

DOI: 10.13733/j.jcam.issn.2095-5553.2024.03.003

张晋, 薛亚光, 刘旭杰, 等. 2BFGK-12型稻茬麦集秸旋耕施肥播种机设计与试验[J]. 中国农机化学报, 2024, 45(3): 14-23

Zhang Jin, Xue Yaguang, Liu Xujie, et al. Design and experiment of gather straws rotary tillage fertilizer planter in 2BFGK-12 for wheat after rice seeder [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2024, 45(3): 14-23

2BFGK-12型稻茬麦集秸旋耕施肥播种机 设计与试验*

张晋^{1,2}, 薛亚光¹, 刘旭杰¹, 单海勇¹, 吴崇友², 刘建¹

(1. 江苏沿江地区农业科学研究所/南通市循环农业重点实验室, 江苏南通, 226012;
2. 农业农村部南京农业机械化研究所, 南京市, 210014)

摘要:针对长江中下游稻麦轮作区小麦播种作业时,存在抢季节耕种农机配套性差、土壤黏重以及秸秆还田难等问题,创制“稻茬麦秸秆行间集覆还田宽窄行种植”技术模式,此模式具有行间集秸、条带旋耕、集中施肥、洁区播种以及对行镇压等技术特征,通过建立秸秆行间集覆运动的力学模型,设计绞龙式秸秆行间集秸装置、开沟旋耕一体式装置、集中施肥装置、浮动覆土板以及对行镇压器等关键部件,研制一种稻茬麦洁区旋耕施肥播种机。田间试验结果表明,秸秆行间集覆还田与宽窄行种植结合有效提高稻茬麦种床整地质量,洁区洁净度 87.69%,小麦窄行平均行距为 148 mm,宽行行距平均为 304 mm,行距变异系数为 5.36%,平均播深为 33 mm,播深合格率为 95.76%,晾籽率为 0.98%,碎土率为 86.01%。施肥方式为耕前集中施肥,平均施肥深度为 65 mm,施肥深度合格率为 94.63%,均满足国家标准。厢沟平均深度为 175 mm,沟面宽度为 198 mm,满足排水要求。试验田实际产量为 8 059.2 kg/hm²,高出平均产量 20%以上,油耗较对比机型降低 31.24%。为稻茬麦绿色低碳保护性耕作技术模式提供农机支撑,促进农机农艺高效快速融合。

关键词:稻茬麦;洁区播种机;稻秸还田;机艺融合

中图分类号:S223.2+4 **文献标识码:**A **文章编号:**2095-5553(2024)03-0014-10

Design and experiment of gather straws rotary tillage fertilizer planter in 2BFGK-12 for wheat after rice seeder

Zhang Jin^{1,2}, Xue Yaguang¹, Liu Xujie¹, Shan Haiyong¹, Wu Chongyou², Liu Jian¹

(1. Jiangsu Yanjiang Institute of Agricultural Sciences/Nantong Key Laboratory of Circular Agriculture, Nantong, 226012, China; 2. Nanjing Institute of Agricultural Mechanization, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Nanjing, 210014, China)

Abstract: In response to the problems of poor supporting agricultural machinery, heavy sticky soil and difficulty in returning straw to the field during wheat sowing in rice-wheat rotation area of the middle and lower reaches of the Yangtze River, the technical model of “inter-row straw mulching and returning to the field in wide and narrow rows” was developed, which has the technical features of inter-row straw collection, strip rototilling, concentrated fertilizer application, clean area sowing and counter-row suppression, etc. By establishing the mechanical model of interrow straw covering movement, designing the key components such as auger type straw row covering device, ditching rotary tillage integrated device, centralized fertilization device, floating soil cover plate and row roller, a kind of rotary tillage fertilization seeder in wheat cleaning area after rice stubble was developed. The results of the field trial showed that the combination of straw inter-row mulching and wide and narrow row planting effectively solved the problems of poor quality of the rice stubble wheat seed bed. The cleanliness of the area was 87.69%, the average row spacing was

收稿日期:2022年10月16日 修回日期:2023年11月16日

* 基金项目:江苏省现代农机装备与技术示范推广项目(NJ2020-04);江苏省科技项目(BE2020388);江苏沿江地区农业科学研究所青年科技基金(YJ(2022)006)

第一作者:张晋,男,1995年生,山东日照人,博士研究生,研究实习员;研究方向为农业机械化工程。E-mail: zhangjin@jaas.ac.cn

通讯作者:刘建,男,1965年生,江苏南通人,硕士,研究员;研究方向为作物栽培学与耕作学。E-mail: ntliuj@sina.com

148 mm in the narrow rows of wheat and 304 mm in the wide rows, with a coefficient of variation of 5.36%, the average sowing depth was 33 mm, the sowing depth pass rate was 95.76%, the seed drying rate was 0.98% and the broken soil rate was 86.01%. Fertiliser application was concentrated before ploughing, with an average depth of 65 mm and a pass rate of 94.63%, all of them met the national standards. The average depth of the furrow was 175 mm and the width of the furrow surface was 198 mm, which met the drainage requirements. The actual yield of the trial field was 8 059.2 kg/hm², more than 20% higher than the average yield, 31.24% reduction in fuel consumption compared to full width seeders. The study provides agricultural machinery support for the green and low-carbon conservation tillage technology model of rice stubble wheat, and promotes the efficient and rapid integration of agricultural machinery and agronomy.

Keywords: wheat after rice; clean area planter; rice straw returning; combination of farm machinery with agronomy

0 引言

小麦作为我国的两大口粮之一,自给率长期超过90%^[1]。长江中下游地区属黄淮冬麦区南片是我国商品小麦重要产区,稻麦两熟种植模式是该地区主要种植制度^[2]。近年来,水稻收获迟、腾茬晚以及抢季节耕种农机配套性差等问题愈发突出^[3]。现行的以“犁—旋”方式耕作对土壤墒情要求较高且机械能耗较大,而旋耕方式难以实现大量稻秸高质量还田并容易导致小麦晾种架种^[4, 5]。由于缺乏适应性强的配套机具,加之国内原油价格持续高位震荡等原因,稻茬麦种植成本激增,农民种植积极性不高,导致冬小麦经济效益受到冲击。

为解决稻茬麦播种存在的抢季节耕种农机配套性差、土壤黏重以及秸秆难以还田等问题,研究人员从种植模式到机具设计开展了大量工作。在现有的稻茬小麦典型的种植模式中,前茬水稻秸秆的处理多采用旋耕翻埋或沟埋的还田方式^[6],受水稻秸秆量不断增大,前茬收获机具秸秆抛撒不均匀等因素的制约,翻埋还田会造成更大的土壤扰动以及更高的能源消耗,不利于实现降本增效的绿色生产目标。研究发现,覆盖还田与翻埋还田均可有效提高作物产量,改善土壤的理化性质^[7-11],基于此,提出宽窄行的种植模式^[12-16]。为配套稻麦轮作地区一年两熟的耕作制度,创制了交互种植保护性耕作技术模式^[17-19],该模式以“行间集秸、条带旋耕、集中施肥、洁区播种、对行镇压”为技术特征,形成以宽行(300 mm)秸秆集覆、窄行(150 mm)洁区播种为核心的适合稻茬田小麦宽窄行种植作业模式。

现有的机具大多针对既有的种植模式,采取播前埋茬的技术路线,秸秆埋覆效果差^[20],采用双轴旋耕的方式^[21]以及秸秆分流覆盖还田的方式^[22, 23]可有效解决秸秆埋覆效果差的问题,但功耗也会增加。“洁区播种”^[24]概念的提出,为解决稻茬麦高质高效种植提供了思路。本文基于宽窄行种植模式,设计研制一种稻茬麦洁区旋耕施肥播种机,满足小麦宽窄行种植作业模式的农艺要求,对提高稻茬麦种床制备质量、提高晚播小麦出苗率,促进稻茬小麦增产增收,保障国家粮食安全、推动农业

绿色发展和现代农业建设均具有重要意义。

1 整机结构与工作原理

稻茬麦宽行交互保护性耕作可有效协调粮食安全、秸秆禁焚、保肥保水三者之间的矛盾,配套相应作业机械可实现耕地增效与环境友好的目标^[25]。根据小麦宽窄行种植模式的农艺要求,结合现有的研究成果,提出如下设计思路:(1)采取宽行(300 mm)秸秆行间集覆、窄行(150 mm)洁区条播(双行)的播种方式,实现小麦行距300 mm与150 mm交互种植,有效改善冬季因地面积温造成的小麦出苗率低,分蘖性差的问题,减少作物生长过程中荫蔽产生的影响^[26, 27];(2)选用耕前秸秆行间集覆的作业顺序,形成清洁的播种行,减少前茬作物秸秆对小麦播种产生的负面效果,提高种床制备质量;(3)只针对播种行进行旋耕碎土、集中施肥作业,降低耕作层土体扰动,减少作业功耗;(4)适配南方稻茬麦农艺要求,旋耕碎土同时对未耕地进行开沟作业,可减少机具下地次数,同时在未耕地进行开沟作业可保证排水沟的沟壁强度,降低因后期雨水增多导致的排水沟坍塌阻塞的风险;(5)采用双行种植的作业方案,旋耕刀棍后安置挡板,防止出现种子因土壤的无序碰撞引起的漏播和均匀度下降的现象,播后进行对行镇压,以保证播种作业深度。作业模式如图1所示。

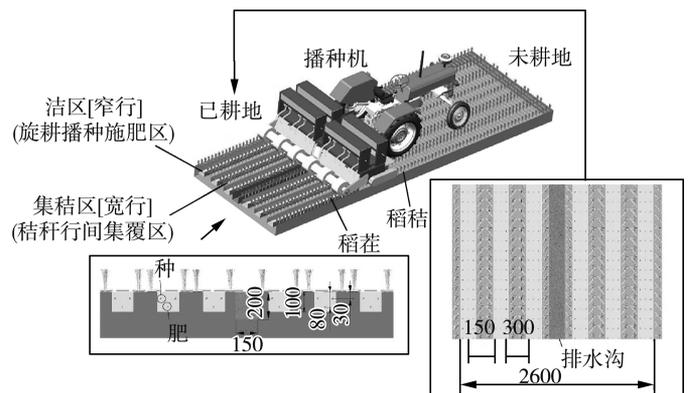


图1 宽窄行种植行间集秸作业模式效果图

Fig. 1 Effect diagram of straw collection mode between wide and narrow row planting

1.1 整机结构

稻茬麦集秸旋耕施肥播种机结构如图2所示,主要由三点悬挂装置、行间集秸装置、施肥装置、条带旋耕装置、开沟装置、播种装置、挡土板及镇压轮等部件组成。行间集秸装置安置在机具最前端,对应洁区播种行呈阵列分布,左右均布对称安装,肥料使用排肥板输送,可保证肥料均匀分布于播种行,旋耕刀分布、种肥排出装置以及镇压轮设计均与集秸装置相匹配,旋耕刀棍中设圆盘开沟器,并在后置整形器以保证沟面光滑平整。该技术模式下机具的主要参数如表1所示。

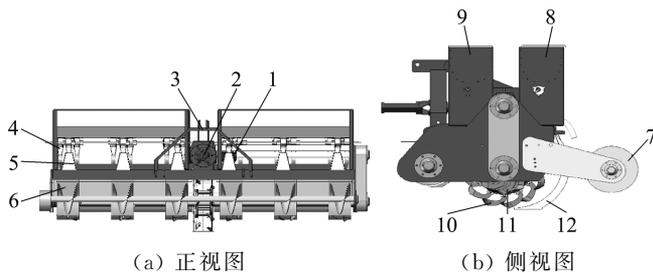


图2 稻茬麦洁区旋耕施肥播种机结构图

Fig. 2 Structure schematics of wheat planter for rotary tillage and fertilization in clean area of rice stubble field

1. 步进电机 2. 万向轴 3. 悬挂架 4. 播种装置 5. 施肥装置
6. 行间集秸装置 7. 镇压轮 8. 种箱 9. 肥箱
10. 开沟器 11. 条带旋耕装置 12. 整形器

表1 主要技术参数

Tab. 1 Technical parameters of machines

参数	数值/型式
结构型式	悬挂式
整机外形尺寸(长×宽×高) (mm×mm×mm)	1 800×3 540×1 530
播种作业幅宽/mm	2 600
行距/mm	150(窄行)/300(宽行)
工作行数	12
排种器数量/个	12
排肥器型式	外槽轮式
种/肥排量调节方式	智能化无级调速
镇压器型式	滚筒式(条带型)

1.2 工作原理

稻茬麦洁区旋耕施肥播种机通过三点悬挂与拖拉机联接,作业时,拖拉机带动机具前进作业,拖拉机通过动力输出轴向高速齿轮箱输入540 r/min的额定转速,经传动系统带动条带旋耕与开沟刀棍、绞龙转动。

作业前,调节拖拉机悬挂限位拉杆使机具水平,通过拖拉机液压升降系统将行间集秸装置与地面接触,并与地面平行。检查种肥排出装置的连接状态,保证种肥排出装置转轴与步进电机联动,随拖拉机驱动轮转速调节种肥排出速率。观察条带旋耕与开沟装置的位置,调至符合作业要求的深度。

作业时,行间集秸装置将窄行内的稻茬与稻秸向宽行轴向输送,使稻茬与稻秸集覆于宽行,在窄行形成洁区;排肥装置将底肥集中施到播种行内,由旋耕刀旋耕入土,并将土壤细碎,完成种床制备;安置在刀辊上的旋耕开沟装置开出排水沟,便于后期农田排涝;旋耕细碎的土壤经挡板二次粉碎,均匀抛洒在播种行,排种装置排出的种子与挡板下方的土壤充分混合,埋入洁区中;通过镇压轮实现镇压平整,完成洁区宽窄行播种作业。

2 关键部件设计

2.1 行间集秸装置

秸秆行间集秸装置主要有绞龙叶片、绞龙轴、上挡板、后挡板和首末端轴承等组成,其结构如图3所示。根据宽窄行种植的农艺要求(播种窄行间距150 mm),结合行间集秸装置的工作环境(稻秸为运输物料、与未耕地表接触、地表有留茬),参照螺旋绞龙设计理论^[28],将绞龙设置为分段式(带式螺旋叶片),左右各安置三段,每段200 mm间隔250 mm,中间间隔400 mm,分别在绞龙上方以及后下方安置挡板,如图3所示。采用侧边链条传动的方案,另一端采用轴承安装在侧板上。进行秸秆集覆作业时,散落在地表上的稻秸与稻茬由绞龙与后挡板之间的缝隙进入行间集秸装置,绞龙在动力驱动下进行旋耕作业,将稻秸与稻茬输送至一侧,随着机具的前进,形成一条整洁的播种作业区,宽行中形成秸秆集覆区。

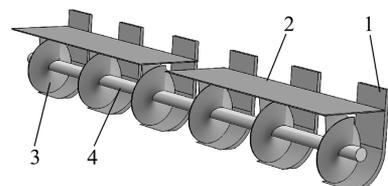


图3 行间集秸装置

Fig. 3 Straw collecting device between rows

1. 后挡板 2. 上挡板 3. 绞龙叶片 4. 绞龙轴

为确定行间集秸装置合理的参数范围,选取秸秆为研究对象,任取绞龙叶片上一点对其进行受力分析,如图4所示。

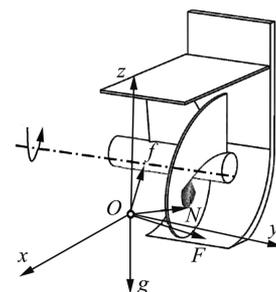


图4 秸秆受力示意图

Fig. 4 Schematic diagram of rice straw stress

不考虑秸秆行间集覆作业时受空气阻力影响,稻

秸在任意时刻所受的合力 F 为自身重力 G 、绞龙叶片的支持力 N 和摩擦力 f 。本机具中, 绞龙叶片起到将稻秸集覆到宽行中的作用, 因此, 稻秸的轴向运动时设计绞龙装置的关键, 在 xOy 平面内对稻秸进行受力分析, 绞龙叶片是螺旋曲面, 转动时稻秸从下方进入, 在任一半径 r 处, 绞龙叶片对稻秸施加法向推力 N' , 该推力和稻秸与叶片间的摩擦力 f' 合成为力 F' , 对该合力进行分解, 其中的径向分力 F_y' 推动稻秸向前运动(横向移动), 而合力的另一分力 F_x' 与机具前进方向一致, 该分力促使稻秸离开叶片, 由于 F_x' 和 F_y' 的共同作用, 使得稻秸不会同螺旋叶片一起旋转, 受绞龙叶片施加的法向推力、轴向分力, 使得稻秸只会随绞龙叶片做轴向方向的运动。稻秸受力如图5所示, 其中 α 为螺旋面升角。

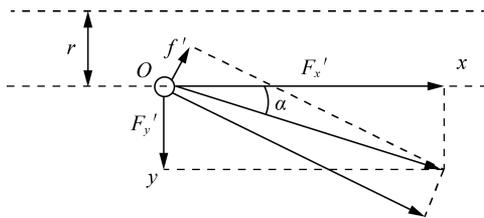


图5 稻秸受力分析图

Fig. 5 Stress analysis diagram of rice straw

输送量是秸秆行间集覆装置的关键技术参数, 本文根据实际生产需求, 对输送量进行计算, 如式(1)所示。

$$Q = \frac{C_s}{b \cdot v} \quad (1)$$

式中: Q ——输送量(表征行间集覆的秸秆量), t/h;

C_s ——可收集量(表征作物收获后剩余可集覆秸秆量), kg/hm²;

b ——洁区工作幅宽(表征洁区实际工作幅宽, 本机具取实际作业幅宽 1/3), m;

v ——机具作业速度, km/h。

本技术模式采用的秸秆行间集覆作业要求秸秆粉碎还田, 同时还应保证割茬高度在合理范围内, 不影响后续的播种作业, 因此在收获机械方面选取半喂入收割机, 还可有效降低收获后水稻的含杂率。行间集秸装置主要功能是实现稻秸的行间集覆, 其作业对象是水稻收获后的秸秆, 水稻秸秆的产量是设计行间集秸装置的重要参考, 研究表明相同留茬高度下不同种植方式对秸秆的可收集系数影响较大^[29]。江苏省常年水稻机插率超过 70%, 平均产量连续 10 年超过 8 250 kg/hm², 因此本文的前茬作物研究对象选用具有代表性的机插秧水稻, 为不影响播种作业, 按照留茬高度 20 cm 选取, 在此条件下, 稻秸总产量为 7 908.46 kg/hm², 水稻秸秆可收集量占秸秆总量的比例为 65.8%, 可收集量 C_s 为 5 203.76 kg/hm²。

依据农艺要求设计的工作幅宽为 2.6 m, 其中洁区为 1.2 m, 占工作幅宽 1/3。小麦播种机作业速度一般为 3~3.5 km/h^[30], 本文选取 3 km/h, 播种速度约为 0.78 hm²/h, 因此输送量 Q 为 2.258 53 t/h。

在实际作业过程中, 忽略秸秆受到轴向阻滞影响, 输送量的计算公式如式(2)所示。

$$Q = 47D^2 \cdot S \cdot n \cdot \varphi \cdot \lambda \cdot \varepsilon \quad (2)$$

式中: D ——绞龙叶片直径, mm;

S ——螺距, mm;

n ——转速, r/min;

φ ——填充系数;

λ ——物料的单位容积质量, t/m³;

ε ——倾斜输送系数。

根据《非标准机械设备设计手册》中对绞龙叶片直径的相关设计公式

$$D = K \cdot \left(\frac{Q}{\varphi \cdot \lambda \cdot \varepsilon} \right)^{\frac{2}{5}} \quad (3)$$

式中: K ——物料特性参数。

根据实际生产需要和《非标准机械设备设计手册》^[31]中的要求, 秸秆的物料特性参数选取为 0.049, 装置的倾斜角度影响填充系数 φ 和倾斜输送系数 ε 。本文设计的是水平式绞龙装置, 倾斜角度为 0°, 故填充系数 φ 和倾斜输送系数 ε 分别为 1.0 和 0.5, 水稻秸秆的容积质量 λ 为 0.035 t/m³^[32], 计算后绞龙装置的直径 D 为 0.34 m, 为满足实际工作需要, 根据标准直径^[31]选取 D 为 0.40 m。

绞龙装置的转速设计参照螺旋输送机的设计公式^[33], 如式(4)所示。

$$n = \frac{30}{\pi} \left(1 + \frac{\tan \gamma_0}{\tan \alpha} \right) \sqrt{\frac{\sin(\alpha + \beta) g}{f_1 R_1 \cos(\alpha + \gamma_0 + \beta)}} \quad (4)$$

式中: α ——绞龙叶片的螺旋角, 15°;

β ——稻秸与绞龙叶片表面之间的摩擦角, 30°;

γ_0 ——稻秸运动绝对速度与水平线间的夹角, 0°;

g ——重力加速度, 9.82 m/s²;

f_1 ——稻秸与外壳之间的摩擦系数, 0.6^[34];

R_1 ——稻秸距离轴心的平均直径, 0.2 m。

经计算 n 为 86.38 r/min, 实际生产中, 转速要根据输送量 Q 进行调整, 由经验公式^[35]给出, 如式(5)所示。

$$n_{\max} = A / \sqrt{D} \quad (5)$$

式中: A ——稻秸的综合系数, 50。

$$n \leq n_{\max} \quad (6)$$

可得 n_{\max} 为 31.62 r/min, 取 n 为 30 r/min。

螺距选取根据式(7)选择。

$$S = K_1 D \quad (7)$$

式中： K_1 ——直径与绞龙叶片螺距的比例系数，取0.8~1.0。

计算得螺距 S 为 0.32 m。

绞龙轴直径

$$d = (0.2 \sim 0.35)D \quad (8)$$

其他参数根据经验测得，绞龙装置主要设计参数如表 2 所示。

表 2 绞龙装置主要设计参数

Tab. 2 Main design parameters of auger device

参数	数值
运输距离/mm	200
绞龙直径/mm	400
轴径/mm	100
螺距/mm	320
叶片厚度/mm	3
转速/(r·min ⁻¹)	30

2.2 排肥装置

排肥装置(图 6)包括肥料箱、排肥器、拨肥轴、排肥板。排肥轴与步进电机相连,可根据实际作业速度调整实现转速与作业速度匹配,施肥量根据地力水平、气候条件、品种特性和目标产量设计为 150~1 500 kg/hm²。施肥方式为均匀抛洒在洁区,集中施肥到播种行内。

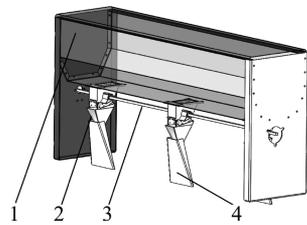


图 6 排肥装置

Fig. 6 Fertilizer discharge device

1. 肥料箱 2. 排肥器 3. 排肥轴 4. 排肥板

2.3 旋耕碎土、开沟装置

宽窄行种植技术模式的另一核心是实现条带旋耕,要保证洁区中的种床达到播种要求,同时在湿烂田中需要设置开沟装置,便于农田排水。设计的旋耕、开沟装置(图 7)主要由开沟刀盘、旋耕刀、刀轴组成。为防止旋耕抛土造成前置肥料口堵塞,实现将洁区上肥料深施,设计旋耕方式为正转。由于内部空间有限,且作业时土壤含水率较高,原在旋耕刀两侧安置挡土板的方案被取消,且经过实地试验,安置挡土板极易导致土壤黏附,降低了碎土效果。

根据农艺要求,旋耕深度应在 80~120 mm,选用回转半径 225 mm 的旋耕刀,其结构参数均参照 GB/T 5669—2017《旋耕机械 刀和刀座》,每个组旋耕刀设置两个回转平面,每组平面内均布依次排列左右

旋耕刀各 4 把,每组作业幅宽 200 mm,土壤扰动占单个工作幅宽的 46%,土壤表面有机残茬覆盖面积 38.5%,符合保护性耕作的相关要求。

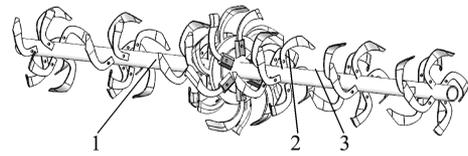


图 7 旋耕、开沟装置

Fig. 7 Rotary tillage and ditching device

1. 开沟刀盘 2. 旋耕刀 3. 刀轴

2.4 播种镇压装置

本技术模式为洁区进行宽窄行(30 cm+15 cm)播种,每个播种单元设计 2 个排种管,间距 15 cm,每两组临近的排种管距离为 30 cm,在开沟装置两边各安置 3 组播种单元,共 6 组播种单元,如图 8 所示。

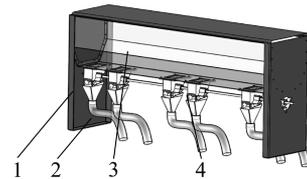


图 8 排种装置结构图

Fig. 8 Structure of seed metering device

1. 排种器 2. 排种管 3. 种箱 4. 排种轴

为满足宽窄行种植的农艺要求,镇压装置需要严格与播种行匹配,因此设计为分段式轴肩镇压轮,播种行外径为 450 mm,宽度 200 mm,秸秆集覆区轴径为 150 mm,高度差 150 mm,满足秸秆集覆区的通过要求,不会引起刮草。通过调整上下位置控制镇压的紧实度,镇压轮可实现对行镇压,仅对镇压播种行。其设计结构如图 9 所示。

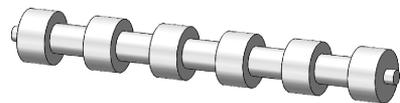


图 9 镇压装置结构图

Fig. 9 Structural diagram of pressure relief device

3 试验

3.1 试验条件与方法

3.1.1 试验条件

田间试验位于江苏省某家庭农场,试验区长度为 100 m,宽度为 30 m,试验地属于一年两熟平原区,年平均降水量 800 mm 左右,土壤质地为壤土,前茬水稻品种为南粳 46。对试验前地块进行调查,试验方法同第 2 节,试验田地的前茬作物为小麦,耕前植被覆盖量为 302.4 g/m²,0~200 mm 厚的土壤坚实度为 1 876.0 kPa、土壤绝对含水率为 31.25%,试验时气温 28℃。

为满足播种作业的技术要求,选用的配套拖拉机的工作参数如表3所示。

表3 沃德奥龙WD904拖拉机主要技术参数
Tab. 3 Main technical parameters of WD904 tractor

参数	数值
型式	4×4(四轮驱动)
外形尺寸(长×宽×高) (mm×mm×mm)	4 940×2 155×2 890
发动机功率/kW	103.0
转速/(r·min ⁻¹)	2 200
动力输出轴转速/(r·min ⁻¹)	760/850

3.1.2 试验指标与方法

洁区洁净度和小麦播种质量是实现稻茬行间集覆及小麦洁区宽窄行种植的重要指标,因此本文根据团体标准 T/CAMA 21—2019《全秸硬茬地洁区播种机》中的相关方法进行试验,主要试验指标有洁区洁净度、行距变异系数、晾籽率、碎土率、播种深度。

采样点选取示意如图10所示,在水平面选取与机具前进方向垂直的方向一个工作幅宽内的6个点,每个采样点均在洁区中,为200 mm×200 mm的采样区域。沿机具前进方向连续取5组数据。

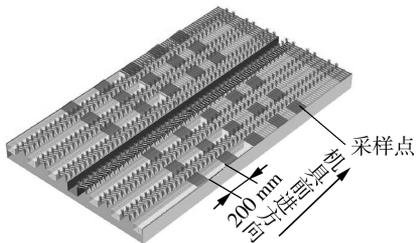


图10 采样点示意图

Fig. 10 Sampling point schematic

1) 洁区洁净度。是指机具作业后洁区中秸秆覆盖量与耕作前的差值与耕作前秸秆覆盖量的比值,直接反映了机具的清秸能力,间接表述了机具的秸秆行间集覆的能力。其测定方法为测定各个采样点耕作前后的秸秆覆盖量,各个点求平均值后,按式(9)、式(10)计算洁区洁净度。

$$W_h = \frac{\sum_{i=1}^n W_g}{n} \quad (9)$$

$$C = \frac{W_q - W_h}{W_q} \quad (10)$$

式中: W_h ——耕作后采样点秸秆覆盖量,kg/m²;
 W_g ——各采样点秸秆覆盖量,kg/m²;
 C ——洁区洁净度,%;
 W_q ——耕作前采样点秸秆覆盖量,kg/m²;
 n ——采样点数量。

2) 行距变异系数。本文设计的机具依托于宽窄行的种植模式,因此行距是描述本技术特征的重要指标之一。其计算方法按照式(11)~式(13)进行。

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n n_{ix}}{n_i} \quad (11)$$

$$s = \sqrt{\frac{\sum (n_{ix} - \bar{x})^2}{n_i - 1}} \quad (12)$$

$$cv = \frac{100s}{\bar{x}} \quad (13)$$

式中: \bar{x} ——平均宽度,mm;

n_{ix} ——第*i*行宽度,mm;

n_i ——测定的行数,宽行取5,窄行取6;

s ——秸秆行间宽度的标准差,mm;

cv ——秸秆行间宽度的变异系数,%。

3) 晾籽率。计算如式(14)所示。

$$P_z = \frac{P_m}{M_s \times S_i} \times 100 \quad (14)$$

式中: P_z ——晾籽率,%;

P_m ——采样点晾籽质量,kg;

M_s ——采样点播种量,g/mm²;

S_i ——采样点面积,mm²。

4) 碎土率。按照在已耕地上设置的采样点,取样土块大小按照其边长为0~4 cm,4 cm以上两个等级,以0~4 cm的土壤质量占总质量的百分比为碎土率。

$$J = \frac{G_s}{G} \quad (15)$$

式中: J ——碎土率,%;

G_s ——全耕层小于作业要求的尺寸的土块质量,kg;

G ——全耕层土块总质量,kg。

5) 播种深度合格率。在已耕地沿机具前进方向挖开土层,每个采样点选取10粒种子,选取测定每个种子上部覆盖土层的厚度,计算覆土深度为按农艺要求的3±1 cm范围内的点占测定点数的百分比。

$$\eta_y = \frac{n_y}{N_y} \times 100\% \quad (16)$$

$$\eta = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \eta_y}{nm} \quad (17)$$

式中: η_y ——各采样点播深合格率,%;

n_y ——每个采样点满足播种深度的个数;

N_y ——每个采样点测试总数;

n ——每个采样点采样数,取10个;

m ——采样点数量。

3.2 田间预试验

3.2.1 试验设计与方法

根据设计需求,结合实际工作经验,进行田间预试验,以便摸索出最佳的试验条件,为正式试验提供参考。由此最终确定出三个主要影响因素,分别是:旋耕转速、作业速度、绞龙转速。以洁区洁净度、碎土率作为相应指标。

为了避免试验水平增加所引起的复杂性和误差大的问题,利用软件 Design-Expert 8.0.6,根据 Box-Behnken Design (BBD)设计响应曲面试验,进行3因素3水平试验设计,共22组试验。水平因素编码表如表4所示。

表4 试验因素水平表
Tab. 4 Table of test factor levels

水平	旋耕转速 ($r \cdot \min^{-1}$)	作业速度 ($m \cdot s^{-1}$)	绞龙转速 ($r \cdot \min^{-1}$)
1	180	0.5	20
2	230	0.75	25
3	280	1	30

3.2.2 试验结果分析

试验结果如表5所示,对结果进行方差分析。根据表6洁区洁净度方差分析结果可知,一次项因素B(作业速度)与因素C(绞龙转速)的 $p < 0.01$,极显著,模型中的二次项 B^2 、 C^2 对洁区洁净度的影响极显著,交互作用BC洁区洁净度的影响显著,因素A(旋耕转速)对洁区洁净度影响不显著。

表5 试验设计方案及结果
Tab. 5 Test design scheme and results

	A ($r \cdot \min^{-1}$)	B ($m \cdot s^{-1}$)	C ($r \cdot \min^{-1}$)	洁净度 /%	碎土率 /%
1	180	0.75	20	77.14	70.12
2	280	0.5	25	84.12	89.43
3	180	0.75	30	82.72	70.32
4	230	0.75	25	87.12	77.55
5	230	0.75	25	86.55	78.48
6	230	0.75	25	86.27	78.23
7	180	0.5	25	82.23	74.82
8	280	1	25	73.09	88.89
9	230	0.75	25	88.9	77.55
10	280	0.75	20	76.38	90.67
11	230	0.5	20	69.98	83.23
12	230	0.75	25	87.12	77.55
13	230	1	30	75.42	72.89
14	230	0.5	30	82.23	81.85
15	180	1	25	76.42	65.43
16	230	1	20	72.45	75.98

表6 洁区洁净度的方差分析
Tab. 6 ANOVA of cleanliness of clean areas

来源	平方和	自由度	均方和	F值	显著水平 P
Model	689.34	9	76.59	32.67	<0.0001 **
A	0.6328	1	0.6328	0.2699	0.6129
B	56.07	1	56.07	23.91	0.0004 **
C	91.73	1	91.73	39.12	<0.0001 **
AB	6.81	1	6.81	2.91	0.1140
AC	0.1260	1	0.1260	0.0537	0.8206
BC	21.53	1	21.53	9.18	0.0105 *
A^2	13.83	1	13.83	5.90	0.1318
B^2	194.07	1	194.07	82.76	<0.0001 **
C^2	150.72	1	150.72	64.28	<0.0001 **
残差	28.14	12	2.34		
失拟项	20.98	3	6.99	8.80	0.0048 **
误差	7.15	9	0.7949		
总离差	717.47	21			

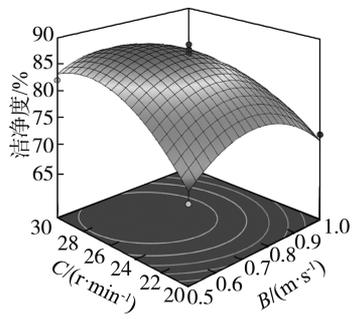
注:**表示该项极显著($P < 0.01$),*表示该项显著($P < 0.05$)。下同。

根据表7碎土率方差分析结果可知,一次项因素A(旋耕转速)与因素B(作业速度)的 $p < 0.01$,极显著,模型中的二次项 A^2 、交互作用AB对碎土率的影响极其显著,因素C(绞龙转速)对碎土率影响不显著。

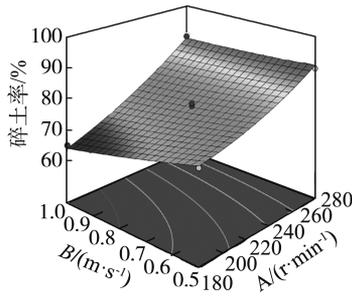
根据图11(a)可知,作业速度0.75 m/s,绞龙转速25 r/min时洁区洁净度取得最大值86.55%,由图11(b)可知,旋耕速度280 r/min,作业速度0.75与0.5对碎土率的影响较小,对洁净度的影响较大,因此最优组合为 $A_3B_2C_2$,既旋耕速度280 r/min,作业速度0.75 m/s,绞龙转速25 r/min。对其进行验证试验得,洁区洁净度86.97%,碎土率87.59%。符合设计预期与农艺要求。

表7 碎土率的方差分析
Tab. 7 ANOVA of soil breakage rate

来源	平方和	自由度	均方和	F值	显著水平 P
Model	899.86	9	99.98	82.90	<0.0001 **
A	757.38	1	757.38	627.97	<0.0001 **
B	85.41	1	85.41	70.82	<0.0001 **
C	3.64	1	3.64	3.02	0.1077
AB	19.58	1	19.58	16.23	0.0017 **
AC	0.4422	1	0.4422	0.3667	0.5561
BC	0.7310	1	0.7310	0.6061	0.4513
A^2	19.80	1	19.80	16.42	0.0016 **
B^2	0.6662	1	0.6662	0.5524	0.4717
C^2	3.78	1	3.78	3.13	0.1020
残差	14.47	12	1.21		
失拟项	6.86	3	2.29	2.70	0.1083
误差	7.62	9	0.8462		
总离差	914.33	21			



(a) 交互作用 BC 对洁净度的影响



(b) 交互作用 AB 对碎土率的影响

图 11 各因素交互作用对功耗的响应曲面

Fig. 11 Response surface of the interaction of various factors to power consumption

3.3 田间验证试验

为检验稻茬麦洁区旋耕施肥播种机的工作性能,并对相关设计参数进一步优化,按照 GB/T 5668—2017《旋耕机》标准、GB/T 5262—2008《农业机械 试验条件测定方法的一般规定》以及本文的作业要求,按照预试验得到的因素最优组合,以旋耕速度 280 r/min,作业速度 0.75 m/s,绞龙转速 25 r/min 进行田间试验。

同时,为验证本农艺要求设计的播种机的油耗对比,设置田间油耗对比试验,试验参数(播种量、播种和肥料深度、秸秆覆盖量等)基本相同。两台播种机均由沃德奥龙 WD904 拖拉机提供动力,另一台对照播种机型号为 2BX-12,耕作幅宽 2 600 mm,全幅旋耕播种。两者一次作业可完成开沟、播种、施肥多项作业。对比结果发现,本文设计柴油消耗量平均减少了 16.25 L/hm² (35.8 L/hm²),降低了 31.24%。其原因可以归结为:根据农艺要求,本文设计的播种机实行秸秆行间集覆模式,减少了对前茬作物的翻埋处理,降低了作业负载;此外,本播种机在全耕幅宽内耕地面积仅占 50%,降低了旋耕切土的功耗,减少了耕地扰动面积,减少了无用的动力消耗,从而降低了单位面积的燃料消耗。

田间试验结果如表 8 所示,稻茬麦洁区旋耕施肥播种机作业后洁区洁净度 87.69%,小麦窄行平均行距为 148 mm,宽行行距平均为 304 mm,行距变异系数为 5.36%,平均播深为 33 mm,播深合格率为 95.76%,晾籽率 0.98%,碎土率为 86.01%。施肥方

式为耕前集中施肥,平均施肥深度为 65 mm,施肥深度合格率为 94.63%,均满足国家标准。厢沟平均深度为 175 mm,沟面宽度为 198 mm,满足排水要求。

表 8 田间试验结果

Tab. 8 Field test results

采样点	洁区 洁净度	行距变异 系数	晾籽率	碎土率	播深 合格率
1	88.59	4.76	0.85	85.28	93.25
2	88.06	5.58	0.87	83.28	96.94
3	86.23	4.91	0.95	89.16	93.57
4	87.73	6.43	1.05	83.2	95.26
5	87.82	5.12	1.16	89.14	94.14
均值	87.69	5.36	0.98	86.01	94.63

3.4 小麦全周期长势及产量对比

田间示范在如东绿耕元家庭农场进行,在前茬水稻秸秆全量粉碎还田后,采用研发的“全秸秆茬地洁区旋耕智能施肥播种机”清分麦秸秆后,在洁区进行宽窄行(30 cm+15 cm)播种,同步进行施肥、旋耕、开沟,播种,播种面积为 13.67 hm²,小麦品种为农麦 88,播种量为 180 kg/hm²,基本苗为 2.769×10⁶ 株/hm²,高峰苗为 1.064 7×10⁷ 株/hm²,最终成穗数为 5.094×10⁶ 株/hm²,每穗粒数为 37.16,千粒重为 40.9g,理论产量为 7 742.1 kg/hm²,实际产量为 8 059.2 kg/hm²,高出大面积平均产量 20%以上。

4 结论

1) 本文以“稻茬麦条带旋耕秸秆行间集覆宽窄行精播技术”为设计思路,研发了具有(宽)行间集秸、条带旋耕、集中施肥、洁区(窄行)播种等技术特征的稻茬麦洁区旋耕施肥播种机,其核心是在前茬小麦秸秆留田后,使用配套研制的“全秸秆茬地洁区旋耕智能施肥播种机”清分麦秸秆至 30 cm 宽行间,然后进行宽窄行(30 cm+15 cm)播种,同步进行施肥、旋耕、开沟。该技术能够提高小麦播种出苗质量,且作业效率高、能耗低,能使秸秆还田和小麦播种环节的机械能耗显著下降,生产成本大幅降低,实现小麦丰产降本增效的目标。

2) 通过理论分析计算得到了机具关键部件的参数,根据相关设计手册对关键部件进行了选型与标准化,通过田间试验确定了最佳作业参数组合,前进速度 3 km/h,绞龙转速 30 r/min,旋耕开沟转速 280 r/min。

3) 田间试验结果显示,稻茬麦洁区旋耕施肥播种机作业相对于全幅播种机油耗降低了 31.24%。洁区洁净度 87.69%,小麦窄行平均行距为 148 mm,宽行行距平均为 304 mm,行距变异系数为 5.36%,平均播深为 33 mm,播深合格率为 95.76%,晾籽率 0.98%,

碎土率为 86.01%。施肥方式为耕前集中施肥,平均施肥深度为 65 mm,施肥深度合格率为 94.63%,均满足国家标准。厢沟平均深度为 175 mm,沟面宽度为 198 mm,满足排水要求。

4) 对试验田小麦全生长期进行调查,本试验田小麦品种为农麦 88,播种量为 180 kg/hm^2 ,基本苗为 $2.769 \times 10^6 \text{ 株/hm}^2$,高峰苗为 $1.0647 \times 10^7 \text{ 株/hm}^2$,最终成穗数为 $5.094 \times 10^6 \text{ 株/hm}^2$,每穗粒数为 37.16,千粒重为 40.9 g,理论产量为 7742.1 kg/hm^2 ,实际产量为 8059.2 kg/hm^2 ,高出大面积平均产量 20%以上。

参 考 文 献

- [1] 邵海鹏. 小麦进口量激增 价格走强趋势明显[J]. 中国食品, 2022(6): 94-95.
- [2] 习敏, 杜祥备, 吴文革, 等. 稻麦两熟系统适期晚播对周年产量和资源利用效率的影响[J]. 应用生态学报, 2020, 31(1): 165-172.
Xi Min, Du Xiangbei, Wu Wenge, et al. Effects of late sowing of two season crops on annual yield and resource use efficiency in rice-wheat double cropping system [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2020, 31(1): 165-172.
- [3] 石祖梁, 张姗, 孙仁华, 等. 秸秆还田下晚播稻茬麦适宜施氮量研究[J]. 生态与农村环境学报, 2015, 31(4): 589-593.
Shi Zuliang, Zhang Shan, Sun Renhua, et al. Economical nitrogen application on late sowing wheat with rice straw returning under rice-wheat rotation [J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2015, 31(4): 589-593.
- [4] 薛亚光, 石吕, 韩笑, 等. 不同机械耕播方式对稻茬小麦产量形成及经济效益的影响[J]. 江苏农业科学, 2021, 49(22): 94-98.
Xue Yaguang, Shi Lü, Han Xiao, et al. Influences of different mechanized tillage and sowing practices on yield formation and economic benefits of wheat after rice [J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2021, 49(22): 94-98.
- [5] 张会娟, 顾峰玮, 吴峰, 等. 江苏省稻茬麦机械化播种概况与发展[J]. 中国农机化学报, 2021, 42(11): 186-192.
Zhang Huijuan, Gu Fengwei, Wu Feng, et al. General situation and development on mechanized sowing of wheat after rice in Jiangsu Province [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2021, 42(11): 186-192.
- [6] 徐华岗, 张永辉. 江苏稻茬麦生产全程机械化技术[J]. 农业装备技术, 2022, 48(3): 36-37, 40.
- [7] 高盼, 刘玉涛, 徐莹莹, 等. 秸秆覆盖与翻埋两种还田模式对农田土壤物理性质及玉米产量的影响[J]. 黑龙江农业科学, 2021(11): 13-17.
Gao Pan, Liu Yutao, Xu Yingying, et al. Effects of maize straw mulching and burying returning to the field on soil physical properties and maize yield [J]. Heilongjiang Agricultural Sciences, 2021(11): 13-17.
- [8] 李廷亮, 王嘉豪, 黄璐, 等. 秸秆还田替代化肥对土壤有机碳组分及冬小麦产量的影响[J]. 山西农业科学, 2022, 50(6): 771-780.
Li Tingliang, Wang Jiahao, Huang Lu, et al. Effects of straw returning and replacing chemical fertilizer on soil organic carbon fractions and winter wheat yield [J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2022, 50(6): 771-780.
- [9] 潘剑玲, 代万安, 尚占环, 等. 秸秆还田对土壤有机质和氮素有效性影响及机制研究进展[J]. 中国生态农业学报, 2013, 21(5): 526-535.
Pan Jianling, Dai Wan'an, Shang Zhanhuan, et al. Review of research progress on the influence and mechanism of field straw residue incorporation on soil organic matter and nitrogen availability [J]. Chinese Journal of Eco-agriculture, 2013, 21(5): 526-535.
- [10] 劳秀荣, 孙伟红, 王真, 等. 秸秆还田与化肥配合施用对土壤肥力的影响[J]. 土壤学报, 2003(4): 618-623.
Lao Xiurong, Sun Weihong, Wang Zhen, et al. Effect of matching use of straw and chemical fertilizer on soil fertility [J]. Acta Pedologica Sinica, 2003(4): 618-623.
- [11] 温美娟, 杨思存, 王成宝, 等. 深松和秸秆还田对灌耕灰钙土土壤细菌多样性和群落结构的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2022(2): 1-15.
Wen Meijuan, Yang Sicun, Wang Chengbao, et al. Effects of subsoiling and the return of straw on soil bacterial diversity and community structure in an irrigated sierozem farmland [J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2022(2): 1-15.
- [12] 吴红丹, 李洪文, 梅峰, 等. 一沟双行小麦施肥播种单体的设计与试验[J]. 中国农业大学学报, 2007(2): 50-53.
Wu Hongdan, Li Hongwen, Mei Feng, et al. Design and experimental study on a combined fertilizing and seeding opener for wheat of two rows in one furrow [J]. Journal of China Agricultural University, 2007(2): 50-53.
- [13] 朱统泉, 赵立尚, 贺建锋, 等. 不同行距对小麦群体质量及产量的调节效应[J]. 陕西农业科学, 2006(4): 8-10.
- [14] 姚永平, 宋子洲, 叶静. 水稻宽窄行配置扩行增产机理研究[J]. 耕作与栽培, 2000(6): 41-42.
- [15] 赵虹, 杨兆生, 闫素红, 等. 播种方式对不同类型小麦品种产量性状的影响[J]. 华北农学报, 2000(2): 100-105.
Zhao Hong, Yang Zhaosheng, Yan Suhong, et al. Effect of planting method on wheat yield components of different variety types [J]. Acta Agriculturae Boreall-sinica, 2000(2): 100-105.
- [16] 王玉红, 张季, 王敏杰. 小麦超高产宽窄行栽培技术[J]. 现代农业科技, 2009(11): 178.
- [17] 石吕, 薛亚光, 魏亚凤, 等. 基于宽窄行种植模式下稻秸非均匀性覆盖对土壤特性及小麦产量的影响[J]. 核农学报, 2021, 35(7): 1668-1677.

- Shi Lü, Xue Yaguang, Wei Yafeng, et al. Effects of rice straw non-uniform mulch on soil characteristics and wheat yield based on wide-narrow row planting pattern [J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2021, 35(7): 1668-1677.
- [18] 刘建, 魏亚凤, 杨美英, 等. 小麦宽窄幅冬季培肥的产量表现、经济效益及化肥减施效应研究[J]. *江西农业学报*, 2015, 27(12): 59-63.
- Liu Jian, Wei Yafeng, Yang Meiyong, et al. Effects of winter fertilization within wide bare land of wheat field and reduction of chemical fertilizer application rate on yield and economic profits of wheat [J]. *Acta Agriculturae Jiangxi*, 2015, 27(12): 59-63.
- [19] 薛亚光, 魏亚凤, 李波, 等. 播期和密度对宽幅带播小麦产量及其构成因素的影响[J]. *农学学报*, 2016, 6(1): 1-6.
- Xue Yaguang, Wei Yafeng, Li Bo, et al. Effects of sowing date and planting density on grain yield and its components of wheat under wide belt planting [J]. *Journal of Agriculture*, 2016, 6(1): 1-6.
- [20] 牛琪, 王庆杰, 陈黎卿, 等. 秸秆后覆盖小麦播种机设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2017, 48(11): 52-59.
- Niu Qi, Wang Qingjie, Chen Liqing, et al. Design and experiment on straw post-covering wheat planter [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2017, 48(11): 52-59.
- [21] 顾宸嘉, 奚小波, 韩连杰, 等. 双轴旋耕压槽播种开沟匀覆土作业机设计与试验[J]. *中国农机化学报*, 2021, 42(11): 17-22.
- Gu Chenjia, Xi Xiaobo, Han Lianjie, et al. Design and experiment research of double-axis rotary tillage machine for sowing, ditching, and covering soil [J]. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 2021, 42(11): 17-22.
- [22] 徐弘博, 胡志超, 吴峰, 等. 全量稻秸还田小麦播种机秸秆分流还田装置设计[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(9): 19-28.
- Xu Hongbo, Hu Zhichao, Wu Feng, et al. Design of straw distributed retention device of wheat planter under full rice straw retention [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2019, 35(9): 19-28.
- [23] 罗伟文, 顾峰玮, 吴峰, 等. 全秸硬茬地碎秸行间集覆小麦播种机设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2019, 50(12): 42-52.
- Luo Weiwen, Gu Fengwei, Wu Feng, et al. Design and experiment of wheat planter with straw crushing and inter-furrow collecting-mulching under full amount of straw and root stubble cropland [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2019, 50(12): 42-52.
- [24] 顾峰玮, 胡志超, 陈有庆, 等. “洁区播种”思路下麦茬全秸秆覆盖地花生免耕播种机研制[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(20): 15-23.
- Gu Fengwei, Hu Zhichao, Chen Youqing, et al. Development and experiment of peanut no-till planter under full wheat straw mulching based on “clean area planting” [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32(20): 15-23.
- [25] 杨美英, 刘建, 魏亚凤, 等. 南方稻田麦稻宽行交互保护性耕作技术模式的创制[J]. *安徽农业科学*, 2011, 39(2): 707-708.
- [26] 陈素英, 张喜英, 毛任钊, 等. 播期和播量对冬小麦冠层光合有效辐射和产量的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2009, 17(4): 681-685.
- Chen Suying, Zhang Xiyong, Mao Renzhao, et al. Effect of sowing date and rate on canopy intercepted photosynthetically active radiation and yield of winter wheat [J]. *Chinese Journal of Eco-agriculture*, 2009, 17(4): 681-685.
- [27] 马鑫, 代兴龙, 王晓婧, 等. 冬小麦高产高效群体的年际间稳产性能[J]. *应用生态学报*, 2017, 28(12): 3926-3934.
- Ma Xin, Dai Xinglong, Wang Xiaojing, et al. Stability of a winter wheat population with high yield and high resource use efficiency [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2017, 28(12): 3926-3934.
- [28] 黄松元. 散体力学[M]. 北京: 机械工业出版社, 1993.
- [29] 顾克军, 杨四军, 张斯梅, 等. 不同生产条件下留茬高度对水稻秸秆可收集量的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2011, 19(4): 831-835.
- Gu Kejun, Yang Sijun, Zhang Simei, et al. Effect of stubble height on collectable amount of rice straw under different cultivation patterns [J]. *Chinese Journal of Eco-agriculture*, 2011, 19(4): 831-835.
- [30] 时聪. 小麦旋耕播种施肥机械的选型应用研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2021.
- [31] 胡宗武, 徐履冰, 石来德. 非标准机械设备设计手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2003.
- [32] 肖伟. 奉贤区农田废弃物资源化利用的可行性研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2012.
- Xiao Wei. The feasibility study for farmland waste recycling of fengxian district [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2012.
- [33] 贾朝斌. 螺旋输送机参数设计及其优化方法研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2015.
- [34] 张晋. 旋耕机正转深旋节能技术研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2021.
- Zhang Jin. Research on energy-saving technology of down-cut deep-rotary-tillage rotary tiller [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2021.
- [35] 向冬枝, 徐余伟. 螺旋输送机设计参数的选择和确定[J]. *水泥技术*, 2010(1): 29-33.
- Xiang Dongzhi, Xu Yuwei. Design parameter selection of spiral conveyer [J]. *Cement Technology*, 2010(1): 29-33.