doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2025.01.022

水稻插秧机组时间利用率随格田参数变化关系模型建立与试验

乔金友[1,2]　苏红雪[1,2]　徐宇航[1,2]　郑大明[1]　孙　健[1,2]　李文华[3]　陈海涛[1,2]

(1. 东北农业大学工程学院, 哈尔滨 150030; 2. 黑龙江省主要农作物生产机械化材料化技术创新中心, 哈尔滨 150030;
3. 黑龙江省科学技术厅, 哈尔滨 150001)

摘要: 机械化插秧作业是水稻生产的重要环节,研究插秧机组技术参数随格田参数变化的定量规律,不仅可提高插秧机组作业效率,而且为确定不同插秧机组适宜作业格田条件和依据不同格田规模选择合适插秧机组型号提供理论依据。基于机组运行机理和实地调研结果,明确插秧机组作业方式及作业路径,建立插秧机组纯作业时间、加秧(肥)时间、转弯时间等参数计算模型,进而建立 2 种加秧方式下插秧机组时间利用率随格田参数变化的数学模型;采取多点多设备同步跟踪试验方法获取 5 种插秧机组的各项时间数据,依据所建模型及有效数据,采用 Matlab 2020a 模拟仿真得到两种作业方式下 5 种插秧机组时间利用率随格田长度、面积的变化规律,进而确定 3 种不同时间利用率下,各机组适宜作业单元格田长度和面积的耦合关系。研究表明,加秧次数是影响插秧机组时间利用率波动增大的主要因素;固定时间利用率条件下,当时间利用率分别为 0.45 和 0.5 时,机组适宜格田长度及面积均呈反比例关系耦合变化,当时间利用率为 0.55 时,机组适宜作业格田长度和面积呈多区域分布,且格田长度具有明显多段性;研究给出了 3 种时间利用率条件下各插秧机组适宜作业的格田参数特征值。

关键词: 水稻插秧机组; 时间利用率; 格田参数; 数学模型; 耦合规律

中图分类号: S232.5　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2025)01-0221-13　　**OSID**:

Modeling and Experiment on Variation of Time Utilization Rate of Rice Transplanters with Pond Parameters

QIAO Jinyou[1,2]　SU Hongxue[1,2]　XU Yuhang[1,2]　ZHENG Daming[1]　SUN Jian[1,2]　LI Wenhua[3]　CHEN Haitao[1,2]

(1. *College of Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin* 150030, *China*
2. *Innovation Center of Main Crop Production Mechanization and Materializaion Technology in Heilongjiang Province, Harbin* 150030, *China*
3. *Department of Science and Technology in Heilongjiang Province, Harbin* 150001, *China*)

Abstract: Mechanized transplanting is an important operation of rice production. Studying quantitative variation of transplanter technical parameter with pond parameters can not only improve transplanter operation efficiency, but also provide theoretical basis for determining suitable pond parameters for different transplanters and selecting appropriate transplanter for different pond scales. Based on transplanters operating mechanism and surveying results, transplanter operating modes and paths of transplanters were clarified. Mathematical model for transplanter time utilization rates varied with pond parameters under two seedling adding modes were established according to calculation models for pure operation time, seedling and fertilizer adding time, turning time, and other time parameters. The method of multi-point synchronous tracking measurement was adopted to obtain various time items of five typical transplanters. Based on the established models and tested time items, data sets of time utilization rates of five transplanters operating under two operation modes were calculated by using Matlab 2020a program, and then time utilization rate variations were analyzed with different scopes of pond length and area. Coupling relationships between pond length and area suitable for each transplanter at three different time utilization rates were determined as further conclusions. The results showed that seeding adding times was

收稿日期: 2024-01-23　修回日期: 2024-02-20

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFD2000405-2)

作者简介: 乔金友(1969—),男,教授,博士生导师,主要从事农业机械化生产与管理研究,E-mail: qiaojinyou@163.com

通信作者: 陈海涛(1962—),男,教授,博士生导师,主要从事农业机械化装备及生物质材料研究,E-mail: htchen@neau.edu.cn

the key reason why transplanter time utilization rate fluctuantly changed with pond length and area. Pond length and area suitable for transplanters coupling varied inversely when time utilization rate equaled to 0.45 and 0.5, and distributed significantly in multiple regions and multi-segmented lengths when time utilization rate equaled to 0.55. The eigenvalues of pond parameters suitable for each transplanter at different time utilization rates were determined. The research results improved the theory of agricultural machinery units and provided theoretical and technical support for selecting suitable transplanter based on different pond parameters.

Key words: rice transplanters; time utilization rate; pond parameters; mathematical model; coupling relationship

0 引言

由于小规模农户分散经营,耕地呈现细碎化的特点,很大程度上阻碍了机械化发展进程及土地综合产出率的提高[1-2]。近年来,随着新型农业生产经营主体的快速发展,部分土地得到整合,土地经营规模不断提高[3]。尽管如此,农业中依然存在多种经营规模并存、大中小型农机混用现象[4-5],导致农机作业效率仍偏低,农业机械利用率有待提高。

土地经营规模与农业机组型号适宜匹配是农机作业效率最大化的必要条件,国内外专家学者从不同角度研究土地规模与农业机组相关参数间的关系。

一般认为,地块面积和长度是影响农业机组效率的重要地块条件因素[6-7]。农业机组时间利用率、机组作业效率随地块面积增大而增大[8-10]。地块面积小会使机组非作业时间增多,导致机组作业效率降低[11]。作业地块长度越长,机组时间利用率和作业效率越高[12-14]。地块长度对机组作业效率的影响比地块面积更显著[15]。

适当增大地块长宽比及面积可提高机组的生产效率[16-18]。地块面积和长度较小时,采用中小型拖拉机工作效率更高;地块面积和长度较大时,应选用较大功率的拖拉机组[19]。一些专家建立数学模型选择机组适宜作业的地块规模[20-21]。DOUNGPUENG 等[22]采用田间容量预测模型,根据地块条件参数选择适宜的联合收获机类型。也有专家建立不同机组时间利用率随地块条件参数变化的数学模型,仿真得到旱田耕整地机组、播种机组和收获机组时间利用率或技术生产率随地块条件参数变化的定量规律[23-25],获得了收获机组适宜作业单元地块长度和面积的耦合关系[26],明确播种机组加种加肥参数与作业单元地块条件间的定量关系[27]。张凯等[28]基于收获机生产率提出了适宜东北地区水田长度和宽度阈值。

综上所述,国内外研究成果大多集中在研究农机时间利用率、作业效率和地块条件之间的定性关系,一些专家提出了旱田机组时间利用率随地块条件参数变化的定量规律。但针对水田机组关键作业参数与格田参数间的定量关系研究鲜有报道。因此,本文结合水田地块特点及水稻插秧机组实际作业过程,研究不同加秧加肥条件下插秧机组时间利用率随格田参数的变化规律,以完善水田机组运用理论,为水田机组合理选型提供理论与技术指导。

1 概念

(1)地块与格田

地块是由道路、灌溉(排水)沟渠以及绿化防风林等间隔而成的自然状态下的农业耕地单元。

由于一个地块内地表不完全平整,为使水稻生长期田间水层深度尽量一致,保证水稻生长需求,一个水田地块往往被分成多个大小不一的小田块,称之为格田。格田是水田插秧机组的基本作业单元。

(2)直行插秧区与地头作业区

为使水稻在生长期获得充足光照,水稻插秧多在格田内沿南北方向往返进行。设水稻插秧机组作业方向为格田长度方向,与格田长度垂直方向为格田宽度方向,则插秧机组沿格田长度方向直行往返作业的区域称为直行插秧区。插秧机组直行作业行程两侧地头常常留出一段未插秧区域作为机组地头转弯空间。在直行作业结束后,插秧机组需补插此区域,因此称之为地头作业区。

(3)加秧方式与加肥方式

根据实际地块条件、道路条件及供秧设备条件不同,水稻插秧机组可以采用单侧加秧、双侧加秧与空载加秧 3 种方式作业。单侧加秧方式是指插秧机组只在格田一侧地头定点加秧的作业方式,其特点是当插秧机组剩余秧苗量不足完成往返两个直行行程作业任务时即在加秧侧地头停车加秧。双侧加秧方式是指插秧机组可以在格田任一侧地头停车加秧的作业方式。而空载加秧是当秧苗完全耗尽时插秧机组可在格田任意位置加秧的作业方式,其特点是机载秧苗利用率高、插秧机组加秧次数相对少,作业效率高。但由于格田内秧苗运输较难实现,空载加

秧方式实际应用较少，故本文只讨论单侧加秧和双侧加秧两种情况下插秧机组时间利用率随格田参数变化规律。

对于具有施肥功能的插秧机组，由于单位面积的秧苗用量大于施肥量，为了减少插秧机组停车次数、缩短非作业时间，一般期望加秧与加肥同时进行。当插秧机组停车加秧时，若机组肥箱内肥量无法支持机组作业至下一个加秧点时，亦需停车加肥。水稻插秧机组加肥方式与加秧方式相同。

(4)直接补插与循环补插

在实际生产中，插秧机组作业方向及地头作业区宽度不受格田大小和形状的影响，插秧机组均沿与格田某一边平行方向作业，且格田两侧地头作业区宽度均为插秧机组幅宽的 2 倍。由于格田形状多为矩形或梯形，故以矩形格田为依据界定插秧机组的补插方式。

在单侧加秧方式下，若格田宽度较小，机组最大秧苗承载量能够支撑一次性完成格田单侧地头作业区全部作业任务，则机组可先完成格田全部直行插秧作业后再统一进行补插作业。称此类补插方式为直接补插。双侧加秧方式下，插秧机组也采用此补插方式。直接补插方式插秧机组作业路径如图 1 所示。

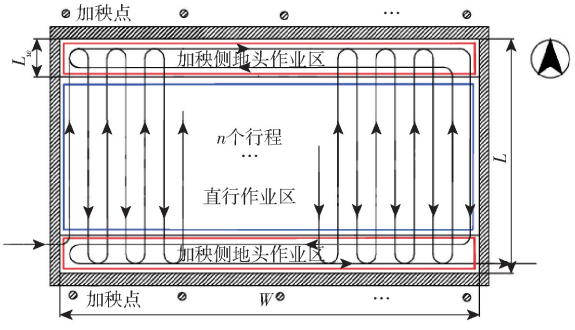

图 1　直接补插方式插秧机组作业路径图

Fig. 1　Transplanter operating path under direct filling up transplanting mode

插秧机组单侧加秧方式作业时，若格田宽度较大，机组最大秧苗承载量无法支撑格田单侧地头作业区全部作业任务时，机组需在直行插秧作业过程中分次完成地头作业区插秧作业。补插具体过程为：机组在格田加秧侧地头作业区加满秧苗后直行作业至格田非加秧侧地头作业区，往返两个行程补插作业后再直行插秧作业至加秧侧地头作业区加秧。按照“直行插秧作业-补插作业”方式循环作业直至完成格田直行作业区和非加秧侧地头作业区的全部作业任务，最后完成加秧侧地头作业区的补插作业。这类作业方式称为单侧循环补插方式，其作业路径如图 2 所示。

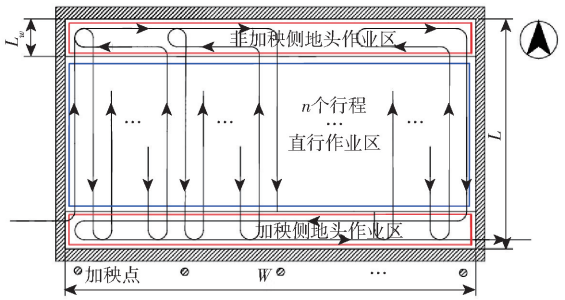

图 2　循环补插方式插秧机组作业路径图

Fig. 2　Transplanter operating path under cyclic filling up transplanting mode

插秧机组以直行补插或循环补插方式作业时，格田转移的起止点均在格田同侧(图 1、2)，当机组完成作业后可直接越埂至相邻格田继续插秧作业。

2　插秧班次机组时间利用率与格田参数关系模型构建

2.1　插秧机组班次时间利用率一般原理及模型

机组班次时间利用率是机组在一个班次内完成作业任务所消耗的纯作业时间与作业班次总作业时间的比值[29]，计算模型为

$$\tau = \frac{T_p}{T} \tag{1}$$

式中　τ——机组班次作业时间利用率

T_p——机组班次纯作业时间，s

T——班次总时间，s

插秧机组以格田为作业单元，每班次可完成多格田插秧作业任务。故插秧机组班次总作业时间除机组完成各格田纯作业时间外，还包括加秧时间、加肥时间、转弯时间、格田或地块转移时间、其他停歇时间等。故插秧机组时间利用率计算模型为

$$\tau = \frac{\sum_{j=1}^{k_s}\sum_{i=1}^{k_{pj}} T_{pji}}{\sum_{j=1}^{k_s}\left[\sum_{i=1}^{k_{pj}}\left(T_{pji}+T_{rji}+T_{fji}+T_{tji}+T_{sji}+t_{lji}\right)+t_{lj}\right]} \tag{2}$$

式中　T_{pji}——机组完成第 j 地块第 i 格田插秧作业的纯作业时间，s

T_{rji}——机组完成第 j 地块第 i 格田插秧作业的加秧时间，s

T_{fji}——机组完成第 j 地块第 i 格田插秧作业的加肥时间，s

T_{tji}——机组完成第 j 地块第 i 格田插秧作业的转弯时间，s

T_{sji}——机组完成第 j 地块第 i 格田插秧作业的停歇时间，s

t_{lji}——机组完成第 j 地块第 i 格田插秧作业的格田转移时间,s

t_{lj}——机组完成第 j 地块插秧作业的地块转移时间,s

k_s——插秧机组在一个班次内插秧作业地块数量

k_{pj}——插秧机组在一个班次内插秧作业格田数量

2.2 插秧机组时间项目与格田参数关系模型构建

2.2.1 插秧机组纯作业时间计算模型

插秧机组纯作业时间等于机组完成格田直行作业与补插作业的纯作业时间之和,模型为

$$T_{pji} = n_{1ji}t_{p1ji} + n_{2ji}t_{p2ji} \tag{3}$$

式中 n_{1ji}——第 j 地块第 i 格田直行作业的行程数(下角 1 代表直行作业,下同)

t_{p1ji}——第 j 地块第 i 格田单直行行程的纯作业时间,s

n_{2ji}——第 j 地块第 i 格田补插作业的行程数(下角 2 代表补插作业,下同)

t_{p2ji}——第 j 地块第 i 格田单补插行程的纯作业时间,s

插秧机组在格田内直行作业行程数为格田宽度与机组作业幅宽之比。比值出现小数说明最后剩余格田宽度小于机组作业幅宽,此情况机组仍需再作业一个行程才能完成整个格田作业任务,所以该比值需向上取整。故机组格田内直行作业行程数的计算模型为

$$n_{1ji} = \left\lceil \frac{W_{ji}}{B_p} \right\rceil \tag{4}$$

式中 W_{ji}——第 j 地块第 i 格田宽度,m

B_p——机组作业幅宽,m

插秧机组在格田内补插作业行程数 n_{2ji} 为地头作业区宽度 L_w 与机组作业幅宽之比,结果亦需向上取整,计算模型为

$$n_{2ji} = \left\lceil \frac{L_w}{B_p} \right\rceil \tag{5}$$

实际生产中,地头作业区宽度一般为机组作业幅宽的 2 倍,因此单侧补插作业行程数为 2。

将式(4)、(5)代入式(3),整理可得到插秧机组纯作业时间随格田参数变化模型,因格田两侧均有地头作业区,因此格田总补插行程数为 $2n_{2ji}$,具体模型为

$$T_{pji} = \left\lceil \frac{W_{ji}}{B_p} \right\rceil t_{p1ji} + 2\left\lceil \frac{L_w}{B_p} \right\rceil t_{p2ji} \tag{6}$$

2.2.2 插秧机组加秧、加肥时间计算模型

加秧时间与加肥时间是插秧机组作业过程中必须消耗的工艺性停歇时间。机组以某种加秧或加肥方式完成格田作业的总加秧或加肥时间等于单次加秧或加肥时间与加秧或加肥次数之积,计算模型为

$$T_{waji} = m_{waji}t_a \tag{7}$$

式中 T_{waji}——机组以 w 种加秧或加肥方式完成第 j 地块第 i 格田作业的总加秧或加肥时间,s

m_{waji}——机组以第 w 种加秧或加肥方式完成第 j 地块第 i 格田作业的加秧或加肥次数

t_a——机组单次加秧或加肥时间,s

下角 w 表示插秧机组作业方式,取 u、b 分别表示单侧和双侧加秧方式;下角 a 表示插秧机组加秧加肥方式,取 r、f 分别表示加秧和加肥作业方式。

2.2.2.1 加秧时间计算模型建立

(1)机组单侧加秧方式作业加秧时间计算模型

插秧机组以单侧加秧方式作业时,完成第 i 格田直行作业的加秧次数等于机组完成全部格田作业直行行程数与相邻两次加秧间隔内的行程数之比,比值出现小数表示机组需再加一次秧苗才能完成整个格田直行作业任务,计算结果向上取整,计算模型为

$$m_{ur1ji} = \left\lceil \frac{n_{1ji}}{n_{urji}} \right\rceil \tag{8}$$

式中 m_{ur1ji}——机组以单侧加秧方式完成第 j 地块第 i 格田直行作业的加秧次数

n_{urji}——单侧加秧方式下机组相邻两次加秧间隔内作业行程数

单侧加秧条件下,插秧机组在相邻两次加秧间隔内作业行程数 n_{urji} 等于机组最大载秧量 Q_l 与往返两个行程所需秧苗量 $2q_{ji}$ 的比值,而直行作业单行程所需秧苗量 q_{ji} 等于机组作业幅宽与直行作业的行程长度 L_a 及单位面积需秧苗量的乘积。当机组剩余秧苗量不足作业往返两个行程时,需停车加秧,故比值需向下取整。插秧机组一次加秧能完成的最大作业行程数为该比值 2 倍,计算模型为

$$n_{urji} = 2\left\lfloor \frac{Q_l}{2q_{ji}} \right\rfloor = 2\left\lfloor \frac{n_r q_z}{2B_p L_a q_u} \right\rfloor \tag{9}$$

式中 n_r——机组最大承载秧苗盘数,盘

q_z——秧苗量,穴/盘

q_u——格田单位面积插秧量,穴/m^2

L_a——格田直行作业长度,m

在单侧加秧方式下,地头作业区加秧次数等于地头作业区秧苗需求量与插秧机组最大载秧量的比值,建模思想与直行作业相同。插秧机组补插作业时单行程插秧量 q_w 等于机组作业幅宽、补插作业行

程长度与单位面积需秧量的乘积，因格田两侧均有地头作业区，计算结果需乘 2，计算模型为

$$m_{ur2ji}=2\left\lceil\frac{2B_pW_{ji}q_u}{Q_l}\right\rceil \tag{10}$$

式中　m_{ur2ji}——单侧加秧方式机组完成第 j 地块第 i 格田补插作业加秧次数

机组完成第 j 地块第 i 格田插秧任务的总加秧次数 m_{urji} 等于直行作业加秧次数与补插作业加秧次数之和，依据式(4)、(8)～(10)，整理可得到插秧机组总加秧次数模型为

$$m_{urji}=m_{ur1ji}+m_{ur2ji}=\left\lceil\frac{\left\lceil\frac{W_{ji}}{B_p}\right\rceil}{2\left\lfloor\frac{n_rq_z}{2B_pL_aq_u}\right\rfloor}\right\rceil+2\left\lceil\frac{2B_pW_{ji}q_u}{Q_l}\right\rceil \tag{11}$$

将式(11)代入式(7)，整理得插秧机组以单侧加秧方式作业加秧总时间 T_{urji} 模型为

$$T_{urji}=\left(\left\lceil\frac{\left\lceil\frac{W_{ji}}{B_p}\right\rceil}{2\left\lfloor\frac{n_rq_z}{2B_pL_aq_u}\right\rfloor}\right\rceil+2\left\lceil\frac{2B_pW_{ji}q_u}{Q_l}\right\rceil\right)t_r \tag{12}$$

式中　t_r——插秧机组单次加秧时间，s

(2)双侧加秧方式作业加秧时间计算模型

插秧机组以双侧加秧方式作业时，完成第 j 地块第 i 格田直行作业加秧次数 m_{br1ji} 计算方法与单侧加秧方式同理。相邻两次加秧间隔内作业行程数 n_{brji} 等于机组最大载秧量 Q_l 与机组作业单行程所需秧苗量 q_{ji} 的比值，当插秧机剩余秧苗量不足作业一个行程时，需停车加秧，比值向下取整，计算模型为

$$n_{brji}=\left\lfloor\frac{Q_l}{q_{ji}}\right\rfloor=\left\lfloor\frac{n_rq_z}{B_pL_aq_u}\right\rfloor \tag{13}$$

双侧加秧方式下，地头作业区加秧次数 m_{br2ji} 与单侧加秧方式中的地头作业区的加秧模型(式(10))相同。插秧机组双侧加秧作业总加秧次数计算模型为

$$m_{brji}=m_{br1ji}+2m_{br2ji}=\left\lceil\frac{\left\lceil\frac{W_{ji}}{B_p}\right\rceil}{\left\lfloor\frac{n_rq_z}{B_pL_aq_u}\right\rfloor}\right\rceil+2\left\lceil\frac{2B_pW_{ji}q_u}{Q_l}\right\rceil \tag{14}$$

将式(14)代入式(7)整理得插秧机组在双侧加秧方式下作业加秧总时间 T_{brji} 模型为

$$T_{brji}=\left(\left\lceil\frac{\left\lceil\frac{W_{ji}}{B_p}\right\rceil}{\left\lfloor\frac{n_rq_z}{B_pL_aq_u}\right\rfloor}\right\rceil+2\left\lceil\frac{2B_pW_{ji}q_u}{Q_l}\right\rceil\right)t_r \tag{15}$$

2.2.2.2　加肥时间计算模型建立

由于插秧机组加秧频率大于加肥频率，且为提升机组作业效率，一般加秧同时加肥。插秧机组完成第 j 地块第 i 格田作业的加肥次数 m_{wfji} 等于格田总加秧次数 m_{wrji} 与两次加肥间隔内加秧次数 m_{wji} 的比值，比值出现小数说明插秧机组按此值加肥后仍存在未作业行程，此时需再加一次肥方能完成全部作业，所以比值需向上取整。计算模型为

$$m_{wfji}=\left\lceil\frac{m_{wrji}}{m_{wji}}\right\rceil \tag{16}$$

式中　m_{wfji}——机组以第 w 种加肥方式完成第 j 地块第 i 格田作业的加肥次数

m_{wji}——机组以第 w 种加肥方式完成第 j 地块第 i 格田作业的两次加肥间隔内加秧次数

两次加肥间隔中加秧次数 m_{wji} 为不同加秧方式下加满肥箱能作业最大行程数 n_{wfji} 与加满秧苗后所能作业最大行程数 n_{wrji} 的比值。机组加秧时当肥箱剩余肥量不足以作业 n_{wrji} 个行程时，需在加秧同时加肥，因此，计算结果须向下取整。其计算模型为

$$m_{wji}=\left\lfloor\frac{n_{wfji}}{n_{wrji}}\right\rfloor \tag{17}$$

(1)单侧加秧方式机组加肥时间计算模型

单侧加秧方式下，机组加满肥箱后可作业最大行程数 n_{ufji} 等于机组肥箱容量 Q_f 与往返 2 个行程所需肥量 $2q_{fji}$ 的比值，当机组肥箱中剩余肥量不足作业往返两个行程时，需停车加肥，故比值需向下取整。单侧加秧方式下机组一次加肥能完成的最大作业行程数为该比值 2 倍，计算模型为

$$n_{ufji}=2\left\lfloor\frac{Q_f}{2q_{fji}}\right\rfloor=2\left\lfloor\frac{\rho_fV_f}{2B_pL_aq_f}\right\rfloor \tag{18}$$

式中　ρ_f——肥料密度，kg/m^3

V_f——插秧机组肥箱容积，m^3

q_f——单位面积施肥量，kg/m^2

将式(11)、(16)～(18)代入式(7)，整理得插秧机组在单侧加秧方式下作业加肥总时间 T_{ufji} 模型为

$$T_{ufji}=\left\lceil\frac{\left\lceil\frac{\left\lceil\frac{W_{ji}}{B_p}\right\rceil}{2\left\lfloor\frac{n_rq_z}{2B_pL_aq_u}\right\rfloor}\right\rceil+2\left\lceil\frac{2W_{ji}B_pq_u}{n_rq_z}\right\rceil}{\left\lfloor\frac{\frac{\rho_fV_f}{2B_pL_aq_f}}{\frac{n_rq_z}{2B_pL_aq_u}}\right\rfloor}\right\rceil t_f \tag{19}$$

式中　t_f——插秧机组单次加肥时间，s

(2)双侧加秧方式作业机组加肥时间计算模型

双侧加秧方式下,机组加满肥箱后可作业最大行程数 n_{bfji} 建模原理与单侧加秧方式相似,当机组肥箱中肥量不满足一个行程的需求时,即需停车加肥,计算模型为

$$n_{bfji}=\left\lfloor\frac{Q_f}{q_{fji}}\right\rfloor=\left\lfloor\frac{\rho_f V_f}{B_p L_a q_f}\right\rfloor \tag{20}$$

将式(16)、(17)、(20)代入式(7)整理得插秧机组在单侧加秧方式下作业,加肥总时间 T_{bfji} 模型为

$$T_{bfji}=\left\lceil\frac{\left\lceil\frac{\left\lceil\frac{W_{ji}}{B_p}\right\rceil}{\left\lfloor\frac{n_r q_z}{B_p L_a q_u}\right\rfloor}\right\rceil+2\left\lceil\frac{2W_{ji}B_p q_u}{n_r q_z}\right\rceil}{\left\lfloor\frac{\left\lfloor\frac{\rho_f V_f}{B_p L_a q_f}\right\rfloor}{\left\lfloor\frac{n_r q_z}{B_p L_a q_u}\right\rfloor}\right\rfloor}\right\rceil t_f \tag{21}$$

2.2.3 机组转弯与转移时间计算模型

插秧机组转弯总时间等于直行作业转弯时间与补插作业转弯时间之和。计算模型为

$$T_{wtji}=(m_{wt1ji}+m_{wt2ji})t_t \tag{22}$$

式中 T_{wtji}——机组以第 w 种加秧方式作业的转弯总时间,s

m_{wt1ji}——机组以第 w 种加秧方式在第 j 地块第 i 格田直行区作业的转弯次数

m_{wt2ji}——机组以第 w 种加秧方式在第 j 地块第 i 格田地头作业区作业转弯次数

t_t——机组单次转弯时间,s

(1)循环补插和直接补插方式判定

单侧加秧方式下,插秧机组可能采用直接补插或循环补插方式完成地头作业区作业。当机组满载秧苗时最大作业距离小于机组在非加秧侧地头作业区补插作业需行驶的距离时,机组采取单侧循环补秧方式;反之,机组采取直接补插方式,计算公式为

$$\frac{Q_l}{B_p q_u}\geqslant\left\lceil\frac{L_w}{B_p}\right\rceil W_{ji} \tag{23}$$

(2)插秧机组循环补插次数计算模型

采取单侧循环补插方式时,补插循环次数 m_{zcji} 为机组地头作业区作业总距离与机组最大秧苗载荷能作业的最大距离减去 2 个直行行程长度之比,比值出现小数说明地头作业区仍剩余行程未作业,因此计算结果需向上取整,计算模型为

$$m_{zcji}=\left\lceil\frac{\left\lceil\frac{L_w}{B_p}\right\rceil W_{ji}}{\frac{Q_l}{B_p q_u}-2L_a}\right\rceil \tag{24}$$

(3)插秧机组转弯时间计算模型

机组采取单侧加秧方式作业时,机组每完成一个直行作业行程或补插作业行程都会发生一次无环节 180°转弯(图 1、2)。因此,机组直行作业的转弯次数等于机组直行作业行程数,计算模型与式(4)相同。

机组进行非加秧侧补插作业时,转弯次数等于补插循环次数 m_{zcji} 与一次补插作业总行程数的乘积。当机组进行加秧侧补插作业时,转弯次数等于一次补插作业总行程数,由于机组完成格田的最后一个补插行程后,无需转弯,直接转移至下一格田作业。因此,机组补插作业的总转弯次数须少一次。将式(4)、(24)代入式(22)中,得到机组单侧加秧作业时转弯总时间 T_{utji} 计算模型为

$$T_{utji}=\left(\left\lceil\frac{W_{ji}}{B_p}\right\rceil+2m_{zcji}+1\right)t_t \tag{25}$$

机组双侧加秧方式作业时,采用直接补插方式。机组可在格田任一侧地头的补插作业途中停车加秧,沿格田宽度方向单行程补插作业无转弯,机组在格田双侧的地头作业区共作业 4 个行程,地头作业区转弯次数为 3 次。转弯总时间 T_{btji} 的计算模型为

$$T_{btji}=\left(\left\lceil\frac{W_{ji}}{B_p}\right\rceil+4\left\lceil\frac{L_w}{B_p}\right\rceil-1\right)t_t=\left(\left\lceil\frac{W_{ji}}{B_p}\right\rceil+3\right)t_t \tag{26}$$

(4)插秧机组转移时间计算模型

水稻插秧机组作业班次中发生的转移时间包括格田间转移时间 t_{tji} 和地块间转移时间 t_{tj}。格田间转移时间是指插秧机组从一个格田转移至相邻格田所需要的时间,机组每完成一个格田作业进行一次格田间转移。地块转移时间是指插秧机组从一个地块转移至另一个地块所需要的时间,完成一个地块作业后机组进行一次地块转移。由于各机组格田间转移和地块转移速度不同,因此不同机组转移时间有差异,插秧机组各项转移时间均可通过调研或试验直接获得。

2.2.4 非工艺性停歇时间计算模型

插秧机组在完成第 j 地块第 i 格田作业时,除加秧加肥时间外,还可能因设备故障、技术维护、驾驶员换班等原因致使机组停歇无法作业,机组非工艺性总停歇时间计算模型为

$$T_{sji}=\sum_{m=1}^{m_s}t_{smji} \tag{27}$$

式中 m_s——机组完成第 j 地块第 i 格田除加秧加肥时间外的停歇时间种类数

t_{smji}——机组完成第 j 地块第 i 格田作业时第 m 类停歇时间,s

2.3　插秧机组班次时间利用率随格田参数变化关系模型构建

将插秧机组的各项时间参数模型分别代入式(2)，分别得到单、双侧两种加秧方式下插秧机组班次时间利用率随格田参数变化关系模型，整理后为

$$\tau=\frac{\sum_{j=1}^{k_s}\sum_{i=1}^{k_{pj}}X_{ji}}{\sum_{j=1}^{k_s}\left(\sum_{i=1}^{k_{pj}}\left(X_{ji}+Y_{bji}t_r+\left\lceil\frac{Y_{bji}}{\left\lfloor\frac{\left\lfloor\frac{Q_f}{2q_{fji}}\right\rfloor}{\left\lfloor\frac{Q_l}{2q_{ji}}\right\rfloor}\right\rfloor}\right\rceil t_f+\left(\left\lceil\frac{W_{ji}}{B_p}\right\rceil+2m_{zcji}+1\right)t_t+t_{lji}+T_{sji}\right)+t_{lj}\right)} \tag{28}$$

$$\tau=\frac{\sum_{j=1}^{k_s}\sum_{i=1}^{k_{pj}}X_{ji}}{\sum_{j=1}^{k_s}\left(\sum_{i=1}^{k_{pj}}\left(X_{ji}+Y_{bji}t_r+\left\lceil\frac{Y_{bji}}{\left\lfloor\frac{\left\lfloor\frac{Q_f}{q_{fji}}\right\rfloor}{\left\lfloor\frac{Q_l}{q_{ji}}\right\rfloor}\right\rfloor}\right\rceil t_f+\left(\left\lceil\frac{W_{ji}}{B_p}\right\rceil+3\right)t_t+t_{lji}+T_{sji}\right)+t_{lj}\right)} \tag{29}$$

其中

$$X_{ji}=\left\lceil\frac{W_{ji}}{B_p}\right\rceil t_{p1ji}+2\left\lceil\frac{L_w}{B_p}\right\rceil t_{p2ji}$$

$$Y_{bji}=\left\lceil\frac{\left\lceil\frac{W_{ji}}{B_p}\right\rceil}{2\left\lfloor\frac{Q_l}{2B_pL_aq_u}\right\rfloor}\right\rceil+2\left\lceil\frac{2W_{ji}B_pq_u}{Q_l}\right\rceil$$

式(28)、(29)中，机组结构参数为定值，且各项作业时间参数均可通过试验测定，因此只有格田长度和面积为变量，因此这两个模型反映插秧机组班次时间利用率随格田长度、面积变化关系。

3　试验

3.1　试验机组及仪器设备

考虑测试机组的普适性，选取保有量大、应用效果良好的 5 种水稻插秧机组为测试对象，包括两种自走式施肥插秧机组、2 种自走式非施肥插秧机组和 1 种手扶式插秧机组。测试机组基本参数如表 1 所示。为水稻机插行距 0.3 m、穴距 0.18 m，每公顷插秧量为 2.758×10^5 穴、施肥量为 375 kg。采用 0.6 m × 0.3 m 栽秧盘，每盘秧苗可插秧 512 穴。

表 1　测试插秧机组基本参数

Tab.1　Basic parameters of tested transplanters

机组型号	功率/kW	作业幅宽/m	载秧量/盘	肥箱容积/m^3	机组类别
2FH－1.8	14.8	1.8	16	0.012 5	施肥机组
2FH－2.4	16.6	2.4	20	0.048 0	施肥机组
2ZGQ－6D1	14.4	1.8	18		非施肥机组
2ZGQ－8D1	16.1	2.4	26		非施肥机组
2ZS－6	3.3	1.8	12		非施肥手扶机组

3.2　试验方法

在不影响插秧机组正常作业情况下，采用皮尺(100 m)、钢卷尺(5 m)等测量格田长度、宽度以及机组作业幅宽等结构参数，依据多人多设备同步跟踪测时原理[30]，采用 UG801 + GPS/BDS 手持终端(精度 0.01 s)、Canon 760D 型数码摄像机等测试各水稻插秧机组作业过程中发生的各类时间。

为保证试验条件一致性、试验数据客观性和可比性，每插秧机组跟踪测试时间至少为 8 h，自走式插秧机组在两种作业方式下的操作人数相同，均为 4 人，其中驾驶员 1 人，加秧(肥)3 人；手扶式插秧机组在两种作业方式下的操作人数均为 2 人，其中驾驶员 1 人，加秧 1 人。各机组所有操作人员均经过专业培训，操作技能娴熟。

3.3　试验结果

依据 χ^2 检验原理[31]、采用 SPSS 2020 对所获试验数据进行正态性检验，数据证明所测均符合正态分布。各项时间数据平均值，如表 2 所示。

表 2 插秧机组时间测试结果

Tab. 2 Tested time items of transplanters

机组型号	直行作业平均速度 v_p/(m·s^{-1})	补插作业平均速度 v_b/(m·s^{-1})	单次转弯时间 t_t/s	单次加秧时间 t_r/s	单次加肥时间 t_f/s	停歇时间 t_s/s	格田间转移时间 t_l/s	地块间转移时间 t_{lj}/s
2FH-1.8	0.63	0.57	16.94	64.23	31.50	89.90	105.96	226.20
2FH-2.4	0.50	0.43	20.94	71.91	59.95	102.63	88.45	217.42
2ZGQ-6D1	0.72	0.60	10.69	107.73		69.32	92.02	186.21
2ZGQ-8D1	0.70	0.55	13.76	149.03		99.96	105.60	179.60
2ZS-6	0.46	0.45	11.19	141.33		151.69	81.11	361.42

3.4 插秧机组时间利用率随格田参数变化规律

依据实际调研获取的格田面积及长度分布情况,设定格田长度 0~200 m(步长为 5 m)、面积 0~1.5 hm^2(步长为 0.05 hm^2),地块面积为 5 hm^2。将表 2 数据代入前述建立的相关模型。采用 Matlab 2020a[32]编程计算并画出两种加秧方式 5 种插秧机组时间利用率随格田条件参数变化曲面图(图 3)。

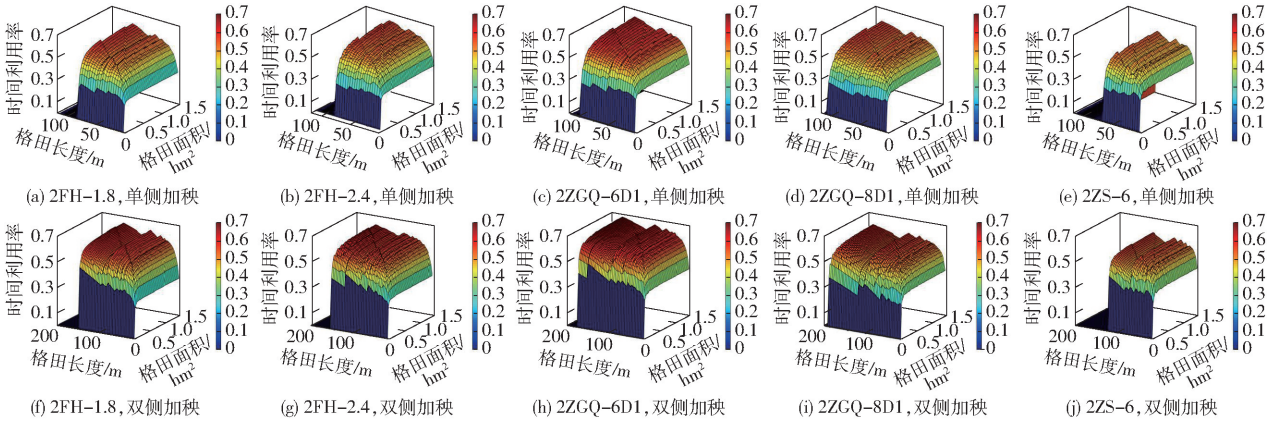

图 3 插秧机组时间利用率随格田参数变化曲面

Fig. 3 Variations of time utilization ratio of transplanters with parameters of pond field

3.4.1 插秧机组时间利用率波动规律分析

(1)时间利用率波动规律

由图 3 可知,两种加秧方式下,当格田长度不变时,5 种插秧机组时间利用率均随格田面积增大而波动增大,其原因是格田面积增加致使同面积地块格田数量减少,因机组格田间转移次数减少致格田间转移时间减小;另外,计算时采用的地块面积较大(5 hm^2),格田面积变化对机组地块转移时间影响较小,因此时间利用率增大。

由图 3 可看出,格田面积不变时,插秧机组时间利用率随格田长度增加也呈波动增大趋势,主要原因是固定地块面积条件下,格田长度增加使插秧机组地头转弯次数减少,缩短了转弯时间,时间利用率增大。

若多台插秧机组同时在一个格田内作业,各机组作业的面积或长度变小,但其仍在图 3 横纵坐标范围内,故上述规律也适用于多插秧机组在一格田内同时作业的情形。

(2)时间利用率波动原因分析

为发现插秧机组时间利用率随长度波动的主要影响因素,分别探讨格田面积固定时,插秧机组以单侧和双侧加秧方式作业各时间项目随格田长度变化关系。由于非工艺停歇时间和格田转移时间随格田参数变化不大,对时间利用率波动无影响,故作纯作业时间、转弯时间、加秧时间和加肥时间随格田长度变化的折线图,如图 4 所示。

由图 4 可知,两种加秧方式下,插秧机组纯作业时间和转弯时间均随格田长度增加呈下降趋势,下降速率先快后慢(图 4a、4b、3f~3g);加秧时间和加肥时间随格田长度增加而波动减小,且加肥时间波动较小(图 4c、4d、3h~3i),因此可以确定加秧时间的波动是导致时间利用率随格田长度增加而波动变化的主要原因。又因加秧时间由单次加秧时间和加秧次数决定,实测结果表明单次加秧时间变化较小,而加秧次数(式(11)、(14))随格田长度增加会呈波动变化。因此,确定加秧次数波动是导致加秧时间波动变化的主要原因,也是影响时间利用率变化的直接原因。

3.4.2 插秧机组可作业最大格田长度分析

由图 3 可知,当格田长度增至某一值时,插秧机

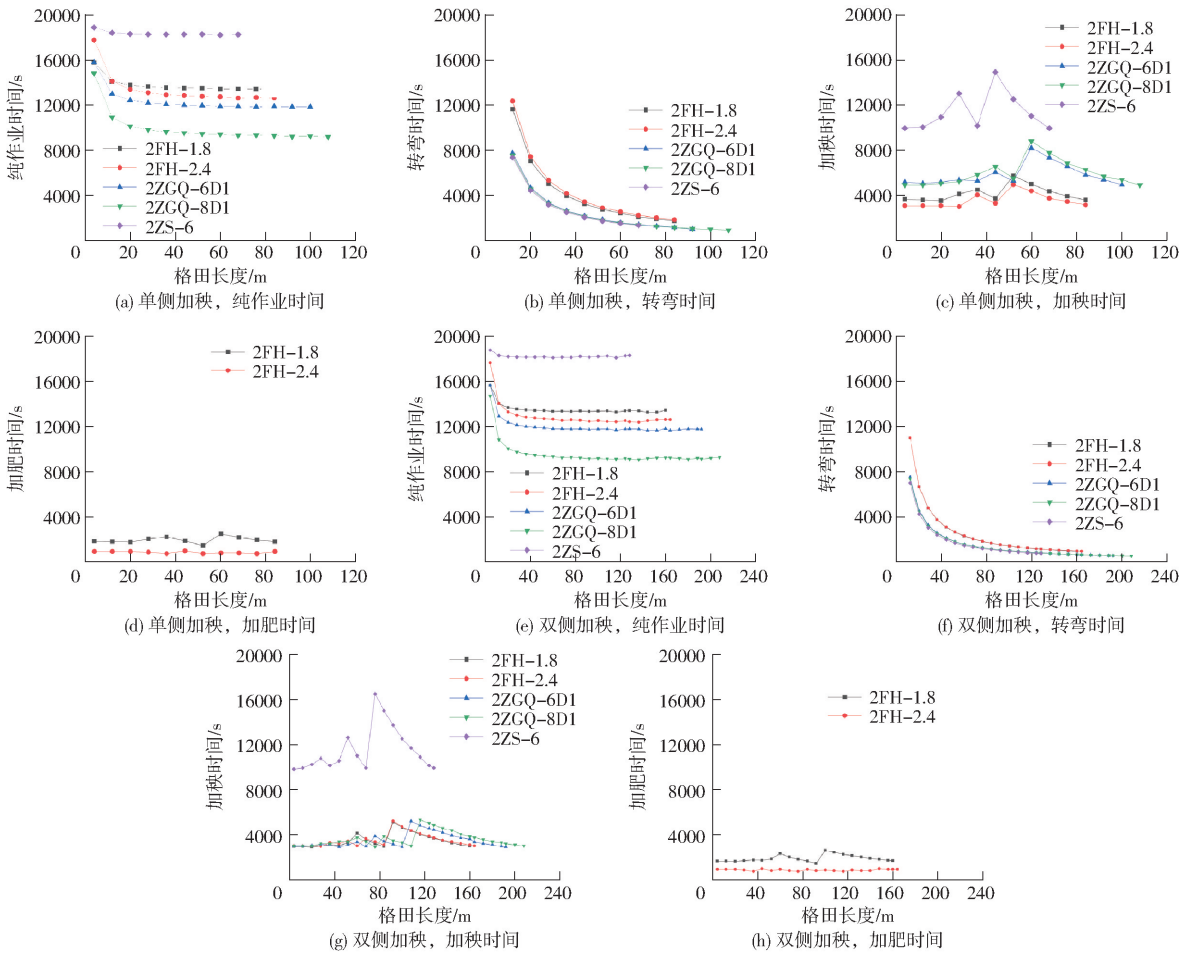

图 4　插秧机组时间项目随格田长度变化曲线

Fig. 4　Changing trends of time items of transplanters with pond length

组时间利用率变为 0，表明当格田长度超过此值时，插秧机组无法作业。此值为插秧机组以不同加秧方式作业时，最大载秧盘数对应的最大作业距离成为机组可作业最大格田长度。根据图 3 得到 5 种插秧机组两种加秧方式下可作业最大格田长度，如表 3 所示。

表 3　插秧机组可作业最大格田长度

Tab. 3　Maximum operating pond length of transplanters

m

加秧方式	机组型号				
	2FH－1.8	2FH－2.4	2ZGQ－6D1	2ZGQ－8D1	2ZS－6
单侧加秧	84	87	100	108	68
双侧加秧	160	164	192	208	128

由表 3 可知，施肥型插秧机组比非施肥型插秧机组可作业最大格田长度小，这是由于施肥型机组需载肥作业，在机组发动机功率不变前提下，机组最大载秧量则减小，进而可作业最大格田长度变小。在设计施肥型插秧机组时，建议适度提升发动机功率，提高施肥型机组最大载秧量以提高机组对格田长度的适应性。

对于同一机组，双侧加秧方式作业时可作业最大格田长度近似为单侧加秧方式作业时可作业最大格田长度的 2 倍。这种非整数倍关系与模型取整有关（式（28）、（29））。

3.4.3　插秧机组时间利用率随格田参数变化规律

两种加秧方式下，若格田长度和面积相同，幅宽较小的施肥型或非施肥型插秧机组时间利用率较高（图 3）。2FH－1.8 机组时间利用率比 2FH－2.4 机组高；2ZGQ－6D1 机组时间利用率比 2ZGQ－8D1 机组高。2FH－1.8 机组纯作业时间比 2FH－2.4 机组大（图 4a、4e），同时由于 2FH－1.8 机组幅宽较小，机组转弯半径小、转弯时间少（图 4b、4f），致使同类型机组中幅宽较小机组的时间利用率较高。

幅宽同为 1.8 m 的 2ZGQ－6D1 非施肥插秧机组时间利用率比 2FH－1.8 施肥型插秧机组高。这是由于非施肥机组 2ZGQ－6D1 无加肥时间（图 3c、3h），致使非作业时间短，时间利用率较高。幅宽同为 1.8 m 的自走式机组 2ZGQ－6D1 比手扶式机组 2ZS－6 时间利用率大，这是由于 2ZGQ－6D1 机组加秧时间较 2ZS－6 机组短，时间利用率更高。

格田参数相同时，以双侧加秧方式作业插秧机

组的时间利用率高于以单侧加秧方式作业机组的时间利用率(图 3)。这是由于在相同格田条件下,机组以双侧加秧方式作业时,机组加秧(肥)次数较少,机组承载的秧苗(肥料)利用率较高,导致机组工艺性非作业时间减少,在其他时间项目相同条件下,时间利用率增大。

4 插秧机组适宜作业格田长度和面积耦合关系分析

为直观确定各机组适宜作业的格田参数间的相互关系,更有针对性指导农业机械化生产实际,依据图 3 不同加秧方式下各插秧机组时间利用率变化规律及范围,在时间利用率随格田参数平缓增长段,分别取时间利用率为 0.45、0.5 和 0.55 对应的水平截面截取图 3 曲面图,得到两种加秧方式下各机组适宜作业格田长度随格田面积变化关系如图 5 所示。

由图 5 可知,时间利用率固定时,随着格田面积增加,插秧机组适宜作业的格田长度逐渐减小,随着格田长度增加,插秧机组适宜作业的格田面积也逐渐减小。但时间利用率不同时,其变化关系有差异。

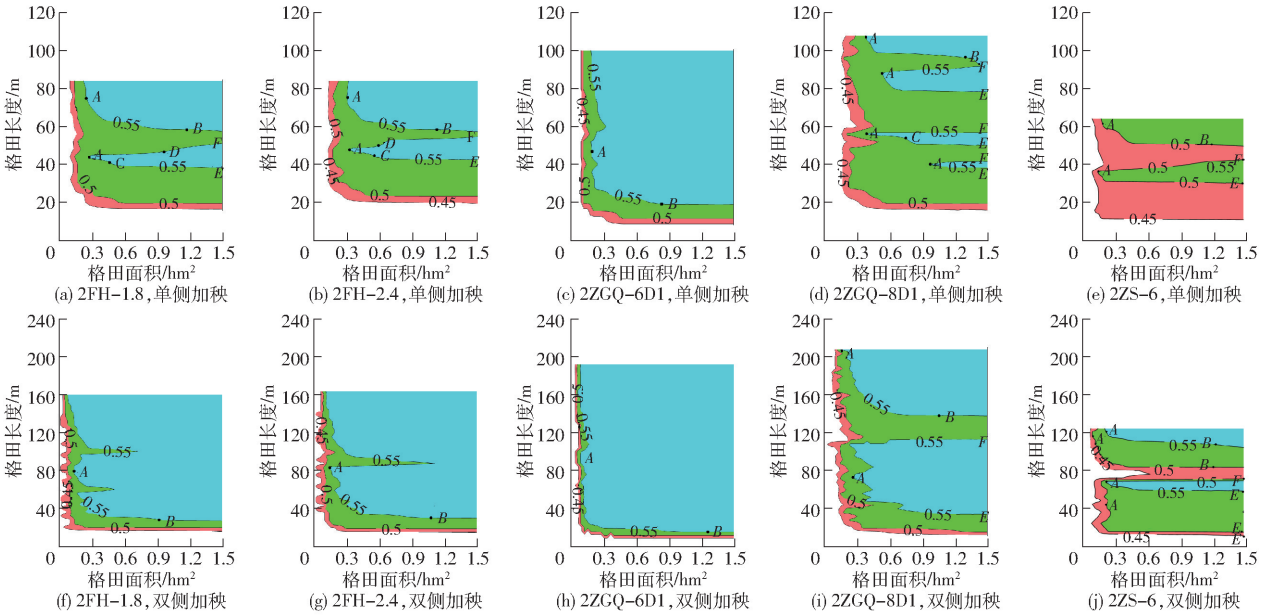

图 5 插秧机组适宜作业格田长度随面积的变化关系

Fig. 5 Relationship between pond length and area suitable for different transplanters

4.1 时间利用率为 0.45 和 0.5 时插秧机组适宜作业格田长度和面积耦合关系

由图 5 可知,当时间利用率分别为 0.45 和 0.5 时,插秧机组以两种加秧方式作业适宜的格田长度随面积呈反比例关系变化。可以采用机组适宜作业的最小格田面积及对应长度、最小格田长度及对应面积两组特征值描述这种耦合关系,如表 4 所示。

由表 4 可知,当时间利用率为 0.45 时,单侧加秧方式下,2FH-1.8 机组适宜作业的最小格田面积 0.14 hm^2,对应的最小格田长度为 28 m;适宜作业的最小格田长度 17 m 对应最小格田面积为 0.55 hm^2。该机组以单侧加秧方式作业时,其适宜的格田长度和面积坐标均在由这两组特征值构成的反比例曲线上方(图 5a)。同样,2FH-1.8 机组以双侧加秧方式作业时,适宜作业的最小格田面积 0.05 hm^2,对应的最小格田长度为 20 m;适宜作业的最小格田长度 16 m 对应最小格田面积为 0.2 hm^2。表明该机组采用双侧加秧方式作业时,其适宜的格田长度和面积坐标均在由这两组特征值构成的反比例曲线上方(图 5f)。其他机组以两种加秧方式作业时适宜的格田长度与面积的耦合规律相同,只是对应反比例曲线的特征值不同。

表 4 时间利用率为 0.45 和 0.5 时插秧机组适宜作业的格田参数耦合关系特征值

Tab. 4 Coupling eigenvalues of pond parameters suitable for transplanters when τ equaled to 0.45 and 0.5

插秧机组型号	时间利用率	单侧加秧方式		双侧加秧方式	
		最小面积及对应长度/(hm^2,m)	最小长度及对应面积/(m,hm^2)	最小面积及对应长度/(hm^2,m)	最小长度及对应面积/(m,hm^2)
2FH-1.8	0.45	(0.14,28)	(17,0.55)	(0.05,20)	(16,0.20)
	0.50	(0.19,28)	(19,0.60)	(0.11,32)	(19,0.25)
2FH-2.4	0.45	(0.16,27)	(20,0.65)	(0.07,37)	(17,0.24)
	0.50	(0.23,31)	(23,0.50)	(0.15,26)	(20,0.29)
2ZGQ-6D1	0.45	(0.12,17)	(8,0.44)	(0.06,24)	(8,0.40)
	0.50	(0.14,19)	(11,0.46)	(0.09,25)	(12,0.40)
2ZGQ-8D1	0.45	(0.24,22)	(16,0.50)	(0.14,31)	(14,0.67)
	0.50	(0.36,25)	(20,0.56)	(0.22,29)	(20,0.35)
2ZS-6	0.45	(0.12,17)	(12,0.21)	(0.10,24)	(10,0.21)

当时间利用率为 0.5，自走式插秧机组以两种加秧方式作业时，其适宜作业的格田长度与面积耦合规律与时间利用率为 0.45 时相同，其差异是反映这种耦合关系反比例曲线的特征值不同，具体如表 4 所示。此时，手扶式插秧机组适宜作业的格田参数范围呈多区域分布，相关特征参数值如表 5 所示。

表 5　时间利用率为 0.55 时插秧机组适宜格田参数特征值

Tab. 5　Suitable eigenvalue of pond parameter for transplanters when τ equaled to 0.55

插秧机组型号	区域编号	单侧加秧						双侧加秧			
		A/(hm², m)	B/(m, hm²)	C/(hm², m)	D/(hm², m)	E/m	F/m	A/(hm², m)	B/(m, hm²)	E/m	F/m
2FH－1.8	1	(0.28, 44)		(0.49, 42)	(1.0, 48)	39	51	(0.15, 79)	(29, 0.92)		
	2	(0.26, 74)	(59, 1.20)								
2FH－2.4	1	(0.33, 47)		(0.56, 44)	(0.6, 51)	43	55	(0.17, 83)	(35, 1.06)		
	2	(0.34, 73)	(59, 1.15)								
2ZGQ－6D1	1	(0.22, 46)	(19, 0.81)					(0.11, 91)	(18, 1.26)		
2ZGQ－8D1	1	(0.98, 40)				39	43	(0.27, 75)		35	115
	2	(0.39, 56)		(0.75, 54)		50	57	(0.27, 208)	(138, 1.15)		
	3	(0.55, 88)				79	92				
	4	(0.4, 104)	(98, 1.29)								
2ZS－6(0.5)	1	(0.15, 36)				28	45	(0.15, 45)		18	72
	2	(0.18, 63)	(48, 1.20)					(0.12, 118)	(84, 1.20)		
2ZS－6(0.55)	1							(0.15, 68)		60	70
	2							(0.21, 120)	(112, 1.20)		

注：2ZS－6(0.5)表示 2ZS－6 插秧机组的目标时间利用率为 0.5，2ZS－6(0.55) 表示 2ZS－6 插秧机组的目标时间利用率为 0.55；A～F 表示机组特征值坐标，见图 5。

4.2　时间利用率为 0.55 时插秧机组适宜作业格田长度和面积的耦合关系

由图 4 可知，当时间利用率为 0.55 时，大多插秧机组适宜作业格田参数范围呈多区域分布，且适宜作业的格田长度具有明显多段性。为了便于分析，按格田长度由小到大的顺序定义机组各适宜区域为区域 1、区域 2 等，如在单侧加秧条件下，2FH－1.8 机组和 2FH－2.4 机组有 2 个适宜作业区域(图 5a、5b)，2ZGQ－6D1 机组有 1 个适宜作业区域(图 5c)，2ZGQ－8D1 机组有 4 个适宜作业区域(图 5d)，2ZS－6 机组无适宜作业区域(图 5e)。

大多区域由 6 个特征值坐标点合围而成：点 A 为机组适宜作业最小格田面积及对应长度坐标点，点 B 为机组适宜作业最小格田长度及对应面积坐标点，点 C、D 分别为机组适宜作业格田长度降、升曲线拐点，点 E、F 分别为格田面积为 1.5 hm² 时对应的适宜作业格田长度。2FH－1.8 和 2FH－2.4 机组的区域 1 由特征值 A、C、D、E 及 F 合围而成，点 A、C、D 组成一个狭长的“三角”区域，C、D 与 E、F 组成“梯形”区域，各区域适宜最小格田面积不同，其对应的格田长度也不同。如 2FH－1.8 机组适宜作业区域 1 最小格田面积为 0.28 hm²，对应格田长度为 44 m，当格田面积为 1.5 hm² 时，此机组在区域 1 适宜作业的长度为 39～51 m(图 5a)；而 2FH－2.4 机组适宜作业区域 1 最小格田面积为 0.33 hm²，对应格田长度为 47 m，当格田面积为 1.5 hm² 时，此机组在区域 1 适宜作业的长度为 43～55 m (图 5b)。

由图 5a～5e 可知，2ZGQ－8D1 机组适宜区域 1 和区域 3 是由 A、E、F 3 个坐标点合围而成的“三角”区域，区域 2 是由 A、D、E、F 4 个坐标点合围而成的区域。2ZGQ－6D1 区域 1、2FH－1.8 和 2FH－2.4 机组的区域 2、2ZGQ－8D1 机组的区域 4 适宜作业格田长度及面积的耦合规律与时间利用率为 0.45 和 0.5 时机组适宜作业格田参数耦合规律相同，只是参数特征值不同。

机组以双侧加秧方式作业时，各机组适宜作业的格田参数耦合规律比单侧加秧作业时稍简单。2FH－1.8、2FH－2.4 和 2ZGQ－6D1 机组仅有 1 个适宜作业区域(图 5f～5h)，2ZGQ－8D1 机组(图 5i)和 2ZS－6 机组(图 5j)有 2 个适宜作业区域。2ZGQ－8D1 机组和 2ZS－6 机组区域 1 是由 A、E、F 3 个坐标点合围而成的区域(图 5i、5j)，点 E、F 分别表示对应机组在格田面积为 1.5 hm² 时机组在此区域适宜作业的格田长度范围。2FH－1.8、2FH－2.4 和 2ZGQ－6D1 机组适宜作业区域 1 及 2ZGQ－8D1 和 2ZS－6 机组适宜作业区域 2 格田面积与长度的耦合规律与时间利用率为 0.45 时相同，只是特征值不同。

当时间利用率为 0.55，各插秧机组以两种加秧方式作业时对应的各适宜作业区域、特征值如表 5 所示。表 5 进一步表明，当时间利用率为 0.55 时，不同插秧机组适宜作业区域数量不同，对应的特征值不同，插秧机组以单侧加秧方式呈现的多区域、多

段性特点比双侧加秧方式更明显。故建议在实际生产中,若条件允许,插秧机组尽量以双侧加秧方式作业,以提升机组对地块及格田条件的适应性,提升机组的作业效率。

5 结论

(1)界定了地块与格田、直行插秧区与地头作业区和加秧方式与加肥方式 3 组与机械化水田插秧作业相关的概念;明确插秧机组作业时间构成,建立单侧加秧和双侧加秧两种方式下插秧机组时间利用率随格田参数变化的数学模型,完善农业机组运用相关理论。

(2)确定了两种加秧方式下 5 种插秧机组时间利用率随格田参数的变化规律:格田长度一定时,时间利用率随面积增大而波动增大,格田面积一定时,时间利用率随格田长度增加在可作业范围内也波动增大,但不同类型机组时间利用率波动范围及规律不同。研究表明加秧次数是影响插秧机组时间利用率波动的主要因素。

(3)随着时间利用率增加,机组在两种加秧方式下适宜格田长度及面积范围逐渐减少;时间利用率为 0.45 和 0.5 时,机组适宜格田长度及面积呈近似反比例关系耦合变化,时间利用率为 0.55 时,各插秧机组适宜作业的格田长度和面积呈多区域分布,适宜作业的格田长度具有明显多段性,研究给出了不同情况下插秧机组适宜作业格田面积和长度耦合关系的特征值。

(4)研究结果适用于多插秧机组在同一格田内作业的情形,为确定不同插秧机组在不同作业方式、不同目标时间利用率下适宜作业的格田条件参数提供理论依据,为依据不同格田条件选择合适的插秧机组提供理论及技术支撑。

参 考 文 献

[1] 卜宏伟. 土地细碎化对土地生产效率的影响研究[D]. 重庆:西南大学, 2015.
BU Hongwei. A research of land-fragmentation's influence on land-production efficiency[D]. Chongqing: Southwest University, 2015. (in Chinese)

[2] 刘涛, 曲福田, 金晶, 等. 土地细碎化、土地流转对农户土地利用效率的影响[J]. 资源科学,2008(10): 1511 - 1516.
LIU Tao, QU Futian, JIN Jing, et al. Impact of land fragmentation and land transfer on farmer's land use efficiency[J]. Resources Science, 2008(10): 1511 - 1516. (in Chinese)

[3] 刘雨松. 土地细碎化对农户购买农机作业服务的影响分析[D]. 重庆: 西南大学,2014.
LIU Yusong. Analysis of the impact of land fragmentation on farmers purchasing agricultural machinery operation services[D]. Chongqing: Southwest University, 2014. (in Chinese)

[4] 刘成武, 楠楠, 黄利民. 中国南方稻作区不同规模农户土地集约利用行为的差异比较[J]. 农业工程学报, 2018, 34(17): 250 - 256.
LIU Chengwu, NAN Nan, HUANG Limin. Difference comparison on land intensive use of different scale farmers in rice-growing areas in Southern China[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(17): 250 - 256. (in Chinese)

[5] 丛文杰. 南方农地地理特征及其对收割机田间作业效率的影响机理研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2017.
CONG Wenjie. Study on the characteristics of agricultural land and the mechanism of field efficiency in south China[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University,2017. (in Chinese)

[6] 陈丽能, 马广. 拖拉机田间作业机组的生产率及其影响因素的研究[J]. 农业机械学报,2001,32(2): 99 - 102,117.
CHEN Lineng, MA Guang. Study on productivity of a field-working tractor-implement unit and its influencing factors[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2001, 32(2): 99 - 102,117. (in Chinese)

[7] 陈丽能. 拖拉机田间作业的最佳功率[J]. 农业机械学报,1986,17(2): 41 - 44.
CHEN Lineng. The best power of the tractor field work[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 1986, 17(2): 41 - 44. (in Chinese)

[8] JANULEVICIUS A. Validation of relationships between tractor performance indicators, engine control unit data and field dimensions during tillage[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2023, 191:110 - 201.

[9] 刘玉, 刘巧芹, 唐秀美, 等. 平原区耕作单元地块细碎化对小麦机收效率的影响分析[J]. 农业机械学报,2018,49(2): 225 - 231.
LIU Yu, LIU Qiaoqin, TANG Xiumei, et al. Effects of fragmentation of cultivated land unit on mechanical harvesting efficiency of wheat in plain area[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(2): 225 - 231. (in Chinese)

[10] 罗丹, 徐艳, 王跃朋, 等. 基于地块面积的土地整理耕作效率测算方法研究[J]. 中国土地科学, 2013, 27(6): 73 - 78.
LUO Dan, XU Yan, WANG Yuepeng, et al. Study on the method of measuring the scale efficiency of land consolidation in terms of plot size[J]. China Land Science, 2013, 27(6): 73 - 78. (in Chinese)

[11] BOCHTIS D D, VOUGIOUKAS S G. Minimising the non-working distance travelled by machines operating in a headland field pattern[J]. Biosystems Engineering, 2008, 101(1): 1 - 12.

[12] JANULEVICIUS A, SARAUSKIS E, CIPLIENE A, et al. Estimation of farm tractor performance as a function of time

efficiency during ploughing in fields of different sizes[J]. Biosystems Engineering, 2019, 179: 80 - 93.
[13] LACOUR S, BURGUN C, PERILHON C, et al. A model to assess tractor operational efficiency from bench test data[J]. Journal of Terramechanics, 2014, 54: 1 - 18.
[14] ZHANG C N. Development of a multi-robot tractor system for agriculture field work[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2017, 142: 79 - 90.
[15] 吕振宇. 耕地细碎化的评价、效应及整治研究[D]. 北京：中国农业大学, 2015.
LÜ Zhenyu. Study on the evalution, effects and consolidation of cultivated land fragmentation[D]. Beijing: China Agricultural University, 2015. (in Chinese)
[16] 杨伟. 江苏省小地块水稻收割机作业效率研究[D]. 南京：南京农业大学, 2016.
YANG Wei. Study on rice harvester working efficiency of the small-type field in Jiangsu Province[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University,2016. (in Chinese)
[17] 张凯, 白美健, 李益农, 等. 联合收割机生产率计算模型与适宜作业路线分析[J]. 农业工程学报,2018, 34(18):37 - 43.
ZHANG Kai, BAI Meijian, LI Yinong, et al. Combine harvester productivity calculation model and analysis of suitable operation route[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(18): 37 - 43. (in Chinese)
[18] 周陈林, 汪小昱, 何瑞银, 等. 收割机作业路线和地块条件匹配模型与分析[J]. 江西农业大学学报, 2022,44(4): 1023 - 1033.
ZHOU Chenlin, WANG Xiaochan, HE Ruiyin, et al. Matching model and analysis of harvester operation routes and plot conditions[J]. Journal of Jiangxi Agricultural University, 2022,44(4):1023 - 1033. (in Chinese)
[19] 余友泰. 农业机械化工程[M]. 北京：中国展望出版社, 1987: 10 - 21.
[20] XU Y, XIN L, LI X, et al. Exploring a moderate operation scale in China's grain production: a perspective on the costs of machinery services[J]. Sustainability, 2019, 11(8): 2213.
[21] SOGAARD H T,SORENSEN C G. A model for optimal selection of machinery sizes within the farm machinery system[J]. Biosystems Engineering, 2004, 89(1):13 - 28.
[22] DOUNGPUENG K, SAENGPRACHATANARUG K, POSOM J, et al. Selection of proper combine harvesters to field conditions by an effective field capacity prediction model[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2020, 13(4): 125 - 134.
[23] 乔金友, 吴广硕, 韩兆桢, 等. 规模化玉米机械化茬耕整地技术选择与机组性能试验[J]. 东北农业大学学报, 2019, 50(11):71 - 78.
QIAO Jinyou, WU Guangshuo, HAN Zhaozhen, et al. Tillage mechanization technology selection and machinery unit performance experiment on large-scaled field covered with corn stubble and straw[J]. Journal of Northeast Agricultural University,2019,50(11):71 - 78. (in Chinese)
[24] 乔金友, 邵光辉, 李荣, 等. 播种机组纯作业时间利用率与地块条件的匹配模型与试验[J]. 农业工程学报, 2020, 36(5):19 - 28.
QIAO Jinyou, SHAO Guanghui, LI Rong, et al. Matching model and experiment of net working time utilization rate of seeder unit with plot length and area[J]. Transactions of the CSAE,2020,36(5):19 - 28. (in Chinese)
[25] 乔金友, 韩兆桢, 洪魁, 等. 收获机组技术生产率随地块条件的变化规律试验[J]. 农业工程学报, 2016, 32(7): 43 - 50.
QIAO Jinyou, HAN Zhaozhen, HONG Kui, et al. Variation of technology productivity of harvesting outfit along with site conditions[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(7): 43 - 50. (in Chinese)
[26] 乔金友, 李荣, 张朋永, 等. 基于 STUR 收获机组适宜作业单元地块长度和面积耦合关系研究[J]. 东北农业大学学报, 2022,53(5):80 - 88.
QIAO Jinyou, LI Rong,ZHANG Pengyong, et al. Research on STUR based coupling relationship between suitable plot length and area for harvesters[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2022,53(5):80 - 88. (in Chinese)
[27] 乔金友, 万盈贝, 丛昕, 等.播种机组加种加肥参数与地块长度关系建模与试验[J]. 农业机械学报, 2022,53(7):43 - 55.
QIAO Jinyou,WAN Yingbei, CONG Xin, et al. Modeling and experiment on the relationship between seed and fertilizer adding parameters for seeding machinery unit and plot conditions[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2022,53(7):43 - 55. (in Chinese)
[28] 张凯, 杨姗姗, 白美健, 等.基于较高收割机生产率的东北地区适宜水田规格阈值分析[J]. 中国水利水电科学研究院学报(中英文), 2023,21(2):157 - 165.
ZHANG Kai, YANG Shanshan, BAI Meijian, et al. Threshold analysis of suitable paddy fieldscale in Northeast China considering the productivity of multiple models harvesters[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2023,21(2):157 - 165. (in Chinese)
[29] 陈建. 农业机械化管理学[M]. 北京：中国农业出版社, 2022.
[30] 郑大明. 水田插秧机组技术参数随地块条件变化规律研究[D]. 哈尔滨：东北农业大学, 2019.
ZHENG Daming. The research on technical parameters regularities of paddy field transplanters varies with land conditions[D]. Harbin: Northeast Agricultural University,2019. (in Chinese)
[31] 盛骤. 概率论与数理统计[M]. 4 版. 北京：高等教育出版社, 2014: 178 - 183.
[32] 李军成. MATLAB 语言基础[M]. 南京：南京大学出版社, 2022.