

自走式果园有机肥条铺机设计与试验

朱新华¹ 李旭东¹ 高翔¹ 谭辰² 邓海涛¹

(1. 西北农林科技大学机械与电子工程学院, 陕西杨凌 712100; 2. 潍柴动力股份有限公司发动机研究院, 潍坊 261061)

摘要: 为扩展果园秸秆覆盖机作业功能,解决丘陵山地果园缺少有机肥施肥机械的问题,基于秸秆覆盖机,设计了自走式果园有机肥条铺机。整机主要由车体和条铺装置组成,其中条铺装置采用伸缩式结构,条铺间距为 1.8 ~ 2.7 m,适应在行距为 3.0 ~ 4.5 m 的果园进行有机肥对沟施肥或行间双侧条铺,也可用于大田作物对行施基肥或条铺栽培基质。运用离散元法对条铺装置的排肥口结构进行优化,确定了最优斜口形排肥口结构。条铺试验结果表明,腐熟牛粪施肥量 29.40 ~ 53.10 t/hm²,变异系数小于等于 15.48%;菌渣施肥量 21.45 ~ 75.00 t/hm²,变异系数小于等于 6.57%;腐熟牛粪、菌渣施肥量模型的确定系数分别为 0.871 3 和 0.963 1。果园实地试验中作业效果良好。

关键词: 果园; 有机肥; 对沟施肥; 条铺装置; 伸缩式螺旋排肥器

中图分类号: S224.22 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2022)05-0136-11 OSID: 

Design and Test of Self-propelled Orchard Organic Fertilizer Strip-spreader

ZHU Xinhua¹ LI Xudong¹ GAO Xiang¹ TAN Chen² DENG Haitao¹

(1. College of Mechanical and Electronic Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China
2. Engine R&D Center, Weichai Power Co., Ltd., Weifang 261061, China)

Abstract: In order to expand the function of the orchard straw mulching machine and solve the problem of the shortage of organic fertilizer fertilization machine in a hilly orchard, a self-propelled orchard organic fertilizer strip-spreader was developed based on the straw mulching machine. The machine was mainly composed of the vehicle body and the strip-spreading device. The strip-spreading device adopted a telescopic structure, and the spacing of the strip-spreading was 1.8 ~ 2.7 m, which was suitable for ditch fertilization or two-side strip spreading of organic fertilizer in orchard with row spacing of 3.0 ~ 4.5 m or applying base fertilizer along the rows for field crops or spreading cultivation substrate in strips. The discrete element method was used to optimize the fertilizing outlet structure of the strip-spreading device, and the best XK type fertilizing outlet structure was decided. The strip-spreading test results showed that the fertilizing amount of the decomposed cow manure was ranged from 29.40 t/hm² to 53.10 t/hm², and the coefficient of variation was less than or equal to 15.48%. The amount of the mushroom residue applied was 21.45 ~ 75.00 t/hm², and the coefficient of variation was less than or equal to 6.57%. The determination coefficients of the fertilization quantitative models of the decomposed cow manure and the mushroom residue were 0.871 3 and 0.963 1, respectively. In the field test of orchard, the strip-spreader showed a good operation effect. The self-propelled orchard organic fertilizer strip-spreader can adapt to large-scale fertilization in a hilly orchard.

Key words: orchard; organic fertilizer; ditch-fertilizing; strip-spreading device; telescopic spiral fertilizer apparatus

收稿日期: 2021-05-05 修回日期: 2021-06-10

基金项目: 公益性行业(农业)科研专项经费项目(201503137)、陕西省重点研发计划项目(2019ZDLNY01-05-02)和陕西省农业协同创新与推广联盟重大科技项目(LMZD201703)

作者简介: 朱新华(1967—),男,教授,博士生导师,主要从事西部旱区农业机械技术与装备研究,E-mail: zzh920@nwsuaf.edu.cn

0 引言

近年来,矮化密植逐渐成为苹果等果树的主流栽培模式,单位面积植株多、产量高,对土壤水肥条件要求更高^[1]。但目前我国果业长期依赖化肥^[2-3],土壤酸化、板结和环境污染等问题日益突出^[4-6]。土壤有机质含量低、干旱已成为制约黄土高原苹果产区果业发展的关键因素^[7-8]。施用有机肥是提升土壤有机质含量和蓄水能力的有效途径^[9],可改善土壤结构和微环境,有效缓解干旱问题。研究表明,果园合理的施肥比例为,除氮、磷、钾外,有机肥应占施肥总量的 95% 以上^[10]。然而,果园有机肥施肥量高达 45 t/hm²^[11-12],作业强度大、作业环境差。在劳动力短缺的背景下,缺少专业有机肥施肥装备已成为我国果园增施有机肥、减施化肥的瓶颈^[13-14]。

开沟施肥是我国果园的主要施肥方式之一^[15-16],作业方式分为开沟、施肥两段式和联合式。化肥作为果园追肥施用,一般小于 0.51 t/hm²^[6],便于实现联合式作业。1KS60-35X 型果园双螺旋开沟施肥机^[17]由前轴破土、后轴搅土施肥,肥料自搅土刀轴中通管道落下施入土壤;2FK-40 型果园开沟施肥机^[18]肥箱容积约 0.8 m³,作业时由限深轮驱动螺旋器排肥;2FPG-40 型葡萄开沟施肥机^[19]肥箱容积 0.4 m³,由驱动滚筒调节开沟深度并驱动螺旋器推送肥料经施肥靴施于沟中。以上机型均与拖拉机三点悬挂联接,可实现开沟、施肥、覆土一体化作业,但载肥量小、排肥器只适用于化肥,不适于施肥量较大的有机肥特别是农家肥。

有机肥施肥机械方面,王向阳等^[20]研制的果园有机肥开沟施肥机以及张宏建等^[21]研制的自动调节深度式果园双行开沟施肥机均属于联合式,可实现双侧开沟、施肥、覆土一体化作业,开沟深度、间距以及施肥量可调,但其肥箱容积相对较小,影响作业效率,且不适于丘陵山地果园。我国 60% 的果园处于丘陵山地^[22],开沟、施肥两段式作业依然是果园有机肥施用的重要方式,且有利于施肥装备轻简化。现阶段,犁铧式、链式、螺旋式、旋耕式开沟机^[17]等机型已在果园中广泛应用,但施肥环节仍由拖拉机运输、人工对沟埋肥,效率低下。因此,果园两段式施肥缺少兼具大体量肥料运输和条铺施肥功能的机具。

先前研制的自走式果园秸秆覆盖机^[23-24]能将秸秆、腐熟粪肥等有机物料覆盖于果园行间增碳保墒。该机车箱容积大,适于丘陵山地果园,作业效率高,但配套功能少。为实现有机肥对沟施肥或行间

双侧条铺及果园秸秆覆盖机一机多用,本文基于果园秸秆覆盖机研制果园有机肥条铺机,通过设计计算与仿真优化确定关键部件结构及参数,并进行性能试验。

1 整机方案

1.1 矮化密植苹果园宜机条件

黄土高原是我国苹果主产区之一,该地区苹果园主要分布在丘陵山地,区域交通条件差,坡地果园多,地头道路相对狭小。矮化密植苹果树形有高纺锤形、细长纺锤形、改良纺锤形以及自由纺锤形等,不同树形果园的宜机参数如表 1 所示^[24-26]。

表 1 我国矮化密植苹果园宜机参数
Tab.1 Parameters related to mechanical operation of dwarf and close planting apple orchards in China

树形	株距×行距/ (m×m)	平均冠径/ m	行间可通行宽 度/m	果园坡度/ (°)	地头道路宽 度/m	无枝树干高 度/m
高纺锤形	(0.9~1.2)× (3.0~3.9)	1.2	1.8~ 2.7			
细长纺锤形	2×4	1.7	2.3	≤15	4~6	0.5~
改良纺锤形	2×4	1.6	2.4			0.6
自由纺锤形	(2.0~2.5)× (4.0~4.5)	2.0	2.0~ 2.5			

果树主要依靠根毛吸收肥料养分,根毛大多数分布于树冠边缘^[27],因此,树冠垂直投影边际切线是条状沟施肥的理想位置^[16]。果园有机肥条沟施肥示意图如图 1 所示。

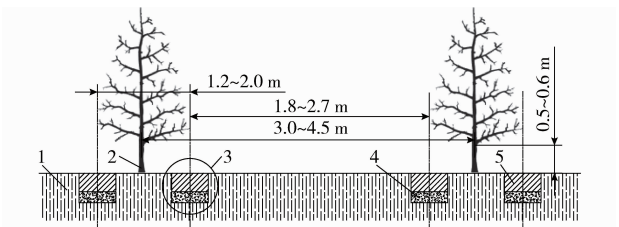


图 1 果园有机肥条沟施肥示意图
Fig.1 Schematic of ditch-fertilizing of organic fertilizer in orchard
1. 土壤 2. 果树 3. 条状沟 4. 有机肥料 5. 覆土层

1.2 条铺机设计技术要求

结合我国矮化密植苹果园栽植现状及有机肥条沟施肥的农艺要求,得到条铺机设计要求如表 2 所示。为提高效率,条铺机载肥量应不小于 667 m²的施肥量,且具备良好的转向性能和倒车操控性。

1.3 整机方案评价

肥料特性和果园环境是有机肥施肥机械整机结构设计的关键限制因素,评价重点是载肥量和山地果园适应性。条铺机的整机结构可选方案有拖拉机

表 2 果园有机肥条铺机设计要求

Tab.2 Design requirements of orchard organic fertilizer strip-spreader

参数	数值/类型
最大爬坡角/(°)	≥15
车身宽度/m	≤1.8
肥箱容积/m ³	>5
有机肥施肥量/(t·hm ⁻²)	24.60~45.00
施肥方式	对沟施肥或行间双侧条铺
适应条沟间距/m	1.8~2.7
适应肥料类型	商品有机肥、腐熟粪肥、菌渣等有机物料

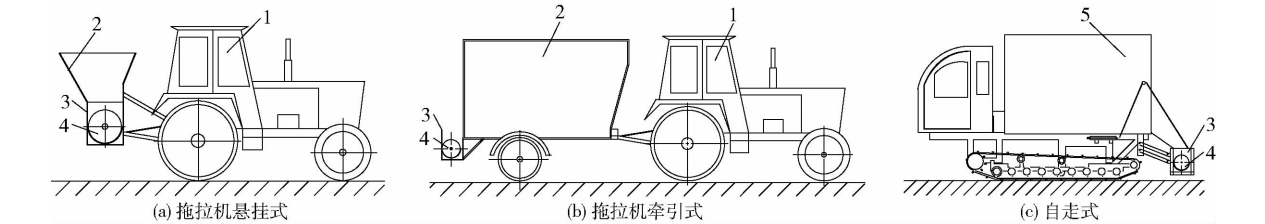


图 2 整机方案示意图

Fig.2 Schematics of complete machine schemes

1. 拖拉机 2. 肥箱 3. 条铺装置 4. 排肥螺旋 5. 自走式车体

表 3 整机方案比较结果

Tab.3 Comparison results of complete machine schemes

项目	拖拉机悬	拖拉机牵	自走式	
	挂式	引式	轮式	橡胶履带式
载肥量	小	中等	中等	大
爬坡性能	差	差	中等	优
转向性能	中等	差	中等	优
倒车操控性	优	差	优	优

悬挂式、牵引式和自走式 3 种(图 2),其中自走式包括轮式或橡胶履带式。综合评价如表 3 所示^[22,28]。

橡胶履带自走式方案在适应施肥量较大的有机肥施肥以及果园空间狭小、地形复杂的作业环境方面具有优势,因此条铺机的车体采用橡胶履带自走式。课题组前期研制的橡胶履带自走式果园秸秆覆盖机^[23-24]车箱容积大于 5 m³,供料机构可适应秸秆、粪肥、菌渣等多种农业废料,其车体可作为有机肥条铺机的基础。本文的重点是在果园秸秆覆盖机车体基础上研制配套有机肥条铺装置,实现一机多用。

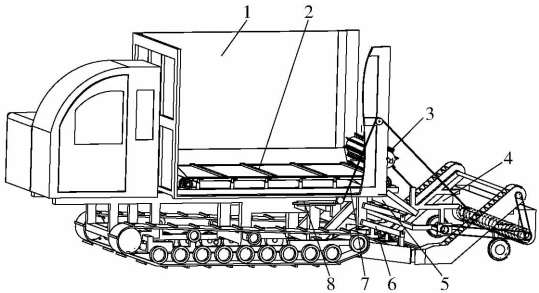


图 3 果园秸秆覆盖机整机结构图

Fig.3 Overall structure diagram of orchard straw mulching machine

1. 车箱 2. 刮板送料机构 3. 下料辊 4. 覆土装置 5. 导料板 6. 平行四杆机构 7. 钢丝绳 8. 升降油缸

2 整机结构与工作原理

2.1 果园秸秆覆盖机结构

果园秸秆覆盖机主要由车体和覆土装置两部分组成,如图 3 所示。车体主要包括发动机、驾驶室、橡胶履带底盘、车箱、刮板送料机构、下料辊、导料板等,其中刮板送料机构和下料辊共同组成供料机构。覆土装置通过平行四杆机构挂接于车体后部,由升降油缸带动的钢丝绳调节离地高度。由 3 台液压马达驱动工作装置,其液压动力可满足果园有机肥条铺机的动力需求。

2.2 条铺机整机结构与工作原理

条铺机整机结构如图 4 所示,主要由车体和条铺装置两部分组成。条铺装置主要由左右对称布置的 2 个伸缩式螺旋排肥器及其伸缩油缸组成,与车体挂接方式和覆土装置一致以方便互换。为将肥料导流至左右两侧伸缩式螺旋排肥器,在车体导料板上设置有分料板。

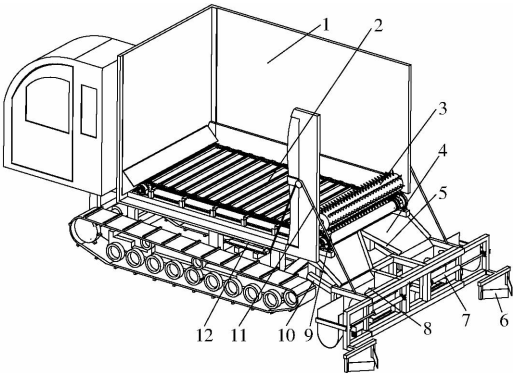


图 4 有机肥条铺机整机结构图

Fig.4 Overall structure diagram of organic fertilizer strip-spreader

1. 车箱 2. 刮板送料机构 3. 下料辊 4. 导料板 5. 分料板 6. 覆土铲 7. 伸缩油缸 8. 伸缩式螺旋排肥器 9. 车箱下料口 10. 平行四杆机构 11. 钢丝绳 12. 升降油缸

刮板送料机构、下料辊、排肥螺旋均由液压马达驱动,可通过调速阀灵活调节作业参数。液压系统原理图如图 5 所示,系统压力为 16 MPa。

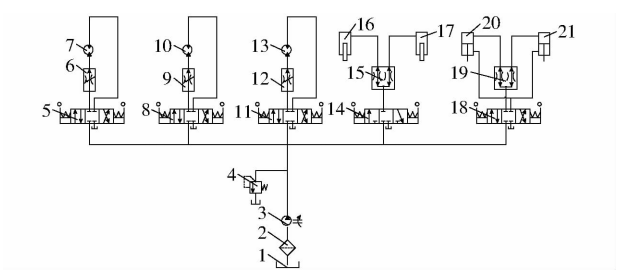


图 5 液压系统原理图

Fig. 5 Schematic of hydraulic system

1. 油箱 2. 过滤器 3. 油泵 4. 溢流阀 5、8、11、14、18. 手动换向阀 6、9、12. 调速阀 7、10、13. 液压马达 15、19. 分流集流阀 16、17、20、21. 液压油缸

条铺机工作时,分别由升降油缸和伸缩油缸调整条铺装置离地高度和两侧排肥口间距,与行间两沟对正。有机肥在刮板送料机构的推送下于车箱后部形成一定的堆积以保证供料充足,由下料辊破碎结块肥料并将肥料自车箱下料口排出至导料板。肥料经分料板分流进入条铺装置两侧伸缩式螺旋排肥器,由螺旋排肥器推送至左右两侧,落入提前开好的沟中。覆土铲将条沟两侧的土刮入条沟内完成覆土。条铺机可在丘陵山地果园进行有机肥对沟施肥或行间双侧条铺;条铺装置也可与通用撒肥车配套,用于马铃薯、棉花、西瓜等多种大田作物对行施基肥或条铺栽培基质。

该机主要技术参数如表 4 所示。

表 4 自走式果园有机肥条铺机主要技术参数

Tab. 4 Main technical parameters of self-propelled orchard organic fertilizer strip-spreader

参数	数值
配套动力/kW	47
果园道路行驶速度/(km·h ⁻¹)	0.6~3.6
条铺作业速度/(km·h ⁻¹)	0.8~1.2
整机尺寸(长×宽×高)/(m×m×m)	5.0×1.8×2.6
肥箱容积/m ³	5.6
液压系统压力/MPa	16
载肥量/kg	≥3 500
条铺间距/m	1.8~2.7
作业效率/(m ² ·h ⁻¹)	≥2 800

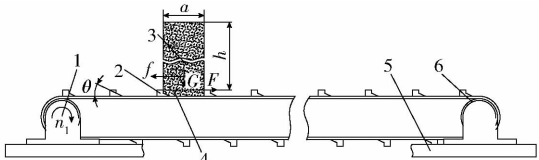
3 关键部件设计

3.1 供料机构设计

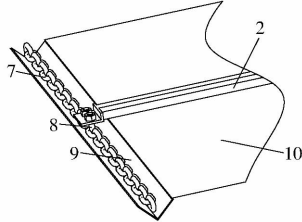
相比秸秆供料,有机肥容重大、粘性强、易结块等特点对供料均匀性、可靠性提出了更高要求。供料机构持续、稳定地推送、排出有机肥的同时,对结块肥料应有一定的破碎作用。

3.1.1 刮板送料机构

刮板送料机构主要由圆环链、链轮、刮板、承料板、V 形滑槽、连接环、链轮传动轴、支架等组成,如图 6 所示。作业时由液压马达通过减速器驱动主动链轮轴带动机构运动,链轮转速 n_1 取 2~20 r/min,刮板线速度 v_1 为 0.01~0.1 m/s。为提高供料均匀性,根据文献[29],将刮板间距 a 减小至 150 mm。



(a) 刮板送料机构结构与物料层受力分析示意图



(b) 圆环链与刮板连接方式示意图

图 6 刮板送料机构

Fig. 6 Scraper feeding mechanism

1. 链轮传动轴 2. 刮板 3. 上层物料 4. 下层物料 5. 支架 6. 链轮 7. 圆环链 8. 连接环 9. V 形滑槽 10. 承料板

车箱中的有机肥根据所处空间可分为上层物料和下层物料,下层物料由刮板带动向车箱后部输送。取相邻刮板间物料分析,上层物料受力有重力 G 、车箱侧壁摩擦力 f 以及下层物料提供的前进摩擦力 F ,上下层物料整体向车箱后部移动的条件为 $F > f$ 。其中

$$F = \mu_0 abh\gamma g \quad (1)$$

$$f = 2 \int_0^h \mu \lambda \gamma gh dh = \mu \lambda \gamma gh^2 \quad (2)$$

式中 μ_0 ——物料间摩擦因数,取 1^[30]

b ——刮板长度,取 1.5 m

h ——上层物料高度

γ ——肥料密度 g ——重力加速度

λ ——侧压系数,取 0.86^[31]

μ ——车箱侧壁与物料间摩擦因数,取 0.86^[30]

由 $F > f$ 得

$$h < \frac{\mu_0 b}{\mu \lambda} \quad (3)$$

经计算,上下层物料连续整体运动的条件是 $h < 2.0$ m。条铺机车箱高度 $h_1 = 1.5$ m,满足物料整体推进条件。

刮板送料机构的输送量 Q_0 为

$$Q_0 = 3\,600bh_1v_1\eta \quad (4)$$

式中 η ——输送效率,取 50%^[31]
 v_1 按链轮转速 7 r/min,取 0.035 m/s,经计算,
 $Q_0 = 141.75 \text{ m}^3/\text{h}$,满足施肥量要求。

原秸秆覆盖机中,受空间限制,刮板送料机构的主动链轮轴驱动部件安装于车箱前部,使得圆环链松边在上。车箱底部的有机肥被镇压后,易在刮板和承料板之间形成结拱层,结拱层厚度增加将导致圆环链过度张紧,增大刮料阻力甚至会引起刮板和链条变形、断裂。为解决这一问题,刮板迎料面设计为由倾斜面和竖直阶梯面组成,倾斜面铲料、清料可避免肥料结拱,减小刮料阻力,竖直阶梯面限制肥料后滑,保证稳定推送肥料至车箱后部。倾斜面倾角 θ 过大将增大刮料阻力,过小时刮板不易铲入肥料,依据文献[32]确定为 25°。

3.1.2 下料辊

下料辊安装于车箱尾部,其结构如图 7a 所示。下料辊辊面上布置有三角锥齿,用于刮拨肥料并破碎较大的结块肥料,各排锥齿对称交错排列,齿平面相对齿辊母线倾斜 $\pm 5^\circ$,可侧向分拨肥料,提高横向出料均匀性,下料辊设计参数见文献[24]。下料辊圆柱面与承料板之间形成车箱下料口,其开度 δ 可调(图 7b)。 δ 过小时,下料辊与刮板干涉且无法满足最大供肥量要求; δ 过大时,肥料不能始终充满车箱下料口甚至在重力作用下直接从车箱下料口流出,导致供肥不均匀、供肥量不受下料辊转速调控,且无法破碎较大的结块肥料。 δ 值根据施肥量由试验确定。

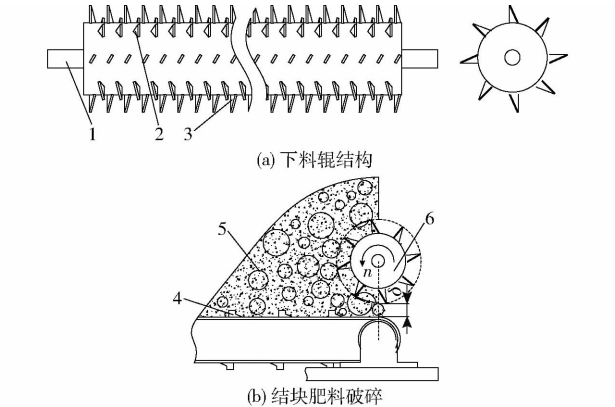


图 7 下料辊及结块肥料破碎示意图
Fig. 7 Schematic of feeding roller and crushing of block fertilizer
1. 齿辊轴 2. 右倾锥齿 3. 左倾锥齿 4. 刮板 5. 结块肥料 6. 下料辊

3.2 条铺装置设计

条铺装置结构如图 8a 所示。左右对称布置两个伸缩式螺旋排肥器。伸缩式螺旋排肥器由排肥螺旋、固定槽、伸缩槽、伸缩油缸等组成。内侧的固定

槽和外侧的伸缩槽相互嵌套构成伸缩式螺旋槽,在伸缩油缸驱动下调整螺旋槽整体长度及左右两侧的排肥口间距。左右两个排肥螺旋轴通过联轴器连接于中间传动轴,由液压马达通过带传动驱动,如图 8b 所示。排肥螺旋工作长度与固定槽等长。肥料被螺旋推送至固定槽末端后,在伸缩槽内适度堆积,受螺旋轴向力作用依靠肥料间推挤自伸缩槽端部的排肥口排出,对沟施肥。

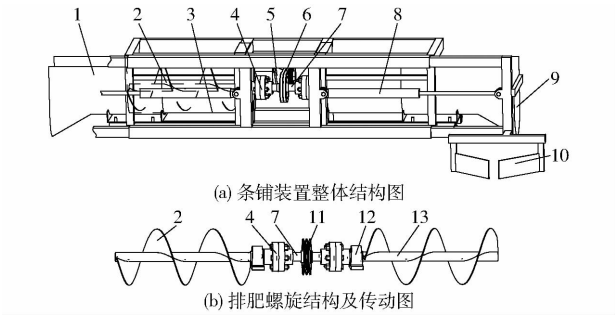


图 8 条铺装置结构及传动示意图
Fig. 8 Structure and transmission diagrams of strip-spreading device

1. 伸缩槽 2. 排肥螺旋 3. 固定槽 4. 联轴器 5. 液压马达
6. 传动带 7. 中间传动轴 8. 伸缩油缸 9. 排肥口 10. 覆土铲
11. 带轮 12. 轴承座 13. 螺旋轴

3.3 排肥螺旋结构设计

依据 GB/T 25246—2010《畜禽粪便还田技术规范》和果园施肥量推荐值^[12],条铺机施肥量设计为 24.60 ~ 45.00 t/hm²。条铺机行进速度按作业速度最大值的 1.05 倍取 0.35 m/s(1.26 km/h)。矮化密植果园行距为 3.0 ~ 4.5 m,施肥量一定时,行距越大,要求螺旋排肥量越高。为保证螺旋排肥量满足不同行距果园至少施肥量 24.60 t/hm²要求,行距取 4.5 m 计算,则单侧螺旋排肥量为 6.97 t/h。对于条铺机最大施肥量 45.00 t/hm²,通过提高排肥螺旋转速来满足要求。

排肥螺旋叶片外径计算式为

$$d = \sqrt{\frac{Q}{47n_2S\psi\gamma\varepsilon}} \tag{5}$$

- 式中 d ——排肥螺旋叶片外径,m
 Q ——螺旋排肥量,取 6.97 t/h
 n_2 ——排肥螺旋转速,为保证螺旋排肥量满足施肥量最小值,计算中暂取较低值 80 r/min
 S ——排肥螺旋螺距,取 $S = d$
 ψ ——物料填充系数,取 0.33^[32]
 ε ——倾斜输送系数,取 1^[32]

为确保螺旋排肥量满足不同密度有机肥排肥量要求,按密度较低的菌渣密度取值,取肥料密度 $\gamma =$

0.476 t/m³。经计算, $S = d = 0.228$ m。螺旋叶片外径和螺距均取 0.25 m^[32]。

3.4 伸缩式螺旋槽设计

为适应不同果园行距和条沟间距, 条铺装置两端排肥螺旋槽设计为可伸缩式结构, 如图 9 所示。

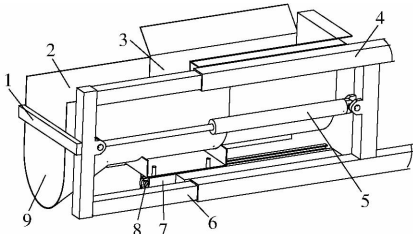


图 9 伸缩式螺旋槽结构示意图

Fig.9 Structure diagram of telescopic screw slot

1. 横杆 2. 伸缩槽 3. 固定槽 4. 机架方管 5. 伸缩油缸 6. 伸缩架 7. 滑轨 8. 滚轮 9. 排肥口

伸缩式螺旋槽主要由固定槽、伸缩槽、滚轮、滑轨及伸缩油缸等组成。固定槽、伸缩槽均为 U 形槽, 伸缩槽外端设排肥口。固定槽固连于机架, 伸缩槽通过滚轮安装在与机架固连的滑轨上, 并与固定槽嵌套, 其外端通过横杆与伸缩架固连。伸缩架与机架方管呈滑套式结构。在伸缩油缸作用下伸缩架可相对机架方管伸缩, 从而带动伸缩槽沿滑轨移动, 调整螺旋槽整体长度及左右两侧的排肥口间距。

根据表 1 中树形和对应的株行距及冠径确定果园有机肥施肥条沟间距。满足农艺要求的条沟间距为

$s = L - D$ (6)

式中 s ——条沟间距, m L ——果园行距, m

D ——果树平均冠径, m

则矮化密植苹果园施肥合理的条沟间距为

$1.8\text{ m} \leq s \leq 2.7\text{ m}$ 。

伸缩槽不伸出, 即与固定槽全段嵌套时机具适应最小条沟间距; 伸出至最大距离时适应最大条沟间距。由此, 单侧伸缩槽最大伸出距离 $d_{\max}$ 为

$$d_{\max} = \frac{s_{\max} - s_{\min}}{2}$$
 (7)

式中 $s_{\max}$ ——最大条沟间距, 取 2.7 m

$s_{\min}$ ——最小条沟间距, 取 1.8 m

经计算, 单侧伸缩槽最大伸出距离 $d_{\max} = 45$ cm。

伸缩槽、固定槽及排肥螺旋长度均取 65 cm, 伸缩槽伸出至最大条铺间距时, 仍有部分槽体与固定槽嵌套, 以保证物料顺畅推送。

4 排肥口结构仿真优化

4.1 仿真设置

伸缩式螺旋槽单侧最大伸出距离为 45 cm, 该段螺旋槽内无螺旋推送。对于流动性较差的牛粪等肥料能否顺利排肥, 伸缩槽排肥口结构十分关键。伸缩槽排肥口结构设计为 JK、ZK、XK 3 种型式。JK 型为 U 形槽底部开矩形口结构, ZK 型为直口形结构, XK 型为斜口形结构。

为优化排肥口结构, 运用 EDEM 2018 分别对 3 种排肥口结构的伸缩式螺旋排肥器中腐熟牛粪排肥情况进行数值模拟, 如图 10 所示。以伸缩槽伸出

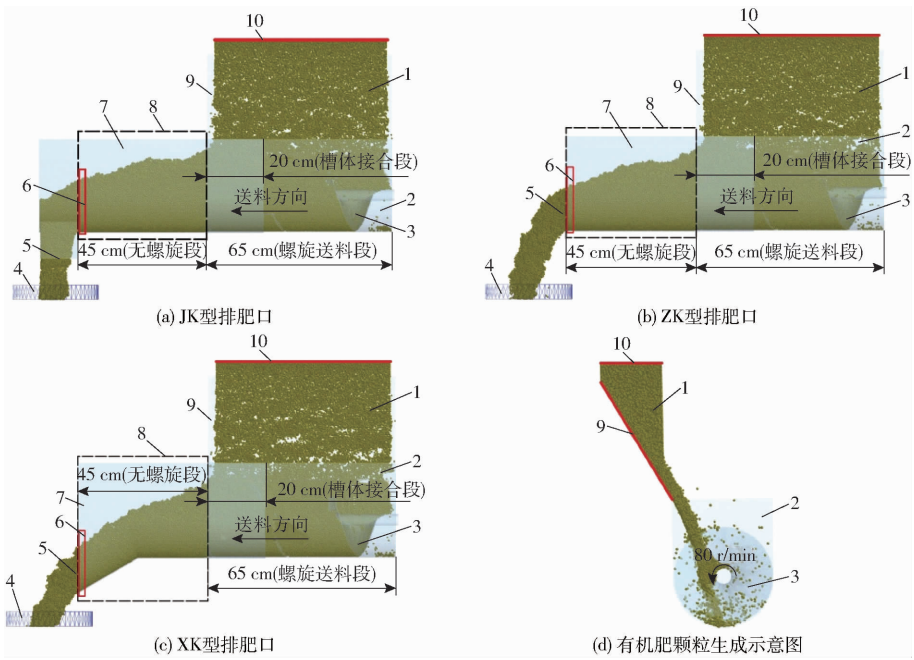


图 10 3 种不同排肥口结构伸缩式螺旋排肥器仿真及有机肥颗粒生成示意图

Fig.10 Schematics of simulation of telescopic spiral fertilizer apparatuses with three different kinds of fertilizing outlet structures and formation of organic fertilizer particles

1. 有机肥颗粒 2. 固定槽 3. 排肥螺旋 4. 质量流量传感器 5. 排肥口 6. 统计网格 1 7. 伸缩槽 8. 统计网格 2 9. 导料板 10. 颗粒工厂

段 45 cm 处肥料轴向流速(水平方向)、无螺旋段肥料堆积质量、排肥流量标准差为指标分别评价 3 种结构下的肥料流动性、抗堵塞性能和排肥均匀性,并分别通过统计网格 1、2(即 EDEM 中 Grid Bin Group 组件)和质量流量传感器监测相应指标。流速高、堆积质量小、排肥流量标准差小则说明排肥口结构优。仿真中伸缩槽伸出距离为最大值 45 cm。仿真参数设置如表 5 所示^[30,33-34]。

4.2 仿真结果分析

图 11 为 3 种排肥口结构下伸缩槽伸出段 45 cm 处肥料轴向流速(图 11a)、无螺旋段肥料堆积质量(图 11b)、排肥流量(图 11c)随时间的变化曲线,表 6 为 14~20 s 区间排肥性能。

由图 11a 可知,排肥口结构为 ZK、XK 型时,肥料轴向流速 6 s 后呈小幅波动的稳定状态;排肥口结构为 JK 型时,开始排肥后伸缩槽中肥料自矩形口直接排出,而随着堆积量的增加,肥料逐渐堆积至端板受阻,故肥料轴向流速有一减小阶段,14 s 后进入稳定状态。结合表 6 可知,稳定排肥后,排肥口结构为 XK 型时,肥料轴向流速最大,JK 型最小。采用 JK 型排肥口时,受端板阻挡和矩形口限制,伸缩槽中肥料轴向流速低,更易堵塞,而采用 XK 型排肥口时肥料流动性最好。

由图 11b、表 6 可知,稳定排肥后,JK 型排肥口对应的无螺旋段肥料堆积量最多,XK 型最少,从另一个角度说明采用 XK 型排肥口肥料流动性最好,不易堵塞。

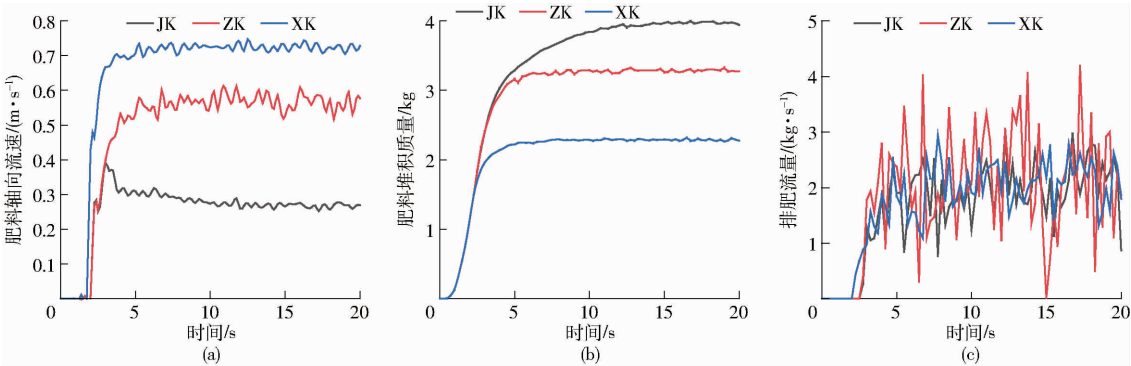


图 11 3 种排肥口结构下肥料轴向流速、肥料堆积质量、排肥流量变化曲线

Fig. 11 Variation curves of fertilizer axial velocity, fertilizer accumulation quality and fertilizer mass flow rate under three types of fertilizing outlet structures

表 6 稳定排肥后 3 种排肥口结构下排肥性能

Tab.6 Fertilizer output performances under three kinds of fertilizing outlet structures from 14 s to 20 s			
排肥口类型	肥料轴向流速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	肥料堆积 质量/kg	排肥流量标准 差/($\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$)
JK	0.27	3.97	0.50
ZK	0.56	3.28	0.99
XK	0.72	2.29	0.40

表 5 伸缩式螺旋排肥器离散元仿真参数		
Tab.5 Discrete element simulation parameters of telescopic spiral fertilizer apparatus		
参数类型	参数	数值/类型
有机肥	颗粒半径/mm	3
	密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	620 *
	剪切模量/Pa	1×10^6
	泊松比	0.25
排肥器	密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	7 850
	剪切模量/Pa	7.94×10^{10}
	泊松比	0.30
接触	有机肥-有机肥碰撞恢复系数	0.6
	有机肥-有机肥静摩擦因数	1.0
	有机肥-有机肥滚动摩擦因数	0.5
	有机肥-排肥器碰撞恢复系数	0.6
	有机肥-排肥器静摩擦因数	0.86
	有机肥-排肥器滚动摩擦因数	0.5
	接触模型	Hertz - Mindlin with JKR
其他	有机肥颗粒间 JKR 表面能/($\text{J} \cdot \text{m}^{-2}$)	1.5
	重力加速度/($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)	9.81
	颗粒工厂尺寸/($\text{mm} \times \text{mm}$)	600×150 (长方形平面)
	颗粒生成速度/($\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$)	2
	排肥螺旋转速/($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)	80 **
	伸缩槽伸出段长度/cm	45
	仿真时间/s	20
	仿真步长/s	$1.279\,06 \times 10^{-5}$

注：* 表示有机肥密度按流动性较差的腐熟牛粪的密度取值；
** 表示排肥螺旋转速按设计计算中最低转速取值。

图 11c 及表 6 表明,3 种排肥口结构下排肥流量均受螺旋送料影响呈“脉动现象”,但排肥口结构为 JK、XK 型时,排肥流量标准差明显小于 ZK 型。肥料在伸缩槽中适度堆积可缓解螺旋式排肥器排肥量波动,提高排肥均匀性。有机肥多以结块垮落的形式自排肥口排出,这可能是采用 ZK 型排肥口时排肥流量波动较大的原因。与 ZK 型相比,XK 型排

肥口的斜槽段对结块垮落具有缓冲、匀料作用。因此,排肥口结构为 XK 型时,在无螺旋段肥料堆积量较少时即可得到最佳的排肥均匀性。

综合比较肥料流动性、抗堵塞性能及排肥均匀性,确定 XK 型排肥口为最优结构。

5 条铺试验

5.1 试验条件

在西北农林科技大学试验站进行了条铺试验,试验材料为杨凌万佳牧业公司生产的腐熟牛粪(密度 620 kg/m³,含水率 58%)和杨凌众兴食用菌公司生产的杏鲍菇菌渣(密度 476 kg/m³,含水率 39%)。

试验因素选取:刮板送料机构的链轮转速、车箱下料口开度、下料辊转速均影响供肥量,但由于刮板送料机构的链轮转速、车箱下料口开度调控精度较低,为提高供肥均匀性和稳定性,选择下料辊转速调控供肥量;排肥螺旋转速对应的排肥量大于供肥量后,不再影响施肥量;车速是施肥量和作业效率的决定性因素,因此,选取车速及下料辊转速作为试验因素。

根据行距为 3.5 m(普遍采用)果园的最大施肥量(45.00 t/hm²),通过预试验确定了刮板送料机构的链轮转速、车箱下料口开度、排肥螺旋转速分别为 7 r/min、4 cm、120 r/min。该条件下调整下料辊转速

可兼顾腐熟牛粪和菌渣最大施肥量,保证螺旋排肥量大于供肥量,且均匀性、稳定性和碎肥效果好。

试验时条铺间距设为 2.7 m。两侧排肥口分别由 5 个盒子收集肥料,按等距取样法,每 2 m 为一个采样点,每组试验共有 10 个采样点。采样后测量单盒肥料质量。单组试验重复 2 次,结果取平均值。试验过程如图 12 所示。除施肥性能外,图 12b 为条铺机或条铺装置(与通用撒肥车配套)用于果园或大田作物栽培基质条铺效果。



(a) 腐熟牛粪条铺试验 (b) 菌渣条铺试验

图 12 有机肥条铺试验

Fig. 12 Organic fertilizer strip spreading test

5.2 试验结果分析

根据单因素试验,以车速(0.8~1.2 km/h)和下料辊转速(20~50 r/min)为影响因素,以单侧每米施肥量、施肥量变异系数为指标,对条铺机分别进行腐熟牛粪和菌渣施肥的二因素三水平正交试验,评价其施肥性能。试验设计与结果如表 7 所示。

表 7 施肥性能正交试验设计与结果

Tab.7 Arrangement and results of orthogonal test on fertilizing performances

试验 序号	因素		腐熟牛粪			菌渣		
	车速 $v/$ (km·h ⁻¹)	下料辊转速 $n/$ (r·min ⁻¹)	单侧每米施肥量 $x/(kg·m^{-1})$	施肥量/ (t·hm ⁻²)	施肥量变异 系数/%	单侧每米施肥量 $y/(kg·m^{-1})$	施肥量/ (t·hm ⁻²)	施肥量变异 系数/%
1	1.0	20	5.14	29.40	15.48	7.59	43.35	5.44
2	0.8	50	9.30	53.10	12.09	13.11	75.00	3.55
3	1.0	35	6.26	35.85	13.56	8.72	49.80	6.57
4	1.0	35	6.47	37.05	12.23	8.68	49.65	4.54
5	1.0	35	6.77	38.70	12.68	8.15	46.65	5.12
6	0.8	20	6.26	35.85	11.15	9.95	56.85	4.60
7	0.8	35	6.98	39.90	13.76	10.96	62.70	3.69
8	1.0	50	7.63	43.65	14.44	10.45	59.70	3.25
9	1.2	35	6.20	35.40	14.83	6.86	39.30	5.80
10	1.0	35	7.24	41.40	12.84	8.62	49.35	5.79
11	1.0	35	7.18	41.10	13.62	8.47	48.45	4.87
12	1.2	20	5.14	29.40	12.49	3.75	21.45	6.45
13	1.2	50	7.06	40.35	12.86	8.36	47.85	2.84

注:施肥量按普遍采用的果园行距 3.5 m 计算得到。

试验结果表明,条铺机腐熟牛粪和菌渣施肥量分别为 29.40~53.10 t/hm²和 21.45~75.00 t/hm²,变异系数分别小于等于 15.48% 和 6.57%。说明设计的条铺装置满足果园有机肥对沟施肥或行间双侧条铺要求。腐熟牛粪含水率高、流动性差,供料连续

性、均匀性差,相同条件下施肥量和施肥均匀性低于菌渣。菌渣含水率低、颗粒间粘结力小,流动性、填充性好,相同条件下供肥量较大、排肥螺旋中实际填充系数较高,从而其施肥量较大。

通过 Design-Expert 10.0 响应面分析得到车速

v 、下料辊转速 n 与腐熟牛粪及菌渣单侧每米施肥量 x 、 y 的一次回归方程

$$x = 0.082\,778n - 3.45v + 7.293\,55 \quad (8)$$

$$y = 0.118\,11n - 12.541\,67v + 17.151\,62 \quad (9)$$

对试验结果及回归方程进行方差分析,如表 8 所示。结果表明:车速和下料辊转速对条铺机腐熟牛粪和菌渣单侧每米施肥量均有极显著影响。腐熟牛粪和菌渣施肥量回归方程模型的 P 值均小于 0.000 1,表明模型极显著,其决定系数分别为 0.871 3 和 0.963 1,失拟项不显著。菌渣施肥量模型拟合性优于腐熟牛粪,主要是由于菌渣流动性较好,而腐熟牛粪含水率较高,多块状,流动性较差。车速及下料辊转速对腐熟牛粪和菌渣单侧每米施肥量的影响如图 13 所示,分析可知,施肥量随车速的增大而减小,这是由于车速增大导致单位长度排肥时间减少;施肥量随下料辊转速的增大而增大,其原

因是下料辊转速增大使得供肥量增大,即单位时间内排肥量增大。

表 8 方差分析
Tab.8 Variance analysis

试验指标	方差来源	平方和	自由度	均方	F	P
x	模型	12.11	2	6.05	33.85	<0.000 1
	v	2.86	1	2.86	15.97	0.002 5
	n	9.25	1	9.25	51.72	<0.000 1
	残差	1.79	10	0.18		
	失拟	1.05	6	0.18	0.95	0.546 6
	误差	0.74	4	0.18		
	总误差	2.53	14			
y	模型	56.58	2	28.29	130.32	<0.000 1
	v	37.75	1	37.75	173.89	<0.000 1
	n	18.83	1	18.83	86.75	<0.000 1
	残差	2.17	10	0.22		
	失拟	1.96	6	0.33	6.07	0.051 2
	误差	0.21	4	0.054		
	总误差	2.38	14			

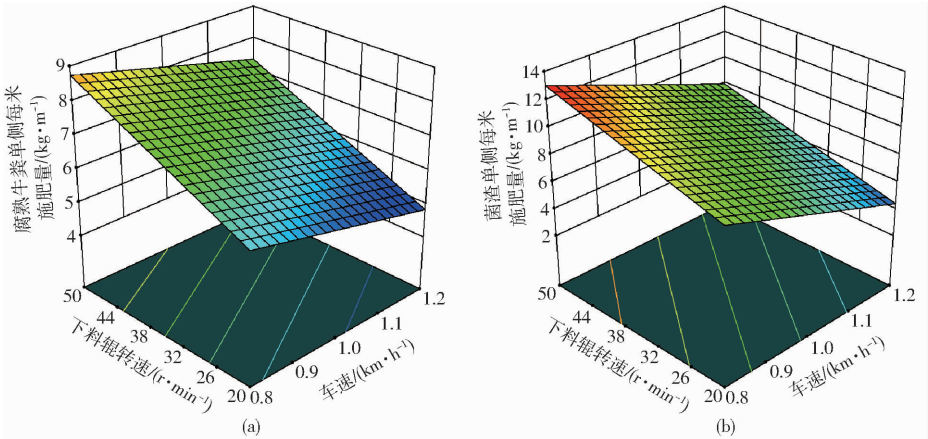


图 13 车速及下料辊转速交互作用对单侧每米施肥量影响的响应曲面
Fig.13 Response surfaces of interaction of driving speed and feeding roller rotation speed on effect of one side fertilization amount per meter

5.3 田间试验

为测试有机肥条铺机在果园环境中的适应性,在杨凌扶特斯苗木有限公司苹果园进行菌渣沟施肥作业。果园行距 3.5 m,条沟间距 2.2 m,车速 1.0 km/h,下料辊转速 40 r/min,施肥量 18.7 kg/m(图 14a)。导料板调整为单侧下料形式,在陕果集团武功有限公司新建猕猴桃园进行羊粪单侧对沟施肥作业。车速 1.2 km/h,下料辊转速 20 r/min,施肥

量为 4.7 kg/m(图 14b)。机具可适应果园作业环境和施肥量要求,作业效果良好。试验中为了检查施肥效果,没有安装覆土铲。

6 结论

(1)基于果园秸秆覆盖机,研制了果园有机肥条铺机,整机由车体和条铺装置组成,肥箱容积 5.6 m³。设计了以伸缩式螺旋排肥器为核心的条铺



图 14 田间作业效果
Fig.14 Field operation effects

装置。条铺间距为 1.8 ~ 2.7 m, 适应行距为 3.0 ~ 4.5 m 的果园有机肥对沟施肥或行间双侧条铺。条铺装置也可与通用撒肥车配套, 用于马铃薯、棉花、西瓜等多种大田作物对行施基肥或条铺栽培基质。

(2) 针对伸缩式排肥器无螺旋段流动性较差的粪肥易堵塞问题, 运用 EDEM 2018 对 3 种不同排肥口结构的伸缩式螺旋排肥器的排肥性能进行了数值

模拟。结果表明, 排肥口结构为斜口形(XK 型)时, 伸缩槽无螺旋段肥料流动性最好, 不易堵塞且排肥均匀。

(3) 条铺试验中, 腐熟牛粪和菌渣的施肥量分别达 29.40 ~ 53.10 t/hm² 和 21.45 ~ 75.00 t/hm², 变异系数分别小于等于 15.48% 和 6.57%。腐熟牛粪、菌渣施肥量模型的决定系数分别为 0.871 3 和 0.963 1。果园实地试验中机具作业效果良好。

参 考 文 献

[1] 邵砾群. 中国苹果矮化密植集约栽培模式技术经济评价研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2015.
SHAO Liqun. Techno-economic evaluation on high-density dwarfing cultivation parttern of apple in China [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2015. (in Chinese)

[2] ZHU Z, JIA Z, PENG L, et al. Life cycle assessment of conventional and organic apple production systems in China[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 201: 156 – 168.

[3] WANG N, JOOST W, ZHANG F S. Towards sustainable intensification of apple production in China—yield gaps and nutrient use efficiency in apple farming systems[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2016, 15(4): 716 – 725.

[4] GE S, ZHU Z, JIANG Y. Long-term impact of fertilization on soil pH and fertility in an apple production system[J]. Journal of Soil Science and Plant Nutrition, 2018, 18(1): 282 – 293.

[5] 唐汉, 王金武, 徐常塑, 等. 化肥减施增效关键技术研究进展分析[J]. 农业机械学报, 2019, 50(4): 1 – 19.
TANG Han, WANG Jinwu, XU Changsu, et al. Research progress analysis on key technology of chemical fertilizer reduction and efficiency increase[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(4): 1 – 19. (in Chinese)

[6] ZHAO Z, YAN S, LIU F, et al. Effects of chemical fertilizer combined with organic manure on Fuji apple quality, yield and soil fertility in apple orchard on the Loess Plateau of China[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2014, 7(2): 45 – 55.

[7] YANG M, WANG S, ZHAO X, et al. Soil properties of apple orchards on China's Loess Plateau[J]. Science of the Total Environment, 2020, 723: 138041.

[8] GE S, ZHU Z, PENG L, et al. Soil nutrient status and leaf nutrient diagnosis in the main apple producing regions in China[J]. Horticultural Plant Journal, 2018, 4(3): 89 – 93.

[9] HOSSEINZADEH M H, GHALAVAND A, BOOJAR M M A, et al. Application of manure and biofertilizer to improve soil properties and increase grain yield, essential oil and ω3 of purslane (*Portulaca oleracea* L.) under drought stress[J]. Soil & Tillage Research, 2021, 205: 104633.

[10] 何丹. 合理施肥与果园土壤质量提升探讨[J]. 南方农业, 2019, 13(12): 192 – 193.
HE Dan. Discussion on rational fertilization and soil quality improvement of orchard[J]. South China Agriculture, 2019, 13(12): 192 – 193. (in Chinese)

[11] WANG Y, ZHU Y, ZHANG S, et al. What could promote farmers to replace chemical fertilizers with organic fertilizers? [J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 199: 882 – 890.

[12] 寇建村, 杨文权, 李尚玮, 等. 我国果园土壤有机质研究进展[J]. 北方园艺, 2016(4): 185 – 191.
KOU Jiancun, YANG Wenquan, LI Shangwei, et al. Research advance on soil organic matter of orchard in China [J]. Northern Hortuculture, 2016(4): 185 – 191. (in Chinese)

[13] 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)

[14] XIANG W J, CHEN J P, FU X H. Influencing factors of grain farmers' application behavior to adopt organic fertilizer from the perspective of heterogeneity—based on the empirical study of 512 farmers in Sichuan Province[C] // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2020 4th International Workshop on Renewable Energy and Development, Sanya, China, 2020: 032030.

[15] 刘双喜, 徐春保, 张宏建, 等. 果园开沟施肥机机架优化设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(增刊1): 113 – 122.
LIU Shuangxi, XU Chunbao, ZHANG Hongjian, et al. Optimization design and experiment for rack of orchard ditching-fertilizer machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(Supp.1): 113 – 122. (in Chinese)

[16] 刘双喜, 徐春保, 张宏建, 等. 果园基肥施肥装备研究现状与发展分析[J]. 农业机械学报, 2020, 51(增刊2): 99 – 108.
LIU Shuangxi, XU Chunbao, ZHANG Hongjian, et al. Research status and development analysis of base-fertilizer application

- equipment of orchard[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(Supp. 2): 99–108. (in Chinese)
- [17] 肖宏儒, 赵映, 丁文芹, 等. 1KS60–35X 型果园双螺旋开沟施肥机刀轴设计与试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(10): 32–39.
XIAO Hongru, ZHAO Ying, DING Wenqin, et al. Design and experiment on blade shaft of 1KS60–35X type orchard double-helix trenching and fertilization machine[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(10): 32–39. (in Chinese)
- [18] 何义川, 汤辉辉, 孟祥金, 等. 2FK–40 型果园开沟施肥机的设计与试验[J]. 农机化研究, 2015, 37(12): 201–204.
HE Yichuan, TANG Zhihui, MENG Xiangjin, et al. Design and experiment of 2FK–40 orchard ditching fertiliser combined machine[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2015, 37(12): 201–204. (in Chinese)
- [19] 夏瑞花, 吴董军, 蒙贺伟. 2FPG–40 型葡萄开沟施肥机的设计与试验[J]. 中国农机化学报, 2018, 39(12): 36–40.
XIA Ruihua, WU Dongjun, MENG Hewei. Design and experiment of 2FPG–40 grape ditching fertilizer combined machine[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2018, 39(12): 36–40. (in Chinese)
- [20] 王向阳, 毕新胜, 王剑. 果园有机肥开沟施肥覆土机的设计与试验[J]. 新疆农机化, 2018(4): 5–7.
WANG Xiangyang, BI Xinsheng, WANG Jian. Design and experiment of orchard organic manure ditching and fertilizing machine[J]. Xinjiang Agricultural Mechanization, 2018(4): 5–7. (in Chinese)
- [21] 张宏建, 徐春保, 刘双喜, 等. 自动调节深度式果园双行开沟施肥机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(1): 62–72.
ZHANG Hongjian, XU Chunbao, LIU Shuangxi, et al. Design and experiment of orchard double row ditching-fertilizer machine with automatic depth adjustment[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(1): 62–72. (in Chinese)
- [22] 郑永军, 江世界, 陈炳太, 等. 丘陵山区果园机械化技术与装备研究进展[J]. 农业机械学报, 2020, 51(11): 1–20.
ZHNG Yongjun, JIANG Shijie, CHEN Bingtai, et al. Review on technology and equipment of mechanization in hilly orchard[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(11): 1–20. (in Chinese)
- [23] 王东阳. 矮化苹果园秸秆基质覆盖机改进与试验研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2017.
WANG Dongyang. Improvement and experimental study on orchard straw mulching machine[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2017. (in Chinese)
- [24] 徐少杰, 朱新华, 王东阳. 果园秸秆覆盖机设计与试验[J]. 中国农业大学学报, 2019, 24(7): 122–130.
XU Shaojie, ZHU Xinhua, WANG Dongyang. Design and experiment on straw mulching machine in arid orchards[J]. Journal of China Agricultural University, 2019, 24(7): 122–130. (in Chinese)
- [25] 董然然. 苹果不同树形对光截获能力和产量品质的差异比较[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2013.
DONG Ranran. Effect of different apple tree shapes on light intercepted ability and yield and fruit quality[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2013. (in Chinese)
- [26] 邓丰产, 马锋旺, 束怀瑞. 美国苹果生产新体系[J]. 西北林学院学报, 2009, 24(4): 114–117.
DENG Fengchan, MA Fengwang, SHU Huairui. Novel apple production system in USA[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2009, 24(4): 114–117. (in Chinese)
- [27] 赵政阳. 中国果树科学与实践——苹果[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 2015.
- [28] 胡炼, 杜攀, 罗锡文, 等. 悬挂式多轮支撑旱地激光平地机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2019, 50(8): 15–21.
HU Lian, DU Pan, LUO Xiwen, et al. Design and experiment on multi-wheel support laser land leveler hanging on tractor[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(8): 15–21. (in Chinese)
- [29] 李文哲, 王庆庆, 崔亮, 等. 农家肥抛撒机抛撒性能分析与试验[J]. 东北农业大学学报, 2017, 48(12): 57–67.
LI Wenzhe, WANG Qingqing, CUI Liang, et al. Performance analysis and experiment of farm manure spreader[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2017, 48(12): 57–67. (in Chinese)
- [30] 袁全春, 徐丽明, 邢洁洁, 等. 机施有机肥散体颗粒离散元模型参数标定[J]. 农业工程学报, 2018, 34(18): 21–27.
YUAN Quanchun, XU Liming, XING Jiejie, et al. Parameter calibration of discrete element model of organic fertilizer particles for mechanical fertilization[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(18): 21–27. (in Chinese)
- [31] 李文哲, 崔亮, 王庆庆, 等. 堆肥抛撒机的研制[J]. 东北农业大学学报, 2017, 48(10): 65–74.
LI Wenzhe, CUI Liang, WANG Qingqing, et al. Design on compost scatters machine[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2017, 48(10): 65–74. (in Chinese)
- [32] 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.
- [33] 罗帅, 袁巧霞, GOUDA Shaban, 等. 基于 JKR 粘结模型的蚯蚓粪基质离散元法参数标定[J]. 农业机械学报, 2018, 49(4): 343–350.
LUO Shuai, YUAN Qiaoxia, GOUDA Shaban, et al. Parameters calibration of vermicomposting nursery substrate with discrete element method based on JKR contact model[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(4): 343–350. (in Chinese)
- [34] 曾智伟, 马旭, 曹秀龙, 等. 离散元法在农业工程研究中的应用现状和展望[J]. 农业机械学报, 2021, 52(4): 1–20.
ZENG Zhiwei, MA Xu, CAO Xiulong, et al. Critical review of applications of discrete element method in agricultural engineering[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(4): 1–20. (in Chinese)