

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2022.07.004

播种机组加种加肥参数与地块长度关系建模与试验

乔金友^{1,2} 万盈贝^{1,2} 丛 昕³ 郭长友⁴ 陈海涛^{1,2} 邵光辉^{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. 哈尔滨剑桥学院智能与电气电子工程学院, 哈尔滨 150069; 4. 北大荒集团红星分公司, 北安 164022)

摘要: 加种加肥是播种机组必不可少的作业环节,研究播种机组加种加肥参数与作业单元地块长度间的定量关系,对客观分析加种加肥参数随地块长度变化规律、提高播种机组的时间利用率具有重要理论和实际意义。基于播种机组实际作业组织需求,提出加种加肥行程比 α_w 的概念,建立了3种加种加肥方式及有、无 α_w 条件下,播种机组加种加肥点间距离、加种加肥量、加种加肥次数和加种加肥总时间等随作业单元地块长度变化关系的数学模型;结合试验数据采用Matlab计算,分别确定了4种典型播种机组以单侧加种加肥方式作业时4个加种加肥参数随作业单元地块长度的变化规律;明确了有、无 α_w 条件下播种机组加种参数随地块长度均呈“两段一点”式变化规律;确定了当地块面积为5 hm²时,单侧加种加肥方式作业条件下4种典型播种机组的加种参数不同段与其相同段的分界点及其可作业的地块长度上限点:约翰迪尔7830播种机组的地块长度段分界点为575 m、可作业地块长度上限点为1 151 m,维美德171播种机组的分界点为438 m、上限点为1 031 m,常发504播种机组的分界点为457 m、上限点为1 035 m,黄海254播种机组的分界点为517 m、上限点为1 035 m。研究结果完善了农业机组运用的相关理论,为有效提高机组的时间利用率及作业效率提供了理论和技术支撑,为播种机组作业规划、农业机械化高质量发展提供了科学依据。

关键词: 播种机组; 作业单元地块长度; 加种加肥参数; 数学模型; 作业规划

中图分类号: S232.5 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2022)07-0043-13 OSID: 

Modeling and Experiment on Relationship between Seed and Fertilizer Adding Parameters for Seeding Machinery Unit and Plot Length

QIAO Jinyou^{1,2} WAN Yingbei^{1,2} CONG Xin³ GUO Changyou⁴ CHEN Haitao^{1,2} SHAO Guanghui^{1,2}

(1. College of Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China

2. Heilongjiang Province Technology Innovation Center of Mechanization and Materialization of Major Crops Production, Harbin 150030, China

3. School of Intelligent and Electrical and Electronic Engineering, Harbin Cambridge University, Harbin 150069, China

4. Beidahuang Group Hongxing Farm Co., Ltd., Beian 164022, China)

Abstract: The work of adding seed and fertilizer is an indispensable operation for seeding machinery unit. The research on quantitative relationship between seed or fertilizer adding parameters for seeding machinery unit and operational plot length is of great theoretical and practical significance to objectively analyze the regulars of seed and fertilizer adding parameters varying with plot length, and to improve the time utilization rate for seeding machinery unit. Based on the actual operation organization needs for the seeding machinery unit, the concept of the travel ratio of seed and fertilizer adding α_w was put forward, the mathematic models of the distance between two adjacent seed or fertilizer adding positions, seed or fertilizer adding amount, seed or fertilizer adding times, and seed and fertilizer adding time for seeding machinery unit varying with the parameters of operational plot length were established under the conditions of three adding seed and fertilizer modes and with or without α_w . Combined with experimental data and Matlab software, the various regulars of four seed and fertilizer adding parameters varying with operational plot length were determined when four typical seeding machinery units were operated with

收稿日期: 2022-02-21 修回日期: 2022-04-27

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFD2000405-2)和国家大豆产业技术体系专项资金项目(CARS-04-PS27)

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

adding seed and fertilizer at one side of the plot. Regulars of four seed adding parameters of seeding machinery unit with or without α_w all had a “two-ranges one-point” feature varying with plot length. When the plot area was 5 hm^2 , the demarcation points between the corresponding plot length ranges with different seed adding parameters and with the same seed adding parameters, and the upper limit points of plot lengths that can be operated by four typical seeding machinery units with adding seed and fertilizer at one side of the plot were determined: the demarcation point of John Deere 7830 seeding machinery unit was 575 m and the upper limit point was 1 151 m, the demarcation point of Valtra 171 seeding machinery unit was 438 m and the upper limit point was 1 031 m, the demarcation point of Changfa 504 seeding machinery unit was 457 m and the upper limit point was 1 035 m, and the demarcation point of the Huanghai 254 seeding machinery unit was 517 m and the upper limit point was 1 035 m. The research results can improve the relevant application theory of agricultural machinery unit, provide theoretical and technical support for effectively improving time utilization rate and operational efficiency, and provide scientific basis for operation planning for seeding machinery unit and high-quality developing of agricultural mechanization.

Key words: seeding machinery unit; operational plot length; seed and fertilizer adding parameter; mathematic models; operation planning

0 引言

目前我国农业生产中存在多种作业单元地块规模。作业单元地块面积^[1-2]和长度^[3]等是影响农业机组时间利用率和作业效率的重要地块条件因素,因此,研究农业机组作业参数与作业单元地块条件的关系对提升农业机组作业效率具有重要理论和现实意义。

国内外许多专家学者从多个角度开展此领域研究工作。在农业机组时间利用率及作业效率随作业单元地块面积变化规律研究方面,文献[4-8]研究发现作业单元地块面积较小会增大农业机组的非作业时间,进而降低机组时间利用率和作业效率。文献[9-10]建立非线性规划模型,研究作业单元地块面积、作业时间等参数对农业机组作业效率的影响规律。文献[11-14]通过试验获取农业机组各项作业时间类别及数值,建立时间利用率计算模型,得到耕整地机组、播种机组和收获机组的时间利用率、作业生产率随作业单元地块面积增加呈非线性增加的规律,当作业单元地块面积大于某一数值时,农业机组时间利用率及作业效率变化趋于稳定^[15-16]。

国内外相关学者也在农业机组时间利用率及作业效率随作业单元地块长度变化规律方面进行了较深入研究。王旭等^[17]研究发现在面积大、长垄、坡度小的地块条件下,农业机组能获得较高的作业效率。邵光辉^[18]研究发现当作业单元地块面积一定时,随着地块长度增加,农业机组转弯次数逐渐减少,机组时间利用率增加。文献[19-21]研究显示农业机组时间利用率和作业效率随地块长度增加呈非线性增加。文献[22-23]研究发现机组作业效

率随着作业单元地块长宽比的增加呈指数增加。

工艺性停车时间是致使农业机组时间利用率等作业参数随作业单元地块条件变化的重要因素^[24]。文献[25-27]研究表明农业机组工艺停车时间是必不可少的工作时间消耗,该时间取决于工艺停车次数和单次停车时间,对于播种机组工艺停车时间主要是加种加肥时间。文献[28-30]研究发现填充种子和肥料、更换不同种子和肥料、调整播种量及播种深度以及机组等待肥料运输车等时间是影响播种机组加种加肥时间的主要因素。乔金友等^[12]研究发现由于加种加肥时间的影响造成了时间利用率随地块条件有波动性变化。

综上所述,国内外学者在农业机组时间利用率和作业效率与作业单元地块条件的关系方面进行了较多研究,明确了农业机组作业参数随作业单元地块条件的变化规律,在很大程度上为不同作业单元地块条件下农业机组选型提供理论和技术支撑。虽然一些学者研究指出了工艺性停车时间是影响农业机组作业参数的重要因素,但是结合生产实际需求,针对播种机组加种加肥参数随作业单元地块(简称为地块)条件定量变化关系的研究鲜有报道。本文结合新阶段农业机械化高质量发展需求,建立播种机组加种加肥参数数学模型,结合试验数据,基于Matlab 软件编程计算,研究加种加肥参数随地块条件参数变化规律,完善和发展机组运用理论,以期科学规划播种机组加种加肥作业,减少工艺性停车时间、提高播种机组时间利用率和作业效率提供理论和技术支撑。

1 播种机组加种加肥作业概念界定

1.1 播种机组加种加肥方式

结合地块条件及实际作业特点,播种机组在作

业过程中可采取单侧加种加肥、双侧加种加肥和空箱加种加肥 3 种作业方式。单侧加种加肥方式要求种箱或肥箱内剩余种量或肥量不足以作业往返两个行程时,播种机组停车加种加肥,加种点加肥点只能在地块同侧地边;双侧加种加肥方式要求播种机组种箱或肥箱内剩余的种量或肥量不足以作业一个行程时,播种机组停车加种加肥,加种点或加肥点可以在地块的任一侧地边;空箱加种加肥方式要求播种机组种箱或肥箱内种子或肥料耗尽时停车加种加肥,加种点加肥点可能在地块内任意位置,此种方式需种肥运输车辆频繁进地运种运肥,运输车辆组织比较繁琐^[18]。

在播种机组实际作业过程中,常采用单侧加种加肥方式,若地块较长且两侧地边均有条件满足运种肥车辆进出时,可采用双侧加种加肥方式,空箱加种加肥方式因需在地块内停车加种或加肥,种肥运输车辆协调困难,只有管理水平较先进的现代化农场才可能采用此方式组织播种作业。

1.2 播种机组加种加肥参数

播种机组作业过程中,当箱体内种子或肥料不足支撑后续作业时,需停车填充种子或肥料。播种机组加种加肥作业可能包含机组驶至或驶离加种加肥点,更换、填充种子或肥料,等待种肥运输车等过程。通过科学协调播种机组和种肥运输车供求关系、合理设置加种加肥点位置,可以将播种机组驶至或驶离加种加肥点和等待种肥运输车过程所需时间降至最低。加种加肥过程是播种机组作业中的工艺性停车过程。与加种加肥作业相关技术参数称为播种机组加种加肥参数,主要包括加种加肥点间距离、加种加肥量、加种加肥次数和加种加肥总时间等。研究加种加肥参数是科学调度种肥运输车辆、合理组织机械化播种作业,提升播种机组作业效率的重要理论基础和前提。

1.3 播种机组加种加肥行程比

一般情况下,确定面积地块的肥料需要量大于种子需要量,且播种机组肥箱容积大于种箱容积,由于不同作物单位面积需种量与需肥量、播种机组种箱与肥箱容积并无确定比例关系,导致播种机组一次加种能作业的行程数与一次加肥所能作业的行程数也不呈固定比例关系。实际作业过程中为减少停车次数、减少工艺性停车时间,一般期望加种与加肥作业同时进行。为满足上述要求,便于研究播种机组加种加肥作业参数随地块条件变化规律,定义加种加肥行程比为播种机组正常作业条件下,一次加种能作业的行程数与一次加肥所能作业的行程数的比值。当种箱剩余种量不足以作业一次加肥所能作

业的行程数时,需在上一次加肥时加种,因此加种加肥行程比须向下取整。其计算模型为

$$\alpha_w = \left\lfloor \frac{n_{ws}}{n_{wf}} \right\rfloor \tag{1}$$

式中 α_w ——以第 w 种加种加肥方式作业时播种机组的加种加肥行程比

n_{ws} ——以第 w 种加种加肥方式作业时播种机组一次加种能作业的行程数

n_{wf} ——以第 w 种加种加肥方式作业时播种机组一次加肥能作业的行程数

w ——加种加肥方式区分码

$w=0,1,2$ 分别代表空箱加种加肥方式、单侧加种加肥方式和双侧加种加肥方式。

应用加种加肥行程比可以使播种机组加种作业与加肥作业同时进行,有效减少播种机组加种加肥停车次数,降低加种加肥总时间,提高播种机组时间利用率。当播种机组一次加种能作业的行程数大于一次加肥能作业的行程数时,即 $\alpha_w \geq 1$,也就是在考虑 α_w 情况下,播种机组每加 α_w 次肥加一次种。

播种机组一次加种能作业的行程数为种箱的种子最大播出量与单行程播种量的比值,按此思路可确定播种机组一次加肥能作业的行程数,计算模型为

$$n_{wt} = \frac{Q_{ct}}{q_t} \tag{2}$$

式中 n_{wt} ——以第 w 种加种加肥方式作业时播种机组一次加种(肥)能作业的行程数

Q_{ct} ——播种机组种(肥)箱种子(肥料)的最大播出量,kg

q_t ——单行程播种(肥)量,kg

t ——加种加肥参数区分码(t 为 f 表示加肥参数, t 为 s 表示加种参数)

播种机组种箱种子或肥箱肥料的最大播出量 Q_{ct} 的计算模型为

$$Q_{ct} = (1 - k_t) \rho_t V_t \tag{3}$$

式中 k_t ——播种机组种(肥)箱安全留种(肥)量系数

ρ_t ——种(肥)箱内种子(肥料)堆积密度,kg/m³

V_t ——播种机组种(肥)箱容积,m³

播种机组种(肥)箱安全留种(肥)量系数 k_t 是播种机组加种前种(肥)箱剩余种(肥)质量与种(肥)箱可容最大种子(肥料)质量的比值,是保证播种机组能够正常连续作业的前提。

单行程播种(肥)量为播种机组单行程作业面积与单位面积播种(肥)量之积,计算模型为

$$q_t = 10^{-4} B_p L q_{ut} \tag{4}$$

式中 B_p ——播种机组作业幅宽,m

依前述原理,考虑 α_w 的情况下,由于单行程播种量与单行程施肥量并不相等,因此播种机组以第 w 种加种加肥方式作业加种量为加种加肥行程比、单行程播种量与单行程施肥量之比和加肥量之积,其计算模型为

$$Q_{was\alpha} = \alpha_w \frac{q_s}{q_f} Q_{waf}$$

(11)

式中 $Q_{was\alpha}$ ——考虑 α_w 情况下,播种机组以第 w 种

加种加肥方式作业时的加种量,kg
 q_s ——单行程播种量,kg
 q_f ——单行程施肥量,kg
 Q_{waf} ——播种机组以第 w 种加种加肥方式作业时的加肥量,kg

将式(1)、(5)~(7)代入式(10)、(11)分别得到 3 种加种加肥方式下有、无 α_w 的加种量和加肥量随地块长度变化的计算模型,如表 2 所示。

表 2 播种机组加种加肥量数学模型

Tab.2 Formulas of seed or fertilizer adding amount for seeding machinery unit

加种加肥方式	加种量模型		加肥量模型
	无 α_w	有 α_w	
单侧加种加肥	$Q_{1as} = 2 \left[\frac{(1 - k_s) \rho_s V_s}{2 \times 10^{-4} B_p L q_{us}} \right] q_s$	$Q_{1as\alpha} = 2 \alpha_1 q_s \left[\frac{(1 - k_f) \rho_f V_f}{2 \times 10^{-4} B_p L q_{uf}} \right]$	$Q_{1af} = 2 \left[\frac{(1 - k_f) \rho_f V_f}{2 \times 10^{-4} B_p L q_{uf}} \right] q_f$
双侧加种加肥	$Q_{2as} = \left[\frac{(1 - k_s) \rho_s V_s}{10^{-4} B_p L q_{us}} \right] q_s$	$Q_{2as\alpha} = \alpha_2 q_s \left[\frac{(1 - k_f) \rho_f V_f}{10^{-4} B_p L q_{uf}} \right]$	$Q_{2af} = \left[\frac{(1 - k_f) \rho_f V_f}{10^{-4} B_p L q_{uf}} \right] q_f$
空箱加种加肥	$Q_{0as} = \frac{(1 - k_s) \rho_s V_s}{10^{-4} B_p L q_{us}} q_s$		$Q_{0af} = \frac{(1 - k_f) \rho_f V_f}{10^{-4} B_p L q_{uf}} q_f$

2.3 加种加肥次数计算模型

播种机组加种次数等于完成整个地块总作业行程数与相邻两加种点间行程数的比值。比值的小数部分表示播种机组按比值整数部分加种后仍剩余作业行程未作业,依然要加一次种才能完成整个地块作业,因此计算结果需向上取整,按此思路可确定加肥次数。播种机组加种加肥次数计算模型为

$$m_{wt} = \left\lceil \frac{n}{n_{wt}} \right\rceil$$

(12)

式中 m_{wt} ——播种机组以第 w 种加种加肥方式作业时的加种(肥)次数

n ——播种机组完成整个地块的总作业行程数

播种机组的总作业行程数等于地块面积与播种机组的单行程面积之比向上取整。计算模型为

$$n = \left\lceil \frac{S}{10^{-4} LB_p} \right\rceil$$

(13)

式中 S ——地块面积, hm^2

依前述原理,在考虑 α_w 的情况下,播种机组以第 w 种加种加肥方式作业时的加种次数计算模型为

$$m_{ws\alpha} = \left\lceil \frac{m_{wf}}{\alpha_w} \right\rceil$$

(14)

式中 $m_{ws\alpha}$ ——考虑 α_w 的情况下,播种机组以第 w 种加种加肥方式作业时的加种次数

m_{wf} ——播种机组以第 w 种加种加肥方式作业时的加肥次数

将式(1)、(5)~(7)、(13)代入式(12)、(14)分别得到 3 种加种加肥方式下有、无 α_w 的加种次数以及加肥次数随地块长度变化的计算模型,如表 3 所示。

表 3 播种机组加种加肥次数数学模型

Tab.3 Formulas of seed or fertilizer adding times for seeding machinery unit

加种加肥方式	加种次数模型		加肥次数模型
	无 α_w	有 α_w	
单侧加种加肥	$m_{1s} = \left\lceil \frac{\frac{S}{10^{-4} LB_p}}{2 \left[\frac{(1 - k_s) \rho_s V_s}{2 \times 10^{-4} B_p L q_{us}} \right]} \right\rceil$	$m_{1s\alpha} = \left\lceil \frac{1}{\alpha_1} \left[\frac{\frac{S}{10^{-4} LB_p}}{2 \left[\frac{(1 - k_f) \rho_f V_f}{2 \times 10^{-4} B_p L q_{uf}} \right]} \right] \right\rceil$	$m_{1f} = \left\lceil \frac{\frac{S}{10^{-4} LB_p}}{2 \left[\frac{(1 - k_f) \rho_f V_f}{2 \times 10^{-4} B_p L q_{uf}} \right]} \right\rceil$
双侧加种加肥	$m_{2s} = \left\lceil \frac{\frac{S}{10^{-4} LB_p}}{\left[\frac{(1 - k_s) \rho_s V_s}{10^{-4} B_p L q_{us}} \right]} \right\rceil$	$m_{2s\alpha} = \left\lceil \frac{1}{\alpha_2} \left[\frac{\frac{S}{10^{-4} LB_p}}{\left[\frac{(1 - k_f) \rho_f V_f}{10^{-4} B_p L q_{uf}} \right]} \right] \right\rceil$	$m_{2f} = \left\lceil \frac{\frac{S}{10^{-4} LB_p}}{\left[\frac{(1 - k_f) \rho_f V_f}{10^{-4} B_p L q_{uf}} \right]} \right\rceil$
空箱加种加肥	$m_{0s} = \left\lceil \frac{S q_{us}}{(1 - k_s) \rho_s V_s} \right\rceil$		$m_{0f} = \left\lceil \frac{S q_{uf}}{(1 - k_f) \rho_f V_f} \right\rceil$

2.4 加种加肥总时间计算模型

当播种机组的加种点与加肥点不在同一位置时,播种机组完成作业任务加种加肥总时间等于总加种时间与总加肥时间之和,计算模型为

$$T_{aw} = m_{ws} \bar{t}_s + m_{wf} \bar{t}_f \tag{15}$$

式中 T_{aw} ——播种机组以第 w 种加种加肥方式作业时的加种加肥总时间,s
 m_{ws} ——播种机组以第 w 种加种加肥方式作业时的加种次数
 $\bar{t}_s$ ——播种机组平均单次加种时间,s
 $\bar{t}_f$ ——播种机组平均单次加肥时间,s

当考虑 α_w 时,播种机组的加种点与加肥点在同一位置时,由于肥箱容积大于种箱容积,且加肥量大于加种量,因此在加肥同时即完成加种,加种加肥总时间为总加肥时间,计算模型为

$$T_{aw\alpha} = m_{wf} \bar{t}_f \tag{16}$$

式中 $T_{aw\alpha}$ ——考虑 α_w 的情况下,播种机组以第 w 种加种加肥方式作业时的加种加肥总时间,s
将表 3 的数学模型代入式(15)、(16)可得到 3 种加种加肥方式下有 α_w 和无 α_w 的加种加肥总时间随地块长度变化的计算模型,如表 4 所示。

表 4 播种机组加种加肥总时间数学模型
Tab.4 Formulas of seed and fertilizer adding time for seeding machinery unit

加种加肥方式	无 α_w 加种加肥总时间模型		有 α_w 加种加肥
	加种加肥点异位	加种加肥点同位	总时间模型
单侧加种加肥	$T_{a1} = \left[\frac{\frac{S}{10^{-4}LB_p}}{2 \left[\frac{(1-k_f)\rho_f V_f}{2 \times 10^{-4}B_p Lq_{uf}} \right]} \right] \bar{t}_f + \left[\frac{\frac{S}{10^{-4}LB_p}}{2 \left[\frac{(1-k_s)\rho_s V_s}{2 \times 10^{-4}B_p Lq_{us}} \right]} \right] \bar{t}_s$	$T_{a1} = \left[\frac{\frac{S}{10^{-4}LB_p}}{2 \left[\frac{(1-k_f)\rho_f V_f}{2 \times 10^{-4}B_p Lq_{uf}} \right]} \right] \bar{t}_f$	$T_{a1\alpha} = \left[\frac{\frac{S}{10^{-4}LB_p}}{2 \left[\frac{(1-k_f)\rho_f V_f}{2 \times 10^{-4}B_p Lq_{uf}} \right]} \right] \bar{t}_f$
双侧加种加肥	$T_{a2} = \left[\frac{\frac{S}{10^{-4}LB_p}}{\left[\frac{(1-k_f)\rho_f V_f}{10^{-4}B_p Lq_{uf}} \right]} \right] \bar{t}_f + \left[\frac{\frac{S}{10^{-4}LB_p}}{\left[\frac{(1-k_s)\rho_s V_s}{10^{-4}B_p Lq_{us}} \right]} \right] \bar{t}_s$	$T_{a2} = \left[\frac{\frac{S}{10^{-4}LB_p}}{\left[\frac{(1-k_f)\rho_f V_f}{10^{-4}B_p Lq_{uf}} \right]} \right] \bar{t}_f$	$T_{a2\alpha} = \left[\frac{\frac{S}{10^{-4}LB_p}}{\left[\frac{(1-k_f)\rho_f V_f}{10^{-4}B_p Lq_{uf}} \right]} \right] \bar{t}_f$
空箱加种加肥	$T_{a0} = \left[\frac{Sq_{uf}}{(1-k_f)\rho_f V_f} \right] \bar{t}_f + \left[\frac{Sq_{us}}{(1-k_s)\rho_s V_s} \right] \bar{t}_s$	$T_{a0} = \left[\frac{Sq_{uf}}{(1-k_f)\rho_f V_f} \right] \bar{t}_f$	$T_{a0\alpha} = \left[\frac{Sq_{uf}}{(1-k_f)\rho_f V_f} \right] \bar{t}_f$

3 试验

3.1 典型播种机组及相关参数

为使研究成果具有代表性,选择动力机功率、作

业幅宽不同的 4 种典型大豆播种机组,测取其正常作业过程中实际发生的单次加种、加肥时间^[31]。典型播种机组基本参数及平均加种加肥时间如表 5 所示。

表 5 播种机组基本参数及平均加种加肥时间
Tab.5 Basic parameters and average seed or fertilizer adding time for tested seeding machinery units

机组名称	动力机型号	作业机型号	配套动力/ kW	作业幅宽/ m	种箱容积/ m ³	肥箱容积/ m ³	平均加种 时间/s	平均加肥 时间/s
约翰迪尔 7830	John Deere 7830	Great Plain YP-12	151.0	6.6	0.234 4	0.96	86.6	433
维美德 171	Valtra 171	Monasem NG-12	132.0	6.6	0.228 4	0.86	81.6	408
常发 504	常发 504	2BFJM-4 型精密耕播机	37.0	2.6	0.056 4	0.34	61.2	306
黄海 254	黄海 254	2BJG-2 型精密耕播机	18.4	1.3	0.042 4	0.17	39.6	198

3.2 加种加肥参数随地块条件变化规律

当地块长度一定时,播种机组加种加肥点间距离和加种加肥量均不受地块面积的影响,加种加肥次数和加种加肥总时间随地块面积的增加而线性增加,其规律较简单明确;另外,由于单侧加种加肥方式是播种机组最常见的作业方式,因此,分析确定地块面积条件下,单侧加种加肥条件下播种机组加种加肥参数随地块长度变化规律具有典型性和代表性。

结合北方规模化生产区域地块条件参数分布情况^[31],选取地块面积 5 hm²、地块长度 100~1 500 m

变化。依据表 1~4 相关数学模型及表 5 数据,采用 Matlab R2020a 编程计算绘图,进而分析 4 种典型播种机组在单侧加种加肥方式下加种加肥点间距离、加种加肥量、加种加肥次数和加种加肥总时间随地块长度的变化规律。

3.2.1 加种加肥点间距离随地块长度变化规律
依据表 1 加种加肥点间距离模型及表 5 相关数据,计算可得单侧加种加肥方式下 4 种典型播种机组加种加肥点间距离随地块长度的变化规律,如图 1 所示。

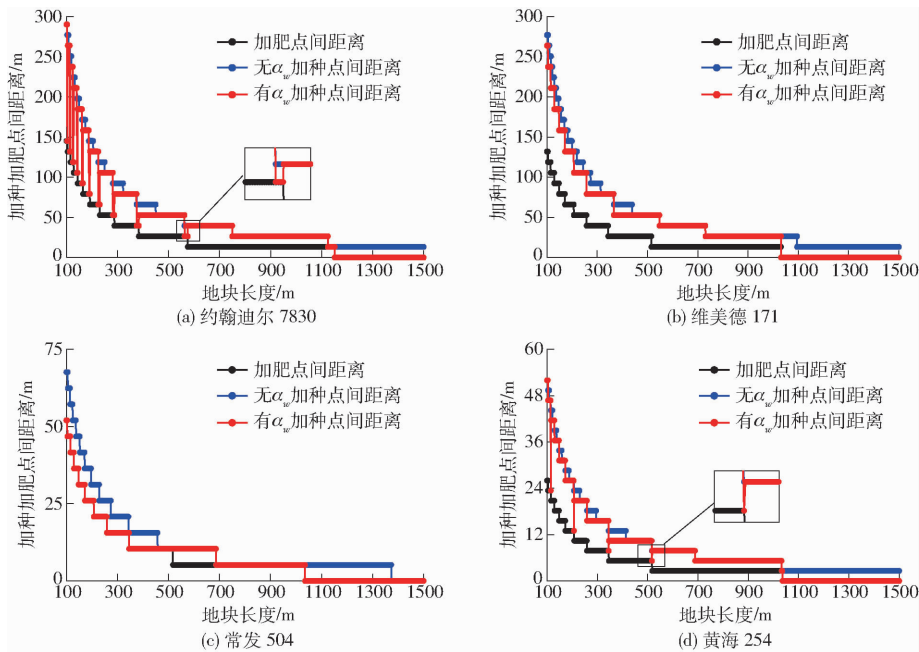


图 1 播种机组加种加肥点间距离随地块长度变化规律

Fig. 1 Regulars of distance between two adjacent seed or fertilizer adding positions varying with plot length

由图 1 可见,4 种播种机组加种点间距离、加肥点间距离均随地块长度增加呈阶梯型逐级减少,且整体趋势为先急后缓。其原因是当地块面积固定时,随着地块长度增加单作业行程所需种、肥量增加,播种机组相邻两加种(肥)点间行程数减少,致使加种(肥)点间距离减小。而单侧加种加肥方式播种作业在地头一侧加种加肥,因此播种机组相邻两加种(肥)点间行程数一定是偶数,且加种(肥)点间距离是机组作业幅宽和相邻两加种(肥)点间行程数之积,因此加种(肥)点间距离呈阶梯型递减。当地块较短时,随地块长度等步长增加,地块长度变化率相对较大,相邻两加种(肥)点间行程数快速变少,致使加种(肥)点间距离随地块长度增加快速减小;当地块较长时,随地块长度增加,地块长度变化率减小,相邻两加种(肥)点间行程数缓慢减少,致使加种(肥)点间距离随地块长度增加缓慢减小。因此加种(肥)点间距离整体下降趋势为先急后缓。

虽然不同播种机组有 α_w 和无 α_w 加种点间距离随地块长度段变化规律有所不同,但均存在 3 种情况,即有 α_w 加种点间距离小于等于无 α_w 加种点间距离时对应地块长度段;有 α_w 和无 α_w 加种点间距离相同对应地块长度段;有 α_w 加种点间距离为 0 时对应的地块长度点。

受播种机组的幅宽及其相邻两加种(肥)点间行程数的影响,约翰迪尔 7830 机组和维美德 171 机组的加种加肥点间距离最大值比常发 504 机组和黄海 254 机组的加种加肥点间距离的最大值大,且随地块长度增加前两种机组加种加肥点间距离减少的

速度比后两种机组快。

3.2.2 加种加肥量随地块长度变化规律

依据表 2 计算模型及表 5 相关数据,可计算单侧加种加肥方式下 4 种典型播种机组加种加肥量随地块长度变化规律,如图 2 所示。

由图 2 可见,当地块面积一定时,4 种播种机组加种加肥量随地块长度增加呈周期性波动变化,波动周期渐长,且加种加肥量峰值不变,谷值逐渐减小,波幅渐大,同一周期内时加种加肥量随地块长度增加而增加;加种量小于加肥量,且加种量随地块长度增加的波动周期比加肥量的短。

分析产生上述规律的原因:当地块面积一定时,完成该地块作业所需总种、肥量是固定的,在某一地块长度下,播种机组相邻两加种或加肥点间行程数恰好为偶数时,箱内剩余种(肥)量为安全留种(肥)量,加种(肥)量等于箱内总种(肥)量与箱内剩余种(肥)量之差,加种加肥量相应达到峰值;地块长度再增加,单行程所需种、肥量增加,箱内剩余种(肥)量恰不足以完成往返两行程的作业任务,播种机组应提前停车加种或加肥,此时箱内剩余种、肥量最大,加种加肥量达至谷值;地块长度再增加,若相邻两加种加肥点间行程数保持不变,则箱内剩余种、肥量不断减少,致使加种加肥量增加,直到播种机组相邻两加种或加肥点间行程数再次为偶数时,加种加肥量再次达到相同峰值。所以,随地块长度的增加,加种加肥量呈周期性波动变化规律。

由于在加种或加肥量达到谷值时,箱内剩余种、肥量恰不足以完成往返两行程的作业任务,且随着

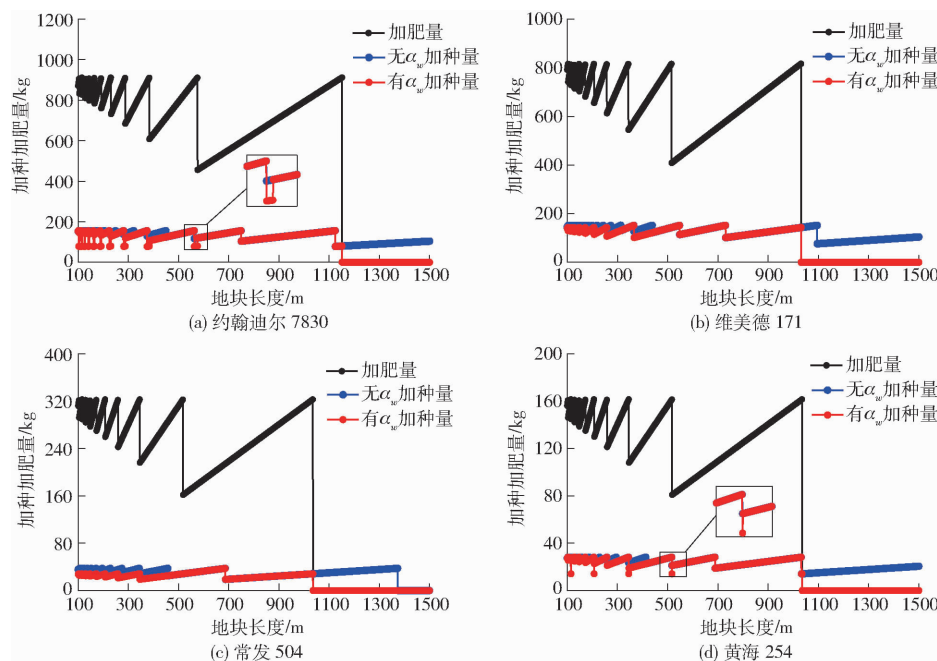


图 2 播种机组加种加肥量随地块长度变化规律

Fig. 2 Regulars of seed or fertilizer adding amount varying with plot length

地块长度增加,往返两行程所需的种、肥量增加,因此箱内剩余种、肥量最大值增加,加种加肥量谷值减小,而其峰值不变,故加种加肥量波幅渐大;图 2 折线波动周期为加种加肥量谷值与峰值对应的地块长度之差,根据前述加种加肥量模型可知,播种机组单侧加种加肥方式下的加种(肥)量波动周期 ΔL_i 与加种(肥)量波幅 ΔQ_{1at} 的关系为

$$\Delta L_i = \frac{\Delta Q_{1at}}{n_{1i} (10^{-4} B_p q_{ut})} \tag{17}$$

根据式(17)及前述分析可知,机组幅宽 B_p 和单位面积播种(肥)量 q_{ut} 固定,随地块长度增加,不同波动周期中的加种(肥)量波幅 ΔQ_{1at} 增大、相邻两加种(肥)点间行程数 n_{1i} 减少,因此,图 2 加种加肥量折线的波动周期 ΔL_i 增大。

图 2 表明,依据播种机组有 α_w 和无 α_w 加种量可将地块长度分为 3 部分:有 α_w 加种量小于等于无 α_w 加种量时对应地块长度段、有 α_w 和无 α_w 加种量相同对应地块长度段和有 α_w 加种量为 0 时对应地块长度点。

在无 α_w 加种量大于等于有 α_w 加种量对应地块长度段内,约翰迪尔 7830 和黄海 254 播种机组的有 α_w 加种量峰值等于无 α_w 加种量峰值,有 α_w 加种量谷值小于无 α_w 加种量谷值;维美德 171 和常发 504 机组的有 α_w 加种量峰值和谷值均小于无 α_w 加种量峰值和谷值。

3.2.3 加种加肥次数随地块长度变化规律

根据表 3 计算模型和表 5 相关数据,计算可得单侧加种加肥方式下 4 种典型播种机组加种加肥次

数随地块长度的变化规律,如图 3 所示。

由图 3 可见,当地块面积一定时,4 种播种机组加种加肥次数均随地块长度增加呈周期性规律波动,波动周期渐长,且峰值逐渐增加至最大值,谷值不变、波幅渐大;周期内加种加肥次数随地块长度增加而呈阶梯型逐级减少。

由图 2 可知,随着地块长度增加播种机组加种加肥量增大,而整个地块所需总种、肥量不变。由于播种机组加种、加肥次数为地块所需总种、肥量与播种机组加种、加肥量之比,即播种机组加种(肥)次数与加种(肥)量成反比例关系,所以加种加肥次数随地块长度增加而减少,加种、加肥次数波动周期变化规律与加种、加肥量波动周期相同;但由于加种加肥次数需向上取整,故加种加肥次数呈阶梯型变化规律。

由图 3 可知,当地块长度范围不同时,不同播种机组均存在有 α_w 加种次数大于等于无 α_w 加种次数、有 α_w 和无 α_w 加种次数相同和有 α_w 加种次数为 0 这 3 种情况。

在有 α_w 加种次数大于等于无 α_w 加种次数对应地块长度段内,约翰迪尔 7830 和维美德 171 机组加种次数波幅平稳,谷值不变,有 α_w 加种次数波动频率高于无 α_w 加种次数,约翰迪尔 7830 机组有 α_w 加种次数的峰值高于无 α_w 加种次数,维美德 171 机组加种次数的峰值相等;常发 504 和黄海 254 机组的加种次数波幅增大,常发 504 机组有 α_w 加种次数的峰值、谷值和波动频率均大于无 α_w 加种次数,黄海 254 机组的加种次数谷值相等,有 α_w 加种次数的峰

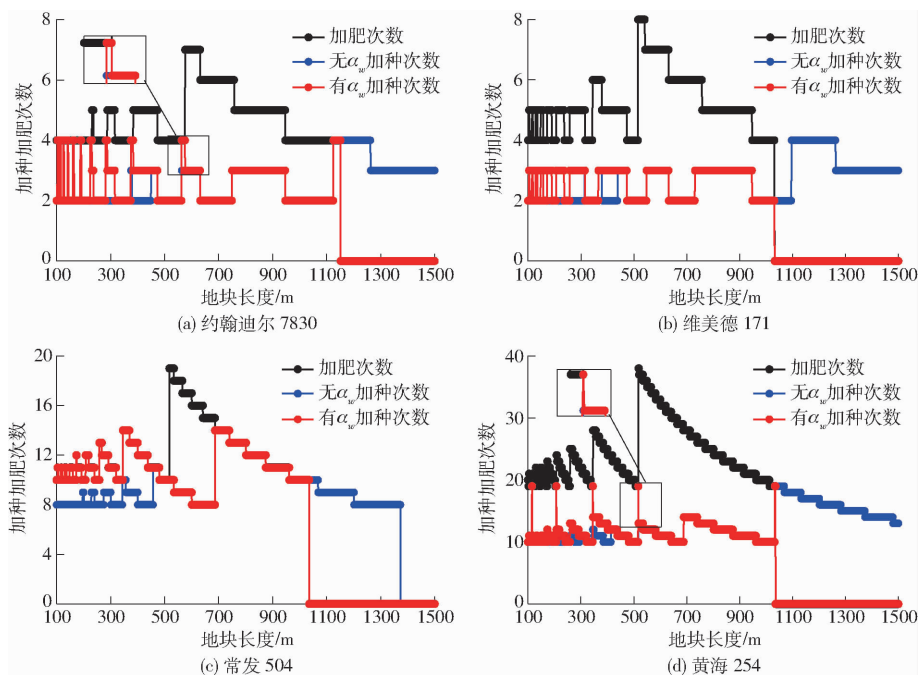


图 3 播种机组加种加肥次数随地块长度变化规律
Fig. 3 Regulars of seed or fertilizer adding times varying with plot length

值大于无 α_w 加种次数,有 α_w 加种次数波动频率低于无 α_w 加种次数。

3.2.4 加种加肥总时间随地块长度变化规律

结合表 4 模型和表 5 相关数据,计算可得单侧加种加肥方式下 4 种典型播种机组加种加肥总时间随地块长度的变化规律,如图 4 所示。

由图 4 可知,4 种播种机组加种加肥总时间随地块长度增加呈周期性波动,且波动周期渐长、波幅渐大;在同一周期内加种加肥总时间随地块长度增

加由峰值呈阶梯型减少,至谷值后跳跃到下一峰值。此规律与加种加肥次数的变化规律相似,这是由于播种机组加种加肥总时间受加种次数和加肥次数的影响所致。

当地块长度范围不同时,对比分析播种机组有 α_w 和无 α_w 加种加肥总时间也存在 3 种情况,有 α_w 加种加肥总时间小于等于无 α_w 加种加肥总时间对应地块长度段、有 α_w 和无 α_w 加种加肥总时间相同对应地块长度段和有 α_w 加种加肥总时间为 0 时对

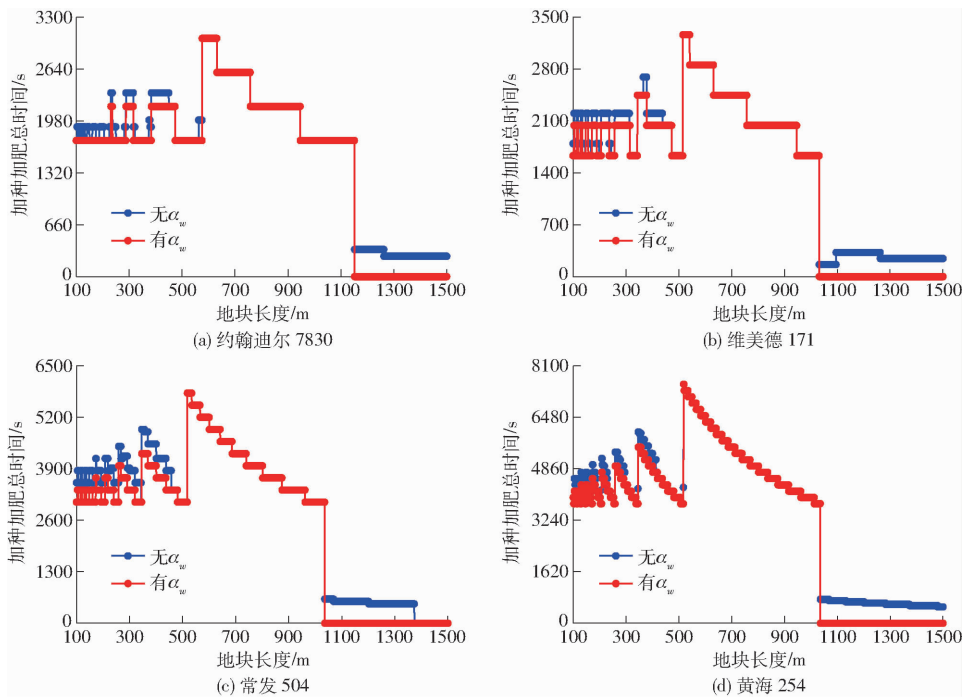


图 4 播种机组加种加肥总时间随地块长度变化规律
Fig. 4 Regulars of seed and fertilizer adding time varying with plot length

应的地块长度点。

在有 α_w 加种加肥总时间小于等于无 α_w 加种加肥总时间对应地块长度段内,约翰迪尔 7830 机组有 α_w 加种加肥总时间波动频率和峰值分别小于无 α_w 加种加肥总时间波动频率和峰值,二者谷值相同,维美德 171 和黄海 254 机组有 α_w 加种加肥总时间峰值小于无 α_w 加种加肥总时间,二者波动频率和谷值相同,常发 504 机组的有 α_w 加种加肥总时间峰值和谷值均小于无 α_w 加种加肥总时间,二者波动频率相同。

3.3 加种加肥参数规律讨论

3.3.1 加种参数的“两段一点”式规律分析

前述分析结果表明,随地块长度的变化 4 种播种机组的 4 个加种参数均具有“两段一点”式规律,即有 α_w 和无 α_w 加种参数不同对应地块长度段、有 α_w 和无 α_w 加种参数相同对应地块长度段和有 α_w 加种参数为 0 时对应地块长度点。

深入分析和计算发现,确定地块面积条件下同一播种机组的 4 个加种参数的“两段一点”式规律对应的地块长度范围相同。当地块面积为 5 hm² 时,各播种机组加种参数“两段一点”式规律如表 6 所示。

表 6 播种机组加种参数“两段一点”式规律
Tab.6 “Two-ranges one-point” regular of seed adding parameters of seeding machinery units m

播种机组	加种参数不同时	加种参数相同时	可作业地块长
	地块长度段	地块长度段	度上限点
约翰迪尔 7830	100 ~ 575	576 ~ 1 151	1 151
维美德 171	100 ~ 438	439 ~ 1 031	1 031
常发 504	100 ~ 457	458 ~ 1 035	1 035
黄海 254	100 ~ 517	518 ~ 1 035	1 035

由图 1 ~ 4 和表 6 可知,在有 α_w 和无 α_w 加种参数不同对应地块长度段内,有 α_w 加种点间距离、加种量和加种加肥总时间分别小于等于无 α_w 加种点间距离、加种量和加种加肥总时间,有 α_w 加种次数大于等于无 α_w 加种次数。其原因是受 α_w 的影响,将加种点与其相邻的前一个加肥点调整至同一位置,致使考虑 α_w 时相邻两加种点间行程数小于无 α_w 时相邻两加种点间行程数,因此有 α_w 加种点间距离小于无 α_w 加种点间距离,又因确定地块长度条件下单行程播种量一定,有 α_w 加种量小于无 α_w 加种量,而加种次数与加种量成反比,因此有 α_w 加种次数大于无 α_w 加种次数;由前述可知有 α_w 加种点与加肥点同位,有 α_w 加种加肥总时间仅为加肥时间,无 α_w 加种点与加肥点异位,无 α_w 加种加肥总时间为总加肥时间和总加种时间之和,因此有 α_w 加种加肥总时间小于无 α_w 加种加肥总时间。

在加种参数相同对应地块长度段内,无论是否考虑 α_w ,确定的地块长度对应的各播种机组 4 个加种参数均分别相等。其原因是在此地块长度段内,无论是否考虑 α_w ,播种机组的加种点均与加肥点在同一位置,即相邻两加种点间行程数和相邻两加肥点间行程数均呈整数倍关系。

当地块长度增至某一值时,各播种机组 4 个加肥参数分别变为 0,致使考虑 α_w 条件下播种机组的 4 个加种参数均为 0。这是由于精量播种条件下的单位面积播种量远小于施肥量,相邻两加肥点间行程数小于相邻两加种点间行程数,因此当播种机组的最大可施用肥量不足以支撑往返两个行程的作业时,该播种机组不能在此地块长度条件下以单侧加种加肥方式进行作业,4 个加肥参数均为 0。此地块长度点为相应播种机组在单侧加种加肥方式作业时可作业地块长度上限。这也说明如果适当增加肥箱容积,则这 4 种播种机组适应的地块长度也将增大。

3.3.2 加种参数特殊点分析

由图 1 ~ 3 可知,约翰迪尔 7830 和黄海 254 机组的有 α_w 加种参数随地块长度增加存在突然增加或降低特殊点,如图中放大部分所示。

根据前述数学模型及分析可知,随着地块长度增加至某一特定地块长度时,加种加肥行程比 α_w 恰好为整数,即播种机组相邻两加种点间行程数恰好是相邻两加肥点间行程数的 α_w 倍。此时,地块长度继续增加,相邻两加种点间行程数减少 2 个行程,而相邻两加肥点间行程数不变,因此加种加肥行程比 α_w 减小,致使有 α_w 加种点间距离和有 α_w 加种量跳跃式减小、有 α_w 加种次数跳跃式增大;当地块长度继续增加至某一特定地块长度时,相邻两加种点间行程数保持不变,而相邻两加肥点间行程数减少,此时播种机组的加种加肥行程比 α_w 增大,致使有 α_w 加种点间距离和有 α_w 加种量跳跃式增加、有 α_w 加种次数跳跃式减少。因此产生图 1 ~ 3 中的特殊点。

3.4 基于加种加肥参数模型播种机组作业规划

在单侧加种加肥方式下,播种机组从地头一侧开始作业,每隔 d_{1i} 距离放置 Q_{1ai} 种子或肥料量,在此地块中作业 n 个行程,加种或加肥 m_{1i} 次,加种加肥总时间为 T_{a1i} 。当作业单元地块面积为 5 hm²、长度为 400 m 时,4 种典型播种机组以单侧加种加肥方式作业时的作业规划相关参数如表 7 所示。

由表 7 可知,在相同地块条件下,考虑 α_w 约翰迪尔 7830 播种机组、维美德 171 播种机组和黄海 254 播种机组加种加肥总时间 $T_{a1\alpha}$ 均减少 7.41%,常发 504 播种机组加种加肥总时间减少 12.16%。表明在作业单元地块条件相同时,考虑 α_w 可有效减

表 7 播种机组的作业规划相关参数

Tab. 7 Relative operation planning parameters of seeding machinery units

播种机组	n_1	d_{1f}/m	d_{1s}/m	d_{1sa}/m	m_{1f}	m_{1s}	m_{1sa}	Q_{1af}/kg	Q_{1as}/kg	Q_{1asa}/kg	T_{a1}/s	T_{a1a}/s
约翰迪尔 7830	19	26.4	66.0	52.8	5	2	3	633.6	138.6	110.9	2 338.2	2 165.0
维美德 171	19	26.4	66.0	52.8	5	2	3	633.6	138.6	110.9	2 203.2	2 040.0
常发 504	49	10.4	15.6	10.4	13	9	13	249.6	32.8	21.8	4 528.8	3 978.0
黄海 254	97	5.2	13.0	10.4	25	10	13	124.8	27.3	21.8	5 346.0	4 950.0

少播种机组加种加肥总时间,进而提高播种机组的时间利用率。

由表 7 可知,约翰迪尔 7830 机组的加种加肥总时间大于维美德 171 机组的加种加肥总时间,二者其他的加种加肥参数均相等。常发 504 机组和黄海 254 机组的总作业行程数、加种加肥次数和加种加

肥总时间比两个大型机组大,加种加肥点间距离和加种加肥量减小。

以约翰迪尔 7830 播种机组为例,其作业规划图如图 5 所示。图中①、②、③为加种次数序号,①、②、③、④、⑤为加肥次数序号。

结合图 5 和表 7 可知,当地块面积为 5 hm²、长

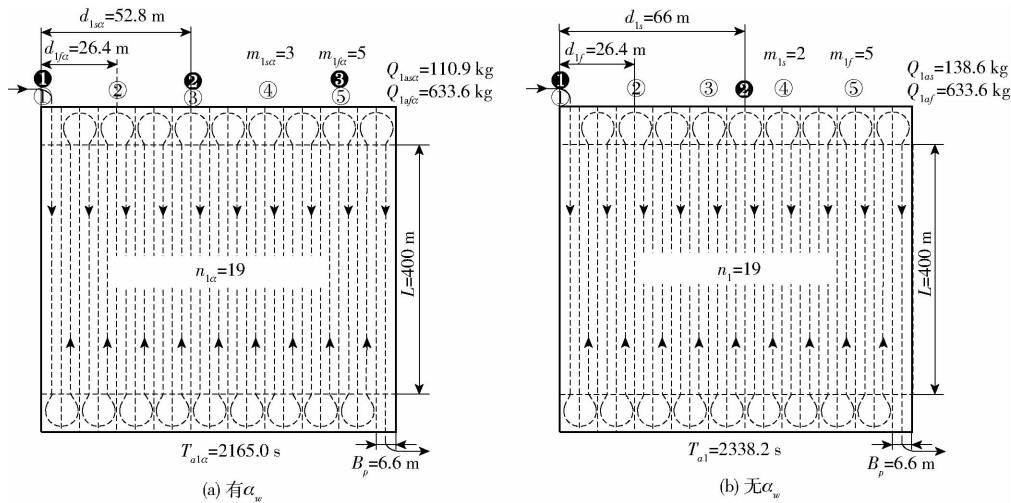


图 5 约翰迪尔 7830 播种机组作业规划

Fig. 5 Operation planning of John Deere 7830 seeding machinery unit

度为 400 m,约翰迪尔 7830 播种机组以单侧加种加肥方式作业时,在有 α_w 情况下(图 5a)应在地头一侧每隔 26.4 m 设置一个加肥点,每个加肥点放置 633.6 kg 肥料,每隔 52.8 m 设置一个加种点,每个加种点放置 110.9 kg 种子,每加 2 次肥料加 1 次种子,完成全地块作业共加种 3 次、加肥 5 次。当不考虑 α_w 时(图 5b),应在地头一侧每隔 66.0 m 设置一个加种点,并放置种量为 138.6 kg,每隔 26.4 m 设置一个加肥点,并放置肥量为 633.6 kg,完成全地块作业共加种 2 次、加肥 5 次,此时加种加肥点不能同时进行,致使加种加肥总时间增加。

同理依据表 7 数据可以确定其他 3 个典型播种机组的作业规划。

4 结论

(1) 提出加种加肥行程比 α_w 的概念,应用 α_w 可将加种点和加肥点设置在同一处,有效减少播种机组停车次数和工艺停车时间,进而提高播种机组时间利用率。

(2) 建立了 3 种加种加肥方式及有无 α_w 条件下播种机组加种加肥点间距离、加种加肥量、加种加肥次数和加种加肥总时间 4 个参数随作业单元地块条件变化的数学模型,为进一步研究播种机组运用原理提供理论基础。

(3) 当地块长度一定时,播种机组加种加肥点间距离和加种加肥量与地块面积无关,加种加肥次数和加种加肥总时间随地块面积增加线性增加;在地块面积确定的单侧加种加肥方式下,随地块长度增加,4 种播种机组的加种加肥点间距离呈阶梯型逐级减少,加种加肥量、加种加肥次数和加种加肥总时间呈周期性波动,且周期渐长、波幅渐大,其中加种加肥量谷值减少,峰值不变,周期内呈增加趋势,加种加肥次数和加种加肥总时间峰值增加,谷值不变,周期内呈阶梯型减少趋势。

(4) 研究表明随地块长度变化,4 种播种机组的 4 个加种参数均呈现“两段一点”式规律:当地块面积为 5 hm²、以单侧加种加肥方式作业时,约翰迪尔 7830 播种机组两地块长度段的分界点为 575 m、可

作业地块长度上限点为 1 151 m,维美德 171 播种机组分界点为 438 m、上限点为 1 031 m,常发 504 播种机组分界点为 457 m、上限点为 1 035 m,黄海 254 播种机组分界点为 517 m、上限点为 1 035 m;供试 4 种播种机组的肥箱容积限制可作业最大地块长度,适当增大肥箱容积可提高播种机组适应更长地块的

能力。
(5)依据研究结果确定的播种机组作业规划方案明确了加种加肥点位置及各点需规划放置的种量或肥量,确定了各机组的加种加肥次数、加种加肥总时间,为机械化播种作业科学规划、播种机组高效作业、播种机械化高质量发展提供科学依据。

参 考 文 献

[1] 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.

[2] 董光龙,赵轩,刘金花,等. 基于耕地质量评价与空间集聚特征的基本农田划定研究[J]. 农业机械学报,2020,51(2):133-142. DONG Guanglong, ZHAO Xuan, LIU Jinhua, et al. Prime cropland assignment based on cultivated land quality evaluation and spatial cluster pattern[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2020,51(2):133-142. (in Chinese)

[3] 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)

[4] 戴有忠,杨广林. 松嫩平原区农机经营形式发展的辨识与分析[J]. 农机化研究,1987(2):1-7.

[5] 黄肇先. 田块大小和机械化的经济性[J]. 农业工程,1980(3):2-6.

[6] 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.

[7] 纪月清,王许沁,陆五一,等. 农业劳动力特征、土地细碎化与农机社会化服务[J]. 农业现代化研究,2016,37(5):910-916. JI Yueqing, WANG Xuqin, LU Wuyi, et al. The characteristics of rural labors, land fragmentation, and agricultural machinery services[J]. Research of Agricultural Modernization, 2016, 37(5):910-916. (in Chinese)

[8] 黄小毛,张垒,王绍帅,等. 凸多边形田块下油菜联合直播机组作业路径规划[J]. 农业机械学报, 2022, 53(1):33-40,150. HUANG Xiaomao, ZHANG Lei, WANG Shaoshuai, et al. Path planning of rapeseed combine seeder in field of convex boundary [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(1):33-40, 150. (in Chinese)

[9] 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.

[10] 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.

[11] 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)

[12] 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)

[13] 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)

[14] 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)

[15] 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 Sciences,2013,27(6):73-78. (in Chinese)

[16] TRIPATHI R S. The economics of tractors in South Asia: an analytical review[J]. American Journal of Agricultural Economics, 1979, 61(3):581-582.

[17] 王旭,魏清勇. 黑龙江垦区拖拉机选型试验适应性分析[J]. 农业工程学报,2000,16(2):138-139.

[18] 邵光辉. 播种机组技术生产率随地块条件变化规律试验研究[D]. 哈尔滨:东北农业大学,2018. SHAO Guanghui. Experimental study on the variation of technical productivity of the seeding unit along with land conditions [D]. Harbin: Northeast Agricultural University,2018. (in Chinese)

[19] 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(2):80–93.
- [20] 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.
- [21] 余友泰. 农业机械化工程[M]. 北京:中国展望出版社, 1987.
- [22] 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)
- [23] 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)
- [24] 卢林瑞, 王庆喜, 刘斌, 等. 田间移动机组的生产率[J]. *吉林农业大学学报*, 1992, 14(2):69–73.
- [25] 杜兵. 农机作业班时间构成项目分类的分析及改进[J]. *北京农业工程大学学报*, 1995, 15(1):64–68. DU Bing. Analysis and improvement of current classification of time in shift[J]. *Journal of Beijing Agricultural Engineering University*, 1995, 15(1):64–68. (in Chinese)
- [26] 孔德刚, 张帅, 杨明东, 等. 大功率拖拉机播种作业效率与经济性的测试分析[J]. *东北农业大学学报*, 2008, 39(4):7–13. KONG Degang, ZHANG Shuai, YANG Mingdong, et al. Study on work efficiency and economy of import large power tractor in sowing work[J]. *Journal of Northeast Agricultural University*, 2008, 39(4):7–13. (in Chinese)
- [27] 孔德刚, 赵永超, 刘立意, 等. 大功率农机作业效率与机组合理运用模式的研究[J]. *农业工程学报*, 2008, 24(8):143–146. KONG Degang, ZHAO Yongchao, LIU Liyi, et al. Investigation of work efficiency of high-power agricultural machinery and reasonable application pattern of tractor-implement units[J]. *Transactions of the CSAE*, 2008, 24(8):143–146. (in Chinese)
- [28] MEHTA C R, SINGH K, SELVAN M M. A decision support system for selection of tractor-implement system used on Indian farms[J]. *Journal of Terramechanics*, 2011, 48(1):65–73.
- [29] 李洪文. 农业机械化生产学[M]. 2版. 北京:中国农业出版社, 2018.
- [30] 祝清震, 武广伟, 朱志豪, 等. 冬小麦精准分层施肥宽苗带播种联合作业机研究[J]. *农业机械学报*, 2022, 53(2):25–35. ZHU Qingzhen, WU Guangwei, ZHU Zhihao, et al. Design and test on winter wheat precision separated layer fertilization and wide-boundary sowing combined machine[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2022, 53(2):25–35. (in Chinese)
- [31] 李荣. 基于STUR的播种机组适宜作业单元地块长度和面积耦合关系研究[D]. 哈尔滨:东北农业大学, 2021. LI Rong. Research on STUR based coupling relationship of suitable unit plot length and area for sowing unit[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2021. (in Chinese)

(上接第22页)

- [129] ZHANG C, NOGUCHI N. Development of a multi-robot tractor system for agriculture field work[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2017, 142:79–90.
- [130] LIU C, GONG L, ZHANG W. Manipulating complex robot behavior for autonomous and continuous operations[M]. New York: IntechOpen, 2020.
- [131] SIRUVORU V, VIJAY KUMAR N. Cloud robotics in agriculture automation[C]//International Conference On Computational Vision and Bio Inspired Computing, 2018: 1073–1086.
- [132] Farming Simulator[EB/OL]. [2022-05-01]. <https://farming-simulator.com>.
- [133] 刘成良, 林洪振, 李彦明, 等. 农业装备智能控制技术研究现状与发展趋势分析[J]. *农业机械学报*, 2020, 51(1):1–18. LIU Chengliang, LIN Hongzhen, LI Yanming, et al. Analysis on status and development trend of intelligent control technology for agricultural equipment[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2020, 51(1):1–18. (in Chinese)
- [134] MARCHANT W, TOSUNOGLU S. Robotic implementation to automate a vertical farm system[C]//30st Florida Conference on Recent Advances in Robotics, 2017.
- [135] DUCKETT T, PEARSON S, BLACKMORE S, et al. Agricultural robotics: the future of robotic agriculture[J]. *arXiv preprint arXiv:1806.06762*, 2018.
- [136] 胡小鹿, 梁学修, 张俊宁, 等. 中国智能农机装备标准体系框架构建与研制建议[J]. *智慧农业(中英文)*, 2020, 2(4):116–123. HU Xiaolu, LIANG Xuexiu, ZHANG Junning, et al. Construction of standard system frame-work for intelligent agricultural machinery in China[J]. *Smart Agriculture*, 2020, 2(4):116–123. (in Chinese)
- [137] 邓小明, 胡小鹿, 柏雨岑. 国家农业机械产业创新发展报告(2018)[M]. 北京:机械工业出版社, 2019.
- [138] 国家标准化管理委员会, 中央网信办, 国家发展改革委, 科技部, 工业和信息化部. 国家新一代人工智能标准体系建设指南[S]. 2020-07-27.
- [139] 国家标准化管理委员会, 国家发展和改革委员会, 科学技术部, 工业和信息化部. 国家机器人标准体系建设指南[S]. 2017-05-22.