doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2026.13.020

基于垄厢栽培模式的水稻开沟起垄插秧一体机研究

罗海峰[1,2]　姜译壑[1]　傅志强[2,3]　颜晓元[4]　胡双驰[1]　张　明[5]
刘龙生[5]　方升亮[5]　颜志刚[6]　蒋啸虎[1]

(1.湖南农业大学机电工程学院,长沙 410128;2.岳麓山实验室,长沙 410128;3.湖南农业大学农学院,长沙 410128;
4.中国科学院南京土壤研究所土壤与农业可持续发展重点实验室,南京 211135;
5.衡阳市农业科学院,衡阳 421200;6.衡阳县强农优质稻种种植专业合作社,衡阳 421101)

摘要:水稻垄厢栽培在固碳减排、节能增产等方面有着显著的优势,目前水稻垄厢栽培存在作业环节多、劳动强度大、效率低等问题。为提高垄厢栽培作业效率、简化作业流程,基于农艺需求配套的基础上,在现有开沟起垄装备上设计了一套插秧专用传动系统,满足水稻插秧正常工作需求;以插秧作业稳定性为目标,设计了插秧深度控制仿形系统,保证栽插质量,集成创制了一种水稻开沟起垄插秧一体机,一次性完成旋耕、开沟、起垄、插秧等多项作业。以插秧深度合格率为目标,对仿形系统进行离散元仿真试验,获得最优结构参数:仿形板安装高度 199 mm、仿形板宽 463 mm、仿形板前端角度 20°时,仿形板姿态恢复最短耗时 0.697 s,土壤对仿形板最小阻力 589.52 N,土壤最小下陷量 16.2 mm,插秧深度合格率为 93.22%,仿形性能效果好。以该参数试制了样机,并针对 4 种不同作业模式:普通旋耕 + 插秧机(W1,对照)、一次性开沟起垄插秧作业(W2)、一次旋耕 + 开沟起垄插秧(W3)、二次旋耕 + 开沟起垄插秧(W4),开展两年度早稻、晚稻开沟起垄插秧田间作业性能试验和产量对比。田间作业性能试验表明:机具前进速度 0.5 m/s,旋耕深度 166 ~ 225 mm 时,土壤下陷量均值约为 17 mm,插秧深度稳定性系数达到 91.07%;不同作业模式产量对比试验表明:早稻分别增产 0.42%、4.00%、4.70%,晚稻分别增产 1.05%、5.30%、6.10%,从综合角度分析,二次旋耕作业增加了作业成本,但是产量增幅不明显,因此 W3 综合效益最好。

关键词:水稻移栽;垄厢栽培模式;仿形系统;同步开沟起垄;离散元仿真;参数优化

中图分类号:S223.91　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2026)13-0245-14　　**OSID**:

Integral Rice Transplanter with Ditching-ridging Function for Ridge-furrow Cultivation

Luo Haifeng[1,2]　Jiang Yihe[1]　Fu Zhiqiang[2,3]　Yan Xiaoyuan[4]　Hu Shuangchi[1]　Zhang Ming[5]
Liu Longsheng[5]　Fang Shengliang[5]　Yan Zhigang[6]　Jiang Xiaohu[1]

(1. *College of Mechanical and Electrical Engineering, Hunan Agricultural University, Changsha* 410128, *China*
2. *Yuelushan Laboratory, Changsha* 410128, *China*
3. *College of Agronomy, Hunan Agricultural University, Changsha* 410128, *China*
4. *State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing* 211135, *China*
5. *Hengyang Academy of Agricultural Sciences, Hengyang* 421200, *China*
6. *Hengyang Qiangnong Superior Rice Planting Cooperative, Hengyang* 421101, *China*)

Abstract: Rice ridge-furrow cultivation has significant advantages in carbon sequestration, emission reduction, energy saving, and yield increase. Currently, rice ridge-furrow cultivation faces problems such as numerous operation steps, high labor intensity, and low efficiency. To improve the operation efficiency of ridge-furrow cultivation and simplify the operation process, based on meeting agronomic requirements, a dedicated transmission system for rice transplanting was designed and matched with existing ditching and ridging equipment to meet the normal working needs of rice transplanting. Aiming at the stability of transplanting operation, a transplanting depth control profiling system was designed to

收稿日期:2025 - 10 - 19　修回日期:2026 - 01 - 05
基金项目:国家重点研发计划项目(2022YFD2300305)和水稻节水栽培技术与装备研发项目(湘财农指[2024]39 号)
作者简介:罗海峰(1976—),男,教授,博士,主要从事农业机械性能试验与设计研究,E-mail:luohaifeng@hunau.edu.cn
通信作者:蒋啸虎(1993—),男,讲师,博士,主要从事智能农业机械装备与技术研究,E-mail:18844198030@163.com

ensure the quality of transplanting. An integrated machine for rice ditching, ridging, and transplanting was created, which can complete multiple operations such as rotary tillage, ditching, ridging, and transplanting at one time. Targeting the qualification rate of transplanting depth, a discrete element simulation test was conducted on the profiling system to obtain the optimal structural parameters: when the installation height of the profiling board was 199 mm, the width of the profiling board was 463 mm, and the front angle of the profiling board was 20°, the shortest recovery time of the profiling board posture was 0.697 s, the minimum resistance of soil to the profiling board was 589.52 N, the minimum soil subsidence was 16.2 mm, the qualification rate of transplanting depth was 93.22%, and the profiling performance was good. A prototype was trial-manufactured according to these parameters, and field performance tests and yield comparisons of ditching, ridging, and transplanting for early rice and late rice in two years were carried out for four different operation modes: ordinary rotary tillage + transplanter (W1, control), one-time ditching, ridging, and transplanting operation (W2), one rotary tillage + ditching, ridging, and transplanting (W3), and two rotary tillages + ditching, ridging, and transplanting (W4). The field operation performance test showed that when the forward speed of the machine was 0.5 m/s and the rotary tillage depth was 166 ~ 225 mm, the average soil subsidence was about 17 mm, and the qualification rate of transplanting depth reached 91.20%; the yield comparison test of different operation modes showed that the yield increases of early rice were 0.42%, 4.00%, and 4.70%, respectively, and the yield increases of late rice were 1.05%, 5.30%, and 6.10%, respectively. From a comprehensive perspective, the two rotary tillage operations increased the operation cost, but the yield increase was not significant, thus W3 had the best comprehensive benefit.

Key words: rice transplanting; ridge-furrow cultivation mode; contour-following system; simultaneous ditching and ridging; discrete element simulation; parameter optimization

0 引言

水稻垄厢栽培是在传统平作的基础上进行开沟起垄,将水稻种在畦面上的一种节水湿润栽培模式,利用畦面保持 3 ~ 5 cm 浅水层、沟渠维持 10 ~ 15 cm 深水层的差异化水位管理[1]。与传统水稻种植模式相比,垄厢栽培在减少甲烷排放、提高土壤温度、防止水分流失、改善小气候、增加光照、提高水稻产量等方面有重要的作用[2-3],因此发展垄厢栽培对保障粮食安全以及缓解全球变暖具有重要的意义。

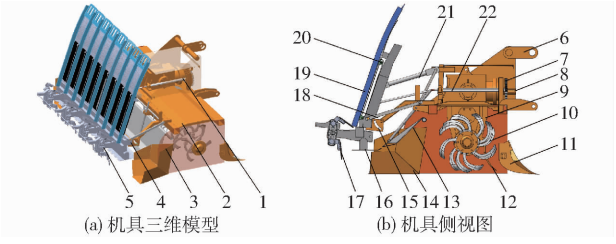
目前垄厢栽培主要有两种方法:一种是整地后采用插秧机完成栽插,待返青人工开沟,该方法劳动强度大,效率低;另一种是分 3 次机械化作业,采用机械整田后机械插秧,待返青后采用小型开沟晒田机开沟,该方法工序多、用工大、成本高。目前国内外在水田开沟起垄方面研究成果主要有:庞伟[4]针对泥泞水田设计的与手扶拖拉机相配套的小型前置式圆盘开沟机,单人便可完成开沟作业;张明华等[5]对水稻精量穴直播机开沟装置进行设计与试验,将“开沟起垄”与“精量穴播”结合,发挥“同步开沟起垄”技术优势;刘晓鹏等[6]提出了一种组合式船型开沟器,可对黏重且含水率较大的土壤实现破土开沟和整理沟型的功能;燕桓等[7]针对水稻秸秆残留较多的黏重板结土壤,设计了一种稻茬田油菜直播机组合式开种沟装置;张青松等[8]为水稻垄作栽培设计一种适用于冷浸田作业的起垄平整装置,实现大垄排水,微垄蓄水。分插机构是水稻机插秧关键工作部件,万苏文等[9]针对高速水稻插秧机作业效率和质量的功能要求,提出了将非圆齿轮行星轮系作为分插机构的传动部件,并设计出非圆齿轮插秧旋转箱与双针推培插植机构。周永清等[10]针对椭圆行星系分插机构建立了三维参数化虚拟运动学模型,分析了该分插机构各主要结构参数对秧针尖运动轨迹形状及姿态的影响,优化其结构参数。孙良等[11]解决了现有空间行星轮系式分插机构在取秧时产生的偏移与偏转,提高插秧作业质量。目前国内外针对水稻垄厢栽培开发的配套机具较少,大部分采用分步骤实施,作业效率低、成本高,难以满足垄厢栽培技术的推广。

为实现水稻开沟起垄插秧一次性完成机械化作业,解决效率低、成本高的问题,本文选用合适的开沟起垄装备,结合插秧机栽插功能,为开沟起垄配套设计插秧传动系统,为保证插秧稳定和栽插质量,设计了插秧深度控制仿形系统。基于多体动力学(Multi-body dynamics, MBD)和离散元法(Discrete element method, DEM)耦合对插秧仿形板关键部件进行仿真优化,得到最优参数组合。试制样机进行不同季节、不同模式下的田间垄厢栽培试验,分析不同栽植模式对水稻生长及产量的影响,以期为水稻开沟起垄插秧技术与机具优化提供技术依据和可靠作业装备。

1　整机结构与工作原理

1.1　整机结构

水稻开沟起垄插秧一体机主要由插秧装置、插秧深度控制仿形系统、插秧传动系统、沟垄成型装置、开沟起垄机组成。根据八行插秧机作业参数要求，配套选用 1Q－2 型起垄机[12]作为底盘，插秧装置安装在开沟起垄机正后方，插秧作业幅宽与开沟起垄后的垄面幅宽一致，机具结构示意如图 1 所示。



(a) 机具三维模型　　(b) 机具侧视图

图 1　水稻开沟起垄插秧一体机结构示意图

Fig. 1　Structural diagram of ridge-furrow transplanter for paddy rice

1. 插秧传动系统　2. 开沟起垄机　3. 沟垄成型装置　4. 插秧深度控制仿形系统　5. 插秧装置　6. 旋耕机挂接点　7. 传动齿轮　8. 动力输入轴　9. 变速箱　10. 旋耕刀　11. 开沟犁　12. 变速箱小前犁　13. 平土拖板　14. 船型开沟器　15. 限位器　16. 仿形板　17. 秧爪　18. 下杆件　19. 秧苗架　20. 送秧履带　21. 可伸缩上杆件　22. 传动杆

1.2　工作原理

开沟起垄机作业时，动力由拖拉机后置动力输出花键轴经万向节驱动旋耕机主体中置的变速箱，再驱动旋耕机轴带动旋耕刀旋转完成旋耕碎土作业。在旋耕机主体的两侧端板设置了小前犁，经过小前犁的入土导向和厢内翻土作用完成整机平稳入土和定厢作业。土壤经旋耕刀旋耕后通过沟垄成型装置实现从动强制挤压成型，挤压出梯型排水沟，沟内的土壤挤向垄体，并抬升整体垄体的田间高度，实现开沟起垄作业。插秧装置利用开沟起垄机动力输入轴，采用侧向齿轮传动，将动力传递到插秧装置的动力输入轴，实现插秧装置的动力输入。插秧深度控制仿形系统利用土壤对插秧深度控制仿形板产生的浮力，实现插植部件与垄面之间相对位置实时仿形，保证插秧装置与插秧深度控制仿形板挤压后的垄面相对位置不变，达到栽插深度一致，整机技术参数如表 1 所示。

1.3　插秧传动系统

插秧传动系统如图 2 所示。作业时，动力由拖拉机动力输出轴通过万向节传递至动力输入轴，经变速箱减速传递至旋耕刀轴，使得旋耕刀轴旋转；此外动力经输入轴上嵌套的侧向齿轮传动减速至插秧部件万向节，经锥齿轮传动至中间轴，最后传动至插植臂转轴和圆柱螺旋凸轮轴，从而驱动插植臂和送秧部件作业。

表 1　主要技术参数

Tab. 1　Main technical parameters

参数	数值
外形尺寸(长 × 宽 × 高)/(mm × mm × mm)	2 440 × 1 850 × 1 550
插秧深度控制仿形板长 × 宽/(mm × mm)	1 800 × 463
整机质量/kg	920
配套功率/kW	≥52. 5
工作幅宽/mm	2 300
工作效率/($hm^2 \cdot h^{-1}$)	0. 4 ~ 0. 5

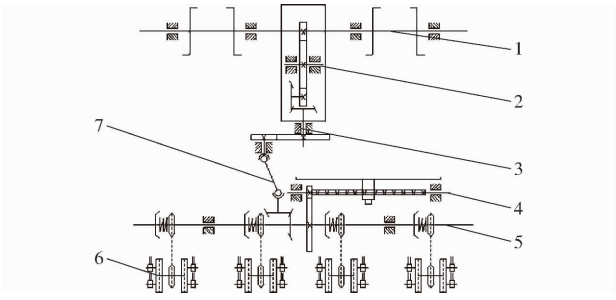


图 2　插秧传动系统简图

Fig. 2　Schematic of transplanter drive system

1. 旋耕刀轴　2. 中间轴　3. 动力输入轴　4. 圆柱螺旋凸轮轴　5. 插秧部件中间轴　6. 插植臂转轴　7. 万向节

2　工作部件选型

2.1　开沟起垄机底盘选型

为保证插秧部件作业质量，需要旋耕机底盘提供合适的垄体条件，旋耕部件与开沟起垄部件为主要的触土部件，其相对位置直接关系到实际作业效果，要求开沟起垄部件作业后垄体断面呈梯形，垄高与沟深满足田间灌溉和排水要求，垄顶宽度满足水稻插秧幅宽，图 3 为水稻垄作农艺示意图。

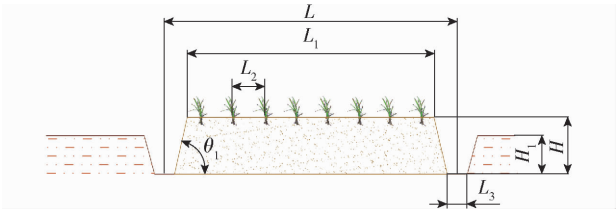


图 3　农艺示意图

Fig. 3　Agronomic schematic

开沟起垄部件的结构参数决定垄体尺寸及开沟性能，根据《水稻机插秧作业技术规范》和《水稻机械化生产技术指导意见》，南方双季稻区机插提倡用窄行插秧机，常规稻株距 12 ~ 16 cm，每穴 3 ~ 5 株，种植密度 25. 5 ~ 33 穴/m^2；杂交稻株距 14 ~ 17 cm，每穴 2 ~ 3 株，种植密度 24 ~ 30 穴/m^2。该部件作业时应满足

$$\begin{cases} L_1 > (n-1)L_2 \\ H = (L - L_1 - L_3)/(2\tan\theta_1) \\ L = L_1 + L_3 \\ r = L_1/L \times 100\% \end{cases} \tag{1}$$

式中 L——旋耕机工作幅宽,mm

L_1——垄顶宽度,mm

L_2——水稻栽插行距,mm

L_3——沟底宽度,mm

H——垄体高度,mm

θ_1——垄体侧边角度,(°)

r——耕地面积利用率,%

n——水稻机插秧行数

根据《农业机械设计手册》及水稻垄作相关研究,选用行距 L_2为 250 mm、行数 n 为 8 的插植部件;通过计算得出耕地面积利用率 r 和垄沟参数应满足:垄高 H 为 200 ~ 250 mm、沟壁倾角 θ 为 35° ~ 45°,垄顶宽 L_1 为 1 750 ~ 1 800 mm、沟底宽 L_3 为 250 ~ 350 mm 的开沟起垄机。代入式(1)中可得作业幅宽 L 为 2 140 ~ 2 400 mm、耕地面积利用率 r 为 73% ~ 84%;由此选用工作幅宽 2 300 mm、垄高 250 mm 的开沟起垄机,为插秧部件提供符合要求的垄面垄沟,满足早晚稻插秧作业密度与耕地利用率。

开沟起垄部件工作时,土壤先经旋耕部件疏松,再通过沟垄成型装置和平土拖板的共同挤压形成垄体,旋耕深度 H_1与土壤孔隙度系数 k_a、土壤坚实度系数 k_b、旋耕作业前后土壤容重有关,故计算式为

$$\begin{cases} H_1 = (L - L_3)k_a k_b H/(2L) \\ A_1 = LH_1 = k_a k_b A_2 \\ A_2 = (L + L_1 - L_3)H/2 \end{cases} \tag{2}$$

式中 A_1——旋耕取土截面面积,mm^2

A_2——垄体截面面积,mm^2

土壤孔隙度系数 k_a 与旋耕作业前后土壤容重有关,常取 1.2 ~ 1.3,土壤坚实度系数与土壤特性有关,常取 0.8 ~ 1.0[13-15],根据水稻插秧机相关技术参数,根据公式(2)求得旋耕深度 H_1 范围为 166 ~ 225 mm,考虑到适当增加旋耕深度,满足水田较深的翻耕需求,更好地将底层土壤翻上来,提高土壤的通气性和保水性,故选择 IT245 型旋耕刀。

2.2 插秧部件选型

根据目前国内外对插秧部件结构的研究与优化,偏心齿轮行星系水稻分插机构因结构对称,每旋转一周可以插秧 2 次,与传统的曲柄摇杆式分插机构相比较,振动幅度小、效率高;与非圆(椭圆)齿轮传动相比易维护和更换。根据开沟起垄插秧一体机设计要求,插秧部件选用圆形偏心齿轮行星系水稻分插机构;与传统高速插秧机相比,因留有排水垄沟从而降低了水稻种植密度,为保证水稻产量,故选用八行插秧机插秧部件。

综上所述,开沟起垄插秧一体机的插秧部件选型为配有偏心齿轮行星系水稻分插机构和 7 寸秧苗盘的八行插秧机底盘。

3 关键部件设计

3.1 插秧传动系统设计

机具前进速度、旋耕刀辊转速与旋耕刀切土节距的匹配关系会直接影响到碎土效果甚至开沟起垄效果,旋耕刀旋耕速比越大,对土壤的切削效果越佳,其关系式为

$$S_1 = \frac{60 v_m}{Z_1 N_1} \tag{3}$$

式中 S_1——切土截距,mm

v_m——机具前进速度,m/s

N_1——旋耕刀辊转速,r/min

Z_1——旋耕刀辊切削小区内刀片数量

根据《农业机械设计手册》,在含水率大于 35% 的轻中黏度稻田土中,切土节距一般选 90 ~ 140 mm;拖拉机前进速度在稻田中一般取 0.5 m/s;刀片数量取 1.6;机具前进速度过小,会使作业效率低;刀片数量过多,刀间间隙变小,易被杂草缠绕[16]。

旋耕机和插秧部件内部均有变速箱,因此还需计算各部分传动比,各部分传动比关系式为

$$\begin{cases} n_f = 60 Z_p v_m / G_y \\ I_1 = N/N_1 \\ i_f = n_e/n_f \\ \mu_f = Z_p n_f \\ I_f = N/n_f \end{cases} \tag{4}$$

式中 G_y——株距,mm

n_e——插秧机动力输出轴转速,r/min

I_1——拖拉机动力输出轴与旋耕刀辊之间传动比

I_f——拖拉机动力输出轴与插植臂之间传动比

i_f——插秧部件动力输入轴与插植臂之间传动比

N——拖拉机动力输出轴转速,r/min

n_f——分插机构转速,r/min

μ_f——插秧频率,株/min

Z_p——秧爪排数

株距取 12 ~ 16 cm、切土截距取 90 ~ 140 mm、小区内刀片数取 2 ~ 4、拖拉机动力输出轴取 540 r/min;代入公式(4)得出旋耕机动力输入轴与插秧部件动力输入轴之间传动比为 0.4 ~ 0.6,故插植部件与旋耕起垄部件之间选用传动比 0.5 齿轮进行传动。

3.2 田间预试验

试验样机是基于插秧机与旋耕机进行功能复合

与传动系统重新设计而成，这导致常规的台架试验存在局限：无法复现样机与轮式拖拉机动力耦合后在田间作业的动态负载工况；难以对水稻插秧的栽植质量及其对后期生长的农艺影响进行有效模拟与测评，故样机制成后进行田间预试验以代替台架试验（如图 4 所示），预试验于早稻插秧前，在衡阳市梅花村试验基地进行。主要试验条件设置为：试验田在晚稻收获后经一次旋耕处理；选用配套 7 寸毯苗；牵引动力选用 804 轮式拖拉机。检验机具以下性能是否符合设计要求：旋耕整田、转速匹配、秧苗株距和插秧作业质量。



图 4　田间预试验（无仿形板）

Fig. 4　Preliminary field test (without following board)

田间预试验发现，因插秧装置与旋耕起垄机固连，无法适应垄面高度的变化，从而导致插秧过深或过浅，同时单一的平土拖板也无法提供插秧作业所需的平整垄面（如图 5 所示）。因此本文设计了一套力反馈式插秧深度控制系统。其核心控制机理是：将作业时土壤作用于仿形板的浮力作为反馈信号，实时驱动仿形机构，从而维持插秧装置与垄面相对高度的恒定，最终实现精准的高度仿形，稳定插秧深度。

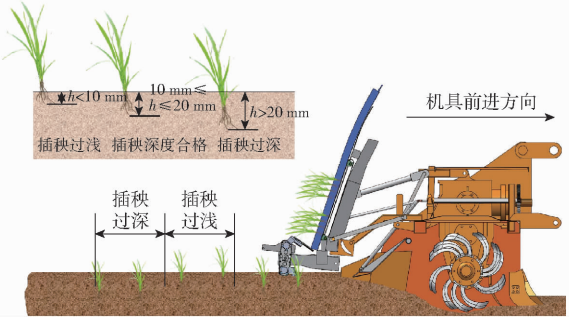


图 5　开沟起垄插秧一体机作业示意图（无仿形板）

Fig. 5　Operational schematic of trenching ridging and transplanting combined machine (without following board)

4　插秧深度控制仿形系统设计

4.1　仿形板设计与受力分析

南方稻田长期处于饱和状态，机具下陷不仅影响作业精度，还加剧壅泥与能耗。传统仿形板研究多采用纯垂直压缩模型，忽视了机具前进时斜板推土对垂直沉陷的耦合效应。本文在 Bekker 承压公式基础上，引入推土阻力模型，构建联合方程，为插秧机仿形板结构优化提供理论依据。仿形板设计如图 6 所示，板体为铝制材料，前端板体弯折翘起防止壅泥。图 6 中 B 为插秧深度控制仿形板宽度，mm；U 为插秧深度控制仿形板长，mm；α 为仿形板前端翘起角度，(°)。

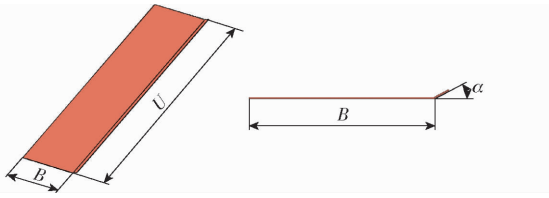


图 6　插秧深度控制仿形板三维模型

Fig. 6　Three-dimensional model of rice transplanting depth control following plate

根据结构分析（如图 7），垂直方向上仿形板受土壤和最低限位器提供的支撑力；水平方向上受到滑动阻力和推土阻力。根据 Bekker 承压模型（重力方向）得

$$\sigma = \left(\frac{k_c}{B} + k_\varphi\right) Z^{n_1} = \frac{G_A}{A} \tag{5}$$

式中　σ——接地比压，N/m^2

Z——仿形板下陷量，m

k_c——内聚力变形模量，kPa/m$^{(n+1)}$

k_φ——摩擦变形模量，kPa/m$^{(n+2)}$

n_1——土壤变形指数

A——仿形板触地面积，m^2

G_A——插秧部件对地压力，N

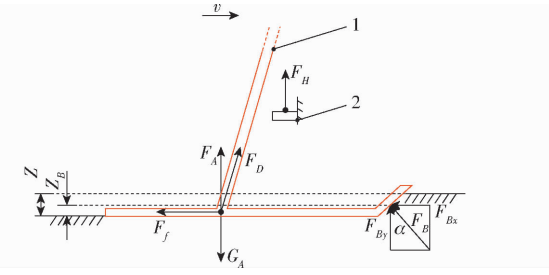


图 7　仿形板受力分析图

Fig. 7　Force analysis diagram of profiling plate

1. 插秧部件受力主体　2. 插秧部件限位器

根据水田土壤的物理性质研究[17-19]，水田土壤内聚力变形模量和摩擦变形模量随着土壤含水率的增加而减小，结合南方水田作业环境及测得的土壤物理性质，内聚力变形模量取 1.5 kPa/m$^{(n+1)}$，摩擦变形模量取 25 kPa/m$^{(n+2)}$；根据 Bekker 的广泛试验结果，按不同均质土壤所得变形指数 n_1 对土壤分类，分界线相当于是 $n_1 = 1$ 的直线，界限以下为“软弱”土壤，界限以上为“硬实”土壤。针对于南方双季稻种植地区稻田土壤，n_1 取 0.6。结合相关水稻垄作研究中 200 ~ 250 mm 的典型垄高[20]，以及上文

所选旋耕机 250 mm 的最大起垄能力，将土壤下陷量允许的安全值设定为 20 mm，代入公式(5)进行计算，当板宽 $B=400$ mm 时，$Z=19.7$ mm，故确定仿形板的允许最小宽度为 400 mm。当宽度增加至 500 mm 以上时，继续增加宽度对减少土壤下陷量的贡献显著降低。

为避免浮板因局部压强过高而破坏垄面，其设计需兼顾两项关键要求：必须具备足够的结构刚度，以防止因变形导致部分下陷、边缘翘起，从而减小有效承载面积并引发局部应力集中；需实现轻量化。为此仿形板选用厚度为 2 mm 的铝制板材，在保证所需强度的同时有效控制了重量。

仿形板水平阻力分析公式为

$$\begin{cases} F_B = PBL_B = PB\dfrac{Z_B}{\sin\alpha} \\ F_{Bx} = F_B\sin\alpha = PBZ_B \\ P = K_S Z^{n_1} \end{cases} \tag{6}$$

式中 F_B——仿形板前端法向阻力，N

P——土壤抗压强度，N/cm^2

Z_B——仿形板前端受力点 B 高度，mm

L_B——仿形板前端点 B 长度，mm

F_{Bx}——仿形板壅土阻力水平分量，N

K_S——土壤变形模量

滑动阻力计算式为

$$\begin{cases} F_f = A\tau_s \\ \tau_s = C_x + \sigma\mu \\ C_x = C_y\mu \end{cases} \tag{7}$$

式中 F_f——仿形板底部法向摩擦力，N

τ_s——摩擦剪力，N

C_x——切向外附系数

C_y——法向外附系数

μ——浮板底面与土壤摩擦因数

联立式(6)、(7)可得水平阻力 R 为

$$R = F_f + F_{Bx} = PBZ_B + A\mu(C_y + \sigma) \tag{8}$$

根据水田土壤的抗压强度、抗剪强度与塑性范围和含水率的关系可知，同一类型土壤，由于含水率不同，机械性质也有所不同，根据试验田取得的土壤样本，测得土壤含水率约为 35%，所以 P 取 5 N/cm^2，根据相关研究[21]，金属板与水田黏土界面的滑动摩擦因数 μ 取值范围为 0.25～0.30。

分析式(8)可知，仿形板阻力以压差阻力为主，且受形状影响显著。为优化前端压力分布，需对水平板状结构进行改进：该结构易使表面堆积泥水，增加部件负重与下陷量。为此，本设计在仿形板前端增设翘起挡板，其作用在于抑制壅泥上涌、稳定作业层土壤，从而从根源上改善受力状态。根据水田浮板设计与优化相关研究成果[22-23]，仿形板前端角度 α 最佳取值范围为 15°～45°。

仿形板前端角度直接关系到水平推土阻力与仿形板前段长度，前端翘起部分垂直分量需大于土壤下陷量，将土壤下陷量 Z 代入公式

$$\alpha = \arcsin\frac{Z}{C} \tag{9}$$

式中 C——仿形板前端翘起长度，mm

优化可得 α 取 30°，C 取 40 mm。

本节依次完成了仿形板宽度与土壤下陷量关系的确定，以及基于下陷量的仿形板前端翘起部分参数(角度、长度)推导。设计旨在平衡多重目标：通过最小化下陷量来保证仿形灵敏度并保护垄面，同时通过优化翘起参数来最小化作业阻力。

4.2 挂接机构设计

插秧装置与开沟起垄机利用三点悬挂方式挂接，考虑到插秧部件应能感应垄面变化，始终与垄面保持仿形运动，实现栽插深度一致，因此挂接机构设计有可伸缩上杆件(如图 8 所示)以适应机具姿态角度变化，同时配有最低限位器，保证插秧部件不因土壤变化或长途运输而损坏，挂接结构如图 9 所示。

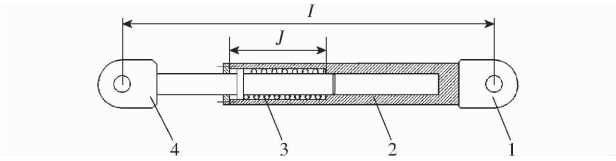


图 8 可伸缩上杆件结构示意图

Fig. 8 Schematic of telescopic upper link structure

1. 可伸缩上杆件开沟起垄机挂接点 2. 缸套 3. 弹簧 4. 可伸缩上杆件插秧装置挂接点

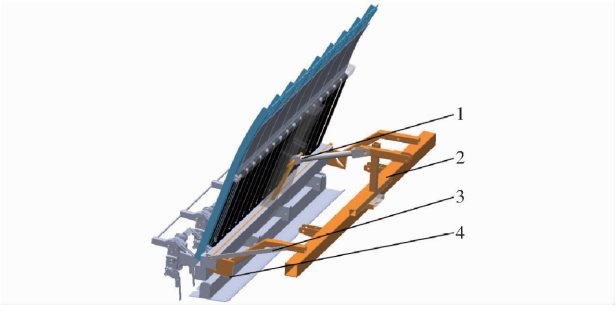


图 9 挂接机构结构示意图

Fig. 9 Structural diagram of hitching mechanism

1. 可伸缩上杆件 2. 旋耕机挂接梁 3. 下杆件 4. 最低限位器

分析挂接机构，上杆拉长则机具处于前倾状态，缩短时机具处于后仰状态，由此得出可伸缩上杆长度应满足

$$\begin{cases} I = \dfrac{\Delta J\cos\theta}{1-\cos\theta} \\ I_{\max} = I_{\min} + J \end{cases} \tag{10}$$

式中　I——仿形部件中可伸缩上杆件长度，mm

J——可伸缩上杆件长度，mm

ΔJ——可伸缩上杆件长度改变量，mm

I_{min}——可伸缩上杆件长度最小值，mm

I_{max}——可伸缩上杆件长度最大值，mm

θ——插秧部件转动角度，(°)

挂接机构运动轨迹如图 10 所示，图中 AB 为插秧深度控制板，BC 为仿形板前端翘起部分，GF 为仿形部件中的下杆件，IJ 为仿形部件中可伸缩上杆件；F_A 为土壤给仿形板的支持力，N；G 为插秧部件所受重力，N；F_G 为仿形部件下杆件所受拉力，N；M_1 为仿形部件受土壤支持力产生的扭矩，N·m。

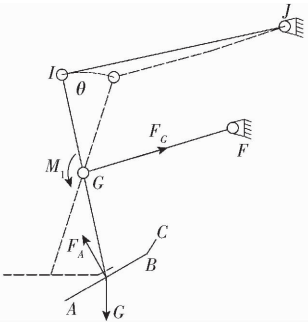


图 10　挂接机构运动分析图

Fig. 10　Kinematic analysis diagram of hitch assembly

4.3　仿形部件运动分析

该插秧深度仿形系统集成了一组带可伸缩上杆件的平行四杆机构与仿形板，插秧深度控制仿形系统可根据垄面高度与角度而改变姿态，使插秧装置始终仿形作业，实现栽插深度一致(图 11)。

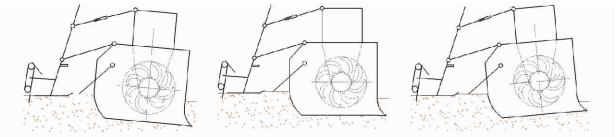


图 11　开沟起垄插秧一体机作业姿态示意图

Fig. 11　Operational posture schematic diagram of trenching, ridging, and transplanting combined machine

根据旋耕机开沟起垄作业效果，仿形部件通常与平土拖板同时工作，因此设计两部分连接时需探讨平土拖板与仿形部件之间的空间关系及进行运动分析，如图 12(DE 为平土拖板，FG 为仿形部件中的下杆件，K 为平土拖板与仿形板间的安全距离，点 H 为插秧部件限位器位置)所示，当 β 达到一定值时，平土拖板距离仿形板最近，此时可以把 C、D 看作一个点并构成一个封闭图形，由此可得仿形部件与平土拖板的极限位置矢量关系式

$$\boldsymbol{l}_{OB}+\boldsymbol{l}_{BC}+\boldsymbol{l}_{DE}+\boldsymbol{l}_{EF}=\boldsymbol{l}_{OG}+\boldsymbol{l}_{GF}\Leftrightarrow$$

$$L_{OB}e^{i\frac{\pi}{2}}+L_{BC}e^{i\alpha}+L_{DE}e^{i\beta}+L_{EF}e^{i\pi}=L_{OG}e^{i\delta}+L_{GF}e^{i\gamma} \tag{11}$$

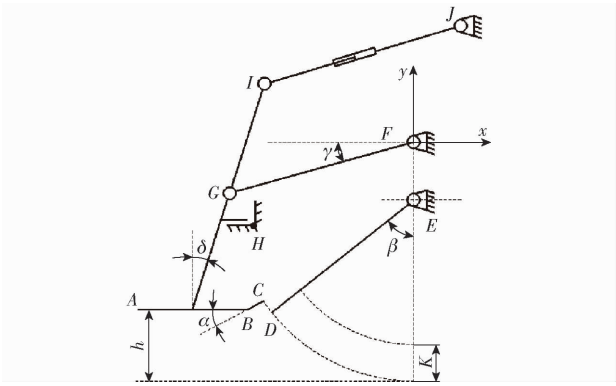


图 12　仿形机构运动分析

Fig. 12　Kinematic analysis of profiling mechanism

展开公式令实部与虚部各自相等，可得

$$\begin{cases}L_{OB}+L_{BC}\cos\alpha+L_{DE}\sin\beta=L_{OG}\sin\delta+L_{GF}\cos\gamma\\ L_{BC}\sin\alpha+L_{DE}\cos\beta+L_{EF}=L_{OG}\cos\delta+L_{GF}\sin\gamma\end{cases} \tag{12}$$

式中　β——平土拖板作业时与旋耕机角度，(°)

γ——平行四杆安装角度，(°)

δ——插秧部件角度，(°)

平土拖板安装在旋耕机上梁，根据所选旋耕机外形尺寸，平土拖板 DE 长度为 440 mm、EF 长度为 237 mm、OG 长度为 335 mm。

为确定仿形板安装高度，首先明确其指的是限位器约束下的运动最低点高度。为使仿形板有效跟踪垄面和避免架空，其安装高度需参照垄高最小值。基于前文计算的垄高最小值，仿形板安装高度最大值为 220 mm，以此实现与垄形的精准贴合；为避免运输及上下田埂时损坏秧爪，安装最小值设计为 180 mm。

5　仿真试验与参数优化

使用 Design-Expert 软件设计三因素二次回归通用旋转组合试验，优化插秧机仿形板结构与工作参数。仿形板与限位器的相互作用涉及多体动力学理论，与土壤的相互作用涉及动力学理论和离散元理论，故本文采用 MBD－DEM 耦合仿真方法进行仿真试验。

5.1　试验方案

响应面优化试验中要求试验点包含各因素最佳水平，根据计算公式与受力分析，确定试验因素为仿形板安装高度、仿形板宽度和仿形板前端角度(如表 2)。仿形板安装高度决定插秧深度并直接影响插秧深度稳定性；仿形板宽度决定仿形工作中产生的土壤下陷量，即对垄面的破坏程度，但增加板宽导致重量加大和滑动阻力增大，因此优化方向为土壤下陷量 Z 尽可能地减小，仿形板前端翘起角度则决

定了壅土量和压实阻力,故优化方向为水平阻力 F_{Bx} 尽量小,翘起高度大于土壤下陷量,设定约束条件 $F_{\mathrm{CONTANT}}(F_H)=0$、$BC\sin\alpha \geqslant Z$。

表 2 试验因素编码

Tab. 2 Factors and codes of experiments

编码	仿形板安装高度/mm	仿形板宽度/mm	仿形板前端角度/(°)
-1	180	400	15
0	200	450	30
1	220	500	45

5.2 MBD-DEM 耦合仿真建模

5.2.1 离散元建模

运用 EDEM 软件建立离散元模型[24](图 13),建立 BOX 与土壤颗粒工厂,生成仿真试验所需土层(长×宽×高:3 000 mm×2 500 mm×400 mm),根据相关研究确定各项仿真材料参数,在 EDEM 中使用 Hertz-Mindlin with JKR 模型模拟土壤之间的相互作用,采用 Hertz-Mindlin(no slip)接触模型模拟土壤和触土部件的接触作用,根据实地调研水稻土壤表层土壤和底层土壤的物理特性有较大差异,因此在试验土槽中生成 0~15 cm 的上层土壤和 15~40 cm 的下层土壤;为减轻仿真运算工作量,更为直观地检验仿形板仿真工作结果,将仿真试验分为 3 步:将 Solidworks 生成的机具模型分成旋耕开沟起垄部分(step 格式)和仿形插秧部分(x_t 格式);将前者放入 EDEM 生成的土槽中进行仿真试验,并导出旋耕开沟起垄后的土槽仿真结果;将后者分别导入 EDEM 和 Adams 中,在 Adams Co-simulation 中编写耦合程序、环境参数和步长,然后进行耦合仿真。

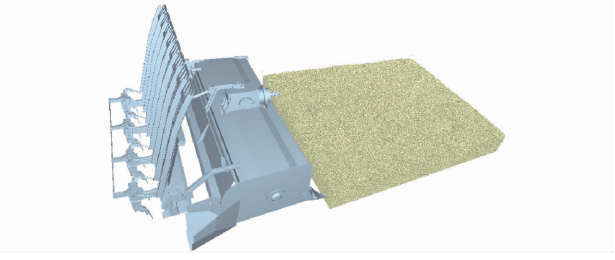


图 13 离散元模型

Fig. 13 Discrete element model

根据土壤颗粒物理特性离散元参数标定相关研究文献[25-26],土壤颗粒仿真参数配置如表 3 所示。

5.2.2 多体动力学建模

在 Adams View 中,建立仿形机构与插秧机构相配合的多体动力学模型,各部件间的运动副及 General Force 设置如表 4 所示,结合插秧机工作环境,重要机构材料配置为不锈钢,旋耕机选用普通碳钢,插秧部件与乘禾板等均为塑料。在主机体简化部件与大地间添加移动副以模拟插秧机在田间移动作业,通过调查插秧机实际工作速度,设置驱动速度为 0.5 m/s。

表 3 土壤颗粒离散元参数

Tab. 3 Parameters of discrete element for soil particles

参数	数值
表层土壤颗粒半径/mm	4
表层土壤颗粒密度/(kg·m^{-3})	1 420
表层土壤颗粒泊松比	0.25
表层土壤颗粒间静摩擦因数	0.11
表层土壤颗粒间滚动摩擦因数	0.15
表层土壤颗粒间恢复系数	0.3
底层土壤颗粒半径/mm	6
底层土壤颗粒密度/(kg·m^{-3})	1 570
底层土壤颗粒泊松比	0.3
底层土壤颗粒间静摩擦因数	0.1
底层土壤颗粒间滚动摩擦因数	0.15
底层土壤颗粒间恢复系数	0.3
土壤颗粒与仿形板静摩擦因数	0.31
土壤颗粒与仿形板滚动摩擦因数	0.13
土壤颗粒与仿形板恢复系数	0.54

表 4 各部件间的运动副及 General Force 配置

Tab. 4 Kinematic pairs among components and General Force configuration

部件	配合部件	运动副	General Force
主机体	地面	移动副	General Force 1
连接杆	主机体	旋转副	General Force 2
侧杆	主机体	旋转副	General Force 3
插秧部件	连接杆	旋转副	General Force 4
插秧部件	侧杆	旋转副	General Force 5

通过添加在主机体简化部件(最低限位器)与插秧部件之间的 contact 1 测得两者接触力 F_H,在仿形板与土壤添加广义力 General Force 4 测量 F_A,在插秧部件上添加 marker 点以测量接触高度。

在进行 MBD-DEM 耦合仿真试验时,每次试验前更改仿真模型并在 Adams 导入新的模型数据(新的质量、质心与位置参数等),仿真结束将生成的 .res 格式耦合仿真结果文件导入 Adams PostProcessor 软件,取从仿形部件首次触土到高度稳定所需时长作为姿态恢复耗时,在仿真稳定时取数据平均值作为当前试验仿形部件所受阻力和土壤下陷量的结果,试验方案与结果如表 5 所示(A、B、C 为因素编码值)。在 EDEM 中使用“Analyst”功能取作业截面,记录垄面高度与秧针高度,计算差值作为插秧深度(如图 14 所示),插秧深度合格率计算式为

$$M=\sum_{i=1}^{\rho}\frac{Q_i}{\rho}\times 100\% \tag{13}$$

式中 M——插秧深度合格率,%

ρ——试验总穴数 Q_i——插秧深度

表 5　试验方案与结果

Tab. 5　Test plan and results

试验编号	因素 A	因素 B	因素 C	姿态恢复耗时 T/s	水平阻力 F_{Bx}/N	土壤下陷量 Z/mm
1	-1	-1	0	0.92	554.6	22.6
2	1	-1	0	0.86	554.8	22.5
3	-1	1	0	0.63	569.4	16.3
4	1	1	0	0.45	574.5	16.2
5	-1	0	-1	0.73	592.5	18.1
6	1	0	-1	0.65	594.1	18.1
7	-1	0	1	0.72	622.1	18.9
8	1	0	1	0.64	624.2	19.3
9	0	-1	-1	0.88	590.2	22.3
10	0	1	-1	0.51	596.2	15.5
11	0	-1	1	0.89	621.3	23.0
12	0	1	1	0.54	626.1	16.9
13	0	0	0	0.67	559.5	18.2
14	0	0	0	0.67	556.6	18.6
15	0	0	0	0.68	557.6	18.4
16	0	0	0	0.66	561.1	18.5
17	0	0	0	0.68	563.5	18.3

当第 i 个数据 Q_i 落在 10 ~ 20 mm 之间时[27]，$Q_i=1$，表示合格；反之 $Q_i=0$，表示不合格。

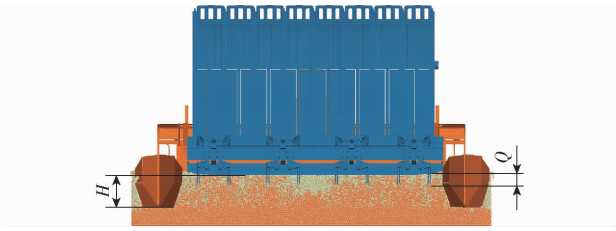


图 14　仿真试验土槽截面

Fig. 14　Simulation test soil-bin cross-section

5.3　仿真结果分析

根据表 6 数据，对仿真结果用 Design-Expert 软件进行回归拟合，剔除不显著因素分别建立姿态恢复耗时 T、水平阻力 F_{Bx} 和土壤下陷量 Z 与各个因素的二次多项式回归模型

$$\begin{cases} T = 0.672 - 0.05A - 0.177\,5B + 0.002\,5C - \\ \qquad 0.03AB + 0.031\,5B^2 \\ F_{Bx} = 559.66 + 1.12A + 5.66B + 15.09C + 46.84C^2 \\ Z = 18.4 + 0.025A - 3.19B - 0.412\,5C + 0.912\,5B^2 \end{cases} \tag{14}$$

回归模型方差分析和显著性分析如表 6 所示：仿形板恢复耗 T、水平阻力 F_{Bx} 和土壤下陷量 Z 回归模型极显著（模型 $P<0.01$），且失拟项不显著（失拟项 $P>0.05$），此结果表明回归方程拟合度较好，可以通过该模型对机具关键部件的参数进行分析和优化。

表 6　回归方程方差分析

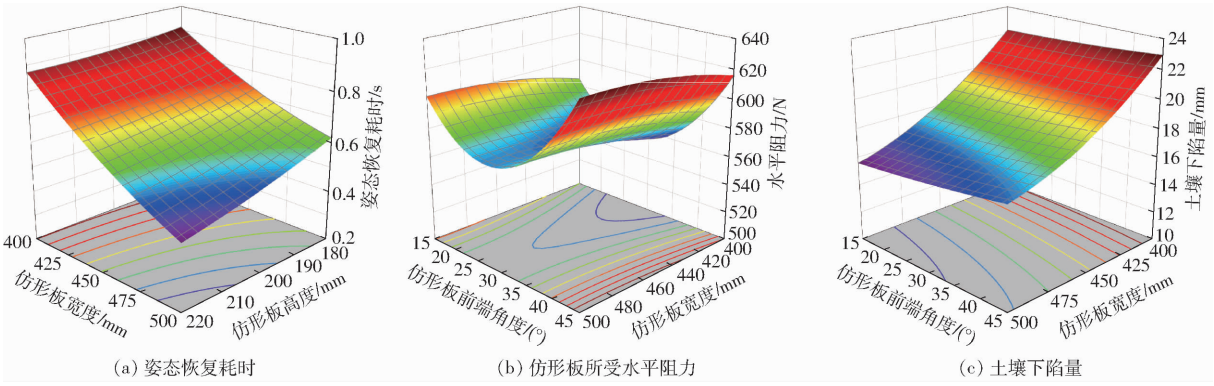
Tab. 6　Variance analysis of regression equation

来源	姿态恢复耗时 T 平方和	自由度	均方	F	P	水平阻力 F_{Bx} 平方和	自由度	均方	F	P	土壤下陷量 Z 平方和	自由度	均方	F	P
模型	0.280 8	9	0.031 2	138.21	0.000 1 **	11 499.20	9	1 277.69	88.38	0.000 1 **	87.25	9	9.69	430.88	0.000 1 **
A	0.020 0	1	0.020 0	88.61	0.000 1 **	10.13	1	10.13	0.700 4	0.430 3	0.005 0	1	0.005 0	0.222 2	0.651 7
B	0.252 1	1	0.252 1	1 116.68	0.000 1 **	256.51	1	256.51	17.74	0.004 0 **	81.28	1	81.28	3 612.5	0.000 1 **
C	0.000 0	1	0	0.221 5	0.652 2	1 821.06	1	1 821.06	125.97	0.000 1 **	2.10	1	2.10	93.39	0.000 1 **
AB	0.003 6	1	0.003 6	15.95	0.005 2 **	6.00	1	6.00	0.415 2	0.539 9	0	1	0	0	1.000 0
AC	0.000 0	1	0	0.000 0	1.000 0	0.062 5	1	0.062 5	0.004 3	0.949 4	0.040 0	1	0.040 0	1.78	0.224 2
BC	0.000 1	1	0.000 1	0.443 0	0.527 0	0.360 0	1	0.360 0	0.024 9	0.879 1	0.122 5	1	0.122 5	5.44	0.052 4
A^2	0.000 6	1	0.000 6	2.47	0.160 3	12.46	1	12.46	0.861 7	0.384 2	0.032 2	1	0.032 2	1.43	0.270 3
B^2	0.004 2	1	0.004 2	18.51	0.003 6 **	15.93	1	15.93	1.10	0.328 7	3.51	1	3.51	155.82	0.000 1 **
C^2	0.000 1	1	0.000 1	0.042 0	0.843 5	9 239.81	1	9 239.81	639.15	0.000 1 **	0.053 3	1	0.053 3	2.37	0.167 7
残余项	0.001 6	1	0.000 2			101.19	7	14.46			0.157 5	7	0.022 5		
失拟项	0.001 3	3	0.000 4	6.19	0.055 3	70.74	3	23.58	3.10	0.151 7	0.057 5	3	0.019 2	0.766 7	0.569 3
误差	0.000 3	4	0.000 1			30.45	4	7.61			0.100 0	4	0.025 0		
总和	0.282 4	16				11 600.40	16				87.41	16			

注：** 表示极显著（$P<0.01$），* 表示显著（$0.01\leqslant P<0.05$）。

根据表 6 回归方程方差分析与图 15 的响应曲面分析，仿形板姿态恢复耗时（T）与仿形板安装高度（A）、仿形板宽度（B）显著相关。结合公式（5）进行分析，其机理在于：改变板宽会改变触土面积，从而改变插秧部件对垄面的压强。而安装高度的增大则相对降低部件重心，因此，适当增加板宽和安装高度，使仿形板更迅速地恢复并贴合垄面，从而提升动态仿形作业的响应速度。

仿形板所受水平阻力（F_{Bx}）主要与前端角度



(a) 姿态恢复耗时 (b) 仿形板所受水平阻力 (c) 土壤下陷量

图 15 试验因素对试验指标影响的响应曲面

Fig. 15 Response surfaces of test factors to test indexes

(C)、仿形板宽(B)显著相关。根据式(6)与式(7):角度过大会显著增加壅土阻力,角度过小时,虽能减少壅土阻力,但因接触面积增大而增大水平摩擦阻力,同时也增加了泥土在板面附着的可能性,间接导致水平阻力增大。

土壤下陷量(Z)与仿形板宽(B)、前端角度(C)显著相关,根据式(5)分析原理为:板宽的增大会减小压强,前端角度减小则间接增大板面宽度,从而减小土壤下陷量。

5.4 参数优化

根据水稻开沟起垄插秧一体机工作原理,要求仿形板恢复耗时 T 尽量短、土壤下陷量 Z 尽量小,以保证仿形板能够实时灵敏感知垄面高低起伏变化,稳定插秧深度;为保证插秧部件与旋耕开沟起垄部件协调运动,要求仿形板受到土壤水平方向的阻力 F_{Bx} 尽量小。为计算仿形部件较好的工作性能时设计参数,建立目标函数和约束条件

$$\begin{cases} \min Z(A,B,C) \\ \min T(A,B,C) \\ \min F_{Bx}(A,B,C) \\ \text{s.t.} \begin{cases} -1 \leqslant A \leqslant 1 \\ -1 \leqslant B \leqslant 1 \\ -1 \leqslant C \leqslant 1 \end{cases} \end{cases} \tag{15}$$

运用 Design-Expert 软件优化功能计算较优的模型参数组合。当仿形板安装高度为 199 mm、板宽为 463 mm、仿形板前端角度为 20°时,仿形板姿态恢复耗时为 0.697 s、仿形板水平阻力为 589.52 N、土壤下陷量为 16.2 mm。将优化参数代入 EDEM 软件并对插秧深度进行测量与统计,结果表明插秧深度稳定性为 93.22%,符合设计预期。

6 田间试验

6.1 试验条件与设备

为检验装置田间插秧作业效果,按照仿真最优参数研制水稻插秧机,于湖南省衡阳市梅花村水田示范区开展田间验证试验,并进行样机鉴定。试验前在衡阳市梅花村试验田对稻田土壤的相关参数进行测定(配套工具有卷尺(4 m)、直尺(500 mm)、土壤取样环刀、电子天平、土壤坚实度检测仪、力辰 DHS 型电子卤素水分测定仪等),测得土壤参数如表 7 所示;田面水深 0 ~ 1 cm,泥脚深度约为 23 mm,试验秧苗选用 7 寸毯状秧苗,插前测得苗高 248 mm,叶龄 3.5 叶,秧苗插前均匀度为 87%,秧苗插前合格率为 98%,取秧深度为 15 mm,移距为 18 mm,合格株数为 2 ~ 7 株,配套拖拉机发动机额定功率为 51.5 kW。

表 7 土壤物理特性参数

Tab. 7 Soil physical property parameters

土层深度/cm	含水率/%	土壤坚实度/kPa	土壤容重/(g·cm^{-3})
0 ~ 10	45.1	105	1.15
10 ~ 15	47.1	210	1.21
15 ~ 20	35.6	316	1.25
20 ~ 25	31.8	421	1.33
25 ~ 30	27.4	596	1.38

6.2 试验设计

水稻田间试验参数设置与试验安排如下:于 2024 年 4 月 13 日和 2024 年 7 月 23 日在湖南省衡阳市梅花村水田示范区进行水稻开沟起垄插秧一体机性能试验,早稻选用秧龄为 30 d 的中早 39,晚稻选用秧龄为 29 d 的瑞两优 1053 作为研究材料,试验设置 4 个处理:旋耕后使用高速水稻插秧机插秧(W1)、未耕地上使用开沟起垄插秧一体机(W2)、旋耕机旋耕一次后使用开沟起垄插秧一体机(W3)、旋耕机旋耕两次后使用开沟起垄插秧一体机(W4)。其中晚稻机插秧为验证试验,经分析产量免耕(W2)增产幅度不高,故 2025 年早稻重复验证 W1、W3 两种模式下水稻生长情况。

6.3　试验结果与分析

水稻开沟起垄插秧一体机田间试验结果如表 8、9 和图 16 所示。

表 8　开沟起垄插秧一体机试验结果

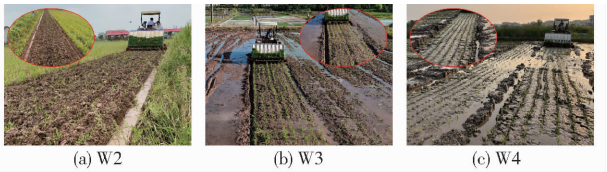
Tab. 8　Test results of the ditching, ridging and transplanting integrated machine

参数			数值
垄高	均值/mm		233
	稳定性系数/%	W2	91.55
		W3	90.12
		W3	89.77
垄顶宽	均值/mm		1 769
	稳定性系数/%	W2	93.10
		W3	90.16
		W4	90.07
开沟深度	均值/mm		191
	稳定性系数/%	W2	93.15
		W3	90.65
		W4	88.79
沟面宽度	均值/mm		205
	稳定性系数/%	W2	94.21
		W3	93.54
		W4	91.43
插秧深度	均值/mm		91.07
	稳定性系数/%	W2	91.22
		W3	91.15
		W4	90.83
伤秧率/%			3.6
漏插率/%			4
漂秧率/%			1

表 9　不同模式下作业效率对比

Tab. 9　Comparison of operating efficiency under different modes

作业模式	作业流程(效率/($hm^2 \cdot h^{-1}$))			作业效率/($hm^2 \cdot h^{-1}$)
插秧后人工开沟	机械整田(1.0～1.2)	机械插秧(0.4～0.6)	人工开沟(7.5×10^{-3})	7.3×10^{-3}～7.4×10^{-3}
插秧后机械开沟	机械整田(1.0～1.2)	机械插秧(0.4～0.6)	机械开沟(1.0～1.2)	0.22～0.30
同步开沟起垄插秧	机械整田(选用)(1.0～1.2)	同步开沟起垄插秧(0.4～0.5)		0.29～0.50



(a) W2　(b) W3　(c) W4

图 16　田间效果图

Fig. 16　Field effect visualizations

根据试验数据与作业效果可知，优化过后的机具重要工作部件作业效果符合预期：沟垄成型效果满足水稻垄作要求，仿形系统工作灵敏，能够有效稳定插秧深度，达到水稻机插秧标准，提高作业效率，同时旋耕次数增加有以下效果：除草效果增加，田间土壤更加稀松但土壤回流率增加；插秧效果更佳，漏插率、漂秧率减小；垄面更加平整，但土壤回流率增加，沟型变差。

7　水稻田间长势与产量构成分析

7.1　田间跟踪调查

在移栽后 7 d 内首次对秧苗进行调查分蘖情况，并在随后间隔 7 d 调查水稻分蘖情况，其生长状态(插秧后、生长前中期、成熟期)如图 17 所示，根据田间跟踪所测数据得出水稻生长数据，如图 18 所示。

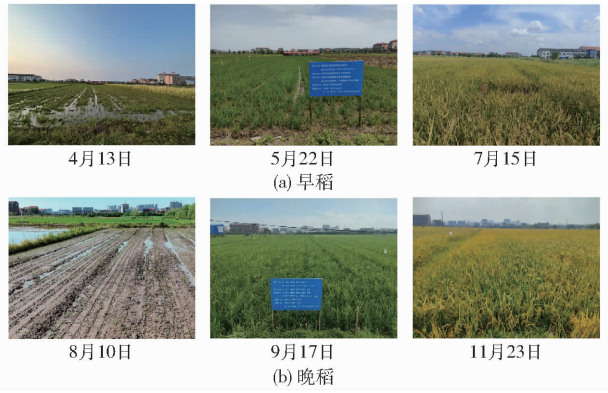


图 17　水稻田间长势图

Fig. 17　Rice growth performance in field

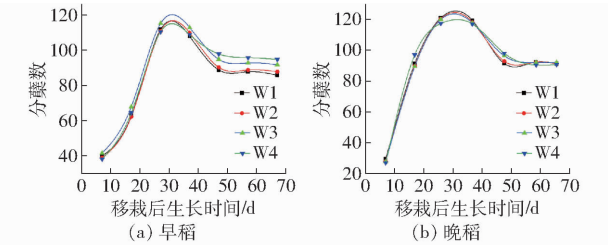


图 18　早晚稻移栽后分蘖数变化曲线

Fig. 18　Dynamic changes curves in tiller number of early and late rice after transplanting

根据调查与统计，早稻分蘖数在移栽后约 30 d 时达到最大值，水稻生长前中期(W3)模式分蘖数最多，其他模式相差不大，在水稻生长后期，W4 模式分蘖数最多，其次是 W3，W1 与 W2 分蘖数基本一致。晚稻分蘖数在移栽后约 35 d 达到最大值，晚稻生长中期(W4)分蘖数最少，其他模式分蘖情况相近，在生长后期 W1、W2 分蘖数下降较快，最终和 W3、W4 相差不大。

7.2　结果与分析

随机抽取 5 组 5 m^2 植株，记录有效穗数、结实率、穗粒数以及千粒质量，考虑试验跨年跨季、全生育期时间长度不同，在产量计算中采用“日产量”来表述。数据如表 10 所示。

表 10 不同处理方式对水稻产量及其构成因素的影响

Tab. 10 Effects of different treatments on rice yield and its component traits

参数	早稻(中早 39)(2024 年)				晚稻(瑞两优 1053)(2024 年)				早稻(陵两优 942)(2025 年)	
	W1	W2	W3	W4	W1	W2	W3	W4	W1	W3
有效穗数	97.45	98.15	99.12	99.67	91.67	91.41	91.33	90.67	92.89	90.54
结实率/%	73.9	74.2	74.9	75.2	73.9	74.1	77.2	79.8	74.2	78.5
穗粒数	100.60	102.80	110.97	111.23	191.85	195.55	203.12	202.98	121.57	123.79
千粒质量/g	24.96	25.17	25.43	25.48	26.17	26.16	26.10	26.22	27.10	27.31
日产量/($kg \cdot hm^{-2} \cdot d^{-1}$)	64.89	65.16	67.47	67.95	64.74	65.42	68.16	68.68	74.86	79.46
产量增加率/%		0.42	4.00	4.70		1.05	5.30	6.10		6.20

根据不同模式对水稻产量及其构成因素影响的数据,可以得出结论:水稻开沟起垄插秧种植模式田间排水更好、受光受热面积更大(如图 19 所示)、增加水稻有效穗数、利于干物质积累,从而增加作物产量;水稻产量随旋耕次数的增加而增大,“二次旋耕 + 开沟起垄插秧”模式下水稻产量最高,但其相较于“一次旋耕 + 开沟起垄插秧”增加作业次数但不能明显增产;在 2025 年春季对“一次旋耕 + 开沟起垄插秧”进行验证试验,经测产得出产量增幅约为 6.2%。同时也验证了水稻开沟起垄插秧一体机及种植模式可对不同品种不同季节的水稻进行有效增产。

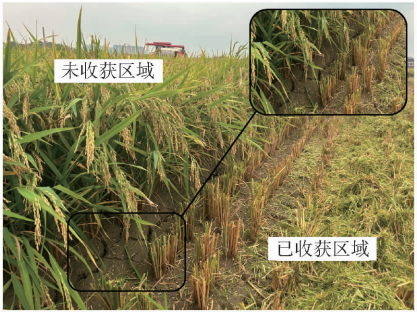


图 19 收获时垄沟示意图

Fig. 19 Schematic of ridges and furrows at harvest time

水稻成熟测产时发现开沟起垄插秧种植模式相较常规插秧种植模式,有明显的抗倒伏优势,如图 20 所示,分析原因推断:对照组稻田边缘排水性能相较于田块中心部分更好,土壤氧含量较高,故根系生长状况更好,水稻生长更强壮、抗倒伏能力更强,观察图 20a 所示无开沟起垄的对照组田间水稻倒伏情况,稻田中心倒伏情况严重而边缘情况良好,在图 20b 垄作模式中,因田间开沟数条垄沟,排水和受热效果好,使水稻总体根系强壮从而产生边际效应,因此未出现大面积倒伏情况。



(a) 对照组 (b) 试验组

图 20 水稻田间倒伏情况

Fig. 20 Rice lodging conditions in field

8 结论

(1)通过 MBD - DEM 耦合仿真方法,结合 Design-Expert 分析得到各试验因素对仿形恢复耗时、仿形板所受水平阻力和土壤下陷量的影响。仿真结果表明:仿形板安装高度为 199 mm、仿形板宽为 463 mm、仿形板前端角度为 20°时,仿形板姿态恢复最短耗时为 0.697 s,土壤对仿形板水平最小阻力为 589.52 N,土壤最小下陷量为 16.2 mm,通过计算得出插秧深度合格率为 93.22%。

(2)田间试验表明:在 3 种作业模式中,插秧深度平均值分别为 21.5、15.0、12.1 mm;插秧深度稳定性系数为 91.22%、91.15%、90.83%。试验结果与优化模型预测值吻合,由此可得仿形机构能够感知垄面起伏变化,较为精准地稳定控制插秧深度,可为水稻插秧机传动系统和深度稳定机构提供参考。

(3)大田试验及产量对比结果表明:开沟起垄插秧一体机种植模式对比常规水稻插秧模式(W1)能有效增产,早晚稻分别选用中早 39 和瑞两优 1053,免耕作业模式(W2)增产 0.42% ~ 1.05%、一次旋耕作业模式(W3)增产 4.0% ~ 5.3%、二次旋耕作业模式(W4)增产 4.7% ~ 6.1%,对比表明 W3 比 W4 成本更小但增产相近;此外水稻开沟起垄插秧种植模式较常规种植模式有助于田间排水、增加受光面积、增加水稻产量,利于水稻根系生长,产生边际效应,从而具有抗倒伏的优势。

参 考 文 献

[1] 戴锦清,袁紫依,陈俊,等. 垄厢栽培模式下厢宽和种植密度对双季稻田甲烷排放的影响[J/OL]. 农业资源与环境学报. [2025 - 12 - 28]. https://link.cnki.net/doi/10.13254/j.jare.2025.0178.

[2] Yuan Z Y. Effects of ridge tillage on photosynthesis and root characters of rice[J]. Chilean Journal of Agricultural Research, 2015,75(1):35 – 41.

[3] Qin Chuan, Wright Alan L, Ma Lihua, et al. Improving nitrogen-use efficiency by using ridge tillage in rice paddy soils[J]. Soil Use and Management,2020,38(1):528 – 536.

[4] 庞伟. 一种新型前置式开沟机刀盘的研究设计[J]. 农机化研究,2002,24(4):107 – 109,119.
Pang Wei. The research and the design of a new-type cutter head of a rotation ditching machine[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research,2002,24(4):107 – 109,119. (in Chinese)

[5] 张明华,王在满,罗锡文,等. 水稻精量穴直播机开沟装置的设计与试验[J]. 农业工程学报,2017,33(5):10 – 15.
Zhang Minghua, Wang Zaiman, Luo Xiwen, et al. Design and experiment of furrowing device of precision hill-drop drilling machine for rice[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(5): 10 – 15. (in Chinese)

[6] 刘晓鹏,张青松,刘立超,等. 基于微分几何与 EDEM 的船型开畦沟装置触土曲面优化[J]. 农业机械学报,2019,50(8): 59 – 69.
Liu Xiaopeng, Zhang Qingsong, Liu Lichao, et al. Surface optimization of ship type ditching system based on differential geometry and EDEM simulation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(8): 59 – 69. (in Chinese)

[7] 燕桓,魏国梁,张青松,等. 稻茬田油菜直播机组合式开种沟装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2025,56(9):199 – 211.
Yan Huan, Wei Guoliang, Zhang Qingsong, et al. Design and experiment of combined seed furrow opener for rapeseed direct seeder in rice stubble field[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025,56(9):199 – 211. (in Chinese)

[8] 张青松,蔡家顺,于良航,等. 冷浸田起垄平整装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2024,55(2):50 – 59.
Zhang Qingsong, Cai Jiashun, Yu Lianghang, et al. Design and experiment of ridging leveling device for cold waterlogged paddy field[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2024,55(2):50 – 59. (in Chinese)

[9] 万苏文,庞建华. 分插推培机构非圆齿轮节曲线设计分析与加工[J]. 机械设计与制造, 2019 (11): 181 – 183.
Wan Suwen,Pang Jianhua. The designing and making of the pitch curve about non-circular gears with double needle pushing-planting mechanism[J]. Machinery Design & Manufacture, 2019(11): 181 – 183. (in Chinese)

[10] 周永清,贺亮,顾林. 基于虚拟样机的超级稻高速插秧机分插机构参数优化[J]. 机械设计与研究,2019,35(6):62 – 66.
Zhou Yongqing, He Liang, Gu Lin. Parameters optimization of seperating-planting mechanism for high-speed transplanter for super-rice based on virtual prototyping technology[J]. Machine Design & Research, 2019,35(6):62 – 66. (in Chinese)

[11] 孙良,姜凯雯,周斌,等. 取秧侧向零偏移的空间轨迹再生稻分插机构设计与试验[J]. 农业机械学报,2024,55(2): 101 – 108.
Sun Liang, Jiang Kaiwen, Zhou Bin, et al. Design and experiment of regenerated rice on space trajectory transplantation mechanism with zero lateral offset[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024,55(2): 101 – 108. (in Chinese)

[12] 包攀峰,吴明亮,官春云,等. 犁旋组合式油菜播种开沟起垄装置设计[J]. 农业工程学报,2017,33(20):23 – 31.
Bao Panfeng, Wu Mingliang, Guan Chunyun, et al. Design of plow-rotary style ditching and ridging device for rapeseed seeding[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(20): 23 – 31. (in Chinese)

[13] 刘海,张青松,廖宜涛,等. 小白菜复式播种机犁旋辊压驳岸型种床起垄装置研究[J]. 农业机械学报,2021,52(11): 40 – 48,77.
Liu Hai, Zhang Qingsong, Liao Yitao, et al. Design of plow-rotary and roll-forming revetment style seed bed ridging device of combined precision seeder for *Brassica chinensis*[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2021, 52(11): 40 – 48,77. (in Chinese)

[14] 杜文斌,杨春雷,杨锦鹏,等. 雪茄烟叶可调式苗床起垄铺膜机设计与试验[J]. 农业机械学报,2023,54(1):116 – 126, 295.
Du Wenbin, Yang Chunlei, Yang Jinpeng, et al. Design and experiment of cigar tobacco adjustable seed-plot ridging and film spreading machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2023,54(1):116 – 126,295. (in Chinese)

[15] 张和,蒋啸虎,吴明亮,等. 冷浸田立式锥辊主动挤压沟垄定型装置设计与试验[J]. 农业工程学报,2025,41(4):21 – 31.
Zhang He, Jiang Xiaohu, Wu Mingliang, et al. Design and experiment of the upright cone roller active extrusion ridge and furrow shaping device for cold waterlogged paddy field[J]. Transactions of the CSAE,2025,41(4):21 – 31. (in Chinese)

[16] 赵华慧,李云伍,曾庆庆,等. 基于 MATLAB 的旋耕机运动仿真分析[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版),2016, 44(1):230 – 234.
Zhao Huahui, Li Yunwu, Zeng Qingqing, et al. Simulation of rotary tiller based on MATLAB[J]. Journal of Northwest A& F University (Natural Science Edition),2016,44(1):230 – 234. (in Chinese)

[17] 李澜,黄博翰,曾剑辉,等. 水田表层土壤力学特性的原位试验分析[J]. 河北农业大学学报,2023,46(1):121 – 126.

Li Lan, Huang Bohan, Zeng Jianhui, et al. In-situ test analysis on mechanical properties of paddy surface soil[J]. Journal of Hebei Agricultural University, 2023,46(1):121 – 126. (in Chinese)

[18] 莫泓滔. 船式拖拉机叶轮-土壤相互作用仿真与试验[D]. 武汉:华中农业大学,2024.
Mo Hongtao. Simulation and experiment on impeller-soil interaction of boat-tractor[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University,2024. (in Chinese)

[19] 张国忠,丁凯权,李正博,等. 基于泥鳅体表的水稻直播机仿生滑板设计与试验[J]. 吉林大学学报(工学版),2024,54(5):1482 – 1492.
Zhang Guozhong, Ding Kaiquan, Li Zhengbo, et al. Design and experiment of biomimetic sliding plate for rice direct seeding machine based on loach body surface[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition),2024,54(5): 1482 – 1492. (in Chinese)

[20] 张涛,李英,张晓春,等. 黏重土壤精旋起垄一体机设计与试验[J]. 干旱地区农业研究,2022,40(2):250 – 258.
Zhang Tao, Li Ying, Zhang Xiaochun, et al. Design and test of precision rotary-ridging machine for sticky soil[J]. Agricultural Research in the Arid Areas,2022,40(2):250 – 258. (in Chinese)

[21] 孙一源,高行方,余登苑. 农业土壤力学[M]. 北京: 农业出版社, 1985: 89 – 92.

[22] 王晓燕,邓博,谭丁炀,等. 无驱动式自动调平水田埋秆起浆整地机设计与试验[J]. 农业机械学报,2022,53(12):20 – 31.
Wang Xiaoyan, Deng Bo, Tan Dingyang, et al. Design and experiment of undriven soil puddling machine with improved auto-leveling and straw-burying design for paddy field[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2022, 53(12): 20 – 31. (in Chinese)

[23] 毛欣,王帏,岳晴. 小型水稻补苗器设计与试验[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版),2025,53(11):12 – 21,33.
Mao Xin, Wang Wei, Yue Qing. Design and performance test of a small rice seedling replenishment device[J]. Journal of Northwest A&F University(Natural Science Edition),2025,53(11):12 – 21, 33. (in Chinese)

[24] Aikins Kojo A, Ucgul M, Barr James B, et al. Review of discrete element method simulations of soil tillage and furrow opening [J]. Agriculture,2023,13(3):541.

[25] 江应星,赵子赋,王景立. 基于 EDEM 的水田平地机打浆机构参数分析研究[J]. 江西农业大学学报(自然科学版),2020,42(3):608 – 618.
Jiang Yingxing, Zhao Zifu, Wang Jingli. Analysis on the parameters of the beating mechanism of paddy field straw dumping grader by EDEM discrete element[J]. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis(Natural Sciences Edition), 2020, 42(3): 608 – 618. (in Chinese)

[26] 武涛,黄伟凤,陈学深,等. 考虑颗粒间黏结力的黏性土壤离散元模型参数标定[J]. 华南农业大学学报,2017,38(3):93 – 98.
Wu Tao, Huang Weifeng, Chen Xueshen, et al. Calibration of discrete element model parameters for cohesive soil considering the cohesion between particles[J]. Journal of South China Agricultural University,2017,38(3):93 – 98. (in Chinese)

[27] 许春林,单伊尹,辛亮,等. 探出开孔式高速水稻膜上插秧机分插机构设计与试验[J]. 农业机械学报,2020,51(5):79 – 87.
Xu Chunlin, Shan Yiyin, Xin Liang, et al. Design and experiment of high-speed rice transplanter with extensible mulch cutting mechanism in mulching cultivation system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2020,51(5): 79 – 87. (in Chinese)