

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.12.009

2BM-4型藜麦覆膜精量播种机设计与试验

王小瑜¹ 康建明¹ 丁汉凤² 彭强吉¹ 张春艳¹ 李娜娜²

(1. 山东省农业机械科学研究院, 济南 250100; 2. 山东省农作物种质资源中心, 济南 250100)

摘要: 针对目前国内缺乏藜麦专用播种机械的现状, 设计了一种藜麦覆膜精量播种机。根据藜麦覆膜精量种植农艺要求, 采用滴灌管浅埋开沟技术, 使用滑刀式开沟器在两侧种行间开出宽 45 mm、深 20 mm 的浅沟, 用于埋设滴灌管; 采用随动仿形覆膜装置将地膜铺设于整平装置整平后的地表上; 设计了翼勺式取种器, 确定了种勺结构和侧孔、容种腔的长度, 以实现藜麦精量取种; 采用滚筒式穴播器在地膜上打穴播种, 采用覆土装置将土壤输送至种行进行覆盖, 完成播种过程。以白藜品种“陇藜 1 号”为试验对象, 采用三因素四水平正交试验设计方法, 试验分析播种机的作业速度、侧孔长度、充种高度对播种性能的影响。结果表明, 当播种机作业速度为 1.0 m/s、侧孔长度为 10 mm、充种高度 140 mm 时, 播种机性能指标最佳, 此时合格指数为 85.4%, 空穴指数为 1.7%, 漏播指数为 5.2%, 重播指数为 9.4%, 播深合格指数为 88.1%, 各项性能指标均达到了设计要求和相关标准要求, 满足藜麦种植的覆膜精量播种要求。

关键词: 藜麦; 覆膜精量播种机; 正交试验

中图分类号: S223.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2020)12-0086-09

OSID:



Design and Test of 2BM-4 Film Mulch Precision Planter for *Quinoa*

WANG Xiaoyu¹ KANG Jianming¹ DING Hanfeng² PENG Qiangji¹ ZHANG Chunyan¹ LI Nana²

(1. Shandong Academy of Agricultural Machinery Science, Ji'nan 250100, China

2. Shandong Center of Crop Germplasm Resources, Ji'nan 250100, China)

Abstract: *Quinoa* as an emerging healthy food of rich nutrition has developed rapidly in recent years, but there is little research about the farming equipment of quinoa. Considering the shortage of research on dedicated sowing machine of quinoa in China, a film mulch precision *quinoa* seed sowing machine was developed. Based on the planting requirements of film-covering precision quinoa, the drip irrigation pipes were buried in the trench (45 mm wide and 20 mm deep) between rows dug by the obtuse furrow opener. A layer of film was laid by the adaptive profiling film covering device on the surface flattened by the leveling device. A wing-spoon seed storage tank was designed with specified structure and sizes of the spoon, side holes and seed chamber. Six drum-type hole sowing devices (with the radius of the seed metering device as 210 mm) were used to dig holes and sow seeds through the film. The whole precision sowing process was completed by covering rows with soil conveyed via the earthing roller. With a white variety of *quinoa* “Long *Quinoa* No. 1” as the test object, using orthogonal test method of three factors and four levels, the influence of operating speed, length of the seed chamber and seed depth on the seeding result was studied. The result indicated that the factors for the qualification of the sowing machine rank from top to down were operating speed, the length of the seed chamber and seed depth. By optimization, when the moving speed of the machine was 1.0 m/s, the length of the side hole was 10 mm and the seed depth was 140 mm, the machine achieved its best performance. Specifically, the machine had a qualified rate (2~4 seeds per hole) of 85.4%, empty rate (no seed) of 1.7%, shortage rate (less than 2 seeds per hole) of 5.2% and repetition rate (over 4 seeds per hole) of 9.4% with rate of qualified depth of 88.1%. All these indicators either matched or exceeded the design requirements and

收稿日期: 2020-07-30 修回日期: 2020-09-10

基金项目: 山东省现代农业产业技术体系杂粮产业创新团队建设(SDAIT-15-01)、山东省农业良种工程项目(2019LZGC017)和山东省农业科学院农业科技创新工程项目(CXGC2016A02)

作者简介: 王小瑜(1982—),女,工程师,主要从事农业机械装备研究,E-mail: wangxiaoyusdut@163.com

通信作者: 康建明(1984—),男,副研究员,博士,主要从事农业机械装备研究,E-mail: kjm531@126.com

related standards, perfectly in line with the growing requirements of quinoa. The research result can provide theoretical reference for film mulch precision quinoa sowing and promote the mechanization of growing quinoa.

Key words: quinoa; mulching precision planter; orthogonal test

0 引言

藜麦(*Quinoa*)是一种保健型粮食作物,因其具有丰富的营养价值和多种健康功效而在我国发展迅速^[1-2]。藜麦的经济效益显著,具有极高的开发和利用价值^[3]。藜麦产量和品质受土壤、气候、水肥条件的影响较为明显^[4-5],覆膜栽培是提高藜麦品质和适种性的有效手段^[6]。但是,目前缺少与之配套的藜麦专用覆膜精量播种机。

我国播种小粒种子多采用槽轮式排种器,存在精度不高、稳定性差、漏播严重等问题^[7-8]。膜上精量穴播省时省力,可一次完成开沟覆膜、膜上打孔播种、覆土镇压等作业,在增强膜下土壤蓄水保温作用的同时可减轻对土壤的扰动,有效避免烧苗等现象^[9]。藜麦播种的株距为 200~300 mm,行距在 400 mm 左右,单穴播种要求在 2~4 粒之间,机械式滚筒穴播器能够满足藜麦覆膜播种的农艺要求,且成穴性好,具有结构简单、制造难度小、作物针对性强等优点。

国外的膜上播种技术主要用于蔬菜种植^[10]。LAWRENCE 等^[11]设计了可改变孔距、孔深的气动点播铺膜机,可用于马铃薯和洋葱种植。我国于 20 世纪 80 年代由陈学庚首创了棉花铺膜播种技术^[9],目前已在棉花、花生等作物中广泛应用,在旱作水稻种植中也有应用^[12-13]。但对于藜麦等特色作物的应用研究较少。天祝藏族自治县农牧业机械技术推广站对 2MBJ-1/4 型精量联合播种机进行了改进,该机能够一次性完成藜麦的整地、滴灌管铺设、覆膜、播种、覆土镇压等作业^[14],但没有设计专用的取种部件。国内藜麦引进时间短,相关研究较少^[15],目前尚未见专用藜麦精量播种机的研究报道。

本文针对藜麦种植农艺要求,以现有膜上成穴播种机为基础,提出藜麦覆膜精量播种技术,设计藜麦覆膜精量播种机,针对藜麦种子特点,重点对取种器进行设计,确定其结构参数,并以播种机的作业速度、取种器侧孔长度和充种高度为试验因素,对播种机的播种性能进行试验研究,寻求最佳参数组合。

1 整机结构与工作过程

1.1 膜下滴灌藜麦种植模式

合理密植是藜麦高产高效栽培的要求,具体根

据地力条件确定最佳密度,一般在土壤肥力中下等田块,基本苗为 12.75 万株/hm²或更高;在土壤肥力中上等的地块,基本苗以不低于 11.25 万株/hm²为宜^[3]。

如图 1 所示,针对不同肥力地块的种植密度要求,设计了 1 膜 2 管 4 行的等行距种植模式,对于肥力中下等田块,行距 D 取 400 mm,对于肥力中上等田块,行距 D 取 350 mm;播种深度为 20~30 mm,株距为 220 mm,单穴播种在 2~4 粒之间。

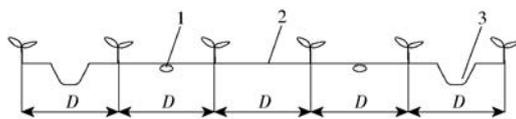


图 1 藜麦覆膜种植模式示意图

Fig. 1 Schematic of planting mode of quinoa covered with film

1. 滴灌管 2. 地膜 3. 膜沟

该种植模式具有以下特点:①将藜麦铺管、铺膜、膜上播种机械作业相结合,实现了一体化覆膜播种,扩大了藜麦的适种范围,且种植行距可根据农艺要求调整,提高了播种质量、降低经济投入。②根据藜麦不同生育阶段对水分的需求,调节土壤含水率,实现藜麦生长的各生育期水分需求的精准控制,可提高藜麦品质,达到节水增产的目的。

1.2 整机结构和工作过程

2BM-4 型藜麦覆膜精量播种机整机结构示意图见图 2,主要由整平装置、种床镇压装置、滴灌管铺设装置、划线装置、随动仿形铺膜装置、膜上成穴播种装置、种行覆土装置、镇压装置等组成,可一次性完成畦面整形镇压、地膜随动仿形铺设、膜上成穴播种、种行覆盖镇压工序。

2BM-4 型藜麦覆膜精量播种机以配套拖拉机为动力,通过三点悬挂装置连接于拖拉机后方,中心对称布置,作业时拖拉机牵引播种机在旋耕整平后的土地上行,畦面整形装置对种床进行清理镇压,膜边开沟圆片开出膜沟,地膜在展膜辊的作用下平铺在地面上,压膜轮将膜边压靠在两侧膜沟内,穴播器在地膜上滚动,完成打膜成穴、播种,随后覆土滚筒将碎土送至种行,完成种行覆土。

1.3 主要技术指标

根据藜麦种植模式需求及谷物播种行业标准,2BM-4 型藜麦覆膜精量播种机主要技术参数如表 1 所示。

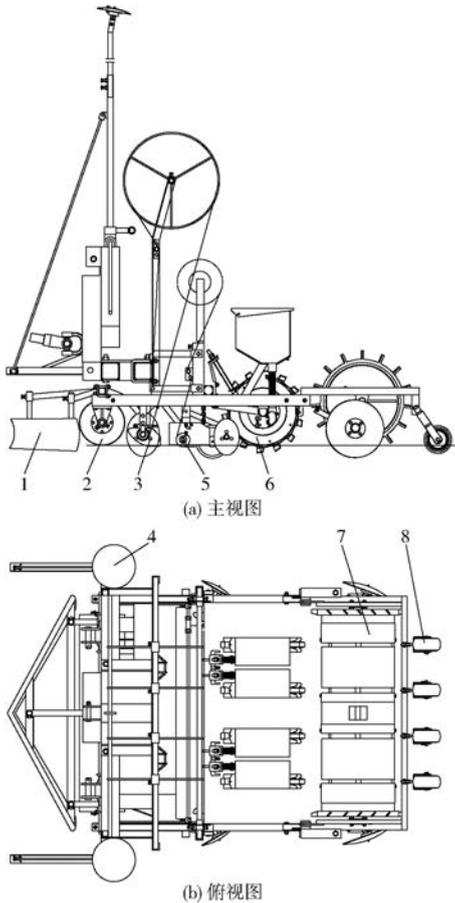


图2 2BM-4型藜麦覆膜精量播种机结构示意图

Fig. 2 Structure diagram of type 2BM-4 film with drip irrigation of *Chenopodium quinoa* planter

1. 整平装置 2. 种床镇压装置 3. 滴灌管铺设装置 4. 划线装置
5. 随动仿形铺膜装置 6. 膜上成穴播种装置 7. 种行覆土装置 8. 镇压装置

表1 主要技术参数

Tab. 1 Main technical parameters

参数	数值
整机尺寸(长×宽×高)/(mm×mm×mm)	2 450×1 884×1 780
作业幅宽/mm	1 600
配套动力/kW	≥22
播种深度/mm	20~30
播种行数/行	4
行距/mm	350/400(可调)
株距/mm	220
作业速度/(km·h ⁻¹)	3~4

2 关键部件设计与参数确定

2.1 滴灌管铺设装置

根据滴灌管浅埋铺设的设计要求,选用挤压入土开沟的滑刀式开沟器,其结构紧凑、作业沟型整洁,具有回土功能^[16],通过改变调节杆的位置,实现开沟深度的调节,开沟器内部的导向轮将滴管铺设于沟底。

滑刀式开沟器对土壤的作用是滑切,影响滑切

作用的结构因素主要有滑刀入土角 Φ 、滑刀刃口角 ρ 和开沟深度 H ^[16]。

2.1.1 滑刀入土角 Φ

滑刀入土角 Φ 为开沟器工作面与水平面之间的夹角,其大小影响开沟器的入土性能和前进阻力。研究表明,滑刀式开沟器的切割阻力随着滑切角的增大而减小^[17], Φ 过小,滑刀滑切作用减弱,但 Φ 过大,会造成翻土,回土效果减弱。土壤视为散颗粒体,滑刀式开沟器前端为垂直斜刃口,工作时,开沟器以刃口楔面劈开土壤并以一定的速度和深度前进,刃口楔面在与土壤接触的每个点上沿法线方向挤压土粒,滑刀式开沟器作业中土壤颗粒在刃口上的受力如图3所示。

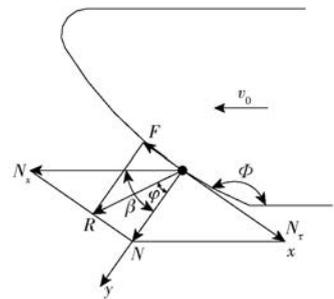


图3 土壤在滑刀式开沟器刃口上的受力分析

Fig. 3 Soil force on edge of a sliding knife trencher

如图3所示,作用在土粒上的力为侧压力 N 和摩擦力 F ,将 N 分解为沿刃口楔面的运动速度方向分力 N_x 及沿楔面方向分力 N_r ,土粒将在 $N_r > F$ 作用下沿表面滑动,即 $N \tan \beta > N \tan \varphi$,其中滑切角 β 为开沟器前进方向与刃口法线方向的夹角, φ 为土粒与滑刀间的摩擦角。所以有 $\beta > \varphi$,又因为 $\Phi - \beta = 90^\circ$,所以保证滑刀对土壤滑切作用的必要条件是 $\Phi > 90^\circ + \varphi$ 。为减小开沟阻力且保证沟土回流,参考前期研究成果和滴灌管浅埋开沟深度要求^[9,18],确定滑刀入土角 Φ 为 145° 。

2.1.2 滑刀刃口角 ρ

土粒被滑刀刃口分离后沿滑刀楔面向后滑移,滑刀刃口角 ρ 增大会造成滑切角 β 减小,进而造成滑刀入土角 Φ 减小,使得滑刀式开沟器的滑切阻力增加。

如图4所示,作用在土粒上的力为侧压力 N' 和摩擦力 F' ,将力 N' 分解为沿刃口楔面的运动速度方向分力 N'_x 及沿楔面方向分力 N'_r ,土粒将在 $N'_r > F'$ 作用下沿表面滑动,即 $N' \tan \beta > N' \tan \varphi$,因为 $\beta + \rho/2 = 90^\circ$,所以土粒在刃口楔面上向后滑移的必要条件是 $\rho < 180^\circ - 2\varphi$ 。根据文献^[19]的研究成果,不论土壤与土壤之间的摩擦角以及土壤与金属之间的摩擦角如何变化,最小切削阻力总是在楔角接近

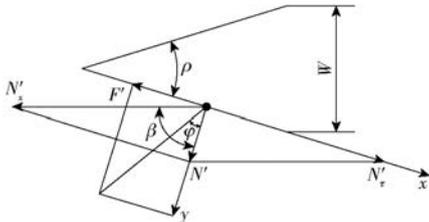


图 4 土壤在滑刀式开沟器楔面上的受力分析
Fig. 4 Force of soil on wedge surface of sliding knife furrow cutter

45°时出现,所以取 $\rho = 45^\circ$ 。

2.1.3 开沟深度 H

开沟深度根据滴灌管浅埋农艺要求确定,还与开沟宽度 W 有关,即

$$W = \left(\frac{H - H_n}{7.245} \right)^{2.73} \quad (1)$$

式中 H_n ——滴灌管覆土深度,mm

根据滴灌管浅埋开沟农艺要求,开沟深度 H 取 20 mm,开沟宽度 W 取 45 mm,此时滴灌管覆土深度 H_n 为 8 mm,满足农艺要求。

2.2 膜上成穴播种装置

膜上成穴播种装置是本机的核心部件,其性能直接影响播种机的作业效果。根据藜麦每穴 2~4 粒的种植农艺要求,采用机械翼勺式滚筒穴播器,主要由壳体、取种器、成穴器等部件组成,其结构如图 5 所示。工作中滚筒式穴播器在地膜上滚动,滚筒内的种子被种子与滚筒之间的摩擦力以及种子相互之间的摩擦力带动,位于滚筒圆周面内侧的取种器随滚筒转动时从种子群中穿过,经过一周的转动完成取种、清种、输种过程,当取种器转动到底部时,种子在自重的作用落入到成穴器内,此时成穴器破膜后插入土壤开出种穴,种子落入土壤后成穴器离开地面并闭合,完成整个播种过程。

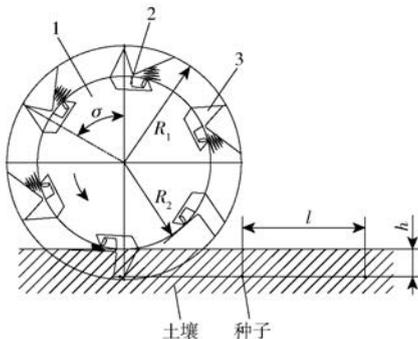


图 5 机械翼勺式滚筒穴播器结构示意图
Fig. 5 Structure diagram of drum-type dibbler
1. 滚筒体 2. 取种器 3. 成穴器

2.2.1 穴播器半径 R_1 和成穴器个数 Z

穴播器半径是穴播器的重要参数,其大小与株距、成穴器个数、播种深度有关。如图 5 所示,理想

状态下穴播器不产生滑移,理论株距 l 为两相邻成穴器之间的夹角 σ 所对应的弧长,则

$$R_1 = \frac{l}{\frac{\sigma}{180^\circ \pi}} = \frac{180l}{360 \frac{Z}{Z} \pi} = \frac{lZ}{2\pi} \quad (2)$$

$$h = R_1 - R_2 \quad (3)$$

式中 R_2 ——成穴器底圆半径,mm

h ——播种深度,mm

根据藜麦播种农艺要求,株距 l 取 220 mm,播种深度 h 取 30 mm,综合考虑成穴器个数和穴播器半径,取 Z 为 6,可得穴播器半径 R_1 为 210 mm,此时株距为 220 mm。

2.2.2 取种器设计

取种器是决定精量播种质量的重要部件,其结构参数在一定程度上决定了单穴播种粒数。本设计采用翼勺式取种器,结构如图 6 所示,工作时,取种器在滚筒底部充种,种勺取种后随着滚筒的转动,种子沿侧孔进入容种腔完成取种过程。

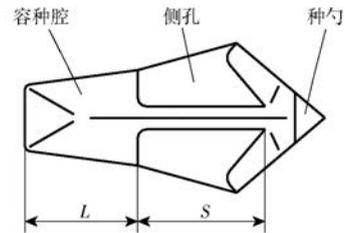


图 6 取种器结构示意图

Fig. 6 Schematic of seed extractor

(1) 种勺设计

藜麦形状的不规则导致取种器的充种过程复杂多变,取种器的种勺形状和尺寸直接影响取种性能。藜麦种子为圆形药片状,按照轴向尺寸表示法对藜麦种子形状和尺寸进行描述^[20],得到藜麦种子的轮廓外形和三轴尺寸如图 7a 所示。根据统计,种子的长度 a 和宽度 b 相差较小,在种子三维描述中将两者按相等处理,将藜麦种子的三轴尺寸进行近似和简化后,其三维外形描述为一圆柱体,如图 7b 所示,圆柱体的直径 d 为 1.93 mm,厚度 t 为 1.13 mm。

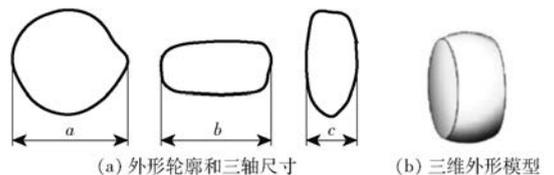


图 7 藜麦种子轮廓外形和三维外形模型

Fig. 7 Quinoa seeds outline shape and three-dimensional shape model

翼勺式取种器的种勺为三角体,经过反复试验,确定了种勺的尺寸和形状,种勺内均可容纳 2~4 粒种子,多余的种子在取种器随穴播器的转动过程中

掉落。因藜麦种子重心位于其对称中心,在充种过程中,藜麦种子将以“平躺”和“竖立”以及其他姿态进入种勺。以“平躺”和“竖立”两种极限姿态为例,种子在种勺内的分布如图8所示。

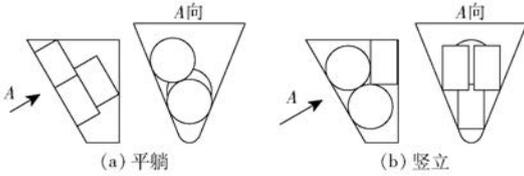


图8 种勺内种子分布示意图

Fig. 8 Schematics of seed distribution in seed scoop

(2) 取种器侧孔长度 S 和容种腔长度 L

取种器侧孔长度 S 是影响取种效果的一个关键因素,影响取种成功率、重播率以及漏播。研究表明,取种器侧孔长度与种子最大直径关系为^[21]

$$S = (1.2 \sim 1.5) d_{\max} \quad (4)$$

$$L = (1.5 \sim 2) d_{\max} \quad (5)$$

式中 d_{\max} ——种子最大直径,mm

取种器的单穴播种粒数随 S 增加而减小,当 S 增加到一定值时,由种勺进入容种腔的种子数量呈相对稳定状态,种子数量不因取种器侧孔长度 S 的增加而继续减小^[22]。本设计中的 S 值通过理论设计结合试验获得,综合考虑藜麦种子的外形特点和在取种器中的运动过程,根据单因素试验和正交试验结果确定侧孔长度 S 为 10 mm,容种腔长度 L 为 10 mm。

2.2.3 穴播器角速度 ω

种子在穴播器滚筒内壁的受力如图9所示,当种子在滚筒内壁上与中心竖直方向的夹角为 η 时,种子所受的力有自身重力 mg 、与滚筒内壁的摩擦力 F_1 、滚筒内壁对种子的支撑力 N_1 以及滚筒转动时所受到的离心力 P ,分析得

$$P = m\omega^2 R_2 \quad (6)$$

$$P + mg\cos\eta = N_1 \quad (7)$$

式中 m ——种子质量,kg

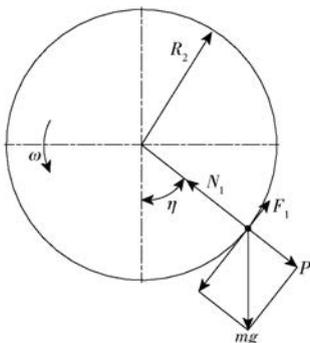


图9 种子在滚筒内受力示意图

Fig. 9 Schematic of force exerted on seeds in roller

在滚筒的水平中心线以上是清种区和护种区,

在这个区域内种子必须脱离滚筒内壁,即 $N = 0$ ^[12],代入式(6)、(7)可得

$$\omega^2 = \frac{-g\cos\eta}{R_2} \quad (8)$$

当 $\eta = \pi$ 时,滚筒的转速为种子始终贴在滚筒壁上的最小转速,代入式(8)求得穴播器底圆直径 R_2 处的最大线速度即整机的最大作业线速度为 1.33 m/s。

2.2.4 穴播器内种子运动状态及取种性能分析

如图10a所示,在正常角速度 ω 范围内,穴播器滚筒内的种子群受滚筒内壁和种子之间的双重摩擦力作用而沿滚筒内壁回转方向向上移动,当升到一定高度时,处于最上面的种子在重力作用下沿种流的斜面滑落回滚到筒底部,然后不停地被滚筒带起,如此循环。图中种子充满的圆周上 A 、 B 两点之间的弧长形成取种过程的充种区。

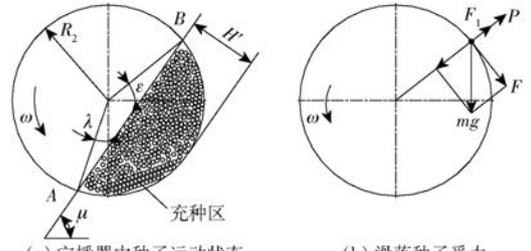


图10 穴播器内种子运动状态和滑落种子受力图

Fig. 10 Motion state of seeds in caveoler and diagram of slipping seeds

图10a中, ε 为滑落位置角,即种子提升最高处 B 与滚筒中心的连线和水平方向的夹角; λ 为取种起始角,即充种区 A 点与滚筒中心连线与竖直方向的夹角; μ 为种子滑落面与水平面的夹角,三者之间存在关系

$$\mu = \varepsilon + \arcsin \frac{R_2 - H'}{R_2} \quad (9)$$

$$\lambda + \mu = 180^\circ - \arcsin \frac{R_2 - H'}{R_2} \quad (10)$$

式中 H' ——充种高度,mm

可以看出 μ 能够反映三者之间的联系,并体现各因素对充种区的影响,下面以 μ 为目标进行分析。如图10b,在机具作业速度为 v 时,结合种子从点 B 滑落时的受力,分析可得种子滑落时应满足条件^[23]

$$mg\sin\varepsilon \geq m \frac{v^2}{R_2} + mg\tan\varphi_1 \cos\varepsilon \quad (11)$$

式中 φ_1 ——种子间摩擦角, ($^\circ$)

则 ε 的临界值为

$$\varepsilon_0 = \arcsin \left(\frac{v^2}{gR_2} \cos\varphi_1 \right) + \varphi_1 \quad (12)$$

将式(12)代入式(9)得 μ 的临界值为

$$\mu_0 = \arcsin \left(\frac{v^2}{gR_2} \cos \varphi_1 \right) + \varphi_1 + \arcsin \frac{R_2 - H'}{R_2} \quad (13)$$

由式(13)可知, μ_0 随 v 、 H' 和 φ_1 的增大而增大, 充种区的大小受这 3 个因素的影响, 即取种质量除与种子本身特性相关外, 还受作业速度和充种高度的影响。在本设计中, 测得藜麦种子的摩擦角 φ_1 为 34° , 在机具最低作业速度为 0.8 m/s 、充种高度 H' 为 140 mm 时, 代入式(13)求得 μ 、 ε 和 λ 的临界值分别为 64.2° 、 51.4° 和 13.0° 。

2.3 种行覆土装置

播种后需用覆土装置进行覆土, 使土壤达到预定的覆盖深度。覆土要求均匀, 不影响种子分布均匀性。导土板螺旋角是影响覆土性能的主要因素, 导土板上的土壤处于临界滑动状态时的受力如图 11 所示。

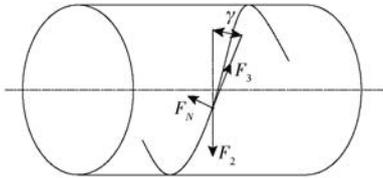


图 11 导土板上土壤的受力分析

Fig. 11 Force analysis of soil on spiral batten

导土板最佳螺旋角 θ 通过在不同土壤条件下试验分析得出, 根据土壤运动特点分析得出^[24]

$$m' \ddot{z} = F_N \cos \gamma - F_3 \sin \gamma \quad (14)$$

$$\text{其中 } \ddot{z} = \frac{F_2}{2m'} (\sin(2\delta) - \tan \delta \sin^2 \gamma) \quad (15)$$

$$F_N = F_2 \sin \gamma \quad (16)$$

$$F_3 = F_N \tan \delta \quad (17)$$

式中 \ddot{z} ——土壤沿着导土板轴向运动加速度, m/s^2

m' ——土壤质量, kg

F_N ——导土板对土壤的支撑力, N

F_2 ——土壤自身重力与其他作用力合力, N

F_3 ——土壤与导土板之间的摩擦力, N

γ ——土壤自身重力与其他作用力合力与螺旋切线方向的夹角, $(^\circ)$

δ ——土壤与导土板的摩擦角, $(^\circ)$

对 \ddot{z} 的 γ 求导, 并求其最大值, 则

$$\theta = \frac{\pi}{4} - \frac{\delta}{2} \quad (18)$$

本设计中, 土壤与导土板的摩擦角 δ 为 30° , 因此 $\theta = 30^\circ$ 。

3 田间试验与结果分析

3.1 试验条件

2020 年 4 月, 在济南市济阳区太平镇山东省农

业科学院综合试验示范基地(济阳)进行了 2BM-4 型藜麦覆膜精量播种机的田间作业性能试验, 试验现场如图 12 所示。试验用地 1.0 hm^2 , 土质为沙壤土, 地表平整, 前茬作物为花生, 收获后空置。试验选用种子为“陇藜 1 号”, 呈小圆药片状, 其物料特性为: 千粒质量 3.17 g , 含水率 11.3% , 平均直径为 1.93 mm , 平均厚度 1.13 mm 。



图 12 样机田间试验

Fig. 12 Prototype field test

3.2 试验方法及指标

试验主要考核 2BM-4 型藜麦覆膜精量播种机的作业效果, 为机具进一步优化与改善提供依据。试验参照 GB/T 6973—2005《单粒(精量)播种机试验方法》进行, 试验完成后, 按照 NT/T 987—2006《铺膜穴播机作业质量》对播种机的作业性能进行测定, 每组试验重复 3 次, 取均值作为试验结果, 每组试验连续记录机具稳定工作时排出的 200 穴种子, 记录每穴的粒数, 计算合格指数、漏播指数、重播指数。各试验指标的计算公式为

$$\text{合格指数 } Q = \frac{n_1}{f} \times 100\% \quad (19)$$

$$\text{空穴指数 } K = \frac{n_2}{f} \times 100\% \quad (20)$$

$$\text{漏播指数 } M = \frac{n_3}{f} \times 100\% \quad (21)$$

$$\text{重播指数 } R = \frac{n_4}{f} \times 100\% \quad (22)$$

$$\text{播深合格指数 } E = \frac{n_5}{f} \times 100\% \quad (23)$$

式中 n_1 ——穴播量为 2~4 粒的总穴数, 个

n_2 ——穴播量为 0 粒的总穴数, 个

n_3 ——穴播量小于 2 粒的总穴数, 个

n_4 ——穴播量大于 4 粒的总穴数, 个

n_5 ——播深为 20~30 mm 的总穴数, 个

f ——总测定穴数, 个

3.3 试验设计及结果分析

3.3.1 试验因素对播种性能的影响

根据 2.2.2 节和 2.2.4 节的设计和分析, 结合

前期研究发现,影响播种机作业性能的主要因素是播种机作业速度、取种器侧孔长度和穴播器充种高度,为明确三者对藜麦播种机作业性能的影响,以合格指数、漏播指数、重播指数为试验指标,设计了三因素四水平正交试验 $L_{16}(4^3)^{[25]}$ 。在前期研究和单因素试验基础上确定了试验因素的水平范围,试验因素和水平如表 2 所示,正交试验方案和结果如表 3 所示(A 、 B 、 C 为因素水平值),对正交试验结果进行极差分析,结果见表 4。

表 2 试验因素水平

Tab. 2 Test factors and coding

水平	因素		
	作业速度/ ($m \cdot s^{-1}$)	侧孔长度/ mm	充种高度/ mm
1	0.8	8	100
2	1.0	10	120
3	1.2	12	140
4	1.4	14	160

表 3 正交试验方案与结果

Tab. 3 Orthogonal test scheme and results

试验号	因素			合格指数	漏播指数	重播指数
	A	B	C	Q/%	M/%	R/%
1	1	1	1	81.1	8.7	10.2
2	1	2	2	84.2	6.9	8.9
3	1	3	3	82.2	7.7	10.1
4	1	4	4	79.3	9.5	11.2
5	2	1	2	83.4	7.0	9.6
6	2	2	1	88.9	6.1	5.0
7	2	3	4	84.7	7.5	7.8
8	2	4	3	86.3	9.6	4.1
9	3	1	3	82.6	5.1	12.3
10	3	2	4	84.6	6.0	9.4
11	3	3	1	80.1	10.7	9.2
12	3	4	2	78.3	9.6	12.1
13	4	1	4	77.3	9.6	13.1
14	4	2	3	78.4	8.1	13.5
15	4	3	2	75.3	10.1	14.6
16	4	4	1	74.6	12.4	13.0

表 4 试验结果极差分析

Tab. 4 Range analysis of test results

指标	合格指数 Q			漏播指数 M			重播指数 R		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C
K_1	326.8	324.4	324.7	32.8	30.4	35.6	40.4	45.2	39.0
K_2	343.3	336.1	321.2	30.2	27.1	35.9	26.5	36.8	43.6
K_3	325.6	322.3	329.5	31.4	38.3	30.5	43.0	40.1	40.0
K_4	305.6	318.5	325.9	40.2	38.8	32.6	41.2	42.0	41.5
极差	37.7	17.6	8.3	10.0	11.7	5.4	16.5	8.4	4.6
较优水平	A_2	B_2	C_3	A_2	B_2	C_3	A_2	B_2	C_1

由表 4 可以看出,影响合格指数、重播指数的主次因素依次为:作业速度、侧孔长度、充种高度,影响漏播指数的主次因素依次为:侧孔长度、作业速度、充种高度。合格指数、漏播指数以及重播指数的较优水平分别为 $A_2B_2C_3$ 、 $A_2B_2C_3$ 、 $A_2B_2C_1$,即 $A_2B_2C_3$ 和 $A_2B_2C_1$ 两个组合的作业效果较好,因此选定这两个组合进行最优方案对比试验。

3.3.2 最优方案确定

为了确定最优参数方案,以合格指数、漏播指数、重播指数、空穴指数为试验指标,进行组合 $A_2B_2C_3$ 和 $A_2B_2C_1$ 的作业效果对比试验,连续统计稳定工作状态下 200 穴种子的播种量,测量播种深度,试验重复 3 次取平均值,计算各指标值,结果如表 5 所示。

表 5 两种因素组合对比试验结果

Tab. 5 Results of contrast experiment

组合	合格指数	漏播指数	重播指数	空穴指数
	Q	M	R	K
$A_2B_2C_3$	85.4	5.2	9.4	1.7
$A_2B_2C_1$	84.9	8.7	6.4	2.5

由表 5 可以看出,相比于组合 $A_2B_2C_3$,组合 $A_2B_2C_1$ 的合格指数、漏播指数和空穴指数较差。结合实际生产要求和极差分析结果,在保证合格指数的同时降低漏播指数比降低重播指数更为有利,因此,选定组合 $A_2B_2C_3$ 为最优方案,即作业速度为 1.0 m/s、侧孔长度为 10 mm、充种高度为 140 mm。

3.3.3 播种深度一致性

在选定的最优方案条件下,连续统计稳定工作状态下 200 穴种子的播种深度,计算播深合格指数,分析播种深度一致性,得到平均播种深度为 26.4 mm,播深合格指数为 88.1%,标准差为 2.51 mm,变异系数为 9.5%,播种深度差异较小,表明播种机播种深度的均匀性和稳定性好。

3.3.4 播种量稳定性

在选定的最优方案条件下,连续统计稳定工作状态下 200 穴种子(每行 50 穴)的播种量,分析播种机各行播种量稳定性和总体播种量稳定性,得到平均播种量为 3.2 粒,各行播种量的稳定性变异系数为 2.74%,总体播种量的稳定性变异系数为

0.86%,播种量差异较小,表明播种机的播种量稳定性好。

4 结论

(1)设计了2BM-4型藜麦覆膜精量播种机,采用滑刀式开沟器将滴灌管浅埋铺设于所开沟内,随动仿形机构将地膜铺设于地表,机械翼勺式滚筒穴播器实现膜上精量播种,可一次性完成平整种床、铺设滴灌管、铺膜、压膜、膜上打孔、播种、膜上覆土、镇压等8道工序,减少了藜麦播种的中间环节,在提高作业效率的同时减少了作业次数、降低了劳动强度。

(2)通过三因素四水平正交试验得出影响播种

机合格指数的主次因素依次为:作业速度、侧孔长度、充种高度。在试验参数范围内适合藜麦精量穴播的最佳参数组合为:作业速度1.0 m/s、侧孔长度10 mm、充种高度140 mm,田间试验表明,在最佳参数组合下,合格指数为85.4%、空穴指数为1.7%、漏播指数为5.2%、重播指数为9.4%,各项性能指标均达到设计要求和相关标准要求,满足藜麦的覆膜精量播种要求。

(3)为了进一步验证播种效果,通过田间试验得到最佳参数组合下的播深合格指数为88.1%、变异系数为9.5%、播种量稳定性变异系数为0.86%,说明播种机的播种深度和播种量的均匀性和稳定性较好,播种质量较高。

参 考 文 献

- [1] 阿图尔·博汗格瓦,任贵兴,叶全宝,等. 藜麦生产与应用[M]. 北京:科学出版社,2014:11.
- [2] 李娜娜,丁汉凤,郝俊杰,等. 藜麦在中国的适应性种植及发展展望[J]. 中国农学通报,2017,33(10):31-36.
LI Nana, DING Hanfeng, HAO Junjie, et al. The adaptive planting and development prospect of quinoa in China[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2017, 33(10):31-36. (in Chinese)
- [3] 吴亚军. 藜麦高产高效栽培技术研究[J]. 种子科技, 2019, 37(5):58, 60.
- [4] FATEMEH R, MOHAMMAD R B, SIGNE H, et al. Physiological characteristics and irrigation water productivity of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) in response to deficit irrigation imposed at different growing stages—a field study from Southern Iran[J]. Journal of Agronomy and Crop Science, 2020, 206(3):390-404.
- [5] 环秀菊,孔治有,张慧,等. 海拔和播期对藜麦主要品质性状的影响[J]. 西南农业学报, 2020, 33(2):258-262.
HUAN Xiuju, KONG Zhiyou, ZHANG Hui, et al. Effect of altitude and sowing date on main quality properties of quinoas[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2020, 33(2):258-262. (in Chinese)
- [6] 魏玉明,黄杰,刘文瑜,等. 藜麦覆膜栽培技术研究与应用[J]. 中国种业, 2018(1):26-29.
- [7] 杜佳伟,杨学军,刘立晶,等. 小粒种子精量播种机研究现状及发展趋势[J]. 农业工程, 2017, 7(6):9-13.
DU Jiawei, YANG Xuejun, LIU Lijing, et al. Research status and development trend of precision seeder for small seeds[J]. Agricultural Engineering, 2017, 7(6):9-13. (in Chinese)
- [8] 邱兆美,张巍朋,赵博,等. 小粒种子电动播种机作业质量监测系统设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2019, 50(4):77-83.
QIU Zhaomei, ZHANG Weipeng, ZHAO Bo, et al. Design and test of operation quality monitoring system for small grain electric seeder[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(4):77-83. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20190409&flag=1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2019.04.009. (in Chinese)
- [9] 陈学庚,胡斌. 旱田地膜覆盖精量播种机的研究与设计[M]. 乌鲁木齐:新疆科学技术出版社,2010.
- [10] 牛琪,王士国,陈学庚. 膜下滴灌水稻穴直播机研究[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(增刊):90-95, 102.
NIU Qi, WANG Shiguo, CHEN Xuegeng. Design of rice planter with plastic film mulched drip irrigation[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(Supp.):90-95, 102. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=2016s014&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.S0.014. (in Chinese)
- [11] LAWRENCE M J, BUCKMASTER D R, LAMONTW J. A pneumatic dibbling machine for plastic mulch[J]. Applied Engineer in Agriculture, 2007, 23(4):419-424.
- [12] 王士国,康建明,颜利民. 2BM-12型旱作水稻铺膜铺管播种机的研制[J]. 中国农机化, 2012, 33(3):74-88.
WANG Shiguo, KANG Jianming, YAN Limin. Design and experiment on 2BM-12 upland rice planter of the development of pipe-laying[J]. Chinese Agricultural Mechanization, 2012, 33(3):74-88. (in Chinese)
- [13] 康建明,王士国,陈学庚. 同步铺膜铺管旱作水稻播种机的设计和试验[J]. 中国农业大学学报, 2016, 21(2):124-131.
KANG Jianming, WANG Shiguo, CHEN Xuegeng. Design and experiment of synchronous laying membrane and irrigation pipe for dry-land rice planter[J]. Journal of China Agricultural University, 2016, 21(2):124-131. (in Chinese)
- [14] 朱雪慧. 机械化助推藜麦产业发展探讨——以天祝藏族自治县为例[J]. 南方农机, 2020, 51(5):4, 6.
- [15] 王晨静,赵习武,陆国权,等. 藜麦特性及开发利用研究进展[J]. 浙江农林大学学报, 2014, 31(2):296-301.
WANG Chenjing, ZHAO Xiwu, LU Guoquan, et al. A review of characteristics and utilization of *Chenopodium quinoa* [J]. Journal of Zhejiang A&F University, 2014, 31(2):296-301. (in Chinese)
- [16] 中国农业机械化科学研究院. 农业机械设计手册(上册)[M]. 北京:中国农业机械科学技术出版社, 2007.

- [17] DAMORA D, PANDEY K P. Evaluation of performance of furrow openers of combined seed and fertilizer drills[J]. Soil and Tillage Research, 1995, 34(1): 127 - 139.
- [18] 顾耀权, 贾洪雷, 郭慧, 等. 滑刀式开沟器设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2013, 44(2): 38 - 42.
GU Yaoquan, JIA Honglei, GUO Hui, et al. Design and experiment of sliding knife furrow opener[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(2): 38 - 42. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20130208&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.02.008. (in Chinese)
- [19] 西涅阿科夫 R H, 潘诺夫 N M. 土壤耕作机械的理论和计算[M]. 北京: 中国农业机械出版社, 1981.
- [20] 马云海. 农业物科学[M]. 北京: 化学工业出版社, 2015.
- [21] 张学军, 杨莹, 周岭. 滚筒式穴播器的重要参数选择与确定[J]. 农业机械学报, 1998, 29(增刊): 63 - 66.
ZHANG Xuejun, YANG Ying, ZHOU Ling. Selection and definitiveness on main parameters of bunch planting cyling[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 1998, 29(Supp.): 63 - 66. (in Chinese)
- [22] 黄钢, 周鹏. 地膜播种机分种器的改进设计与试验[J]. 农业机械学报, 2003, 34(4): 145 - 146, 144.
- [23] 汪遵元, 胡敦俊, 黄聿荣. 滚轮式膜上打孔精量播种机[J]. 农业机械学报, 1988, 19(1): 88 - 95.
WANG Zunyuan, HU Dunjun, HUANG Yurong. The precision roller type hill-drop drill with the punching device on film[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 1988, 19(1): 88 - 95. (in Chinese)
- [24] 李革, 艾力·哈斯木, 康秀生, 等. 地膜播种机螺旋覆土滚筒的参数优化[J]. 农业工程学报, 2003, 19(6): 135 - 138.
LI Ge, AILI · H, KANG Xiousheng, et al. Parametric optimization of the spiral cylinder of a plastic-film mulch seeder[J]. Transactions of the CSAE, 2003, 19(6): 135 - 138. (in Chinese)
- [25] 盖钧镒. 试验统计方法[M]. 北京: 中国农业出版社, 2014.

(上接第 64 页)

- [25] 岑振钊, 岳学军, 王林惠, 等. 基于神经网络 PID 的无人机自适应变量喷雾系统的设计与试验[J]. 华南农业大学学报, 2019, 40(4): 100 - 108.
CEN Zhenzhao, YUE Xuejun, WANG Linhui, et al. Design and test of self-adaptive variable spray system of UAV based on neural network PID[J]. Journal of South China Agricultural University, 2019, 40(4): 100 - 108. (in Chinese)
- [26] DAI A, ZHOU X, LIU X. Design and simulation of a genetically optimized fuzzy immune PID controller for a novel grain dryer[J]. IEEE Access, 2017, 5: 14981 - 14990.
- [27] 龚菲, 王永骥. 基于神经网络的 PID 参数自整定与实时控制[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2002, 30(10): 69 - 71.
GONG Fei, WANG Yongji. PID parameter self-tuning and real-time control based on neural networks[J]. Journal of Huazhong Univ. of Sci. & Tech. (Natural Science Edition), 2002, 30(10): 69 - 71. (in Chinese)
- [28] 刘金琨. 先进 PID 控制及其 MATLAB 仿真[M]. 北京: 电子工业出版社, 2003.
- [29] 陶永华. 新型 PID 控制及其应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002.
- [30] 李砚浓, 李汀兰, 姜艺, 等. 基于 RBF 神经网络自适应 PID 四旋翼飞行器控制[J]. 控制工程, 2016, 23(3): 378 - 382.
LI Yannong, LI Tinglan, JIANG Yi, et al. Adaptive PID control of quad rotor based on RBF neural network[J]. Control Engineering of China, 2016, 23(3): 378 - 382. (in Chinese)
- [31] GB/T 17997—2008 农药喷雾机(器)田间操作规程及喷洒质量评定[S]. 2008.
- [32] 兰玉彬, 张海艳, 文晟, 等. 静电喷雾雾化特性与沉积效果试验分析[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(4): 130 - 139.
LAN Yubin, ZHANG Haiyan, WEN Sheng, et al. Analysis and experiment on atomization characteristics and spray deposition of electrostatic nozzle[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(4): 130 - 139. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180415&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.04.015. (in Chinese)
- [33] 王大帅, 张俊雄, 李伟, 等. 植保无人机动态变量施药系统设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(5): 86 - 93.
WANG Dashuai, ZHANG Junxiong, LI Wei, et al. Design and test of dynamic variable spraying system of plant protection UAV[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(5): 86 - 93. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170510&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.05.010. (in Chinese)
- [34] 程焯焯, 祁力钧, 吴亚垒, 等. 矮化密植果园摇摆变量喷雾机参数响应面法优化[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(增刊): 22 - 29.
CHENG Zhenzhen, QI Lijun, WU Yalei, et al. Parameter optimization on swing variable sprayer of orchard based on RSM[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(Supp.): 22 - 29. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2017s004&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.S0.004. (in Chinese)