

文章编号: 2097-096X(2023)-02-0157-09

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

张 凯^{1,2}, 杨姗姗³, 白美健^{1,2}, 张雪萍⁴, 史 源^{1,2}, 李益农^{1,2}

(1. 中国水利水电科学研究院 流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100048;

2. 水利部数字孪生流域重点实验室, 北京 100048; 3. 中国水利学会, 北京 100053;

4. 北京中水科工程集团有限公司, 北京 100048)

摘要: 农业规模化机械化是东北地区农业产业发展的必然趋势, 规模化水田布局除了考虑灌溉效率问题, 还需要协同农机作业性能等目标来满足当前农业生产的需求。本文将田间试验与数值模拟相结合, 田间试验测量了庆安国家灌溉试验重点站内 22 块水田的收割机生产率, 数值模拟选取了收割机机型、田块面积、田块长宽比共计 210 组方案, 利用收割机生产率模型开展数值模拟, 分析了水田不同形状、面积和长宽比对收割机生产率的影响, 探究了基于较高收割机生产率前提下东北地区适宜水田规格阈值。研究结果表明, 具有较大面积、较大长宽比的矩形水田规格有较高的收割机生产率, 适宜东北地区水田长度和宽度的阈值分别为 [160 m, 200 m] 和 [40 m, 200 m], 该结果可为水田优化布局提供技术参考。

关键词: 收割机生产率; 水田规格; 东北地区; 数值模拟; 试验

中图分类号: S233.4

文献标识码: A

doi: 10.13244/j.cnki.jiwhr.20220375

1 研究背景

东北地区是我国粮食主产区, 未来粮食生产能力呈稳定上升趋势^[1-2]。随着我国城镇化进程的加快, 农村土地快速流转^[3]以及相关的政策导向^[4], 东北地区农业生产向“适度规模化、全程机械化、高度集约化”发展已成为必然趋势^[5]。农业规模化经营需要农田布局适度规模化和标准化, 传统的水田规格需要通过升级改造适应现代农业生产需求。规模化水田规格除了考虑灌溉效率问题, 还需要协同农机作业性能等目标来满足当前农业生产的需求^[6]。

近年来, 随着相关政策的导向和现实需求的凸显, 国内外学者开展了一系列相关研究^[7-11]。农机设计方面, 由于我国南北地区水田规格差异显著, 针对我国南方丘陵地带水田小而高低不齐的特点, 设计了有“小、轻、稳”特点的小动力多功能耕地机具、手扶式插秧机和轻筒型水稻联合收割机; 针对北方地域广阔、地势平坦的特点, 设计了“系列化、乘坐化、复式化”的综合型农机具^[12-14]。提升农机作业性能方面, 相关学者从地块形状、面积、种植作物、作业路线、谷草比及联合作业等方面开展了研究^[15-18], 得到了不同情况下对应的农艺措施, 提高了农机效率。农机选型方面, 通常采用模糊综合评价^[19-20]、线性规划或非线性规划方法^[21]以及鲁棒优化理论等方法^[22-23], 综合考虑气候、土壤、农作物特点及农机功率等因素来选择合适的农业机械以达到减少生产成本的目的^[24-25]。

综上, 已有研究成果通常集中在以作业质量、农机效率等为控制目标对农机选型、农机相关参数进行优化设计上, 而如何通过优化水田规格来提升农机作业性能方面的成果鲜见报道。为此, 本研究以水稻收割机作业为例, 通过开展田间试验, 分析了水田面积、长宽比和形状对收割机生产率的影响, 采用数值模拟手段实现不同收割机型、不同水田规格的收割机生产率定量描述, 利用数值模拟的非劣解确定了具有较高收割机生产率的水田规格。研究结果可为灌区规划、高标准农田建设以及水田

收稿日期: 2022-10-17; 网络首发时间: 2023-02-06

网络首发地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/10.1788.TV.20230206.1334.001.html>

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(52130906); 中国水科院创新团队项目(ID0145B022021)

作者简介: 张凯(1990-), 博士, 工程师, 主要从事节水灌溉理论与技术研究。E-mail: zhangkai@iwhr.com

优化布局提供技术参考。

2 田间试验简介

2.1 收割机生产率定义 收割机生产率是指收割机在一定条件下单位时间内能完成的工作量。生产率可分为理论生产率、技术生产率和实际生产率。理论生产率是制造厂家根据机械的结构和性能，不考虑外界影响因素提供的生产率数据。技术生产率仅考虑了不同的工作对象，而未考虑停歇时间。实际生产率是实际完成工程量与所用总时间的比，是农业生产中农业机械的重要指标^[26-27]，计算公式见式(1)。

$$Q = S/T \quad (1)$$

式中： Q 为收割机生产率， hm^2/h ； S 为收割面积， hm^2 ； T 为收割所用总时间， h 。

2.2 试验设计与方法 试验区位于黑龙江省绥化市庆安国家灌溉试验重点站($46^\circ 58' 12''\text{N}$, $127^\circ 40' 4''\text{E}$)，该站位于庆安县平安镇，是典型的寒区黑土分布区，站内种植品种为龙稻 18。站内现有大小稻田 22 块(见表 1)，由于地形、水源等原因导致其大小、形状不一，面积分布在 $0.07 \sim 1.05 \text{ hm}^2$ 范围内，总面积约 8 hm^2 。

表 1 水田规格表
Table 1 Paddy field scale table

编号	水田规格/(m×m)	长宽比	面积/ hm^2	水田形状	收割时间/h	收割生产率/(hm^2/h)
1	23×31	1.35	0.07	矩形	0.35	0.209
2	26×29	1.12	0.08	矩形	0.37	0.206
3	31×78	-	0.12	三角形	0.65	0.186
4	28×46	1.64	0.13	矩形	0.50	0.258
5	28×48	1.71	0.13	矩形	0.52	0.260
6	40×73	-	0.15	三角形	0.83	0.175
7	11×60 15×60	-	0.15	L 形	0.67	0.227
8	26×75	2.88	0.20	矩形	0.62	0.316
9	41×60	1.46	0.25	矩形	0.80	0.306
10	50×58	1.16	0.29	矩形	0.90	0.322
11	22×70 20×72	-	0.30	L 形	1.23	0.242
12	50×60	1.20	0.30	矩形	0.93	0.324
13	50×68	1.36	0.34	矩形	0.95	0.358
14	26×135	5.19	0.35	矩形	0.93	0.376
15	42×107	2.55	0.45	矩形	1.17	0.385
16	50×100	2.00	0.50	矩形	1.22	0.411
17	48.5×112	2.31	0.54	矩形	1.25	0.435
18	53×103	1.94	0.55	矩形	1.30	0.420
19	39×120 20×50	-	0.57	L 形	1.95	0.291
20	48.5×122	2.52	0.59	矩形	1.30	0.422
21	46×228	4.96	1.05	矩形	2.20	0.477
22	50×210	4.20	1.05	矩形	2.15	0.488

水稻收割试验采用 4LZ-4 型全喂入稻麦联合收割机(常发 CF805N)，履带自走式，整机重量 3680 kg，割幅 2000 mm，其理论作业速度为 $0 \sim 4.8 \text{ km/h}$ ，该收割机为黑龙江省常用的国产机型。水稻收割试验记录每块水田的收割机作业时间。收割机在作业过程中可能采用不同的卸粮方式，由于收割

机卸粮方式受到地理条件、道路条件、驾驶员技术水平、收割机技术参数等条件的限制^[28-29]，为使研究结论具有通用性，本研究采取一台收割机配一名工人在收割机出粮口装袋接粮的方式。

3 试验结果

3.1 水田规格对收割机生产率影响因素分析

3.1.1 水田面积对收割生产率的影响 田间试验结果见表1，图1为表1中17个矩形水田与收割机生产率关系图，由图1可知，水田面积从0.07 hm²增长到1.05 hm²，收割机生产率从0.25 hm²/h增长到0.80 hm²/h，收割机生产率随着面积的增大逐渐增加，两者呈较好的对数关系，其R²达0.96。由于收割机作业路线通常为“U”形，即收割机进入田块后先顺着田块长边收割，一边收割完毕后继续向内收割，直到整个田块收割完毕，因此收割机需要行驶的距离为水田面积与收割机割台幅宽的比值，对于同一台收割机，该距离只与水田面积有关。较大的水田面积具有较长的田块边长，收割相同的距离时需要转弯及其转弯前后加速的次数较少，因此收割机生产率随着水田面积的增大而增加。

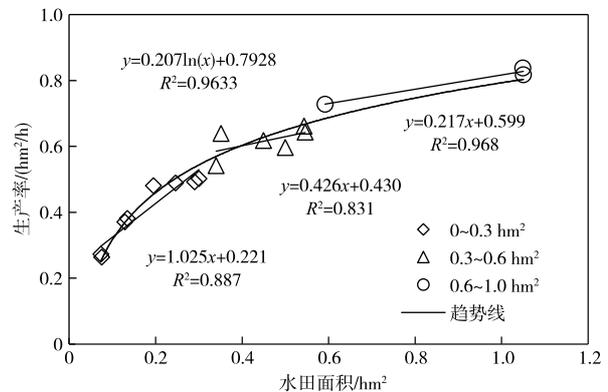


图1 不同矩形水田规格与收割机生产率关系图

Fig.1 Diagram of rectangular paddy field scale in relation to harvester productivity

当水田面积为0~0.3 hm²、0.3~0.6 hm²和0.6~1.2 hm²时，水田面积与收割机生产率均呈较好的线性关系，k值分别为1.03、0.43和0.22；随着田块面积的增大，k值逐渐降低，收割机生产率随水田面积增大的幅度变缓。这是因为当水田面积达到较大规格时，继续增加面积所减少的转弯及其转弯前后加速的次数变少。通过上述分析可知，水田面积是影响收割机生产率的因素，收割机生产率随着水田面积的增大而增大，而后增大趋势趋于平缓。

3.1.2 水田长宽比对收割生产率的影响 水田长宽比是影响收割机生产率的主要因素，为明确水田长宽比对收割机生产率的影响，对比了五组面积相同或接近的水田规格对应的收割机生产率，见表2。由表2可以发现，水田面积相同时具有较大长宽比的水田规格收割机生产率相对较高，田块长宽比差值越大对应的收割机生产率差值越大，其原因是收割机为了不压水稻，在转弯时需要提前减速，转弯后再加速至作业速度，当田块宽度一定时，转弯次数一定，则转弯时所需的减速时间一定，当长宽比增大，减速时间占总体的时间比例减小，故收割机生产率不断提升。

表2 不同长宽比水田规格收割机生产率表

Table 2 Table of harvester productivity for different aspect ratio paddy field scale

组别	I		II		III		IV		V	
	4	5	10	12	13	14	17	18	21	22
编号										
长宽比	1.64	1.71	1.16	1.2	1.36	5.19	2.31	1.94	4.2	4.96
面积/hm ²	0.13	0.13	0.29	0.3	0.34	0.35	0.54	0.55	1.05	1.05
作业时间/h	0.35	0.35	0.59	0.6	0.63	0.55	0.82	0.85	1.28	1.25
收割机生产率/(hm ² /h)	0.37	0.38	0.49	0.5	0.54	0.64	0.66	0.64	0.82	0.84

3.1.3 水田形状对收割生产率的影响 通过观察表1中非矩形水田收割生产率可以发现，水田形状对收割机生产率影响显著，表3列出了四组水田面积相同或相近、不同形状下的收割机生产率。在面积相同的条件下，收割机生产率依次是矩形水田>L形水田>三角形水田(三角形和L形的形式有多种，

本文只考虑了现有田块的三角形和 L 形)。造成该结果的原因可能是：L 形水田由两个面积较小的矩形水田构成，上述分析可以得知，面积较小时其收割机作业效率较低，导致 L 形田块收割机作业效率较低。三角形水田至少有两个锐角，收割机行驶到锐角时，需要考虑转弯或者后退，两者都需要花费较长的时间，因此三角形水田收割机作业效率较低。

表 3 不同形状水田规格收割机生产率表
Table 3 Table of harvester productivity for different shape paddy field scale

分组 编号	I		II			III		IV	
	3	4	5	6	7	11	12	19	20
田块形状	三角形	矩形	矩形	三角形	L 形	L 形	矩形	L 形	矩形
面积/hm ²	0.12	0.13	0.13	0.15	0.15	0.3	0.3	0.57	0.59
作业时间/h	0.5	0.35	0.35	0.56	0.44	0.8	0.6	1.39	0.81
收割机生产率/(hm ² /h)	0.24	0.37	0.38	0.26	0.34	0.37	0.5	0.41	0.73

3.2 适宜的水田规格研究

3.2.1 数值模拟试验设计 通过上述分析可以得出具有较大面积、长宽比的矩形水田规格具有较高收割机生产率的一般结论，为确定适宜在生产实际中采用的水田规格，通过采用数值模拟的方法开展进一步研究。

经实地走访调研，东北地区矩形水田边长范围在 40~200 m(40 m、200 m 分别为散户水田最小边长、农场水田最大边长)，因此将田块长度的数值模拟约束范围定为[40 m, 200 m]，即水田面积约束范围为[0.16 hm², 4 hm²]。为了提高研究结果的通用性，数值模拟选取久保田 PRO488、常发 CF805N 和雷沃谷神 GF40 三种型号的收割机，这 3 种型号分别是东北地区常用的小、中、大型收割机型，其割台幅宽分别为 1.5、2 和 3 m，具有代表性。水田面积选取 0.16、0.3、0.6、1、1.5、2、2.5、3、3.5 和 4 hm²，长宽比分别取 1、1.5、2、2.5、3、3.5 和 4，共计 210 种组合方案，利用收割机生产率模型开展数值模拟。

3.2.2 模型率定及验证 田间收割试验采用的作业路线为“U”形，“U”形作业的收割机生产率模型计算公式见式(2)^[30]。

$$Q = \frac{3600S}{\left\lceil \frac{W}{B_p} \right\rceil \cdot (\bar{t}_z + 2 \cdot \bar{t}_s + \bar{t}_{tm})} \quad (2)$$

$$\bar{t}_z = \frac{1}{v}(L - 2l) \quad (3)$$

式中： W 为田块宽度，m； B_p 为收割机割台幅宽，m； \bar{t}_z 为收割机在作业田块上完成单位行程时恒速行驶作业时间的平均值，s； \bar{t}_s 为收割机进入地头或驶出地尾所需时间，s； \bar{t}_{tm} 为田块中单次转弯时间的平均值，s； v 为收割机在稳定行驶测区内作业速度的平均值，m/s； L 为田块长度，m； l 为地头非恒速行驶距离($l \approx 5$ m)，m；其他符号意义同前。

分别记录久保田 PRO488、常发 CF805N 和雷沃谷神 GF40 三种机型恒速作业速度、进入地头以及转弯作业时间，作为生产率模型参数。选择矩形水田进行模型验证，三种机型实测值与模型模拟值对比情况见图 2。三种机型的模拟值和实测值相关系数达 0.90 以上，相对误差在 5% 以内，收割机生产率模型的模拟值与实测值一致性良好。

3.2.3 具有较高收割生产率的水田规格 根据田块长度、宽度的约束范围，将 210 组数值模拟结果作为实际数据样本，选择整数 1 为间隔，采用 Matlab 进行插值构建全排列数据组合，形成预测数据样本，共计 13041 组。选择 Matlab 中 Matlab 4 Griddata Method(简称 V4)法进行差值，三种收割机的插值精度评价见表 4，结果表明三种收割机的插值精度较好。

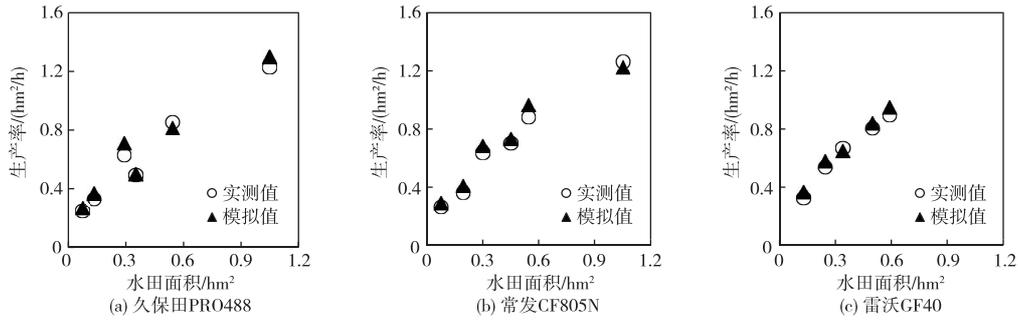


图2 三种机型收割机生产率实测值与模拟值

Fig.2 Measured and simulated values of productivity of three types of harvesters

表4 V4 插值方法的插值精度

Table 4 Interpolation accuracy of the Matlab 4 Griddata Method

机型	插值评价指标		
	均方误差 <i>MSE</i>	均方根误差 <i>RMSE</i>	对称平均绝对百分比误差 <i>SMAPE</i> /%
久保田 PRO488	0.2122	0.4607	6.2143
常发 CF805N	0.1774	0.4213	8.5245
雷沃谷神 GF40	0.3281	0.5728	4.2871

图3为三种收割机型的生产率分布图，图形平滑、插值效果较好。由图3可以得知，当水田面积相同时，较大幅宽的收割机具有较高的生产率。当收割机型号相同时，收割机生产率随着田块面积增大而增大。水田规格从40×40 m²增加至200×200 m²，久保田PRO488、常发CF805N和雷沃谷神GF40生产率分别从0.32、0.44、0.66 hm²/h增加至0.69、0.99、1.51 hm²/h。该结论与收割机生产率模型计算公式性质一致，即收割机生产率与农机幅宽、田块面积呈正相关。将收割机生产率模型计算公式变形后，可以得出收割机生产率与田块长宽比呈正相关，对于一定田块面积，当田块宽度与农机幅宽相等时，收割机作业不需要进行转弯，收割机生产率达到极值。

为进一步明确具有较高收割机生产率的适宜水田规格阈值，将每种收割机生产率的前20%作为非劣解，久保田PRO488、常发CF805N和雷沃谷神GF40生产率非劣解范围分别为0.62~0.69、0.81~0.99和1.26~1.51 hm²/h，可以发现较优收割机生产率范围随着农机幅宽的增大有增大的趋势。图4给出了三种收割机具有较高生产率时的水田规格阈值，将重叠的部分作为三种收割机的共同适宜阈值，适宜东北地区水田长度和宽度的阈值分别为[160 m, 200 m]和[40 m, 200 m]。由于所选的收割机是常见的小、中、大机型，因此绝大多数的收割机选择该阈值内的水田规格都具有较高的生产率，该结果可为灌区规划、高标准农田建设以及水田优化布局提供技术参考。

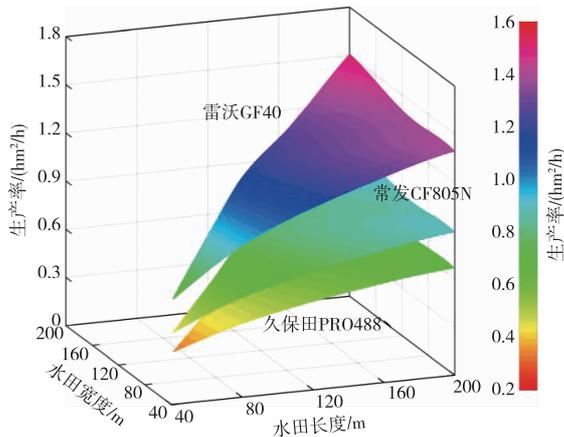


图3 三种收割机生产率分布图

Fig.3 Productivity distribution of three harvester models

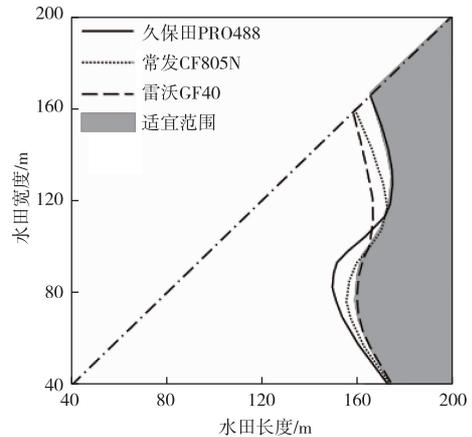


图4 具有较高收割机生产率的水田规格阈值

Fig.4 Paddy field scale with better harvester productivity

4 讨论

规模化农田是确保国家粮食安全、进一步提高农业水土资源利用效率、提升农业科技应用和农业机械化水平、促进农业持续稳增稳产的主要途径。《灌区规划规范》(GB/T50509-2009)中提到了水稻格田长度与宽度的确定应以有利于灌溉和提高机械作业效率为原则,长度宜取60~120 m,宽度宜取20~40 m,水稻格田方向宜取南北向。《高标准基本农田建设标准》(TDT1033-2012)中提到了水田区耕作田块内部宜布置格田,格田长度宜为30~120 m,宽度宜为20 m~40 m。《节水灌溉工程技术标准》(GB/T50363-2018)中提到了平原水稻区格田长度宜为60~120 m,宽度宜为20~30 m,山丘区可根据地形条件进行调减。《灌溉与排水工程设计标准》(GB50288-2018)中提到平原水稻区格田长度宜为60~120 m,宽度宜为20~30 m,山丘区可根据地形、土地平整及耕作条件等调整。可以看到,由于各标准的侧重点不同,对水田规格长度和宽度适宜值有略微差异;各标准对水田规格的范围均采用“宜”字,提到了可根据实际情况进行调整。标准或规范的起草人及主编单位充分考虑了我国不同地区的气候特点、地形地貌、水土条件和耕作制度等因素给出了我国水稻格田长度和宽度的阈值范围,给予了调整空间。各标准和规范给出了适用于全国的水田规格,其长度、宽度的阈值分别为[60 m, 120 m]、[20 m, 40 m],对于具体建设地区的水田规格如何根据实际情况进行调整,目前尚无相关规范。

针对田间技术要素方面的研究大多集中在旱田,水田田间技术参数研究方面,沈颖^[31]选择灌溉流量和土壤质地为影响因素,通过水稻控制灌排试验并利用WinSRFR地面灌溉软件进行数值模拟,获得了具有较好灌溉效率的水田长度,沙壤土在设计流量下田块允许长度为200 m,壤土在较小流量下田块允许长度为250 m、在较大流量下允许长度为200 m,壤黏土和黏土在设计流量下田块允许长度为250 m。本文选择了水田长度、宽度和收割机型号为影响因素,通过田间农机试验并利用收割机生产率模型进行数值模拟,获得了适宜东北地区水田长度和宽度的阈值,该阈值适用于水资源丰富、串灌串排等对灌溉效率不高的地区。本研究基于收割机生产率提出了适宜的水田规格,可为水田优化布局提供一定的技术参考,但在实际生产中,水田规格的布局除了考虑农机作业外,还要综合考虑灌溉效率、灌水均匀度、工程投资以及农业生产活动的便利性等多目标因素,需要在后续的研究中关注水田规格的多目标优化问题。

5 结论

本研究基于田间试验和数值模拟,分析了水田形状、面积和长宽比对收割机生产率的影响,提出了东北地区常用收割机型具有较高生产率的水田规格阈值。得到了如下结论:

(1)水田面积、长宽比和形状均对收割生产率的产生影响,收割机生产率随着水田面积的增大而增大,而后增大趋势逐渐变缓,两者呈较好的对数关系($R^2=0.97$)。当水田面积相同时,具有较大长宽比的矩形水田具有较高的收割机生产率。

(2)当水田面积相同时,较大幅宽的收割机具有较高的生产率,基于实现较高收割机生产率的角度考虑,适宜东北地区水田长度和宽度的阈值分别为[160 m, 200 m]和[40 m, 200 m]。

参 考 文 献:

- [1] 杨俊彦, 陈印军, 王琦琪. 东北三省区耕地资源与粮食生产潜力分析[J]. 土壤通报, 2017, 48(5): 1055-1060. (YANG Junyan, CHEN Yinjun, WANG Qiqi. Cultivated land resources and grain production potential in the three northeast provinces[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2017, 48(5): 1055-1060. (in Chinese))
- [2] 吴文勇, 龚时宏, 李久生, 等. 现代灌溉水肥调控原理与技术研究进展[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2021, 19(1): 81-89. (WU Wenyong, GONG Shihong, LI Jiusheng, et al. Research development on

- principle and technology of water and fertilizer regulation under modern irrigation[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2021, 19(1): 81-89. (in Chinese))
- [3] 韩长赋. 中国农村土地制度改革[J]. 农业经济问题, 2019(1): 4-16. (HAN Changfu. The reform of China's rural land system[J]. Issues in Agricultural Economy, 2019(1): 4-16. (in Chinese))
- [4] 中华人民共和国国务院. 2021 年中央一号文件[R/OL]. [2022-03-21]. <http://www.gov.cn>. (The State Council of the People's Republic of China. No. 1 Central Document of 2021[R/OL]. [2022-03-21]. <http://www.gov.cn>. (in Chinese))
- [5] 刘姗姗. 土地精细平整下畦灌二维水流运动特性及田间优化布局方法研究[D]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2016. (LIU Shanshan. Study on the movement characteristics of the two dimensional water flow in basin irrigation and the optimization method of the field layout under farm land leveling[D]. Beijing: China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2016. (in Chinese))
- [6] 中华人民共和国国土资源部. 高标准基本农田建设标准: TD/T 1033-2012[S]. 北京: 中国标准出版社, 2012: 6. (Ministry of Land and Resources of the People's Republic of China. Construction standard of high standard basic farmland: TD/T 1033-2012[S]. Beijing: Standards Press of China, 2012: 6. (in Chinese))
- [7] 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))
- [8] 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 networking time utilization rate of seeder unit with plot length and area[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2020, 36(5): 19-28. (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] JANULEVIČIUS A, ŠARAUSKIS Egidijus, ČIPLIENĖ Aušra, 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.
- [11] KONIUSZY A, KOSTENCKI P. Fuel consumption and tillage efficiency during cultivation of fields of different areas[J]. Journal of Research & Applications in Agricultural Engineering, 2015, 60(1): 29-33.
- [12] 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))
- [13] 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))
- [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] HIREGOUDAR S, UDHAYKUMAR R, RAMAPPA K T, et al. Artificial neural network for assessment of grain losses for paddy combine harvester a novel approach[J]. Communications in Computer & Information Science, 2011(140): 221-231.
- [16] GÓMEZGIL J, LÓPEZLÓPEZ L J, NAVASGRACIA L M, et al. The spatial low-pass filtering as an alternative to interpolation methods in the generation of combine harvester yield maps[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2011, 27(6): 1087-1097.
- [17] 潘静, 邵陆寿, 王珂. 水稻联合收割机喂入密度检测方法[J]. 农业工程学报, 2010, 26(8): 113-116. (PAN Jing, SHAO Lushou, WANG Ke. Detection method on feed density for rice combine[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2010, 26(8): 113-116. (in Chinese))
- [18] 乔金友, 韩兆楨, 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 Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(7): 43-50. (in Chinese))
- [19] 张倩, 李国强, 诸葛亦斯, 等. 改进的模糊综合评价法在洱海水质评价中的应用[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2019, 17(3): 226-232. (ZHANG Qian, LI Guoqiang, ZHUGE Yisi, et al. Application of improved fuzzy comprehensive method to water quality assessment in Erhai[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2019, 17(3): 226-232. (in Chinese))
- [20] 黄玉祥, 郭康权, 朱瑞祥, 等. 基于证据理论的农业机械选型风险因素评价方法[J]. 农业工程学报, 2008, 24(4): 135-141. (HUANG Yuxiang, GUO Kangquan, ZHU Ruixiang, et al. Method for evaluating the risk of selecting types of agricultural machinery based on evidence theory[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2008, 24(4): 135-141. (in Chinese))
- [21] 张伏, 陈天华, 王亚飞, 等. 最优选型配置方法在农业机械中的应用[J]. 中国农机化学报, 2019, 40(5): 187-192. (ZHANG Fu, CHEN Tianhua, WANG Yafei, et al. Optimal selection and allocation method applied in agricultural machinery[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2019, 40(5): 187-192. (in Chinese))
- [22] 王新, 付函, 王书茂, 等. 收割机作业速度多目标控制模型的鲁棒优化设计[J]. 农业工程学报, 2012, 28(20): 27-33. (WANG Xin, FU Han, WANG Shumao, et al. Robust optimal design of multi-objective control model of working speed for combine harvester[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(20): 27-33. (in Chinese))
- [23] 乔金友, 张晓丹, 王奕娇, 等. 规模化大豆产区大豆联合收获机综合评价与优选[J]. 东北农业大学学报, 2014, 45(8): 124-128. (QIAO Jinyou, ZHANG Xiaodan, WANG Yijiao, et al. Evaluation and selection on soybean combines in large-scale planting area[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2014, 45(8): 124-128. (in Chinese))
- [24] MOHAMED M A, KHEIRY A N O, RAHAMA A E, et al. Optimization model for machinery selection of multi-crop farms in Elsuki agricultural scheme[J]. Turkish Journal of Agriculture - Food Science and Technology, 2017, 5(7): 739.
- [25] NATSIS A, KERKIDES P, PITSILIS J. Farm machinery selection to minimize the cost of agricultural operation[J]. Rural and Environmental Engineering, 2001, 41(8): 47-56.
- [26] 余友泰. 农业机械化工程[M]. 北京: 中国展望出版社, 1987. (XU Youtai. Agricultural Mechanization Engineering[M]. Beijing: China Prospect Publishing House, 1987. (in Chinese))
- [27] 高焕文. 农业机械化生产学: 上册[M]. 北京: 中国农业出版社, 2002: 28-29. (GAO Huanwen. Agricultural Mechanization Production Science[M]. Beijing: China Agricultural Publishing House, 2002: 28-29. (in Chinese))
- [28] 孔德刚, 常晓慧, 张帅, 等. 大马力拖拉机作业机组故障的调查分析[J]. 东北农业大学学报, 2009, 40(10): 109-114. (KONG Degang, CHANG Xiaohui, ZHANG Shuai, et al. Investigation and analysis on fault of large horsepower tractor operating units[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2009, 40(10): 109-114. (in Chinese))
- [29] 万鹤群, 孟繁琪, 王友权, 等. 确定机群最佳服务面积及根据服务面积选择合理机群结构的方法[J]. 农业机械学报, 1984, 6(15): 77-80. (WAN Hequn, MENG Fanqi, WANG Youquan, et al. Methods to determine optimum service area for certain farm machinery group and to select reasonable group for given service area[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 1984, 6(15): 77-80. (in Chinese))
- [30] 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 Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(18): 37-43. (in Chinese))
- [31] 沈颖. 水稻高效控制灌溉田间技术参数研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2015. (SHEN Yin. Study on Field Technical Parameters of Highly Efficient Control Irrigation for Rice[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2015. (in Chinese))

Threshold analysis of suitable paddy fieldscale in Northeast China considering the productivity of multiple models harvesters

ZHANG Kai^{1,2}, YANG Shanshan³, BAI Meijian^{1,2}, ZHANG Xueping⁴,
SHI Yuan^{1,2}, LI Yinong^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources
and Hydropower Research, Beijing 100048, China;

2. Key Laboratory of River Basin Digital Twinning of Ministry of Water Resources, Beijing 100048, China;

3. Chinese Hydraulic Engineering Society, Beijing 100053, China; 4. Beijing IWHR Corporation, Beijing 100048, China)

Abstract: Large-scale agricultural mechanization is an inevitable trend in the development of agricultural industry in Northeast China. Large-scale paddy field layout not only considers irrigation efficiency, but also needs to meet the needs of current agricultural production by cooperating with agricultural machinery performance and other goals. In this paper, harvester productivity is adopted as the evaluation index. Field experiments were carried out at Qing'an National Key Irrigation Experimental Station in Suihua City, Heilongjiang Province, China. In the field experiment, Changfa CF805N, a domestic model commonly used in Heilongjiang Province, and 22 paddy fields of different sizes and shapes in the experimental station were selected. Based on the results of field experiments, the effects of paddy field shape, area and length-width ratio on harvesting productivity were analyzed respectively. The results showed that paddy field area was the factor affecting harvester productivity, and the productivity of harvester increased with the increase of paddy field area, and the increasing trend gradually slowed down. There was a good logarithmic relationship between the two, and the R^2 was 0.96. By comparing the productivity of harvesters corresponding to five groups of paddy field scale with the same or close area, it can be concluded that the productivity of harvesters with larger aspect ratio of paddy field with the same paddy field area is relatively higher, and the larger the difference of aspect ratio of paddy field is, the larger the difference of harvester productivity is. By comparing the productivity of harvester corresponding to four groups of paddy fields with the same or close area, it can be concluded that under the same area, the productivity of harvester is in the order of rectangular paddy field > L-shaped paddy field > triangular paddy field. The general conclusion that the size of rectangular paddy field with larger area and aspect ratio has higher harvester productivity can be drawn from field experiments. In order to determine the suitable size of paddy field in practical production, numerical simulation method is used to carry out further research. The harvester productivity model was calibrated and verified by field experiment data, and three kinds of harvesters, namely Kubota PRO488, Changfa CF805N and Revo Gurgod GF4, were selected for numerical simulation. The spatial distribution of productivity under different combination of harvester model, paddy field area and aspect ratio was analyzed. Taking the top 20% productivity as the non-inferior solution, the non-inferior solution of the three models was projected on the surface of field length and width, and the paddy field specification threshold with higher harvester productivity was obtained. The suitable threshold values for paddy field length and width in northeast China are [160 m, 200 m] and [40 m, 200 m], respectively. The results can provide a technical reference for paddy field layout optimization.

Keywords: harvester productivity; paddy field scale; northeast China; numerical simulation; experiments

(责任编辑: 祁 伟)