

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.S2.012

果园基肥施肥装备研究现状与发展分析

刘双喜^{1,2} 徐春保¹ 张宏建¹ 江浩¹ 权泽堃¹ 王金星^{1,3}

(1. 山东农业大学机械与电子工程学院, 泰安 271018; 2. 山东省园艺机械与装备重点实验室, 泰安 271018;
3. 山东省农业装备智能化工程实验室, 泰安 271018)

摘要: 我国果树栽培面积和果品产量均居世界第一, 果树施肥是果园生产管理的关键作业环节, 施肥质量直接决定果树产量及果品品质。果园主要施肥方式有深施基肥、土壤追肥、叶面喷肥、树干涂肥等。其中, 基肥的肥料施用量占全年施肥总量的70%以上, 是影响果树产量及品质最重要的阶段。基肥施肥机械化是果园生产管理机械化水平的重要体现。本文综合分析果园基肥施肥机械化农艺要求及发展概况, 重点阐述了我国和国外发达国家基肥施肥装备的典型机具及其技术参数和特点, 并结合我国基本农情和果园生产的实际情况, 归纳总结了我国果园基肥施肥机械化发展亟待解决的主要问题, 展望了基肥施肥装备的发展趋势, 为我国果园基肥施肥装备的进一步发展提供参考。

关键词: 果园; 基肥; 施肥装备

中图分类号: S224.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2020)S2-0099-10

Research Status and Development Analysis of Base-fertilizer Application Equipment of Orchard

LIU Shuangxi^{1,2} XU Chunbao¹ ZHANG Hongjian¹ JIANG Hao¹ QUAN Zekun¹ WANG Jinxing^{1,3}

(1. College of Mechanical and Electronic Engineering, Shandong Agricultural University, Taian 271018, China
2. Shandong Provincial Key Laboratory of Horticultural Machinery and Equipment, Taian 271018, China
3. Shandong Provincial Engineering Laboratory of Agricultural Equipment Intelligence, Taian 271018, China)

Abstract: China has superior natural conditions and is suitable for the growth of fruit trees. It is a big fruit producing country. The cultivation area and yield of fruit trees rank first in the world all year round. Fruit industry is not only the third largest agricultural planting industry after grain and vegetable, but also the main industry to increase farmers' income. Fertilization of fruit trees is a key link in orchard production. The quality of fertilization directly affects the nutrient absorption of fruit trees. Rational fertilization is an important measure to ensure the high, stable and increasing yield of fruit trees. The main forms of fertilization in orchard include depth application of base-fertilizer, top dressing of soil, foliar spraying and trunk coating. Among them, the application amount of base-fertilizer accounts for more than 70% of the total amount of fertilization in the whole year, which is the most important stage affecting the yield and quality of fruit trees. Mechanization of base-fertilizer application is an important embodiment of mechanization level of orchard production and management. The agronomic requirements and development of orchard base-fertilizer mechanization were comprehensively analyzed, and the typical machinery and its technical parameters and characteristics of the base-fertilizer fertilization equipment in China and foreign developed countries were emphatically elaborated. Combined with the basic agricultural situation and the actual situation of orchard production in China, the main problems to be solved in the development of orchard base-fertilizer application mechanization in China were summarized, and the development trend of orchard base-fertilizer application equipment was prospected. It provided a reference for the further development of orchard base fertilizer application equipment in China.

Key words: orchard; base-fertilizer; fertilization equipment

收稿日期: 2020-08-06 修回日期: 2020-09-18

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0201104)和国家苹果产业技术体系项目(CARS-27)

作者简介: 刘双喜(1978—),男,副教授,博士,主要从事机器视觉与图像处理研究, E-mail: shuangxiliu168@163.com

通信作者: 王金星(1970—),男,教授,博士生导师,主要从事智能农业装备研究, E-mail: jinxingw@163.com

0 引言

我国自然条件优越,适宜果树生长,是果品生产大国,果树栽培面积和产量均居世界第一^[1-4]。据统计,2018年全国果树栽培面积为1 187.5万公顷,占世界总面积的17.3%,占中国耕地面积的8.7%;果品年产量25 688.4万吨,占世界总产量的29.6%;国内水果市场规模达到了2.45万亿元,对GDP的贡献率为2.72%^[5-6]。水果产业不仅是继粮食、蔬菜之后的第三大农业种植产业,而且已经成为农民增收的主要产业。果树施肥是果园生产中的关键作业环节,施肥质量直接影响果树养分的吸收,合理施肥是保证果树丰产、稳产和增产的重要举措^[7-11]。目前,果树施肥主要以有机肥、无机肥和微生物肥相结合为方向,以控氮、稳磷、增钾、补钙加微生物有机肥为原则。主要施肥方式有深施基肥、土壤追肥、叶面喷肥、树干涂肥等^[12-14]。其中,基肥的肥料施用量占全年施肥总量的70%以上,是影响果树产量及果品品质最重要的阶段^[15-16]。果园基肥机械化施肥可以减轻劳动强度、降低人工成本,是实现果园减肥、提质、增效的重要措施。

果园土壤有机质含量对果树花芽的形成、果实生长发育、果实着色等都有重要影响^[17]。现阶段基肥主要的施肥方式有撒肥、开沟施肥、挖穴施肥。国外果园土地肥沃、土壤有机质含量高,基肥多采用播撒的方式。我国果园土壤有机质含量低、土地贫瘠,基肥普遍采用开沟或挖穴的施肥方式^[18]。因此,本文综合分析果园基肥施肥机械化农艺要求及发展概况,重点阐述国内外各类型施肥装备的典型机具、技术特点、具体参数,结合我国基本农情和果园的生产实际情况,归纳总结果园基肥施肥机械化装备存在的问题,展望基肥施肥装备的发展趋势,为我国果园基肥施肥装备的进一步发展提供参考。

1 果园基肥施肥机械化农艺要求及发展概况

1.1 农艺要求

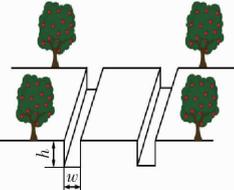
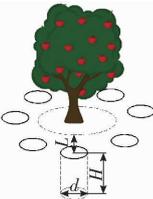
为了满足果树长梢、开花及结果,一般秋季在果树树冠外缘的正下方进行基肥施肥作业。其中,撒肥作业先将肥料撒施于地表,后用旋耕机将肥料旋入土壤中;开沟施肥作业可一次同时完成开沟、施肥和覆土作业;挖穴施肥作业一般先使用挖穴机进行挖穴,再人工施肥覆土^[19-20]。根据基肥施肥方式的不同,施肥机械化的农艺要求也不同,如表1所示。

1.2 发展概况

我国果树栽培的种类多、面积大、区域广泛、自然条件不同,直接决定各地区的作业机械选择不同,

表1 基肥施肥机械化农艺要求

Tab.1 Agronomic requirements for mechanized fertilization of base fertilizer

施肥方式	示意图	农艺要求
撒肥		肥料集中地撒施在树冠范围内,一般要求撒施均匀,施肥量满足果树施肥要求
开沟施肥		在果树树冠外缘的正下方进行开沟施肥作业,其中沟宽 w 在20~40 cm,沟深 h 在20~40 cm
挖穴施肥		挖穴施肥是在距树冠 L 为30 cm以内的树盘里,围绕主干挖呈散布的6~8个深度 H 为40~50 cm、直径 d 为20~30 cm的坑,将肥料填入后覆盖

机械化程度差别显著。从果树栽培的品种上看,柑桔、苹果、梨、香蕉、葡萄是我国产量较大的5类水果^[21]。2018年,我国柑桔的种植面积和产量为2 486.69千公顷和4 138.14万吨,苹果的种植面积和产量为1 938.57千公顷和3 923.34万吨,梨种植面积和产量为943.42千公顷和1 607.80万吨,香蕉种植面积和产量为331.90千公顷和1 122.17万吨,葡萄的种植面积和产量为725.10千公顷和1 366.68万吨^[5]。从果树种植的区域上看,我国水果生产在地域上表现出规模化、区域化特征,主要集中在华东、华中、华南以及西北地区。2018年华东、华中、华南以及西北地区的水果总产量分别为6 532.16、4 507.57、4 216.13、4 142.93万吨^[22]。目前,中国果业的平均综合机械化率仅为26.58%。其中,机械植保率和机械转率较高,分别达到了45.29%、54.23%,机械中耕率为29.43%,机械施肥率和机械修剪率分别低至18.56%、11.32%,而机械采收率仅为2.33%^[23]。

各果品主产区域气候条件、地形条件、土壤条件差异较大,直接导致了各地区基肥施肥机械化水平不一致。目前,地势平坦地区的基肥施肥基本实现了机械化,而丘陵山地,由于地块狭小,栽培模式多、杂等原因,机械化水平较低,基肥施肥机械化发展严重不足。因此,应因地制宜确定不同区域果园基肥施肥机械化最佳方式和技术路线,以满足不同区域、不同作业环境的需求,从而全面提升果园基肥施肥机械化水平。

2 果园撒肥机的发展现状

果园撒肥机将固体肥料均匀撒布于地表,具有结构简单、效率高、撒施均匀、适合大面积作业等优点,广泛应用于农业发达国家^[24]。按照其施肥部件的不同可分为螺旋式撒施肥机、桨叶式撒施肥机、圆盘式撒施肥机、甩链式撒施肥机、锤片式撒施肥机和拨齿式撒施肥机。其中,圆盘式、桨叶式、螺旋式和锤片式撒施肥机应用比较广泛^[25]。

2.1 国外撒肥机研究现状

国外经过几十年的发展,在 20 世纪 70 年代基本已经实现施肥过程的全面机械化^[26-27]。目前,国外撒肥机具有技术先进、功能完善、结构复杂等特点,已经达到较高的技术水平,并向大型化、智能化发展。在撒肥机的理论研究方面也取得较多的成果^[28-29];PATTERSON 等^[30]最早在 1962 年建立了圆盘式撒肥机的肥料颗粒在离心圆盘上运动的数学模型;HOFSTEE 等^[31-33]探究了粒径、摩擦因数、恢复系数、空气动力学阻力等因素对肥料颗粒运动的影响;OLIESLAGERS 等^[34]建立了旋转盘式撒肥机肥料运动的力学模型,研究了肥料颗粒在旋转盘和空气中的运动轨迹。VILLETTE 等^[35-36]确定了肥料颗粒的速度和水平出口角、圆盘形状和转速的函数关系,利用机器视觉技术,开发了数字成像系统,用于测量水平出口角,估计速度分量。COETZEE 等^[37]建立了离心式施肥机的离散元模型,研究了圆盘速度、进给位置、进给速度和叶片角度对肥料撒播的影响。在撒肥机械装备研究方面,目前国外主要使用圆盘离心式撒肥机,具有代表性的机型有^[38-39]:

法国 KUHN(库恩)公司研制的 ProTwin 系列撒肥机,其主要机型和基本技术参数如表 2 所示。该系列撒肥机采用独特的双螺旋输送机式设计,较好地保证物料抛撒的均匀性和连续性。工作时,左侧螺旋输送机将物料向前推向卸料口,右侧的高位螺旋输送机将物料推向后方的同时持续喂入左侧螺旋输送机。当物料运动至锤片卸料口时,锤片将物料撕裂、粉碎,并且自下而上将物料均匀地、有节律地抛撒。该机优点:始终保持物料处于水平位置状态,并防止架空和挤压;适应性强,可抛撒多种物料。

德国 AMAZONE(阿玛松)公司设计研发的 ZA-X Perfect 系列撒肥机,整机结构如图 1 所示,基本技术参数如表 3 所示。工作时,排肥盘上有两个甩肥片可以调节肥量的大小和出肥方向,并且在甩肥盘上装有快速定位系统,能够快速调节叶片的位置,实现自动输送肥料,具有较高的自动化程度,为防止堵塞

表 2 ProTwin 系列产品基本技术参数
Tab.2 Basic technical parameters of ProTwin series products

型号	外形结构	主要技术参数
8110		拖拉机牵引进行作业,配套动力为 45 kW,肥箱最大容量为 3.3 m ³ ,配备摩擦式离合器动力输出装置保护
8118		拖拉机牵引进行作业,配套动力为 75 kW,肥箱最大容量为 6.9 m ³ ,配备切断式动力输出装置保护
8132		拖拉机牵引进行作业,配套动力为 104 kW,肥箱最大容量为 12.3 m ³ ,配备切断式动力输出装置保护
8150		拖拉机牵引进行作业,配套动力为 168 kW,肥箱最大容量为 18.9 m ³ ,配备切断式动力输出装置保护

现象发生,该撒肥机在肥箱的底部配装有自动指针式搅拌器,将从肥箱上部落下的肥料进行搅拌,在挡板关闭之后自动降低转速以降低搅拌器的高速旋转对肥料的破坏。该机主要优点:肥箱和机架坚固;撒肥盘可快速调节;无需停车、无需下车,利用“Limiter X”进行舒适便捷的边界播撒智能搅拌。



图 1 AMAZONE ZA-X Perfect 撒肥机
Fig.1 AMAZONE ZA-X Perfect spreader

表 3 ZA-X Perfect 系列产品基本技术参数
Tab.3 Basic technical parameters of ZA-X Perfect series products

参数	ZA-XW	ZA-X	ZA-X	ZA-X
	502 型	602 型	902 型	1402 型
肥箱容积/L	500	600	900	140
撒肥宽度/m	10~18	10~18	10~18	10~18
整机宽度/m	1.07	1.50	2.02	2.02
整机长度/m	1.42	1.42	1.35	2.02

2.2 国内撒肥机研究现状

目前我国农村地区仍采用人工撒肥的施肥方

式,这不但造成撒布不匀、效率低、肥效差,而且化肥还会对人体产生伤害^[40]。与国外先进撒肥机相比在自动化和智能化等方面存在差距,而且撒肥部件一般采用外槽轮式或螺旋输送机式排肥器,存在撒肥幅宽小、作业效率低等问题,影响了施肥效果,达不到使用要求^[41-45]。现阶段国内撒肥机的研究主要集中于对撒肥装置结构与性能研究,以水平圆盘式为主,且缺乏对关键部件的理论研究。近年在撒肥机装备研究方面,取得较大进展,具有代表性的研究有:

山东大华机械有限公司设计生产的2FGB系列撒肥机,整机结构如图2所示,基本技术参数如表4所示。整机工作时,通过三角带驱动的2个旋转盘实现撒布作业,在每个圆盘上有4个固定可调节的播齿,此结构除了可以提高撒布的均匀性外,可简单地改变播齿的角度,还可以改变撒布范围,由拖拉机变速箱提供动力控制送肥带和撒播盘。该机优点:适应性强,可撒施各种干湿粪肥、有机肥、农家肥、颗粒肥等肥料。



图2 2FGB系列撒肥机

Fig. 2 2FGB series fertilizer spreader

表4 2FGB系列产品基本技术参数

Tab. 4 Basic technical parameters of 2FGB series products

型号	最大装载量/kg	配套动力/kW	撒播宽度/m	最小离地间隙/mm
2FGB-2J	1 600	30~60	6~12	330
2FGB-3J	2 400	40~70	6~12	375
2FGB-5J	4 000	50~80	6~12	440
2FGB-8J	6 000	70~130	6~12	380

胡永光等^[46]研制出叶片位置倾角可调的偏置式撒肥离心盘,整机结构如图3所示,主要由肥箱、机架、离心盘、下料口等构成。工作时,肥料在自身重力和机器振动的作用下,均匀落到离心盘上;在叶片的推动下,肥料以一定速度被抛出落到待施肥区域,即完成撒肥过程;同时置于拖拉机后端的旋耕机将所撒肥料覆土掩埋。该机的性能参数:有效施肥宽度0.8 m,离心盘高0.4 m,转速300 r/min,前进速度0.6~0.8 m/s。该机优点:一次完成撒肥及旋耕覆土作业,避免肥效降低;与拖拉机配套使用,方便移动;施肥均匀性好,适宜性好。



图3 撒肥机整机结构图

Fig. 3 Structure diagram of whole machine of fertilizer spreader

3 果园开沟施肥机研究现状

果园开沟施肥主要分为开沟、施肥、覆土3个作业环节。作业时,整机在拖拉机的牵引下前进,开沟刀切削入土并将土抛起;肥料经输送装置落入所开沟槽中;同时覆土罩壳完成覆土作业^[47-49]。根据其工作部件的运动形态可分为3种类型:固定工作部件型、旋转工作部件型和非连续运转工作部件型^[50-51]。

3.1 国外开沟施肥机研究现状

国外开沟机的发展带动了果园开沟施肥机械的发展。根据时间顺序,开沟机先后经历了铧式犁开沟机、旋转开沟机和链式开沟机3个阶段^[52-61]。在20世纪50年代,铧式犁作为最早的开沟机械被用于农田建设中,这种开沟机械效率较高、工作稳定,整个机构零部件较少且速度较快,最大的缺点是土壤硬度不能过大,所开的沟要人工修整^[62]。20世纪50年代以后,随着大功率拖拉机的出现,旋转式开沟机逐渐兴起^[63]。其特点是可以破除土块,开沟的形状规则稳定,具有较强的适应性,需要的牵引阻力小,缺点是行走速度缓慢,结构形式过于复杂,消耗较高的功率。到了20世纪70年代,链式开沟机逐渐得到发展,其开沟整齐,可以挖较窄的沟^[64]。较具代表性的机型有^[65-66]:

美国Ditch Witch(沟神)公司以生产小型开沟机为主,主要研制出C、HT、RT3个系列的开沟机,代表机型及其基本技术参数如表5所示。Ditch Witch也是目前唯一在刀链传动中采用双离合器变速器技术的公司。RT机型为轮胎式,C机型为履带式或轮胎式,可装备刀链式开沟机构、岩石轮和振动犁,操作方便,能在狭小的空间内作业。8020T型开沟机可配置多种附件,包括开沟刀链、开沟和振动犁机组、反铲和岩石轮。该机优点:配备沟深探测仪,可实现开沟与探测同步,提高了工作效率和准确度。

表 5 Ditch Witch 开沟机基本技术参数

Tab.5 Basic technical parameters of Ditch Witch ditch

型号	外形结构	技术特点
C12		采用偏置后轮胎和枢转后轮设计,具有更好的操作性和更平稳的操作。配套动力为 9 kW,最大开沟深度 60.96 cm,作业速度 0.61 m/s,轮胎式
C16		采用 CX 履带设计,使整机反应灵敏、转向灵活、适应性强,配套动力为 12 kW,最大开沟深度 91.44 cm,履带式
RT45		采用直接耦合的高扭矩挖掘链条电动机以及 Tier4 发动机,动力强劲,工作可靠。配套动力为 37 kW,最大开沟深度 150 cm,作业速度 2.11 m/s,轮胎式
RT125		装备有巡航控制系统,能感应发动机负载,并自动调整地面驱动速度,实现最大生产。配套动力为 90 kW,最大开沟深度 239 cm,最大作业速度 3.58 m/s,轮胎式

美国 Vermeer(威猛)公司生产的开沟机有多种形式,主要用于管线的铺设。开沟产品 Vermeer T-1255 Commander 采用双马达驱动,装备 Vermeer TEC2000.2 计算机辅助控制系统,将独立元件集成为几个控制钮。该控制系统自动进刀,可根据工况自动调整开沟机,基本不需要驾驶员干预,减少或避免了手动调整、开沟刀链失速和发动机过载的问题,同时还可以监控开沟作业并记录机器工作参数。Vermeer 大型开沟机的驾驶室也别具特色,多款开沟机配备豪华高架驾驶室,可使驾驶员在作业中根据需要调节视野,部分机型还配备回转操纵台的二人驾驶室。RTX 系列开沟机采用 VZ 转向系统,只需轻推手杆即可轻松转向。图 4 为 Vermeer RTX 系列开沟机的代表机型,表 6 为 RTX 系列产品基本技术参数。该机优点:配备有操作员在位系统,该系统在操作员离开控制装置时,自动切断动力,提高作业安全性;采用履带式行走系统,可实现开沟深度的控

制,转向灵活为在狭窄空间里移动提供便利。

表 6 RTX 系列产品基本技术参数

Tab.6 Basic technical parameters of RTX series products

型号	开沟深度/ cm	开沟宽度/ cm	配套动力/ kW	整机宽度/ cm
RTX130	76.2	10.2 ~ 15.2	9.7	89.0
RTX200	91.4	10.2 ~ 15.2	15.3	88.9
RTX250	122.0	10.2 ~ 20.3	18.6	87.6

3.2 国内开沟施肥机研究现状

我国果园开沟施肥机械研制起步较晚。最初采用分段式开沟施肥作业,使用开沟机完成开沟工作,再人工施肥填土,这种开沟施肥方式效率低、施工强度大^[67]。随着现代化果园的建设、果树的栽培面积和产量增加、农村劳动力减少,传统分段式开沟、施肥的作业方式不能满足果树产业的发展。因此,能够一次性完成开沟、施肥、覆土的开沟施肥机应运而生,较具代表性的研究工作有:

高密市益丰机械有限公司研制出系列自走式多功能施肥机,如图 5 所示,基本技术参数如表 7 所示。多功能施肥机主要用于果园开沟施肥,兼顾旋耕、喷药、除草、园区开沟排水作业。该机体积小,操作灵便,可原地转向,包含 6 个前进挡位和 2 个倒退挡位,在机器左侧手动操作;动力采用时风单缸水冷柴油机,开沟传动箱内全部为齿轮传动,结实耐用。该机施肥量为 0 ~ 6 L/m,作业速度 7.5 ~ 20 m/s。该机优点:采用螺旋输送机式强制排肥,肥量可调,不易堵塞;行走采用橡胶履带,具有良好的行走直线性和通过性。



图 5 自走式多功能施肥机

Fig.5 Self-propelled multifunctional fertilizer applicator

表 7 开沟施肥机基本技术参数

Tab.7 Basic technical parameters of ditching-fertilization

型号	开沟深度/ cm	开沟宽度/ cm	配套动力/ kW	施肥深度/ cm	整机尺寸 (长 × 宽 × 高)/ (cm × cm × cm)
2F-30-A	0 ~ 35	30	20.6	20 ~ 35	249 × 100 × 75
2F-30-B	0 ~ 35	30	25.7	20 ~ 35	249 × 100 × 92
3DT-40	0 ~ 35	35	29.4	0 ~ 30	270 × 102 × 90



图 4 Vermeer RTX 系列开沟机

Fig.4 Vermeer RTX series ditcher

刘双喜等^[68]联合研制 2FQG-2 型果园双行开沟施肥机,整机结构如图 6 所示,主要由机架、有机肥箱、复合肥箱、开沟装置、排肥装置、输肥装置、导肥装置组成。工作时,随着机具前进,开沟刀盘转动,开沟刀切削入土并将土抛起;有机肥、化肥分别由排肥刮板、螺旋输送机排出,经导肥板落入所开沟槽内;同时,开沟罩壳将开沟刀抛起的土挡住,使其回落至已开沟槽内,实现开沟、施肥、覆土一体化作业。该机性能参数:配套动力为 58 kW,最大开沟深度为 50 cm,开沟宽度为 20~35 cm,作业速度为 1.6 km/h,有机肥最大施肥量可达 7.5 kg/m,化肥最大施肥量可达 2.25 kg/m。该机优点:双行开沟施肥作业,效率高;开沟深度可以实时检测并调节,开沟一致性好;开沟距离可以根据树龄和园艺要求调节,适用范围广;基肥、化肥混施,施肥效果好;施肥量可以根据果树生长状态调节,精量施肥,肥料浪费少。该机缺点:整机尺寸大,适用于矮砧密植的标准新型苹果园和株、行间距较大的传统苹果园,并不适用于株、行间距较小的苹果园。



图 6 2FQG-2 型果园双行开沟施肥机

Fig. 6 2FQG-2 orchard double row ditching and fertilizing machine

4 果园挖穴施肥机研究现状

挖穴施肥机的主要工作部件是钻头,钻头由工作螺旋叶片、切土刀和钻尖构成。工作时,由钻尖定位并切削中心的泥土,切土刀在穴底水平切削中心的土壤,螺旋叶片把已被切削的碎土从底部向上输送至穴外^[69]。挖穴施肥机按配套动力的不同可分为手提式挖穴施肥机、悬挂式挖穴施肥机和自走式挖穴施肥机 3 种,其中以悬挂式挖穴施肥机和手提式挖穴施肥机应用最广。在平地 and 缓坡丘陵地的果园中多采用自走式或悬挂式挖穴施肥机,而在坡度较大的山地果园或零星狭小地块的果园则多使用手提式挖穴施肥机^[70]。

4.1 国外挖穴施肥机研究现状

英国 OPICO(欧佩克)公司研发的悬挂式挖穴施肥机基本技术参数如表 8 所示。近年来,由于液压技术的普及和推广,欧佩克公司在挖穴施肥机上

采用液压传动装置。液压驱动比万向节套管传动更加灵活方便,遇到阻力物体能起到安全缓冲作用,而且还可以根据地面的坡度对钻头进行调节,不仅适合于平原,而且对于大坡度的地形,也能挖出竖直穴^[71]。该机优点:整机结构简单,适用范围广;采用 Eaton 液压马达,传动平稳,作业效率高。

表 8 Model 系列机型基本技术参数

Tab. 8 Basic technical parameters of Model series

型号	外形结构	技术特点
8300		安装于装载机侧面或底部,采用可逆的 Eaton 液压马达, Timken 圆锥滚子轴承,具有更好的操作性和更平稳的操作。最大钻孔直径 60.96 cm,最大钻孔深度 101.6 cm,传动比为 3:1
8800		采用三点悬挂的方式安装于拖拉机尾部,采用可逆的 Eaton 液压马达, Timken 圆锥滚子轴承,具有更好的操作性和更平稳的操作。最大钻孔直径 60.96 cm,最大钻孔深度 101.6 cm,传动比为 3.1:1
8900		安装于装载机侧面或底部,采用可逆的 Eaton 液压马达, Timken 圆锥滚子轴承,以及独特的 Auburn 行星变速箱,传动平稳、操作灵活。最大钻孔直径 91.44 cm,最大钻孔深度 182.9 cm,传动比为 4.08:1

小型便携式挖穴施肥机整机体积小,便于携带,适合在丘陵山区工作。日本、德国、意大利等发达国家对此均有研究。整机结构如图 7 所示,基本技术参数如表 9 所示。整机主要由螺悬钻、机架、通用机组组成。挖穴机工作时,首先将钻头插入土壤中,然后将发动机抬起,钻头与发动机连接,完成挖穴工作。其中,减震装置能有效地克服机身工作时 70% 以上的反作用力,使操作者能够在轻松的工作环境下进行有效地工作。该机优点:结构简单,传动平稳,效率高;体积小,质量轻,适用性强。



图 7 便携式挖穴施肥机

Fig. 7 Portable hole digging machine

表 9 便携式挖穴施肥机基本技术参数

Tab. 9 Basic technical parameters of portable hole digging machine

国别	型号	挖坑深度/ 挖坑直径/		功率/ kW	转速/ ($r \cdot \min^{-1}$)
		cm	cm		
日本	AG531	80	20 ~ 300	1.6	155
日本	AG4300	80	20 ~ 300	1.5	140
德国	STL360	120	90 ~ 350	2.4	50
意大利	LMTL51	70	8 ~ 20	1.6	200

4.2 国内挖穴施肥机研究现状

国内悬挂式挖穴施肥机的生产和应用较为广泛。该类挖穴施肥机通常具有较大的功率,机动性较强,能挖较大和较深的穴,应用范围也比较广,而挖穴施肥一体机处于研究阶段,实现产业化较少^[72]。代表性的机具有:

济南沃丰机械有限公司研制出 1WX 系列挖穴施肥机,整机结构如图 8 所示,基本技术参数如表 10 所示。该机主要由机架、传动轴、传动箱、螺旋钻等组成。工作时,拖拉机为挖穴施肥机提供动力,带动螺旋钻转动,驾驶员操纵手柄实现挖穴作业。整机采用合金等材料制作钻头等部件,可靠性高、耐磨损;工作部分使用螺旋叶片,传动平稳。主要用于果树施肥、树木种植、温室立柱埋设等。该机优点:机具操作简单,安全可靠,维护保养方便,工作效率高。



图 8 1WX 系列挖穴施肥机

Fig. 8 1WX series pit digger

表 10 1WX 系列产品基本技术参数

Tab. 10 Basic technical parameters of 1WX series products

型号	挖坑深度/ 钻头直径/		配套动力/ kW	转速/ ($r \cdot \min^{-1}$)
	cm	cm		
1WX-230	40 ~ 70	230	11.0	540 ~ 760
1WX-300	40 ~ 70	300	14.7	540 ~ 760
1WX-400	40 ~ 70	400	14.7	540 ~ 760

魏子凯^[73]研制出山地果园挖穴施肥覆土机,整机结构如图 9 所示。主要由升降机构、挖穴覆土机构、施肥机构等构成。工作时,挖穴铲同时向下运动并收拢,使挖穴铲入土完成挖穴作业,土壤保存于挖

穴铲的内部;操纵施肥液压缸控制手柄,推动联动式舌板运动,完成施肥作业;最后挖坑铲分开,土壤靠重力作用落回坑中,支架下端面将粘在挖坑铲上的土壤刮下,完成覆土作业。该机的性能参数:最大挖穴深度为 40 cm,最大挖坑穴径为 40 cm,单穴的施肥量为 0.8 kg,配套动力为 13.2 kW。该机优点:一次完成挖穴、施肥、覆土作业,降低劳动强度;与拖拉机配套使用,方便移动。该机缺点:施肥量不可调,易造成肥料浪费。



图 9 山地果园挖穴施肥覆土机

Fig. 9 Hill orchard digging and fertilizing machine

5 讨论与展望

国内部分高校、企业、科研院所几十年的不断探索,我国果园基肥施肥机械已经从机具的简单仿制逐渐发展为高端施肥装备的改进研制、基础理论研究、新技术新产品的创新研发多措并举的全面发展新时代。新技术的应用以及新产品的开发,可以较好地适应不同区域的作业环境,其中中低端果园基肥施肥机械已经初具规模,较为成熟。部分实力雄厚的高校及科研院所开始结合精准、高效、智能的发展方向,研究国际领先的果园基肥机械化施肥技术及装备。针对果园基肥施肥机械化技术及装备,未来将从以下方面取得长足的进展:

(1) 自动化、智能化技术在果园基肥施肥机械上的应用。目前,自动控制技术、智能检测技术、机电液一体化技术等部分发达国家的高端果园施肥装备已经广泛采用。这些技术可以提高作业精度和效率,减轻劳动强度。而国内果园基肥施肥装备的施肥均匀性及稳定性尚不能实现精确控制,以环境感知、测距定位、农机调度为代表的先进技术在大田作业机械的应用日渐成熟,果园基肥施肥机械的智能化水平需逐步加强。为此,国内果园基肥施肥机械也将逐步向自动化、智能化方向发展。

(2) 视觉定深施肥技术、精量施肥技术在果园基肥施肥机械的逐步应用。目前,基于图像处理的

树体检测技术、变量施肥技术和施肥深度自动调节技术等果园机械化施肥还处于研究阶段。其可以通过图像处理的方式获取果树树冠的关键参数及其营养状态;变量施肥控制系统根据土壤养分含量、树冠关键参数及果树营养状态,对果园施肥进行决策,调整施肥深度及施肥量,从而实现定深变量施肥。未来精量、精准施肥是果园施肥机械的发展方向。

(3)因地制宜确定不同区域果园基肥施肥机械化最佳方式和技术路线。经过几十年的发展,发达国家的果园施肥装备的产品系列化和标准化程度高。与发达国家相比,我国果树的栽培面积居世界第一且栽培区域较广,地形复杂,导致施肥机械同类产品系列化、标准化程度不够,未能完全满足不同实际作业环境的需求,而且在作业速度、施肥质量、机具的使用寿命等方面仍需加强研究。果树的营养状

况、地理条件、农艺的多样性共同决定了在今后相当长的一段时间内,撒肥机械、开沟施肥机械、挖穴施肥机械将长期并存;适合丘陵山区使用、自动化程度低的小型机械与适合平原地区使用、自动化程度高的大型施肥机械将长期并存。因此,同系列机型应尽量多地发展不同型号,以满足不同区域、不同作业环境的需求。

(4)基肥施肥装备的相关基础理论研究。为推进果园基肥施肥装备的发展,其相关基础理论研究具有重要意义。目前,机具结构、运动参数与作业质量的关系和外界地形、环境因素对施肥作业装备的影响机理以及肥料施用量、施肥位置、土肥混合状态对果树的作用效果有待进一步研究。随着国家引导、支持、鼓励果园施肥装备的发展,其相关基础理论必将成为研究热点。

参 考 文 献

- [1] 束怀瑞,陈修德.我国果树产业发展的时代任务[J].中国果树,2018(2):1-3.
SHU Huairui, CHEN Xiude. The current task of the development of fruits industry in China [J]. China Fruits, 2018(2): 1-3. (in Chinese)
- [2] 邓秀新,束怀瑞,郝玉金,等.果树学科百年发展回顾[J].农学报,2018,8(1):24-34.
DENG Xiuxin, SHU Huairui, HAO Yujin, et al. Review on the centennial development of pomology in China [J]. Journal of Agriculture, 2018, 8(1): 24-34. (in Chinese)
- [3] 束怀瑞.中国果树产业可持续发展战略研究[J].落叶果树,2012,44(1):1-4.
- [4] 陈学森,韩明玉,苏桂林,等.当今世界苹果产业发展趋势及我国苹果产业优质高效发展意见[J].果树学报,2010,27(4):598-604.
CHEN Xuesen, HAN Mingyu, SU Guilin, et al. Discussion on today's world apple industry trends and the suggestions on sustainable and efficient development of apple industry in China [J]. Journal of Fruit Science, 2010, 27(4):598-604. (in Chinese)
- [5] 国家统计局.中国统计年鉴[J].北京:中国统计出版社,2019.
- [6] 粮农组织统计数据库[EB/OL].http://www.fao.org/faostat/zh/#data/QC/visualize.
- [7] 李沐桐,温翔宇,周福君.中耕作物精准穴施肥控制机构工作参数优化与试验[J].农业机械学报,2016,47(9):37-43.
LI Mutong, WEN Xiangyu, ZHOU Fujun. Working parameters optimization and experiment of precision hole fertilization control mechanism for intertilled crop [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(9):37-43. (in Chinese)
- [8] 沈从举,贾首星,张立新,等.履带自走式果园气爆深松施肥机研制[J].农业工程学报,2019,35(17):1-11.
SHEN Congju, JIA Shouxing, ZHANG Lixin, et al. Development of caterpillar self-propelled orchard gas explosion subsoiling and fertilizer machine [J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(17): 1-11. (in Chinese)
- [9] 韩大勇.果树挖坑定量施肥机的研制[D].泰安:山东农业大学,2011.
HAN Dayong. Study on digging and quantitative fertilizing machine for fruit trees [D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2011. (in Chinese)
- [10] 邵书山,王晓燕,程俊男,等.果园施肥开沟机的发展现状和趋势[J].农机化研究,2019,41(5):256-261,268.
SHAO Shushan, WANG Xiaoyan, CHENG Junnan, et al. Development status and trend of fertilizer trencher at home and abroad [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2019, 41(5):256-261, 268. (in Chinese)
- [11] 葛顺峰,朱占玲,魏绍冲,等.中国苹果化肥减量增效技术途径与展望[J].园艺学报,2017,44(9):1681-1692.
GE Shunfeng, ZHU Zhanling, WEI Shaoshong, et al. Technical approach and research prospect of saving and improving efficiency of chemical fertilizers for apple in China [J]. Acta Horticulturae Sinica, 2017, 44(9):1681-1692. (in Chinese)
- [12] 郭民主.苹果树科学施肥综述[J].西北园艺(果树),2015(4):15-18.
- [13] 侯毛毛,陈竞楠,杨祁,等.暗管排水和有机肥施用下滨海设施土壤氮素行为特征[J].农业机械学报,2019,50(11):259-266.
HOU Maomao, CHEN Jingnan, YANG Qi, et al. Behavior of coastal greenhouse soil nitrogen as influenced by subsurface drainage and organic fertilizer [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(11):259-266. (in Chinese)
- [14] 曹卫东,包兴国,徐昌旭,等.中国绿肥科研60年回顾与未来展望[J].植物营养与肥料学报,2017,23(6):1450-1461.
CAO Weidong, BAO Xingguo, XU Changxu, et al. Reviews and prospects on science and technology of green manure in China [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2017, 23(6):1450-1461. (in Chinese)
- [15] 祝清震,武广伟,安晓飞,等.基肥定深施用装置排肥口位置与施肥深度关系模型[J].农业工程学报,2018,34(13):8-17.
ZHU Qingzhen, WU Guangwei, AN Xiaofei, et al. Relationship model of fertilizer outlet location and fertilizer application depth of depth-fixed application device of base-fertilizer [J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(13):8-17. (in Chinese)
- [16] 曾希柏,胡学玉,胡清秀.我国肥料的施用现状及发展趋势[J].科技导报,2002(8):36-39.
ZENG Xibai, HU Xueyu, HU Qingxiu. Present state on China's fertilizer application and its development [J]. Science &

- Technology Review, 2002(8): 36–39. (in Chinese)
- [17] 焦润安, 张舒涵, 李毅, 等. 生草影响果树生长发育及果园环境的研究进展[J]. 果树学报, 2017, 34(12): 116–129. JIAO Run'an, ZHANG Shuhan, LI Yi, et al. Research progress about the effect of sod-culture on the growth and development of fruit and orchard environment[J]. Journal of Fruit Science, 2017, 34(12): 116–129. (in Chinese)
- [18] 秦朝民, 刘君辉. 离心式撒肥机撒肥部件研究设计[J]. 农机化研究, 2006, 28(10): 100–102. QIN Zhaomin, LIU Junhui. Study and design on spreading mechanism of centrifugal fertilizer spinner[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2006, 28(10): 100–102. (in Chinese)
- [19] 陈倩, 刘照霞, 邢玥, 等. 有机无机肥分次配施对嘎啦苹果生长、¹⁵N-尿素吸收利用及损失的影响[J]. 应用生态学报, 2019, 30(4): 1367–1372. CHEN Qian, LIU Zhaoxia, XING Yue, et al. Effects of split combined application of organic-inorganic fertilizers on plant growth, ¹⁵N absorption, utilization and loss of Gala apple tree[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2019, 30(4): 1367–1372. (in Chinese)
- [20] 李涛涛, 翟丙年, 李永刚, 等. 有机无机肥配施对旱地“红富士”苹果品质的影响[J]. 北方园艺, 2013(21): 178–181. LI Taotao, ZHAI Bingnian, LI Yonggang, et al. Effect of combined application of organic and inorganic fertilizers on quality of ‘Red Fuji’ apple in dry land[J]. Northern Horticulture, 2013(21): 178–181. (in Chinese)
- [21] 农业农村部数据库[EB/OL]. <http://zdcscxx.moa.gov.cn:8080/nyb/pc/search.jsp>.
- [22] 国家统计局数据库[EB/OL]. <https://data.stats.gov.cn/easyquery.htm?cn=C01>.
- [23] 农业部农业机械化管理局. 全国农业机械化统计年报[J]. 北京: 农业部农业机械化管理局, 2015.
- [24] 范英. 中国苹果生产布局变迁研究——基于渤海湾、黄土高原优势区的趋势分析[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2010. FAN Ying. Distribution changes of Chinese apple production: based on the trend of the advantage areas of the Bohai Bay and Loess Plateau[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2010. (in Chinese)
- [25] 齐兴源, 周志艳, 杨程, 等. 稻田气力式变量施肥机关键部件的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2016, 32(6): 20–26, 316. QI Xingyuan, ZHOU Zhiyan, YANG Cheng, et al. Design and experiment of key parts of pneumatic variable rate fertilizer applicator for rice production[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(6): 20–26, 316. (in Chinese)
- [26] 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. LUO Xiwen, LIAO Juan, HU Lian, et al. Improving agricultural mechanization level to promote agricultural sustainable development[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(1): 1–11. (in Chinese)
- [27] 伟利国, 张小超, 苑严伟, 等. 2F-6-BP1型变量配肥施肥机的研制与试验[J]. 农业工程学报, 2012, 28(7): 14–18. WEI Ligu, ZHANG Xiaochao, YUAN Yanwei, et al. Design and experiment of 2F-6-BP1 variable rate assorted fertilizer applicator[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(7): 14–18. (in Chinese)
- [28] COOL S, PIETERS J, MERTENS K C, et al. A simulation of the influence of spinning on the ballistic flight of spherical fertiliser grains[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2014, 105: 121–131.
- [29] KWEON G, GRIFT T E, MICLET D. A spinning-tube device for dynamic friction coefficient measurement of granular fertiliser particles[J]. Biosystems Engineering, 2007, 97(2): 145–152.
- [30] PATTERSON D E, REECE A R. The theory of the centrifugal distributor. I: motion on the disc, near-centre feed[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1962, 7(3): 232–240.
- [31] HOFSTEE J W, HUISMAN W. Handling and spreading of fertilizers part 1: physical properties of fertilizer in relation to particle motion[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1990, 47: 213–234.
- [32] HOFSTEE J W. Handling and spreading of fertilizers: part 4, the reciprocating spout type fertilizer spreader[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1995, 62(1): 9–24.
- [33] HOFSTEE J W. Handling and spreading of fertilizers: part 5, the spinning disc type fertilizer spreader[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1995, 62(3): 143–162.
- [34] OLIESLAGERS R, RAMON H, BAERDEMAEKER J D. Calculation of fertilizer distribution patterns from a spinning disc spreader by means of a simulation model[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1996, 63(2): 137–152.
- [35] VILLETTE S, PIRON E, COPINTAULT F, et al. Centrifugal spreading of fertiliser: deducing three-dimensional velocities from horizontal outlet angles using computer vision[J]. Biosystems Engineering, 2007, 99(4): 496–507.
- [36] VILLETTE S, COINTAULT F, PIRON E. Centrifugal spreading: an analytical model for the motion of fertiliser particles on a spinning disc[J]. Biosystems Engineering, 2005, 92(2): 157–164.
- [37] COETZEE C J, LOMBARD S G. Discrete element method modelling of a centrifugal fertiliser spreader[J]. Biosystems Engineering, 2011, 109(4): 308–325.
- [38] KUEN. Side spreader[EB/OL]. <https://www.kuhn.cn/internet/webcn.nsf/0/17CFA72402718A0CC1257B48002FD6FA?O=openDocument&p=8.12.2.2020>.
- [39] AMAZONE. ZA X Perfect two disc spreader[EB/OL]. <http://www.amazone.cn/223.asp>, 2020.
- [40] 杨立伟, 陈龙胜, 张俊逸, 等. 离心圆盘式撒肥机撒肥均匀性试验[J]. 农业机械学报, 2019, 50(增刊): 108–114. YANG Liwei, CHEN Longsheng, ZHANG Junyi, et al. Test and analysis of uniformity of centrifugal disc spreading[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(Supp.): 108–114. (in Chinese)
- [41] 董向前, 宋建农, 张军奎, 等. 锥盘式颗粒肥撒施机构抛撒性能分析与试验[J]. 农业工程学报, 2013, 29(19): 33–40. DONG Xiangqian, SONG Jiannong, ZHANG Junkui, et al. Working performance and experiment on granular fertilizer spreader with cone disk[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(19): 33–40. (in Chinese)
- [42] 尚琴琴. 锥盘式撒肥机关键部件的设计与试验研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2017. SHANG Qinqin. Key components design and experiment research on granular fertilizer spreader with cone disc[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2017. (in Chinese)
- [43] 芦新春, 陈书法, 杨进, 等. 宽幅高效离心式双圆盘撒肥机设计与试验[J]. 农机化研究, 2015, 37(8): 100–103. LU Xinchun, CHEN Shufa, YANG Jin, et al. Design and experiment on double-disc spreader with wide breadth and highly efficiency[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2015, 37(8): 100–103. (in Chinese)
- [44] 吕金庆, 孙贺, 兑瀚, 等. 锥形撒肥圆盘中肥料颗粒运动模型优化与试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(6): 85–91, 111. LÜ Jinqing, SUN He, DUI Han, et al. Optimization and experiment of fertilizer particle motion model in conical spreading disk[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(6): 85–91, 111. (in Chinese)
- [45] 宋卫堂, 封俊, 刘亚佳. 地轮驱动离心式化肥撒布机的设计与试验[J]. 农业机械学报, 2002, 33(1): 39–42.

- SONG Weitang, FENG Jun, LIU Yajia. Design and performance test of a centrifugal type of fertilizer broadcaster with land-wheel driven [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2002, 33(1):39-42. (in Chinese)
- [46] 胡永光, 杨叶成, 肖宏儒, 等. 茶园施肥机离心撒肥过程仿真与参数优化[J]. 农业机械学报, 2016, 47(5):77-82. HU Yongguang, YANG Yecheng, XIAO Hongru, et al. Simulation and parameter optimization of centrifugal fertilizer spreader for tea plants[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(5):77-82. (in Chinese)
- [47] 康建明, 李树君, 杨学军, 等. 圆盘式开沟机作业功耗仿真分析及试验验证[J]. 农业工程学报, 2016, 32(13):8-15. KANG Jianming, LI Shujun, YANG Xuejun, et al. Experimental verification and simulation analysis on power consumption of disc type ditcher[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(13):8-15. (in Chinese)
- [48] 杨有刚, 刘迎春. 仿生式开沟机设计理论的研究[J]. 农业机械学报, 2004, 35(1):65-68. YANG Yougang, LIU Yingchun. Design of a bionic ditch digger [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2004, 35(1):65-68. (in Chinese)
- [49] 武广伟, 付卫强, 董建军, 等. 1KY-40型液压驱动农田水渠开沟机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2014, 45(增刊):302-308. WU Guangwei, FU Weiqiang, DONG Jianjun, et al. Design and experiment of 1KY-40 hydraulic drive ditcher for farmland conduit[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(Supp.):302-308. (in Chinese)
- [50] 康建明, 李树君, 杨学军, 等. 基于多体动力学的圆盘式开沟机虚拟仿真与功耗测试[J]. 农业机械学报, 2017, 48(1):57-63. KANG Jianming, LI Shujun, YANG Xuejun, et al. Virtual simulation and power test of disc type ditcher based on multi-body dynamics[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(1):57-63. (in Chinese)
- [51] 杨然兵, 杨红光, 连政国, 等. 马铃薯种植机分层施肥开沟器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(11):104-113. YANG Ranbing, YANG Hongguang, LIAN Zhengguo, et al. Design and experiment of separated layer fertilization furrow opener for potato planter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(11):104-113. (in Chinese)
- [52] 刘彪, 肖宏儒, 宋志禹, 等. 果园施肥机械现状及发展趋势[J]. 农机化研究, 2017, 39(11):263-268. LIU Biao, XIAO Hongru, SONG Zhiyu, et al. Present state and trends of fertilizing machine in orchard [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2017, 39(11):263-268. (in Chinese)
- [53] PERRY J A, PERRY D D, PERRY F B. Ditching attachment; CA651579A [P]. 1962-11-06
- [54] RYAN P J. Ditching apparatus with divergent v-wing blade configuration; 2012151659A1 [P]. 2012-11-15.
- [55] KAZUHISA M. Ditching machine for riding; JP2009167722A [P]. 2009-07-30.
- [56] JESSE H, LOUIS L. Rock ditcher; 8600355A1 [P]. 1986-01-16.
- [57] SAEYA W, ENGELEN K, RAMON H, et al. An automatic depth control system for shallow manure injection, Part 1: modelling of the depth control system[J]. Biosystems Engineering, 2007, 98(2):146-154.
- [58] SAEYA W, WALLAYS C, RAMON K, et al. An automatic depth control system for shallow slurry injection, Part 2: control design and field validation[J]. Biosystems Engineering, 2008, 99(2):161-170.
- [59] THOMAS R, ORLOFSKY S. Ditching machine; US3280487A [P]. 1966-10-25.
- [60] HIROSHI S. Disc ditching earth discharger; JP623977A [P]. 1978-08-14.
- [61] MASAMI S. Step ditching machine for paddy field; JP2009161972A [P]. 2009-07-23.
- [62] 王京风. 微型果园开沟机的设计分析与优化[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2010. WANG Jingfeng. Design analysis and optimization of mini orchard trencher[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2010. (in Chinese)
- [63] 马晨, 蒙贺伟, 坎杂, 等. 果园有机肥深施圆盘开沟机研究现状及发展对策[J]. 农机化研究, 2017, 39(10):12-17, 28. MA Chen, MENG Hewei, KAN Za, et al. The research current situation and development countermeasure of the orchard organic fertilizer deep application of disc ditching machine [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2017, 39(10):12-17, 28. (in Chinese)
- [64] 宋月鹏, 张紫涵, 范国强, 等. 我国果园开沟施肥机械研究现状及发展趋势[J]. 中国农机化学报, 2019, 40(3):7-12, 25. SONG Yuepeng, ZHANG Zihan, FAN Guoqiang, et al. Research current situation and development trend of orchard ditching and fertilizing machine in China[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2019, 40(3):7-12, 25. (in Chinese)
- [65] DITCH WITCH. C and RT series ditcher[EB/OL]. <https://www.ditchwitch.com/trenchers>, 2020.
- [66] VERMEER. RTX series ditcher[EB/OL]. <https://www.vermeer.com/ap/pedestrian-trenchers>, 2020.
- [67] 康建明, 李树君, 杨学军, 等. 密植果园开沟施肥机开沟刀片设计与试验[J]. 农业机械学报, 2017, 48(2):68-74. KANG Jianming, LI Shujun, YANG Xuejun, et al. Design and experiment of ditching blade installed in close planting orchard ditching machinery planting orchard ditching machinery[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(2):68-74. (in Chinese)
- [68] 刘双喜, 张宏建, 王金星, 等. 果园开沟施肥机导肥机构的优化设计[J]. 中国农机化学报, 2017, 38(7):45-53. LIU Shuangxi, ZHANG Hongjian, WANG Jinxing, et al. Optimization design of fertilizer-guiding mechanism for orchard ditching and fertilizing machine[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2017, 38(7):45-53. (in Chinese)
- [69] 苗维平. 新型果园挖穴施肥机的设计研究[J]. 农机化研究, 2018, 40(10):100-103, 108. MIAO Weiping. Design research on the holes digging fertilizer machine used in new type orchard[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2018, 40(10):100-103, 108. (in Chinese)
- [70] 杨洲, 陈朝海, 段洁利, 等. 果园施肥用便携式电动挖穴机性能试验[J]. 农业工程学报, 2013, 29(12):25-31. YANG Zhou, CHEN Chaohai, DUAN Jieli, et al. Performance test of hand-held electric hole-digger for fertilization in orchard [J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(12):25-31. (in Chinese)
- [71] OPICO. Hole digging machine[EB/OL]. <https://products.opico.co.uk/opico-products/post-hole-diggers/post-hole-diggers>, 2020.
- [72] 戚开钊. 果园开沟与挖坑部件的分析研究[D]. 乌鲁木齐:新疆农业大学, 2012. QI Kaizhao. The analysis of ditching and hole digging component in orchard[D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2012. (in Chinese)
- [73] 魏子凯. 山地果园挖坑施肥覆土机设计与研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2016. WEI Zikai. Design and research on hydraulic system of hilly orchard digging fertilizing covering machine [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2016. (in Chinese)