

引文格式: 朱海平, 王耀伟, 欧阳怡平, 等. 薯—稻轮作模式下播种密度对旱直播水稻产量的影响[J]. 云南农业大学学报(自然科学), 2024, 39(4): 1-8. DOI: [10.12101/j.issn.1004-390X\(n\).202307011](https://doi.org/10.12101/j.issn.1004-390X(n).202307011)

薯—稻轮作模式下播种密度对旱直播水稻产量的影响*

朱海平¹, 王耀伟², 欧阳怡平², 李贵勇¹, 李如会²,
田淑玲², 李秉菊², 杨从党^{1**}

(1. 云南省农业科学院 粮食作物研究所, 云南 昆明 650200;
2. 临沧市农业科学研究所, 云南 临沧 677099)

摘要: 【目的】探明高地力条件下旱直播水稻播种密度对群体质量和产量的影响。【方法】在云南省冬马铃薯—水稻(以下简称“薯—稻”)轮作高地力土壤上进行田间试验, 以超级杂交籼稻 F 优 498 为供试品种, 设置行穴距 30 cm×13 cm (CK)、30 cm×11 cm (D1)、30 cm×15 cm (D2)、30 cm×17 cm (D3) 和 30 cm×19 cm (D4) 共 5 种播种密度, 比较不同密度对出苗质量、茎蘖动态、叶面积指数 (leaf area index, LAI)、干物质积累转运特征以及产量及其构成因素的影响。【结果】随着播种密度的减小, 有效穗数逐渐减少, 单穴茎蘖数逐渐增加, 每穗粒数显著增加, 使总颖花量维持在 $4.4 \times 10^8/\text{hm}^2$ 以上。不同播种密度在维持适宜 LAI 的同时, 随着播种密度的减小, 齐穗后干物质积累量和积累率增加, 提高了收获指数, 从而使产量保持在较高水平 ($12.0 \text{ t}/\text{hm}^2$ 以上)。【结论】在薯—稻轮作模式下, 将旱直播水稻播种密度调减至 30 cm×19 cm, 有利于齐穗后干物质的积累, 增加每穗粒数, 实现产量的稳定高效, 并具有节本增效的作用。

关键词: 水稻; 旱直播; 密度; 产量; 干物质转运

中图分类号: S344.15

文献标志码: A

文章编号: 1004-390X (2024) 04-0001-08

Effects of Sowing Density on Yield of Dry Direct Seeding Rice under Potato-rice Rotation System

ZHU Haiping¹, WANG Yaowei², OUYANG Yiping², LI Guiyong¹, LI Ruhui²,
TIAN Shuling², LI Bingju², YANG Congdang¹

(1. Institute of Food Crops, Yunnan Academy of Agricultural Sciences, Kunming 650200, China;

2. Institute of Agricultural Science of Lincang City, Lincang 677099, China)

Abstract: [Purpose] To investigate the effects of sowing density on population quality and grain yield of dry direct seeding rice under high fertility conditions. [Methods] A field experiment was conducted in high fertility soils under a potato-rice rotation system in Yunnan Province. The super hybrid indica rice variety, F You498, was used, and five sowing densities were tested: row and hole spacing with 30 cm×13 cm (CK), 30 cm×11 cm (D1), 30 cm×15 cm (D2), 30 cm×17 cm (D3), and

收稿日期: 2023-07-12

修回日期: 2024-08-08

网络首发日期: 2024-09-09

*基金项目: 云南省重大科技专项计划项目 (202402AE090007); 国家水稻产业技术体系重点项目 (CARS-01-07B)。

作者简介: 朱海平 (1986—), 男, 云南华宁人, 在读博士研究生, 助理研究员, 主要从事水稻轻简高效栽培研究。E-mail: haipingzhu_1@163.com

**通信作者 Corresponding author: 杨从党 (1972—), 男, 云南通海人, 博士, 研究员, 主要从事水稻高产生理生态研究。E-mail: yangcd2005@163.com

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/53.1044.s.20240906.1723.002>



30 cm×19 cm (D4). The effects of different densities on seedling emergence quality, tiller dynamics, leaf area index (LAI), dry matter accumulation and transport characteristics, yield and its components were compared. [Results] With the decrease of seeding density, the number of effective panicle decreased gradually, the number of single hole tillers increased gradually, and the number of grains per panicle increased significantly, so that the total spikelets were maintained above $4.4 \times 10^8/\text{hm}^2$. The appropriate LAI was maintained with different densities, and with the decrease of seeding density, dry matter accumulation and accumulation rate after full ear increased, and the harvest index was improved, so that the grain yield was maintained at a high level ($12.0 \text{ t}/\text{hm}^2$ or more).

[Conclusion] Under the potato-rice rotation system, reducing the sowing density of dry direct seeding rice to 30 cm×19 cm promotes dry matter accumulation after full heading stage, increases grain number per panicle, and achieves stable high yields, with cost-saving and efficiency-enhancing effects.

Keywords: rice; dry direct seeding; density; yield; dry matter translocation

水稻是中国主要的粮食作物之一, 在中国粮食生产中具有举足轻重的地位, 全国超过一半的人口以其为主食^[1]。直播是一种轻简节本的水稻种植方式, 具有省工、省时、节本等优势, 已在国内外广泛应用, 美国、澳大利亚等发达国家主要采用机械化直播或飞机撒播的方式进行播种^[2]。随着中国社会经济的发展, 水稻直播技术迅速发展。近十年来, 中国水稻直播面积不断扩大, 尤其是在长江以北地区, 如 2016 年河南省水稻直播面积已超过 $1 \times 10^5 \text{ hm}^2$, 2017 年黑龙江省水稻直播面积突破 $4 \times 10^5 \text{ hm}^2$ ^[3-4]。然而, 直播稻的发展过程也面临诸多挑战, 如杂草危害严重、杂草稻增加、抗倒伏能力差等, 尤其是产量不稳定的问题备受关注^[5]。旱直播是指采用旱整地, 种子经浸种后不催芽直接播种, 并利用自然降雨或人工灌溉使种子发芽的一种直播种植方式。云南水稻种植区立体气候特征明显, 传统旱直播稻(陆稻)主要集中在南部山区, 近年来, 随着农村劳动力的转移和规模化生产方式的转型, 传统移栽稻田逐渐向旱直播稻种植发展^[6]。

冬马铃薯—水稻(以下简称“薯—稻”)轮作种植模式在云南水旱轮作区发展迅速, 常年种植面积约 $2 \times 10^5 \text{ hm}^2$, 主要分布在德宏傣族景颇族自治州、临沧市、普洱市、红河哈尼族彝族自治州和大理白族自治州^[7]。在该模式下, 马铃薯季的营养投入量较大, 基础地力普遍升高, 从而使得水稻季基础产量较高, 小区试验结果分别达到 8.7 和 $8.0 \text{ t}/\text{hm}^2$ ^[7]。机械采收马铃薯的同时可以实现秸秆同步翻埋还田, 旱整地后, 田平土细, 田面无秸秆残留, 非常利于水稻旱直播种植。水稻

是喜肥作物, 前人研究表明: 高基础地力有助于提高水稻产量及其稳定性^[8-9]。然而, 如何利用水稻的喜肥特性来消纳马铃薯茬口投入的大量养分, 从而实现薯—稻轮作模式下高基础地力的水稻产量稳定和周年可持续发展, 目前的相关报道较为有限。本研究基于前期研究成果^[10], 参考当地移栽水稻的种植密度 (30.0 cm×13.3 cm), 探讨薯—稻轮作模式下播种密度对旱直播水稻产量形成及物质积累特征的影响, 以期为提高旱直播稻产量的稳定性和节本有机融合提供技术参数和理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

本研究于 2021 年 4—9 月在云南省临沧市双江拉祜族佤族布朗族傣族自治县勐勐镇忙孝水稻种植农民专业合作社进行。试验区地理位置为 $23^{\circ}36'N$, $99^{\circ}53'E$, 海拔 1100 m。试验地已连续进行薯—稻轮作 11 年, 土壤类型为灰色砂壤土。水稻播种前 0~20 cm 土层的理化性质为: pH 5.7, 有机质含量 31.5 g/kg, 碱解氮含量 203.7 mg/kg, 有效磷含量 64.7 mg/kg, 速效钾含量 247.0 mg/kg。供试水稻品种为超级杂交籼稻 F 优 498, 生育期为 145 d。

1.2 试验方法

1.2.1 试验设计

大田试验采用完全随机区组设计, 设置 5 种播种密度。CK (对照): 行穴距 30 cm×13 cm; D1: 行穴距 30 cm×11 cm; D2: 行穴距 30 cm×15 cm; D3: 行穴距 30 cm×17 cm; D4: 行穴距 30 cm×

19 cm。采用人工点播的方式模拟旱穴播,每穴播3粒种子。每个处理设3个重复,共15个小区。每个小区面积为15 m²(长5 m,宽3 m),小区四周开设排水沟,沟宽40 cm,沟深25 cm,便于排灌。

1.2.2 田间管理

于4月5日机械收获冬马铃薯,并将秸秆翻压还田;4月12日进行旱整地,确保田面平整、土壤细碎且无秸秆残留。种子经浸种48 h后,于4月13日播种。播种后第3天开始沟灌,保持厢面湿润,并喷施土壤封闭除草剂;在3叶1心时喷施茎叶除草剂。水分管理方面,2叶1心前保持田间湿润,2叶1心后建立2~3 cm水层,有效分蘖临界叶龄期撤水晒田,随后保持2~3 cm水层直至收获前1周。水稻全生育期施用纯氮69.0 kg/hm²,于倒4叶期作穗肥一次性撒施,除此之外,不再施用其他氮肥、磷肥和钾肥。病虫害防控参照当地水稻高产栽培技术进行管理。

1.3 测定项目及方法

1.3.1 出苗数及缺穴率调查

播种后第14天,在每小区随机选取4个代表性样点,每个样点调查连续10穴的出苗数,并统计整个小区的未出苗穴数。

1.3.2 叶龄及茎蘖动态调查

每小区定点选取10株植株,每7 d调查1次叶龄和茎蘖动态。在茎蘖高峰期前统计所有分蘖,高峰期至抽穗期统计具有2叶(含2叶)的分蘖,齐穗后统计20粒以上(含20粒)的穗数。

1.3.3 叶面积指数测定

在穗分化始期和齐穗期,根据各小区平均茎蘖数,选取3丛植株,使用LI-3100叶面积仪测定高效叶面积和低效叶面积。高效叶面积指最上部3片叶片的叶面积,低效叶面积指除去最上部3片叶片外所有绿叶的面积,并计算叶面积指数(leaf area index, LAI)。

1.3.4 干物质质量测定

在穗分化始期、齐穗期和成熟期,将样品的茎鞘、叶片和穗分别分开,样品经105℃杀青30 min后,80℃烘干至恒量,称量测定干物质质量。

1.3.5 考种与测产

成熟期时,在每小区随机选取5个点,每个点连续调查10穴有效穗数。根据平均有效穗数,随机取4穴稻穗进行考种,测定每穗粒数、

实粒数、结实率和千粒质量。收获后,根据各小区的实际穴数计算产量,并按照标准含水量(13.5%)进行折算。

1.3.6 相关参数计算

缺穴率=缺穴数/播种穴数×100%;

表观转移量=齐穗期茎叶干物质积累量-成熟期茎叶干物质积累量;

表观转移率=表观转移量/(成熟期穗质量-齐穗期穗质量)×100%。

1.4 数据处理与统计分析

使用Excel 2010和SPSS 26.0进行数据处理和统计分析;采用邓肯氏新复极差法分析处理间的差异性;采用SigmaPlot 14.0绘制图表。

2 结果与分析

2.1 叶龄进程

F优498从4月13日播种至7月16日,历时94 d完成所有叶片的生长,平均叶龄为15.4片叶(图1)。于播种后第53天(6月5日),即倒数第4.1叶期时施用穗肥。

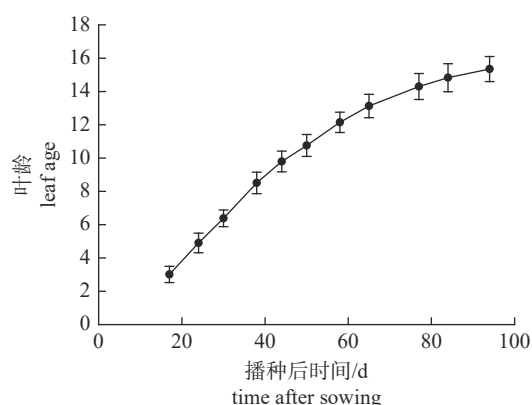


图1 F优498的叶龄进程

Fig. 1 Leaf age process of F You498

2.2 不同播种密度的出苗质量

由表1可知:不同播种密度下的单穴出苗数、出苗率和缺穴率差异不显著。平均每穴出苗2.2株,出苗率为73.1%,缺穴率为2.8%。然而,不同播种密度下的基本苗数差异显著,基本苗数随播种密度的减小而减少,与对照组(CK)相比,D2、D3和D4处理的基本苗数分别减少了7.1%、20.2%和26.0%。

2.3 不同播种密度茎蘖动态比较

不同播种密度下,苗期单穴茎蘖数差异不显

著；穗分化始期单穴茎蘖数随播种密度的减小而增加，D2~D4 处理分别比对照组 (CK) 增加了 7.5%、17.0% 和 26.3%；齐穗期的单穴有效穗数也随播种密度的减小而增加，D2~D4 处理分别比对照组增加了-0.7%、8.7% 和 20.8% (图 2a)。苗期、穗分

化始期和齐穗期的群体茎蘖数均随播种密度的减小而减少，与对照组相比，D2~D4 处理分别减少了 18.6%~29.6%、6.8%~13.6% 和 13.9%~17.3%，且差异显著 (图 2b)。不同播种密度下的成穗率差异不显著，均保持在 53.2% 以上 (图 2c)。

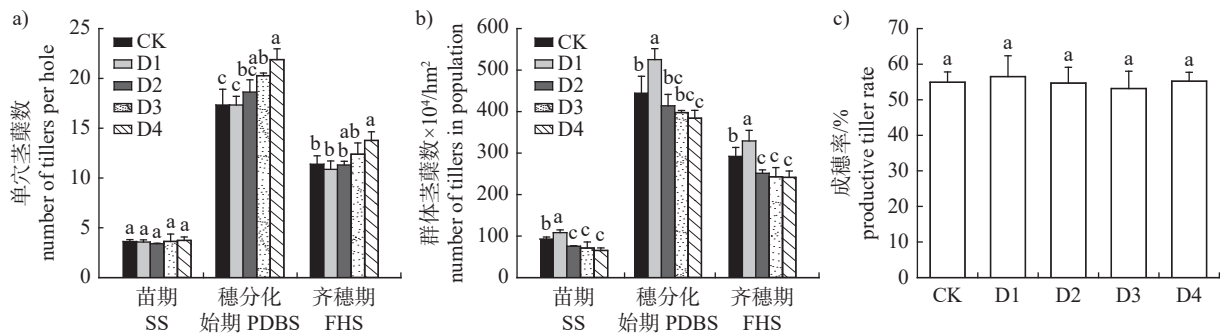
表 1 不同播种密度的出苗质量

Tab. 1 Seedling quality of different seeding densities

密度 density	单穴出苗数 number of seedling emergence per hole	出苗率/% emergence rate	缺穴率/% hole vacancy rate	基本苗数 $\times 10^4/\text{hm}^2$ basic seedling number
CK	2.1 $\pm$ 0.1 a	69.2 $\pm$ 2.2 a	2.3 $\pm$ 1.2 a	52.0 $\pm$ 1.9 b
D1	2.2 $\pm$ 0.1 a	73.1 $\pm$ 3.8 a	1.8 $\pm$ 0.8 a	65.2 $\pm$ 3.9 a
D2	2.2 $\pm$ 0.3 a	74.4 $\pm$ 9.7 a	2.9 $\pm$ 1.9 a	48.3 $\pm$ 6.9 bc
D3	2.2 $\pm$ 0.1 a	72.8 $\pm$ 4.6 a	3.1 $\pm$ 2.7 a	41.5 $\pm$ 3.7 cd
D4	2.3 $\pm$ 0.2 a	75.8 $\pm$ 6.6 a	3.7 $\pm$ 2.9 a	38.5 $\pm$ 4.4 d

注：CK、D1、D2、D3 和 D4 的播种密度分别为 30 cm $\times$ 13 cm、30 cm $\times$ 11 cm、30 cm $\times$ 15 cm、30 cm $\times$ 17 cm 和 30 cm $\times$ 19 cm；同列不同小写字母表示差异显著 ($P<0.05$)；下同。

Note: CK, D1, D2, D3 and D4 represent the seeding densities of 30 cm $\times$ 13 cm, 30 cm $\times$ 11 cm, 30 cm $\times$ 15 cm, 30 cm $\times$ 17 cm and 30 cm $\times$ 19 cm, respectively; different lowercase letters in the same column indicate significant differences ($P<0.05$); the same as below.



注：CK、D1、D2、D3 和 D4 的播种密度分别为 30 cm $\times$ 13 cm、30 cm $\times$ 11 cm、30 cm $\times$ 15 cm、30 cm $\times$ 17 cm 和 30 cm $\times$ 19 cm；SS. 苗期，PDBS. 穗分化始期，FHS. 齐穗期；不同小写字母表示差异显著 ($P<0.05$)；下同。

Note: CK, D1, D2, D3 and D4 represent the seeding densities of 30 cm $\times$ 13 cm, 30 cm $\times$ 11 cm, 30 cm $\times$ 15 cm, 30 cm $\times$ 17 cm and 30 cm $\times$ 19 cm, respectively; SS. seedling stage, PDBS. panicle differentiation beginning stage; FHS. full heading stage; different lowercase letters indicate significant differences ($P<0.05$); the same as below.

图 2 播种密度对关键时期茎蘖数的影响

Fig. 2 Effects of seeding densities on the number of tillers in key stages

2.4 播种密度对叶面积指数 (LAI) 的影响

穗分化始期的 LAI 随着播种密度的减小而减小，不同密度之间存在显著差异。齐穗期的高效 LAI 和总 LAI 也随着播种密度的减小而减小，但低效 LAI 和高效叶面积率的变化不显著 (表 2)。

2.5 播种密度对干物质积累和转运的影响

与对照组 (CK) 相比，穗分化始期、齐穗期和成熟期的平均干物质积累量随着播种密度的增大分别增加了 0.9、0.7 和 0.7 t/hm²，而干物质积累量随着播种密度的减小分别减少了 0.7~1.2、

1.0~2.3 和 0.8~1.3 t/hm²，且不同播种密度之间差异显著。尽管不同密度之间的收获指数差异不显著，但随着播种密度的减小，收获指数总体呈增大趋势 (表 3)。齐穗期前的干物质积累量和积累率随着播种密度的增大而增加，分别提高了 0.7 t/hm² 和 0.5%；而随着播种密度的减小，分别减少了 1.0~2.3 t/hm² 和 1.4%~6.9%。相反地，随着播种密度的减小，齐穗期后的干物质积累量和积累率分别增加了 0~1.1 t/hm² 和 1.4%~6.9% (表 4)。表观转移量和表观转移率均随着播种密度的减小而

降低，且不同密度之间差异显著 (表 5)。

2.6 播种密度对产量及其构成因素的影响

由表 6 可知：与对照组 (CK) 相比，增加播种密度 (D1 处理) 可显著提高有效穗数，增加了 $3.7\times10^5/\text{hm}^2$ ，而减少播种密度 (D2~D4 处理) 则使有效穗数分别显著减少了 4.1×10^5 、 4.9×10^5 和

$5.1\times10^5/\text{hm}^2$ ；每穗粒数的变化趋势则相反，增加播种密度使每穗粒数减少了 20.5 粒；不同播种密度之间的总颖花量、结实率、千粒质量和产量差异不显著，但随着播种密度的减小，总颖花量能稳定在 $4.4\times10^8/\text{hm}^2$ 以上，产量则稳定在 $12.0\text{ t}/\text{hm}^2$ 以上。

表 2 不同播种密度的叶面积指数 (LAI)
Tab. 2 Leaf area index (LAI) of different seeding densities

密度 density	穗分化始期叶面积指数 LAI of panicle differentiation beginning stage	齐穗期 full heading stage			
		高效叶面积指数 high efficiency LAI	低效叶面积指数 low efficiency LAI	总叶面积指数 total LAI	高效叶面积率/% rate of high efficiency leaf area
CK	5.4±0.5 b	4.4±0.3 b	2.4±0.3 a	6.8±0.3 ab	65.0±3.5 a
D1	6.9±0.8 a	5.1±0.3 a	2.4±0.2 a	7.5±0.3 a	68.5±2.2 a
D2	4.5±0.2 bc	4.4±0.2 b	2.2±0.1 a	6.6±0.2 ab	66.5±1.0 a
D3	4.5±0.5 bc	4.2±0.4 b	2.4±0.7 a	6.6±1.1 ab	64.0±4.6 a
D4	4.3±0.2 c	4.0±0.3 b	2.1±0.2 a	6.1±0.3 b	65.4±2.8 a

表 3 不同时期的干物质积累量和收获指数
Tab. 3 Dry matter accumulation amount and harvest index in different periods

密度 density	穗分化始期/(t·hm ⁻²) panicle differentiation beginning stage	齐穗期/(t·hm ⁻²) full heading stage	成熟期/(t·hm ⁻²) maturation stage	收获指数 harvest index
CK	5.8±0.4 ab	15.7±0.8 ab	22.2±0.5 ab	0.54±0.03 a
D1	6.7±0.7 a	16.4±0.4 a	22.9±0.2 a	0.54±0.02 a
D2	5.1±0.9 bc	14.7±0.6 bc	21.1±0.4 c	0.57±0.02 a
D3	4.6±0.3 c	14.2±0.8 cd	21.4±0.7 bc	0.60±0.06 a
D4	4.7±0.3 bc	13.4±0.6 d	20.9±0.5 c	0.58±0.04 a

表 4 齐穗期前后的干物质积累量和积累率
Tab. 4 Dry matter accumulation amount and accumulation rate before and after full heading stage

密度 density	齐穗期前 before full heading stage		齐穗期后 after full heading stage	
	积累量/(t·hm ⁻²) accumulation amount	积累率/% accumulation rate	积累量/(t·hm ⁻²) accumulation amount	积累率/% accumulation rate
CK	15.7±0.8 ab	71.1±4.7 a	6.4±1.2 a	28.9±4.7 b
D1	16.4±0.4 a	71.6±2.4 a	6.5±0.6 a	28.4±2.4 b
D2	14.7±0.6 bc	69.7±1.8 ab	6.4±0.3 a	30.3±1.8 ab
D3	14.2±0.8 cd	66.3±1.8 ab	7.2±0.3 a	33.7±1.8 ab
D4	13.4±0.6 d	64.2±3.7 b	7.5±0.9 a	35.8±3.7 a

3 讨论

3.1 薯—稻轮作模式对土壤基础地力的影响

中国目前的耕地等级划分主要采用地力等级

法和产量法。根据全国第二次土壤普查养分分级标准，碱解氮含量超过 150 mg/kg、有效磷含量超过 40 mg/kg、速效钾含量超过 200 mg/kg 即为一级或极高等级土壤^[1]。本研究的土壤养分水平

高于这一标准,表明其地力水平较高。农业研究中通常将基础产量作为衡量土壤综合生产力的指标^[12-13]。本研究的试验田块已连续 11 年进行薯—稻轮作,前期研究表明:在该试验地种植的水稻品种 F 优 498 和隆两优 1206 的基础产量分别达

到 8.7 和 8.0 t/hm²,基础地力对产量的贡献率均为 83.8%^[10]。在本研究中,仅施用 69.0 kg/hm² 的氮素穗肥,水稻的平均产量便达到了 12.2 t/hm²,进一步证明了该地区薯—稻轮作模式下水稻基础产量高,属于高地力田块。

表 5 干物质的转运特征

Tab. 5 Transport characteristics of dry matter

密度 density	齐穗期干物质积累量/(t·hm ⁻²) dry matter at full heading stage		成熟期干物质积累量/(t·hm ⁻²) dry matter at maturation stage		表观转移量/(t·hm ⁻²) apparent translocation amount	表观转移率/% apparent translocation rate
	茎叶	穗	茎叶	穗		
	stem and leaf	panicle	stem and leaf	panicle		
CK	12.8±0.8 ab	2.9±0.4 ab	9.1±0.3 ab	13.0±0.6 a	3.7±1.0 a	36.6±10.5 a
D1	13.2±0.2 a	3.2±0.3 a	9.8±0.3 a	13.1±0.1 a	3.4±0.5 a	34.3±5.5 a
D2	12.0±0.6 bc	2.7±0.1 ab	8.6±0.7 b	12.6±0.3 ab	3.5±0.3 a	35.2±2.0 a
D3	11.6±0.8 c	2.6±0.1 b	9.4±0.6 ab	11.9±0.4 b	2.2±0.2 b	23.1±1.8 b
D4	11.0±0.4 c	2.5±0.3 b	8.6±0.5 b	12.3±0.8 ab	2.3±0.2 b	23.6±0.8 b

表 6 播种密度对产量及其构成因素的影响

Tab. 6 Effects of seeding density on the yield and its components

密度 density	有效穗数×10 ⁶ /hm ² effective panicle number	每穗粒数 grain number per panicle	总颖花量×10 ⁸ /hm ² total spikelets number	结实率/% grain setting rate	千粒质量/g 1 000-grain weight	产量/(t·hm ⁻²) grain yield
D1	3.3±0.3 a	145.0±8.3 b	4.8±0.2 a	82.2±6.2 a	33.7±0.2 a	12.3±0.3 a
CK	2.9±0.2 b	165.5±17.1 ab	4.8±0.6 a	82.1±6.7 a	33.0±1.1 a	12.0±0.4 a
D2	2.5±0.1 c	174.8±9.2 a	4.4±0.3 a	83.6±2.7 a	34.0±0.4 a	12.0±0.4 a
D3	2.4±0.2 c	181.9±9.1 a	4.4±0.4 a	82.8±1.4 a	33.2±0.5 a	12.7±1.0 a
D4	2.4±0.2 c	183.6±16.6 a	4.4±0.1 a	84.6±1.0 a	33.7±0.3 a	12.2±0.7 a

3.2 高基础地力对水稻群体质量的影响

凌启鸿等^[14]提出:足够大的库容量(群体颖花量)是产量形成的基础,适宜的 LAI 和花后干物质的高效积累是产量形成的关键。本研究表明:随着直播密度的减小,群体茎蘖数和有效穗数显著减少,而单穴茎蘖数和每穗粒数显著增加。这说明密度减小能够合理调控群体与个体的生长,使得有效穗数和每穗粒数协同发展,从而将群体颖花量稳定在 $4.4\times 10^8/\text{hm}^2$ 以上,实现了“稀播、大穗、高群体颖花量”的效果。适宜的 LAI 和花后干物质的高效积累是高质量水稻群体的特征,且干物质的积累、转运与产量形成密切相关^[15-17]。张军等^[18]研究表明:高、中、低地力的高产处理在各个生育期都有较好的群体质量,包括适宜的 LAI、合理的茎蘖动态、较高的群体颖花量以及充足的花后干物质积累。本研究表

明:随着直播密度的减小,LAI 保持在相对较高的水平,齐穗后干物质的转移量和转移率逐渐减小,而干物质积累量和积累率逐渐增加,收获指数也有所提高,这与马波等^[19]的研究结果一致。说明在高地力条件下,适当减小直播稻的播种密度可以优化群体结构,促进后期光合产物的积累,从而达到稳产的效果。

3.3 高基础地力对水稻密度的补偿效应

前人研究表明:在高地力条件下,土壤性质(如有机质和全氮)对水稻产量的影响较大,施肥的增产潜力较小,但产量的可持续性和稳定性较高^[8-9,20]。赵明等^[21]提出了作物差异补偿的概念,即作物系统在一定条件下,通过构成因子之间的相互作用实现增效补偿。本研究结果与前人研究结果^[22-25]一致,即在高基础地力条件下,水稻产量的变幅较小,产量构成因素之间的补偿效应明

显,增加了产量的稳定性。本研究发现:在冬马铃薯茬口的高地力基础上,随着播种密度的减小,基本苗数减少了7.1%~26.0%,但是单穴有效穗数和每穗粒数分别增加了7.5%~26.3%和5.7%~11.0%,使得群体颖花量维持在 $4.4 \times 10^8/\text{hm}^2$ 以上,从而确保了产量的稳定性。这是因为播种密度减小后,单穴占有的空间增大,加之有充足的养分供应,导致单穴有效穗数和每穗粒数显著提高。适宜的密度能够平衡水稻群体和个体生长之间的关系,协同提高群体的数量和质量^[26]。本研究也发现:适当减小播种密度后,通过增加每穗粒数和单穴有效穗数,使总颖花量保持在较高水平,从而确保薯—稻轮作模式下旱直播稻的稳产。此外,本研究还发现:在冬马铃薯茬口下,播种密度对旱直播水稻产量的影响不显著。换言之,在本研究冬马铃薯茬口下,旱直播水稻在低播量水平下即可获得高产。这与多数研究“水稻产量随播种密度增加先增后减”的结论^[27-30]有所不同。究其原因,可能是由于冬马铃薯茬口的高基础地力使得补偿效应更加明显,从而提高了水稻产量的稳定性。

4 结论

在薯—稻轮作模式下,将旱直播水稻的播种密度调减至30 cm×19 cm,有助于齐穗后干物质的积累,并显著增加每穗粒数,从而表现出明显的产量补偿效应,最终实现产量的稳定和提高。此外,该密度调整还具有节约成本、提高效率和稳产的作用。

[参考文献]

- [1] CHENG Q Y, LI L Y, LIAO Q, et al. Is scale production more advantageous than smallholders for Chinese rice production?[J]. *Energy*, 2023, 283(1): 128753. DOI: 10.1016/j.energy.2023.128753.
- [2] 罗锡文,王在满,曾山,等.水稻机械化直播技术研究进展[J]. *华南农业大学学报*, 2019, 40(5): 1. DOI: 10.7671/j.issn.1001-411X.201905069.
- [3] LIU H Y, HUSSAIN S, ZHENG M M, et al. Dry direct-seeded rice as an alternative to transplanted-flooded rice in central China[J]. *Agronomy for Sustainable Development*, 2014, 35(1): 285. DOI: 10.1007/s13593-014-0239-0.
- [4] HUANG M, ZOU Y B, FENG Y H, et al. No-tillage and direct seeding for super hybrid rice production in rice-oilseed rape cropping system[J]. *European Journal of Agronomy*, 2011, 34(4): 278. DOI: 10.1016/j.eja.2011.02.005.
- [5] 李绍平,邢志鹏,田晋钰,等.机械旱直播方式对水稻产量和光合物质生产特征的影响[J]. *农业工程学报*, 2022, 38(7): 1. DOI: 10.11975/j.issn.1002-6819.2022.07.001.
- [6] 李荣波,陈清华,曾国浩,等.水稻旱直播技术在云南山区半山区的应用[J]. *中国稻米*, 2019, 25(4): 111. DOI: 10.3969/j.issn.1006-8082.2019.04.031.
- [7] 岳超,肖石江,王怀义,等.氮肥用量对不同冬马铃薯品种产量及氮肥利用率的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2019(2): 119. DOI: 10.11838/sfsc.1673-6257.18232.
- [8] 曾祥明,韩宝吉,徐芳森,等.不同基础地力土壤优化施肥对水稻产量和氮肥利用率的影响[J]. *中国农业科学*, 2012, 45(14): 2886. DOI: 10.3864/j.issn.0578-1752.2012.14.011.
- [9] 申哲,韩天富,黄晶,等.中国水稻相对产量差时空变异及其对氮肥的响应[J]. *植物营养与肥料学报*, 2023, 29(5): 789. DOI: 10.11674/zwyf.2022480.
- [10] 朱海平,刘玉文,王耀伟,等.薯—稻模式下穗肥用量对直播籼稻产量及群体质量的影响[J]. *云南农业大学学报(自然科学)*, 2021, 36(4): 573. DOI: 10.12101/j.issn.1004-390X(n).202012061.
- [11] 席承藩,朱克贵,周明枞,等.中国土壤[M].北京:中国农业出版社,1998.
- [12] 梁涛,廖敦秀,陈新平,等.重庆稻田基础地力水平对水稻养分利用效率的影响[J]. *中国农业科学*, 2018, 51(16): 3106. DOI: 10.3864/j.issn.0578-1752.2018.16.007.
- [13] 贡付飞,查燕,武雪萍,等.长期不同施肥措施下潮土冬小麦农田基础地力演变分析[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(12): 120. DOI: 10.3969/j.issn.1002-6819.2013.12.016.
- [14] 凌启鸿,张洪程,蔡建中,等.水稻高产群体质量及其优化控制探讨[J]. *中国农业科学*, 1993, 26(6): 1.
- [15] 黄琢理,刘栩薇,梁陆欣,等.喷施微生物菌肥对广东丝苗香米产量形成及茎鞘物质转运特性的影响[J]. *西北农业学报*, 2020, 29(5): 752. DOI: 10.7606/j.issn.1004-1389.2020.05.012.
- [16] 韦还和,孟天瑶,李超,等.甬优籼粳杂交稻花后干物质积累模型与特征分析[J]. *作物学报*, 2016, 42(2): 265. DOI: 10.3724/SP.J.1006.2016.00265.
- [17] 蒋明金,李敏,周维佳,等.适宜机插密度提高优质杂交籼稻插秧质量及产量[J]. *杂交水稻*, 2021, 36(1): 41. DOI: 10.16267/j.cnki.1005-3956.20200224.050.
- [18] 张军,张洪程,戴其根,等.淮北不同地力水平麦茬田上施氮量对超级稻产量形成的影响[J]. *生态学杂志*, 2011, 30(10): 2297. DOI: 10.13292/j.1000-4890.2011.0305.
- [19] 马波,金正勋,刘传增,等.氮肥对寒地水稻齐穗后干物质积累及产量的影响[J]. *黑龙江农业科学*, 2012(2): 38. DOI: 10.3969/j.issn.1002-2767.2012.02.013.
- [20] 张晓丽,陶伟,高国庆,等.直播栽培对双季早稻生育期、抗倒伏能力及产量效益的影响[J]. *中国农业科学*,

- 2023, 56(2): 249. DOI: [10.3864/j.issn.0578-1752.2023.02.004](https://doi.org/10.3864/j.issn.0578-1752.2023.02.004).
- [21] 赵明, 李建国, 张宾, 等. 论作物高产挖潜的补偿机制[J]. 作物学报, 2006, 32(10): 1566. DOI: [10.3321/j.issn:0496-3490.2006.10.023](https://doi.org/10.3321/j.issn:0496-3490.2006.10.023).
- [22] 乔磊, 江荣风, 张福锁, 等. 土壤基础地力对水稻体系的增产与稳产作用研究[J]. 中国科技论文, 2016, 11(9): 1031. DOI: [10.3969/j.issn.2095-2783.2016.09.012](https://doi.org/10.3969/j.issn.2095-2783.2016.09.012).
- [23] 梁涛, 陈轩敬, 赵亚南, 等. 四川盆地水稻产量对基础地力与施肥的响应[J]. 中国农业科学, 2015, 48(23): 4759. DOI: [10.3864/j.issn.0578-1752.2018.16.007](https://doi.org/10.3864/j.issn.0578-1752.2018.16.007).
- [24] ZHOU Y, XU L, ZHANG J W, et al. Low N apparent surplus with higher rice yield under long-term fertilizer postponing in the rice-wheat cropping system[J]. The Crop Journal, 2022, 10(4): 1178. DOI: [10.1016/j.cj.2022.01.001](https://doi.org/10.1016/j.cj.2022.01.001).
- [25] LIANG K M, ZHONG X H, PAN J F, et al. Reducing nitrogen surplus and environmental losses by optimized nitrogen and water management in double rice cropping system of south China[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2019, 286(1): 106680. DOI: [10.1016/j.agee.2019.106680](https://doi.org/10.1016/j.agee.2019.106680).
- [26] 董立强, 高虹, 李跃东, 等. 行株距配置对水稻群体冠层结构及产量的影响[J]. 沈阳农业大学学报, 2021, 52(3): 265. DOI: [10.3969/j.issn.1000-1700.2021.03.002](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-1700.2021.03.002).
- [27] TIAN J Y, LI S P, CHENG S, et al. Increasing the appropriate seedling density for higher yield in dry direct-seeded rice sown by a multifunctional seeder after wheat-straw return[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2023, 22(2): 400. DOI: [10.1016/j.jia.2022.08.064](https://doi.org/10.1016/j.jia.2022.08.064).
- [28] PENG B L, WANG X Y, HU X Y, et al. Determining nitrogen topdressing rates in accordance with actual seedling density and crop nitrogen status in direct-seeded rice[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2024, 104(4): 2294. DOI: [10.1002/jsfa.13117](https://doi.org/10.1002/jsfa.13117).
- [29] WU L M, YU K R, ZOU J X, et al. Management of seedling rate and nitrogen fertilization for lodging risk reduction and high grain yield of mechanically direct-seeded rice under a double-cropping regime in south China[J]. Agronomy, 2024, 14(3): 522. DOI: [10.3390/agronomy14030522](https://doi.org/10.3390/agronomy14030522).
- [30] ZHU H B, LU X Z, ZHANG K W, et al. Optimum basic seedling density and yield and quality characteristics of unmanned aerial seeding rice[J]. Agronomy, 2023, 13(8): 1980. DOI: [10.3390/agronomy13081980](https://doi.org/10.3390/agronomy13081980).

责任编辑: 何承刚