化直播主要采用条播或撒播方式,存在的主要问题是:播种均匀性差、技术含量低、适应性差、作业效率低、配套农艺跟不上。

为了解决人工撒播和机械条播存在的问题,参考机械化插秧的有序种植方式,2003年,华南农业大学成功研究出水稻精量穴播技术体系,包括同步开沟起垄水稻精量水穴播技术、同步开沟起垄施肥水稻精量水穴播技术、同步开沟起垄喷施水稻精量水穴播技术、同步开沟起垄水稻精量早穴播技术和

破茬免耕水稻精量早穴播技术,并成功研制相应的水稻精量穴播机具。

2 国内外水稻精量排种器研究状况

2.1 国外排种器研究状况

国外很多专家采用动力学与运动学理论,通过对比试验、建立数学模型或 EDEM 仿真等方法对气吸式精量排种器进行了较为深入的研究,排种器工作性能稳定,但只适用于大豆、玉米、棉花和甜菜等圆球度较高的种子。美国、澳大利亚以及欧洲发达国家全部采用直播方式种植水稻,包括飞机撒播和机械条播。机械条播一般采用槽轮式排种器、拨齿式排种器,如图1所示。Maleki等^[21-22]研制了一种螺旋槽式排种器,播种均匀性好,但是成穴性差。

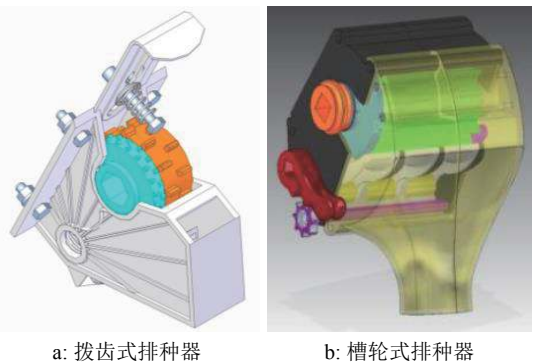
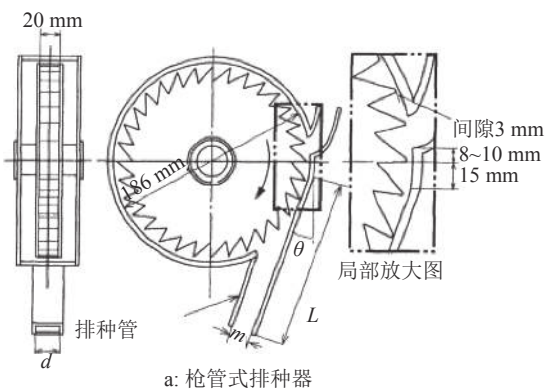


图1 机械式排种器

Fig. 1 Mechanical metering device

日本田坂幸平等^[23]研究了一种枪管式排种器,如图2a所示。工作时锯齿盘以一定的转速旋转,击打从供给管连续进入排种区的种子,使种子加速,利用相邻锯齿击打种子产生的时间间隔,使种子成穴入土。锯齿盘直径为190 mm、厚度为20 mm,齿数为32齿,材质要求有弹性,锯齿盘与排种管的间隙要求在1~3 mm之间可调,排种管的长度为190 mm,管径长边为28~30 mm、短边为23~25 mm,角度为



a: 枪管式排种器



b: 水平圆盘式排种器



c: 调节式槽轮排种器

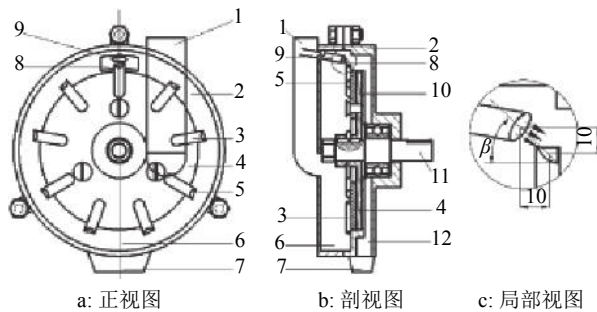
图2 产自日本和韩国的排种器

Fig. 2 The metering devices from Japan and South Korea

10°~15°时,成穴效果最好。日本洋马公司采用水平圆盘式排种器(图 2b),久保田、井关和矢崎公司,韩国大同和东洋公司等采用类似调节爪式槽轮穴播排种器(图 2c),播种量可调,通过加大外槽轮取种槽的间距可将条播变为穴播。

2.2 国内排种器研究状况

水稻直播精量排种器主要有机械式和气力式 2 种。曹成茂等^[24]设计了一种气吹异形孔勺轮式排种器,如图 3 所示。该排种器主要由取种勺、取种盘、异型孔、储种区、出种口、落种口、气吹管和旋转盘等部件组成,采用坡状型孔,播种性能优于其他形式型孔,气吹压力范围在 1.00~1.05 kPa 之间,气吹角度在 40°~45°之间,排种性能可满足水稻穴直播的农艺要求。

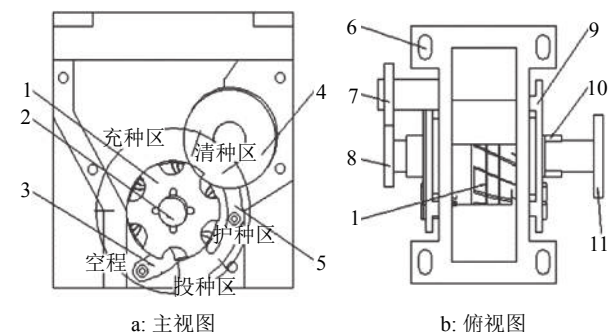


1: 料斗, 2: 壳体, 3: 取种勺, 4: 取种盘, 5: 异形孔, 6: 储种区, 7: 出种口, 8: 落种口, 9: 气吹管, 10: 旋转盘, 11: 排种轴, 12: 落种通道

图 3 气吹辅助勺轮式排种器总体结构

Fig. 3 Sketch of air-assisted spoon wheel seed-metering device

田立权等^[25]设计了一种螺旋槽式水稻穴直播排种器,如图 4 所示。该排种器主要由螺旋槽排种轮、推种刮片、清种滚刷和护种板等部件组成。采用 Matlab 对排种过程中螺旋槽内稻种的运动轨迹进行了研究,结果表明,当螺旋槽升角为 71.0°、螺旋槽长度为 10.8 mm、排种轮工作转速为 23.2 r/min 时,排种性能相对最好,能满足水稻精量穴直播要求。

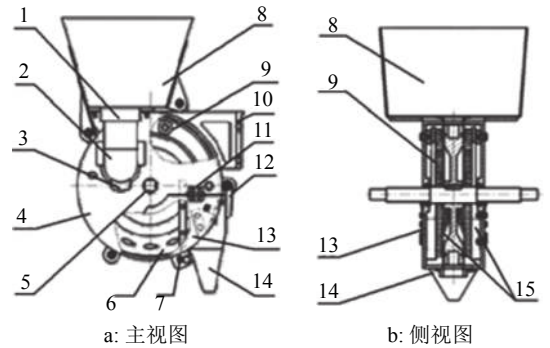


1: 排种轮, 2: 主轴, 3: 推种刮片, 4: 清种滚刷, 5: 护种弧板, 6: 上装配孔, 7: 清种链轮, 8: 驱动链轮, 9: 排种轮盖板, 10: 排种轮定位套, 11: 主轴链轮

图 4 螺旋槽式排种器示意图

Fig. 4 Sketch of spiral-grooved seed-metering device

张国忠等^[26]和张沙沙^[27]设计了一种具有弧形毛刷清种护种装置的双腔侧充式水稻精量穴播排种器(图 5)。单腔播种时用于播杂交稻、双腔播种时用于播常规稻,通过理论计算与试验,确定了排种盘的直径、型孔数量、型孔直径、型孔深度、型孔位置角、清种护种毛刷和防堵装置等结构。

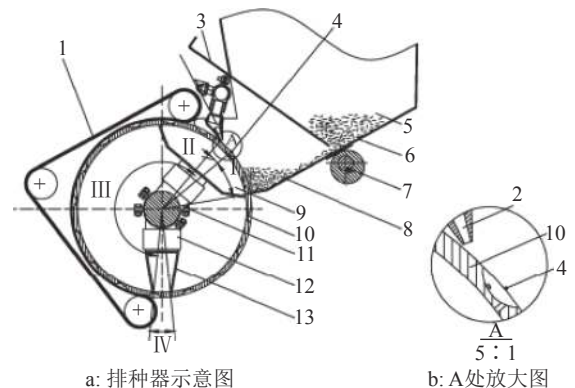


1: 种箱插板, 2: 进种管, 3: 进种管卡槽, 4: 壳体, 5: 排种轴, 6: 排种盘, 7: 隔种毛刷, 8: 种箱, 9: 清种护种毛刷, 10: 中间壳体, 11: 翻转合页, 12: 防堵装置, 13: 翻转式卸种盖, 14: 输种管, 15: 左、右腔体

图 5 双腔侧充式水稻精量穴播排种器结构示意图

Fig. 5 Structural schematic diagram of double cavity side-filled precision hole seeding device for rice

张顺等^[28-30]设计了一种气力滚筒式水稻直播精量排种器,如图 6 所示。采用圆锥形型孔和多吸孔吸附充种、柔性绳结合气吹清种、柔性护种带护种以及气吹防堵,运用 CFD 软件对不同窝眼吸附孔内的气流场进行仿真分析,并通过试验确定了排种器的最佳参数。台架试验和田间试验结果表明,气力滚筒式水稻直播精量排种器能满足杂交稻精量播种要求。



1: 随动护种带, 2: 清种风嘴, 3: 开口调节板, 4: 清种绳, 5: 种子箱, 6: 种箱底板, 7: 圆盘凸轮, 8: 水稻种子, 9: 负压气室, 10: 窝眼滚筒, 11: 出气空心轴, 12: 进气空心轴, 13: 正压气室; I: 充种区, II: 清种区, III: 携种区, IV: 排种区

图 6 气力滚筒式水稻直播精量排种器结构示意图

Fig. 6 Structure diagram of pneumatic cylinder-type precision direct seed-metering device

国内对水稻精量早穴播排种器的研究较少,一般水稻早播的播种量较大、作业速度较快,同时土

壤含水率较低,导致种子触土后容易发生弹跳,穴播难度较大。华南农业大学研究的型孔式排种器在合适的安装高度下能基本实现穴直播,新疆生产建设兵团对鸭嘴式膜上打孔棉花排种器进行了改装(图7)^[31-33]。种子在内部充种后经过护种区到达投种区时,鸭嘴扎入土壤,打开鸭嘴,释放种子。由于鸭嘴已在土壤中打好一定深度的孔,减少了种子触土后的弹跳,穴播效果较好,唯一不足就是播量与穴距调节较为困难。陈学庚等^[32]成功研究出一种气吸式排种器带式导种装置(图8),其转速与排种器同步,将上部排种器排出的种子包络在导种带和护板形成的空腔中,至接近地表的投种位置时,种子自由落下,完成导种过程。由于投种点离播种沟较近,减小了种子的弹跳。

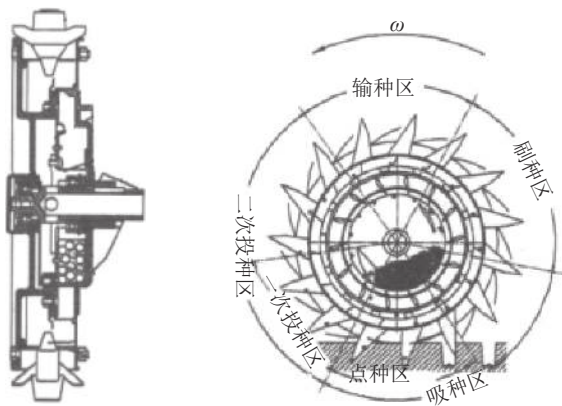


图7 穴播器结构示意图和工作原理图

Fig. 7 Schematic diagram of dibber configuration

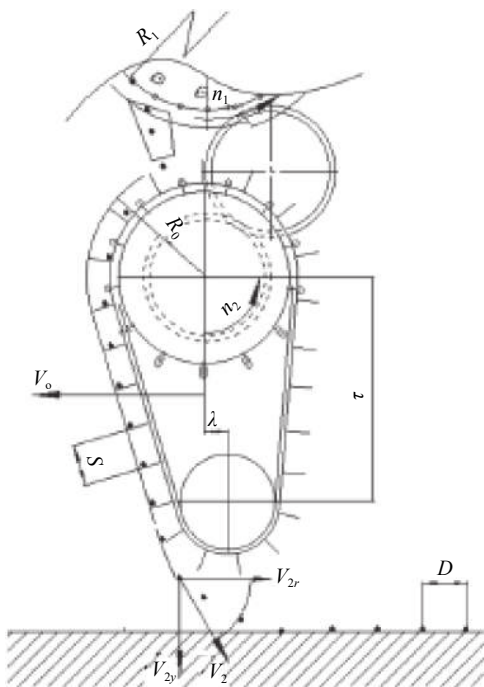


图8 带式导种装置结构示意图

Fig. 8 Structure of belt-type delivery device

3 国内外水稻精量直播机研究状况

3.1 国外水稻直播机研究状况

欧美国家采用机械化直播方式均获得了较高的水稻产量,这除了与品种、气候和土壤等条件有关外,较高的全程机械化水平也是至关重要的因素,其中,播种机械的质量是保证产量的关键之一。欧美国家采用的水稻直播机一般都与小麦条播机通用,主要有机械式和气吹式2种。知名度较高的直播机生产企业有德国 Amasone、意大利的 MaterMacc 和 Maschio Gaspardo 以及美国的 John Deere 等,均研发了机械式和气吹式直播机系列机型,虽然结构和外形有一定的差异,但是基本原理大致相同。机械式直播机通过地轮驱动槽轮式排种器和施肥器,种子和肥料分别经排种管和施肥管落入种沟和施肥沟中,最后覆土镇压。气吹式直播机先通过机械式排种器(大槽轮)将种子连续地排入导种管,风机产生的气流,将种子和气流混合进入分种器中,分种器分种后通过排种管落入种沟中,由覆土镇压装置对种子覆土和镇压。控制机械式排种器的转速可以调节播种量,一般料箱中一半为种子、一半为肥料,中间有隔板隔开,排肥原理和排种原理基本相同。图9a为德国 Amasone 公司生产的 Pneumatic seed drills AD-P 系列集排式播种机,图9b为美国 John Deere 公司的 BD11 系列机械式谷物直播机,播种量为 150 kg/hm² 以上,两者作业速度均达到 10 km/h。

日本的水稻种植习惯与中国类似,有插秧、水直播和旱直播等方式。日本拥有世界领先的水田农业机械生产企业,其中,较为出名的有井关、久保田和洋马,日本的水稻种植基本实现了机械化,插秧机普及率达 99.8%。20 世纪六七十年代,日本水稻直播技术研究曾迎来高峰,当时直播面积达到 5.5×10⁴ hm²,后来随着机械插秧技术的突破,插秧机开始快速普及。至 20 世纪末,随着劳动力缺乏和生产成本增加,日本又对水稻机械化直播技术开展研究,主要以机械化条播为主,日本的插秧机普及率非常高,水稻旱直播和水直播机具有很好的技术储备。梶谷恭一^[34]研究了一种免耕旱直播机,其工作原理与鸭嘴式棉花排种器相似,用安装在旋转圆盘圆周上的打孔器在土壤中打孔,排种管中排种门的开合与旋转圆盘同步,将种子和肥料排入相应的孔中,再经覆土器覆土,可实现穴播。随后日本又研发出了带旋耕的水稻旱直播机^[35],其工作原理:旋耕碎土后,开沟装置开出播种沟,排种器将种子播入



图 9 国外的水稻直播机

Fig. 9 Rice direct seeding machines abroad

沟底后上水,播种沟壁上的土壤吸水后滑实现覆土。与此同时,日本的水直播技术也有了突破,井关、三菱和洋马等公司联合研发了与乘坐式插秧机底盘配套的水直播机^[36-37],直播机可仿形作业,同时开出播种沟,槽轮排种器将包衣种子以条播的形式播于泥面后由覆土器覆土。随后,宫城县农业中心将条播改成了穴播^[13]。近年来日本研究了一种气力辅助喷射式水稻条播机,如图 9c 所示^[38-39]。其工作原理:1 个排种器对应 2 个排种管,排种器将种子排入送种管中,风机产生的气流经分配器进入各个送种管中,将种子吹送到排种喷头,由于排种喷头末端逐渐减小,气压逐渐增大,种子随气流加速后从出口处喷出,以一定的速度射入土壤中。

水稻是韩国最主要的粮食作物,20 世纪 70 年代,韩国从日本引进水稻机械插秧技术,并快速发展。自 1987 年开始,先后研究成功水稻水旱直播栽培技术、幼苗机械移栽栽培技术和育苗自动化技术与机具,至 90 年代,水稻生产全程机械化水平大幅度提高。随着韩国城市化的快速发展,农村劳动力大量转移,韩国政府准备大幅度扩大直播面积,种植面积计划达 50% 以上^[40]。根据水田和旱地直播的需要,韩国研发了一种新型水稻多功能覆土直播机,如图 9d 所示^[41]。该机以轮式拖拉机底盘为配套动力,采用搅龙平整土地和消除轮辙,稻种和肥料分别排入种沟和施肥沟中并覆土,可以水旱两用。日本和韩国的插秧机企业利用插秧机动力底盘的优势,先后开发出多种水稻直播机机型,如图 9e~9h 所示。2013 年,上海矢崎机械贸易有限公司引进了日本一种 8 行水稻穴直播机,其齿形排种器齿部较

浅,对种子的适应性较差。

3.2 国内水稻直播机研究状况

我国水稻种植机械化水平从 1998 年的 3.7% 提高到 2015 年的 40.0%,增幅超过 910%,水稻机械直播面积逐年增加,2018 年上海市水稻精量穴直播面积约占水稻种植总面积的 50%。在我国农村劳动力日益短缺的情况下,水稻直播技术省时、省工、低劳动强度的优点进一步凸显,近年来对水稻精量穴直播机的研究逐渐增多,各种类型的水稻直播机开始出现并且推广应用。我国水稻直播历史悠久,但由于配套的农艺技术问题没有得到很好的解决,汉朝以后逐渐发展为以移栽为主。20 世纪 50 年代开始,我国逐步开展对水稻直播机械的研究。早期的水稻直播机主要是以上海沪嘉 2BD 系列水稻直播机为代表的独轮简易式水稻条播机,通过外槽轮排种器直接将种子播于泥面^[42-44]。蔡东林^[45]研制了一种少精量水稻穴播机,采用间歇传动排种机构带动水平圆盘式排种器,实现了穴播,但是穴粒数无法调节,只能通过调整穴距来改变播种量。

华南农业大学研究成功了一种同步开沟起垄水稻精量穴直播机(图 10a),解决了人工撒播等用种量大、易倒伏等问题,在全国范围内得到广泛应用^[46-48]。2012 年张明华等^[49]对水稻精量穴直播机排种器和仿形机构等进行了进一步改进,使水稻精量穴直播机适应性更好。江苏省昆山市农机推广站研制了一种水稻带式精量条直播机,在塑料底板下装有播种沟开沟器,但开出的播种沟较宽较浅,播后种沟回土性能较差,对播深没有显著帮助。汤永莉^[50]和王安民^[51]研究了一种水稻直播机(图 10b),用一

器八行环槽推送式和勺轮式排种器,以水田插秧机头为动力,可同步开沟起垄精量直播,作业行数为8行,行距250 mm,穴距100~240 mm范围可调节,但无仿形机构,对播前田块的平整度和沉实要求较高。

随着我国土地流转的加速推进,一些大型农场需要作业效率更高的水稻精量穴直播机。2016年农业部南京农业机械化研究所研究成功一种33行气力集排式水稻直播机,该机采用折叠式机架,作业幅宽8 m,作业速度10 km/h,作业效率5~7 hm²/h,可满足大型农场及其他规模化种植主体的作业要求(图10c)。杨文武等^[52]研究成功了与轮式拖拉机配套的21行水稻直播机,采用液压折叠方式,方便转移,可自动消除轮辙,自动仿形和同步开沟起垄作业,作业效率高、作业效果好(图10d)。张亚双^[53]和吕小荣等^[54-56]还研究了一种水稻种绳直播机,种子以一定穴距和穴粒数附着在种绳上,播种时先开沟,再将种绳铺设在种沟中,最后覆土。随着水稻直

播面积的不断扩大,面对市场需求,国内一些农机企业也先后开展了水稻精量穴直播机的研发。南通富来威农业装备有限公司研发的与乘坐式插秧动力底盘配套的2BDX-10型水稻穴播机(图10e),采用旋转勺进行排种,实现了有序播种。上海向明农机有限公司制造的2BD-12型水稻直播机(图10f)采用带式排种器,使整机质心前移,但由于输种管太长,成穴性较差。上海青育农机服务有限公司生产的2BDX-8A型点穴式水稻直播机(图10g)上部采用槽轮连续供种、下部采用鸭嘴式排种管间歇开合的方式实现穴播,成穴效果较好,但是播量调节较为困难、种子破损率较大。南通丰盈机械有限公司生产的2BD-10型水稻穴直播机(图10h)采用勺轮式排种器实现穴播,通过更换取种勺可改变播种量,采用与华南农业大学研发的水稻精量穴直播机类似的开沟起垄和仿形方式。



图10 国内的水稻直播机

Fig. 10 Rice direct seeding machines in China

4 华南农业大学水稻精量穴直播技术与机具研究状况

4.1 水稻精量穴直播技术

为满足不同区域、不同熟制、不同品种成行成穴有序种植的农艺要求,针对人工撒播存在的问题,华南农业大学研究团队基于农机农艺融合,以机械精量穴直播为核心,以高产高效为目标,针对人工撒播稻无序生长、扎根浅、易倒伏等问题,深入分析了国内外机械撒播和条播的优缺点,根据水稻种植农艺要求,经过大量室内模拟试验和不同区域的田间试验研究,首创“三同步”精量穴直播技术

(图11),发明了水稻精量穴直播机系列机具15种,部分机型如图12所示^[57-62]。揭示了机械化精量穴直播水稻的生长发育规律、需水需肥特性和杂草发生特点,创建了“精播全苗”“基肥一次深施”和“播喷同步杂草防除”的水稻精量穴直播配套农艺技术,实现了水稻机械化、轻简化高效种植。发明了与水稻精量穴直播配套的浸种剂、包衣剂、盲谷播种等。实现了精播全苗,与人工撒播相比,成苗率提高10%以上,分蘖成穗率提高5~10个百分点。开展了缓控释肥在同步开沟起垄施肥精量穴直播技术中的试验研究与推广应用,研制了水稻生态专用肥,实现了基肥一次深施,节肥15%以上,氮肥农

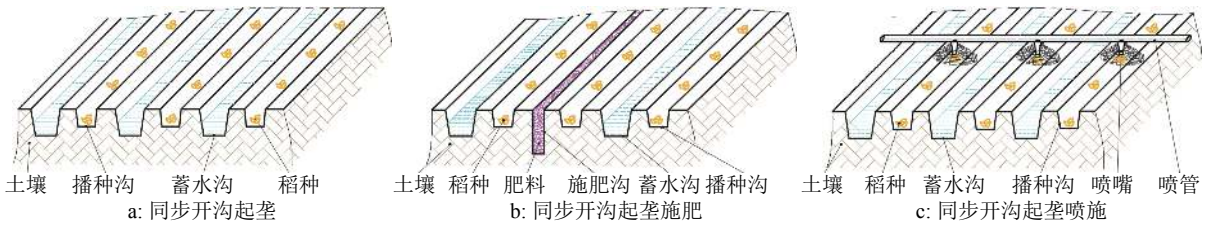


图 11 “三同步”水稻精量穴直播技术原理

Fig. 11 The “three synchronizes” technical principle of rice precision hill-direct-seeder



图 12 水稻精量穴直播机部分机型

Fig. 12 Some types of rice precision hill-drop seeders

学利用率提高 23%。创新研究了水稻精量穴直播的“播喷同步”+苗期除草的杂草“一封一杀”防控技术,实现了杂草有效防控。

同步开沟起垄水稻精量穴直播技术在田面上同时开设蓄水沟和播种沟,采用穴播方式将稻种播在垄上的播种沟中,实现了成行成穴有序生长和垄畦栽培,增加了根系入土深度。由于垄面少淹水或不淹水,提高了土壤中氧化还原电位,有利于根系生长和改善根系结构。王在满等^[63]的田间测定结果表明,精量穴直播比人工撒播水稻的黄根减少 20%、黑根减少 13%、白根增加 33%,垄间的蓄水沟提供水稻生长用水,无需整个田面灌水,减少了灌溉用水,可节省灌溉用水 30% 以上。穴播为水稻生长提供了一个均衡空间,穴内多粒稻种聚生,利于顶土出苗,相互竞争,利于建立高产群体(图 13)^[64-65]。采用同步开沟起垄施肥水稻精量穴直播技术,在 2 条蓄水沟之间垄台上的播种沟一侧开设施肥沟,可节肥 15% 以上,氮肥农学利用率提高 23%^[66-67]。采用同步开沟起垄喷药/膜水稻精量穴直播技术可在播种时同步喷施除草剂或液体地膜^[68]。

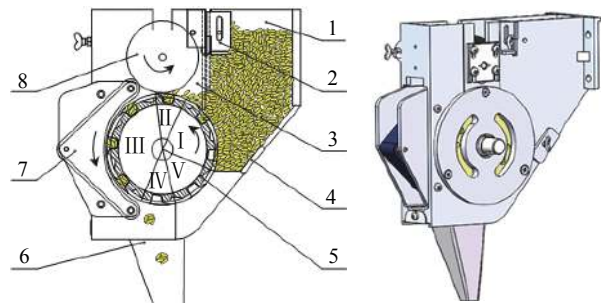
4.2 关键部件——水稻精量直播排种器

4.2.1 播量可调组合型孔式排种器 如图 14 所



图 13 垄畦壮苗效果及根系长势

Fig. 13 The strong seedling result of ditch and root growth



1: 第 1 充种室, 2: 限种板, 3: 第 2 充种室, 4: 卸种板, 5: 组合型孔排种器, 6: 排种管, 7: 护种装置, 8: 清种装置; I: 充种区, II: 清种区, III: 护种区, IV: 投种区, V: 过渡区

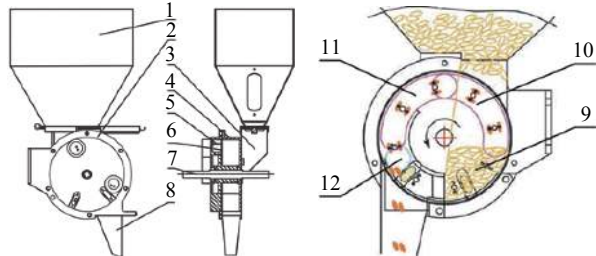
图 14 播种量可调组合型孔式排种器

Fig. 14 Structure diagram of combined hole-type metering device with adjustable sowing quantity

示,组合型孔轮式排种器包括充种、清种、护种和排种 4 个过程^[69-72]。排种轮在传动轴的驱动下顺时针

转动,排种轮型孔首先经过第1充种区进行充种,当型孔经过限种板进入第2充种区后,未充满稻种的型孔进行二次充种;清种毛刷由安装在传动轴上的链轮链条驱动,排种轮型孔表面的多余稻种被清种毛刷刷回至第2充种区;充满稻种的型孔经过毛刷轮后进入护种过程,由弹性随动护种带护送经过护种区,在排种区进入排种管,最后稻种从排种管排出并以自由落体形式落入田面的播种沟中。可调组合型孔排种器能够适应不同稻区和不同品种的播种量要求,调节范围较大(每穴3~10或10~20粒)。

4.2.2 垂直圆盘气吸式排种器 如图15所示,垂直圆盘气吸式排种器包括吸种、清种、携种和投种4个过程^[73-78]。种子由种箱经分层充种室进入排种壳体中的吸种区内,受吸室内负压真空的作用被吸附在吸种盘的吸孔上,吸种盘随排种轴转动,在清种区由清种装置将吸附的种子清除,随后进入携种区,在正压吹送作用下离开吸种盘落入排种管内并落在播种沟内,完成播种过程。垂直圆盘气吸式排种器可满足杂交稻或超级稻精量播种的要求,每穴1~3粒,空穴率小于2%。

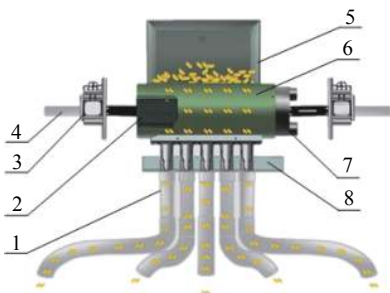


1: 种箱, 2: 气吸壳体, 3: 分层充种室, 4: 排种壳体, 5: 清种装置, 6: 吸种盘, 7: 排种轴, 8: 排种管, 9: 吸种区, 10: 清种区, 11: 携种区, 12: 投种区

图15 垂直圆盘气吸式排种器

Fig. 15 Structure diagram of pneumatic metering device

4.2.3 气吸滚筒集排式排种器 如图16所示,气吸滚筒集排式排种装置主要由内外2层滚筒、侧向换气壳体和送种管路等组成,通过改变外层型孔大小



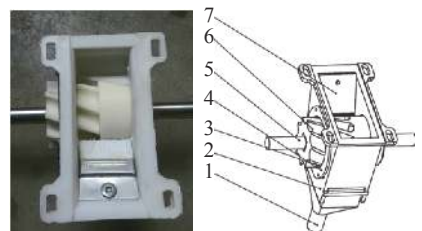
1: 送种管, 2: 内滚筒, 3: 轴承座, 4: 传动轴, 5: 种箱, 6: 外滚筒, 7: 换气壳体, 8: 送种气流进气口

图16 气吸滚筒集排式排种装置

Fig. 16 Configuration of pneumatic seed-metering device

和数量以及吸排种的气压气流实现播量调节,其工作过程包括吸种、携种、投种和送种4个阶段。工作时,排种滚筒在传动轴的驱动下转动,当吸孔转至负压区域时吸取种箱内的稻种,清种机构将多余的稻种清回种箱,排种滚筒旋转至正压区时,在重力和正压气流的作用下稻种下落至下种管,进入到送种管内,在送种气流的作用下沿着分布式送种管落入相应的播种沟中,完成投种。气吸滚筒集排式水稻精量排种器可根据不同杂交稻播种量的需求,更换相应大小与数量的吸种孔,以适应不同地区、不同品种的杂交稻直播农艺需求。

4.2.4 螺旋槽式排种器 如图17所示,螺旋槽式排种器工作时,稻种从种箱进入排种器充种区,在重力和种子间的相互作用力下进入螺旋槽内完成充种过程;排种轴带动螺旋槽轮转动,螺旋槽表面多余的种子被清种毛刷刷回充种区;螺旋槽轮携带稻种转动到排种区,种子在重力和离心力作用下离开螺旋槽轮,由排种管排入播种沟中,实现播种作业。水稻螺旋槽式排种器可满足水稻精量旱直播的高速和大播种量的播种要求。与直槽式排种器相比,解决了直槽轮的脉动现象,提高了水稻播种均匀性,降低了伤种率,通过调节螺旋槽轮的有效工作长度和排种轴的转速可改变播种量。螺旋槽式排种器适应大播量的播种要求,播种调节范围为75~450 kg/hm²,作业速度可达10 km/h以上。



1: 排种管, 2: 壳体, 3: 防漏种挡轮及挡圈, 4: 定位挡圈, 5: 排种轴, 6: 螺旋槽轮, 7: 毛刷

图17 螺旋槽式排种器

Fig. 17 Spiral groove metering device

4.2.5 气吹集排式排种装置 如图18所示,气吹集排式水稻精量排种装置由种箱、排种器、分种器、风机和导流器等部件组成^[79]。分种器形成等流体密度场,稻种均匀分布其中、在垂直向上的气流作用下进入分种器内部腔体、并均匀地向各分种口运动和排出。通过调节风压、风量和斜槽轮排种器的排量可调整播种量(75~375 kg/hm²),实现均匀排种,行间播种量变异系数小于10%,可满足工作速度10 km/h以上的要求。

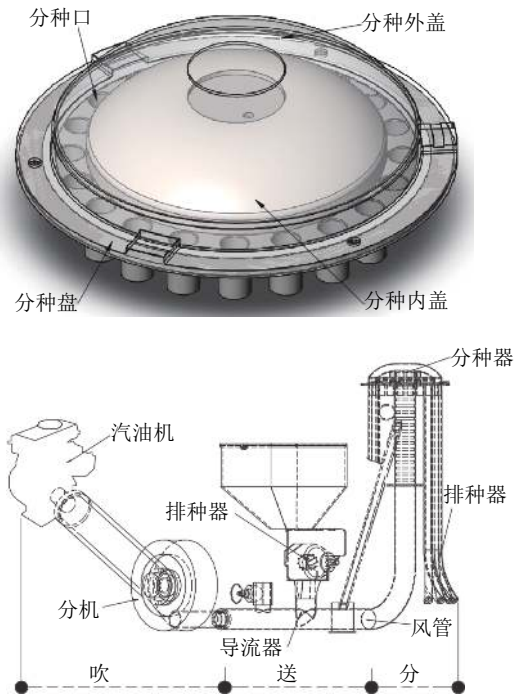


图 18 气吹集排式排种装置

Fig. 18 Pneumatic centralized distributor

4.3 水稻精量穴直播机代表机型

4.3.1 2BD 型水稻精量水穴直播机 2BD 型水稻精量水穴直播机采用乘坐式插秧机动力底盘, 由机架、开沟起垄装置、水平仿形机构、高程仿形机构、动力传动机构、播种装置和液压提升机构组成。播种装置和开沟起垄装置与机架固定连接, 高程仿形机构的机械式传感器装置安装于滑板前方, 底面与滑板最低点平齐, 并通过闸线与动力底盘的液压系统相连; 水平仿形机构的轴承座安装在机架上, 一端安装在挂接架上, 平行四杆提升架一端连接挂接架, 另一端连接动力底盘; 液压油缸连接动力底盘和提升架; 动力转动装置通过万向传动轴与动力底盘相连, 如图 19a 所示。乘坐式插秧机动力底盘提供行走、提升和播种的动力。播种部分通过液压油缸和提升架悬挂于动力底盘后部。工作时, 先将操作手柄置于插植档位, 液压油缸卸荷, 机具随自重下落, 在高程仿形机构和水平仿形机构的作用下滑

板始终紧贴泥面, 播种沟开沟器和蓄水沟开沟器压入土壤内, 随着机器前进, 开出蓄水沟和播种沟。排种器在动力传动系统的驱动下, 以穴播的形式将种子播入播种沟内。两侧挡泥板防止水和泥浆涌入已播种区。

4.3.2 2BD 型折叠式宽幅水稻精量穴直播机 2BD 型折叠式宽幅水稻精量穴直播机以 36.75~51.45 kW 轮式拖拉机为动力底盘, 整机结构主要由控制系统、液压传动系统、同步穴距调整系统、轮辙覆土装置、折叠装置、仿形装置、开沟起垄装置、播种装置和悬挂机构等组成 (图 19b)。采用全液压驱动, 动力通过拖拉机 PTO 带动变速箱驱动液压泵, 为液压系统提供动力; 同步穴距调整系统采用 PLC 控制, 根据拖拉机前进速度, 通过调整液压比例调节调速阀的开度, 实时控制排种器转速, 实现播种穴距同步调整, 保证穴距一致性; 轮辙覆土装置采用对置式螺旋输送机构, 能较好地填覆轮辙, 抹平泥面, 为播种提供良好的作业环境; 折叠装置采用液压缸驱动平行四杆折叠架, 可实现两侧机架垂直折叠; 仿形装置采用双液压缸式仿形方式, 整机可实现实时随地面垂直和水平仿形。直播机与拖拉机采用三点悬挂机构挂接, 作业时, 操作直播机控制系统, 将机器同步提升至最高点, 设置播种穴距, 开始播种后仿形油缸卸荷, 机具下落, 在仿形系统的作用下底板始终贴紧泥面, 随着机器的前进, 在泥面开出厢沟、水沟和播种沟。同时, 排种器在同步穴距调整系统的驱动下, 将种子以穴播的形式播入种沟内。

4.3.3 2BDH 型水稻精量旱穴直播机 2BDH 型水稻精量旱穴直播机由机架、轮辙消除装置、平行四杆仿形机构、动力传动系统、开沟装置、播种装置和覆土镇压装置组成, 可一次完成平整、开沟、播种、覆土及镇压等作业环节, 总体结构如图 19c 所示。水稻精量旱穴直播机通过提升架与拖拉机三点悬挂装置连接, 田间作业时首先由刮土板将拖拉机轮辙消除; 碎土滚筒将土块压碎, 使播种前土壤细碎



图 19 水稻精量旱穴直播机机型

Fig. 19 Types of precision rice hill-drop drilling machines

且平整;开沟器在地面上开出播种沟;型孔式排种器将种子按一定的穴距播种到播种沟中;覆土镇压装置的覆土轮挤压沟壁土壤将种沟覆盖,同时进行镇压;型孔式排种器和覆土镇压装置共同将种子穴播在播种沟内并完成覆土镇压。

4.3.4 2BDQJ-20 气吹集排式水稻旱直播机 2BDQJ-20 气吹集排式水稻旱直播机的播种过程包括供气、供种、混种、分种和投种 5 个阶段,主要由增速器、风机、中央排种器、导种器、分种器和排种管等组成,如图 19d 所示。增速器将拖拉机 PTO 的低转速转化为风机轴需要的高转速,风机轴驱动叶轮产生一定压力的气流;中央排种器将种箱中的稻种排出至导种器;导种器依据喷射式给料原理将排种器定量供应的稻种与流动的空气混合导向分种器;导入的气种混合流通过分种器输送管进入分种器内外盖形成的等距圆弧结构,圆弧结构出口为均匀排列的稻种出口,稻种出口在内外压力差作用下将气种混合流均分;排种管连接稻种出口与开沟器,将等分的气种混合流导入种沟,完成播种过程。

5 结论与展望

美国、澳大利亚、欧洲等发达国家以机械直播(包括飞机撒播)为主,日本、韩国等亚洲国家以机械化插秧技术为主,正逐步向机械化直播技术发展,近年来中国水稻机械化直播技术发展迅速。欧美国家以大型水稻旱条直播机为主,大部分采用槽轮式排种器;中国、日本、韩国等亚洲国家采用水稻条直播机和水稻穴直播机相结合的模式,包括旱直播和水直播,排种器为槽轮式、型孔式和气力式排种器。华南农业大学研究成功水稻精量穴直播技术与机具,发明了“三同步”水稻精量穴直播技术,研发成功 7 种水稻精量水穴直播机、7 种水稻精量旱穴直播机和 1 种杂交水稻制种同步插秧穴直播机,实现了“行距可选、穴距可调、播种量可控和仿形作业”,满足不同区域、不同品种的水稻机械化穴直播精准生产要求。水稻精量穴直播技术有效破解了水稻传统直播中的多项技术难题,为水稻机械化生产提供了一种先进的轻简化栽培技术,引领了水稻机械化种植技术的科技进步与行业发展。

由于中国水稻种植区域跨度大、水稻品种多以及种植条件差异大(茬口、土壤、气候)等方面的原因,中国水稻机械化种植技术必然是多种模式协调发展,包括机械化插秧技术和机械化直播技术,因此,必须根据中国水稻生产实际需求,研究不同功能的水稻精量直播技术与机具。根据不同区域的水

稻机械化种植技术要求,需进一步研究“品种-栽培-机具”的配套农艺技术,实现农艺农机相融合。在品种方面,我国目前水稻直播的品种都采用移栽稻品种,加之我国水稻品种多,既有籼稻和粳稻,又有常规稻、杂交稻和超级稻等,所以亟需培育适合水稻机械化直播技术的品种;在栽培方面,需研究适应不同种植区域和种植茬口的水稻精量直播方式、播种密度、播种量以及田间管理技术规程。

参考文献:

- [1] 罗锡文,廖娟,胡炼,等.提高农业机械化水平促进农业可持续发展[J].*农业工程学报*,2016,32(1):1-11.
- [2] MAHAJAN G, CHAUHAN B S, GILL M S. Dry-seeded rice culture in Punjab State of India: Lessons learned from farmers[J]. *Field Crops Res*, 2013, 144: 89-99.
- [3] KUMAR V, LADHA J K. Direct seeding of rice: Recent developments and future research needs[J]. *Adv Agron*, 2011, 111: 297-413.
- [4] MISHRA A K, KHANAL A R, PEDE V O. Is direct seeded rice a boon for economic performance? Empirical evidence from India[J]. *Food Policy*, 2017, 73: 10-18.
- [5] RAO A N, BRAINARD D C, KUMAR V, et al. Preventive weed management in direct-seeded rice: Targeting the weed seedbank[J]. *Adv in Agron*, 2017, 144: 45-142.
- [6] BHUSHAN L, LADHA J K, GUPTA R K, et al. Saving of water and labor in a rice-wheat system with no-tillage and direct seeding technologies[J]. *Agron J*, 2007, 99(5): 1288-1296.
- [7] WEERAKOON W M W, MUTUNAYAKE M M P, BANDARA C, et al. Direct-seeded rice culture in Sri Lanka:Lessons from farmers[J]. *Field Crops Res*, 2011, 121(1): 53-63.
- [8] PANDEY S, VELASCO L. Economics of direct seeding in Asia: Patterns of adoption and research priorities[M]// PANDEY S, MORTIMER M, WADE L, et al. Direct seeding: Research issues and opportunities. Los Baños (Philippines): IIRI. 2002: 3-14.
- [9] PANDEY S, VELASCO L. Trends in crop establishment methods in Asia and research issues[M]//Rice is life: Scientific perspectives for the 21st century[J]. Tsukuba, 2005:178-181.
- [10] 张绍军,杨宝田,罗阁山.国内外水稻直播机械化的发展研究[J].*农业科技与装备*,2012(5):61-62.
- [11] 高一铭,闫涛,刘文杰.国内外水稻直播机械化研究进展[J].*农业科技与装备*,2013(1):28-29.
- [12] ESPE M B, CASSMAN K G, YANG H S, et al. Yield gap analysis of US rice production systems shows opportunities for improvement[J]. *Field Crops Res*, 2016, 196: 276-283.
- [13] 包春江,王瑞丽.日本水稻机械直播技术综述[J].*农业科技与装备*,2007(6):23-25.
- [14] WON J G, LEE W H, CHOI C D, et al. Growth characteristics and yield of hill-seeded rice in direct seeding[J].

- RDA J of Agric Sci (Korea Republic), 1996, 38(1): 49-55.
- [15] 吴崇友, 金诚谦, 卢晏, 等. 我国水稻种植机械发展问题探讨[J]. *农业工程学报*, 2000, 16(2): 21-23.
- [16] 曾雄生. 直播稻的历史研究[J]. *中国农史*, 2005(2): 3-16.
- [17] 于吉淼, 赵冰, 田新庆. 水稻直播机械的发展状况及前景展望[J]. *农业装备技术*, 2006, 32(2): 14-16.
- [18] 朱德峰, 陈惠哲, 徐一成. 我国水稻种植机械化的发展前景与对策[J]. *北方水稻*, 2007(5): 13-18.
- [19] 杨坚, 韦林, 覃振友, 等. 2BD-8 自走型分流式小型水稻直播机[J]. *农业机械学报*, 1998, 29(4): 177-180.
- [20] 钱生越. 气流式水稻芽种直播机及农艺配套技术[J]. *江苏农机化*, 2003(2): 17.
- [21] MALEKI M R, JAFARI J F, RAUFAT M H, et al. Evaluation of seed distribution uniformity of a multi-flight auger as a grain drill metering device[J]. *Biosystems Eng*, 2006, 94(4): 535-543.
- [22] MALEKI M R, MOUAZEN A M, DE KETELAERE B, et al. A new index for seed distribution uniformity evaluation of grain drills[J]. *Biosystems Eng*, 2006, 94(3): 471-475.
- [23] 田坂幸平, 吉永悟志, 松島憲一, 等. 水稻打込み式代かき同時土中点播機の点播形状の改善[J]. *農業機械学会誌*, 2003, 65(1): 167-176.
- [24] 曹成茂, 秦宽, 王安民, 等. 水稻直播机气吹辅助勺轮式排种器设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2015, 46(1): 66-72.
- [25] 田立权, 王金武, 唐汉, 等. 螺旋槽式水稻穴直播排种器设计与性能试验[J]. *农业机械学报*, 2016, 47(5): 46-52.
- [26] 张国忠, 张沙沙, 杨文平, 等. 双腔侧充种式水稻精量穴播排种器的设计与试验[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(8): 9-17.
- [27] 张沙沙. 双腔侧充种式水稻精量穴播排种器的设计与试验[D]. 武汉: 华中农业大学, 2016.
- [28] 张顺, 夏俊芳, 翟建波, 等. 气力式水稻芽种直播精量排种器关键部件的设计与仿真[J]. *图学学报*, 2014(3): 412-416.
- [29] 张顺, 夏俊芳, 周勇, 等. 气力滚筒式水稻直播精量排种器的设计与试验[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(1): 11-19.
- [30] 张顺, 夏俊芳, 周勇, 等. 气力滚筒式水稻直播精量排种器排种性能分析与田间试验[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(3): 14-23.
- [31] 陈学庚, 卢勇涛. 气吸滚筒式棉花精量穴播器排种性能试验[J]. *农业机械学报*, 2010, 41(8): 35-38.
- [32] 陈学庚, 王敏. 气吸鸭嘴滚筒式精密穴播器关键因素的研究[J]. *农机化研究*, 2011, 42(3): 130-133.
- [33] 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, 28(22): 8-15.
- [34] 梶谷恭一. 水稻乾田不耕起直播栽培とその播種機[J]. *農業機械学会誌*, 1996, 58(6): 145-147.
- [35] 屋代幹雄. 水稻乾田直播の新技術[J]. *農業機械学会誌*, 1997, 59(3): 133-137.
- [36] 西村洋. 水稻湛水直播の新技術[J]. *農業機械学会誌*, 1997, 59(3): 138-142.
- [37] 西村洋, 林和信, 後藤隆志, 等. 高精度水稻湛水条播機の開発 第 2 報 開発機の概要と覆土量制御[J]. *農業機械学会誌*, 2001, 63(6): 114-121.
- [38] 帖佐直, 古畑昌巳, 大嶺政朗, 等. 水稻湛水直播のためのエアアシスト条播技術の開発: 播種機の概要とエアアシストの効果[J]. *農作業研究*, 2009, 44(4): 211-218.
- [39] FURUHATA M, CHOSA T, SHIOYA Y, et al. Developing direct seeding cultivation using an air-assisted strip seeder[J]. *Jpn Agr Res Q*, 2015, 49(3): 227-233.
- [40] 金千瑜. 韩国的直播稻生产与技术[J]. *世界农业*, 1997(9): 16-18.
- [41] 方文华, 姚成月, 胡兴兵. 多功能覆土直播机试验效果研究[J]. *农机科技推广*, 2007(5): 38.
- [42] 马广. 轻便型水稻直播机的研制[D]. 南京: 南京农业大学, 2008.
- [43] 马广, 戴欣平. 轻便型水稻直播机的研制[J]. *中国农机化*, 2005(4): 79-81.
- [44] 马广, 王志明. 基于 AHP 法的轻型水稻直播机的研制与试验研究[J]. *浙江大学学报(农业与生命科学版)*, 2010, 36(1): 84-89.
- [45] 蔡东林. 少精量水稻穴播机的研制与试验[D]. 南京: 南京农业大学, 2011.
- [46] 罗锡文, 蒋恩臣, 王在满, 等. 开沟起垄式水稻精量穴直播机的研制[J]. *农业工程学报*, 2008, 24(12): 52-56.
- [47] 王在满, 罗锡文, 黄世醒, 等. 型孔式水稻排种轮充种过程的高速摄像分析[J]. *农业机械学报*, 2009, 40(12): 65-70.
- [48] 王在满, 罗锡文, 唐湘如, 等. 基于农机与农艺相结合的水稻精量穴直播技术及机具[J]. *华南农业大学学报*, 2010, 31(1): 91-95.
- [49] 张明华, 罗锡文, 王在满, 等. 水稻精量穴直播机仿形与滑板机构的优化设计与试验[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(6): 18-26.
- [50] 汤永莉. 水稻直播机的设计与试验研究[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2014.
- [51] 王安民. 水稻直播机的设计与试验研究[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2014.
- [52] 杨文武, 罗锡文, 王在满, 等. 轮式拖拉机水田轮辙覆土装置设计与试验[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(16): 26-31.
- [53] 张亚双. 水稻种绳直播机研制与试验研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2006.
- [54] 任文涛, 吕小荣, 孔爱菊, 等. 水稻种绳直播机的设计[J]. *沈阳农业大学学报*, 2009, 40(1): 62-66.
- [55] 吕小荣. 水稻种绳直播机的设计与研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2008.
- [56] 吕小荣, 吕小莲, 任文涛. 水稻种绳直播机的研制[J]. *南京农业大学学报*, 2010, 33(3): 104-108.
- [57] 王在满, 戴亿政, 王宝龙, 等. 水稻机械化穴播和条播的对比研究[J]. *中国稻米*, 2016, 22(4): 19-20.
- [58] 王在满, 张明华, 王宝龙, 等. 机械穴播种植方式对华南双季稻的适应性研究[J]. *杂交水稻*, 2016, 31(4): 34-36.

- [59] 王在满, 罗锡文, 陈雄飞, 等. 水稻机械化穴播技术对稻米品质的影响[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(16): 16-21.
- [60] 张明华, 王在满, 罗锡文, 等. 水稻精量穴直播机开沟装置的设计与试验[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(5): 10-15.
- [61] 曾山, 汤海涛, 罗锡文, 等. 同步开沟起垄施肥水稻精量旱穴直播机设计与试验[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(20): 12-19.
- [62] 付威, 罗锡文, 曾山, 等. 水稻精量旱穴播机穴距电液比例控制系统的设计与试验[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(9): 25-31.
- [63] 王在满, 郑乐, 张明华, 等. 不同播种方式对直播水稻倒伏指数和根系生长的影响[J]. *江苏农业学报*, 2016, 32(4): 725-728.
- [64] 王在满, 张明华, 郑乐, 等. 不同播种方式对直播水稻产量形成的影响[J]. *江西农业大学学报*, 2016, 38(4): 601-606.
- [65] 曾山, 黄忠林, 王在满, 等. 不同密度对精量穴直播水稻产量的影响[J]. *华中农业大学学报*, 2014, 33(3): 12-18.
- [66] 陈雄飞, 罗锡文, 王在满, 等. 水稻穴播同步侧位深施肥技术试验研究[J]. *农业工程学报*, 2014, 30(16): 1-7.
- [67] 陈雄飞, 罗锡文, 王在满, 等. 两级螺旋排肥装置的设计与试验[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(3): 10-16.
- [68] 王在满, 王宝龙, 张明华, 等. 同步喷施除草技术及除草剂消解动态规律[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(16): 59-64.
- [69] 张明华, 罗锡文, 王在满, 等. 水稻直播机组合型孔排种器设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2016, 45(9): 29-36.
- [70] 张明华, 王在满, 罗锡文, 等. 组合型孔排种器双充种室结构对充种性能的影响[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(12): 8-15.
- [71] 罗锡文, 刘涛, 蒋恩臣, 等. 水稻精量穴直播排种轮的设计与试验[J]. *农业工程学报*, 2007, 23(3): 108-112.
- [72] 罗锡文, 王在满, 蒋恩臣, 等. 型孔轮式排种器弹性随动护种带装置设计[J]. *农业机械学报*, 2008, 39(12): 60-63.
- [73] 张国忠, 罗锡文, 臧英, 等. 水稻气力式排种器群布吸孔吸种盘吸种精度试验[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(6): 13-20.
- [74] 张国忠, 臧英, 罗锡文, 等. 水稻气力式排种器导向型搅种装置的设计与试验[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(12): 1-8.
- [75] 张国忠, 臧英, 罗锡文, 等. 粳稻穴播排种器直线型搅种装置设计及排种精度试验[J]. *农业工程学报*, 2014, 30(17): 1-9.
- [76] 臧英, 邢赫, 王在满, 等. 水稻气力式排种器挡种装置设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2015, 46(5): 33-38.
- [77] 邢赫, 臧英, 曹晓曼, 等. 水稻气力式排种器投种轨迹试验与分析[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(12): 23-30.
- [78] 邢赫, 臧英, 王在满, 等. 水稻气力式排种器分层充种室设计与试验[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(4): 42-48.
- [79] 戴亿政, 罗锡文, 王在满, 等. 气力集排式水稻分种器设计与试验[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(24): 36-42.

【责任编辑 周志红】



罗锡文, 中国工程院院士, 教授, 博士生导师。现任南方农业机械与装备关键技术教育部重点实验室主任和农业部水田农业机械装备重点实验室主任, 华南农业大学农业机械化工程国家重点(培育)学科带头人, 获得国家级教学名师和农业部中青年有突出贡献专家等多种荣誉。长期从事农业工程教学、科研和工程实践, 研究方向包括水稻精量直播技术与机具、农田精准平整技术与机具、农业机械导航与自动作业技术与装备、农业航空关键技术和农情信息快速获取技术与装备。水稻精量穴直播技术与机具、农田精准平整技术与机具和农业机械导航及自动作业技术等研究成果居国内外同类研究先进水平或领先水平。获国家技术发明奖二等奖1项, 省部级科技奖励15项; 发表学术论文350余篇, 主编专著教材等6部, 授权发明专利70余件; 获国家教学成果二等奖2项, 广东省教学成果一等奖5项、二等奖2项。