



不同密度对寒地水稻产量及光合物质生产的影响

赵黎明,顾春梅,王士强,王丽萍,王 贺,那永光,解保胜

(黑龙江省农垦科学院 水稻研究所,黑龙江 佳木斯 154007)

摘要:为明确不同密度对寒地水稻产量形成过程的影响,在大田条件下,以空育 131 为试验材料,设置行株距 30 cm×8 cm(D₁)、30 cm×10 cm(D₂)、30 cm×12 cm(D₃)、30 cm×14 cm(D₄)、30 cm×16 cm(D₅)五个密度水平,分析密度对水稻产量及光合物质生产的影响。结果表明:与 D₁、D₅ 处理相比,D₂和 D₃处理均显著增加了产量,分别实现了 13.5%~14.6%和 9.5%~10.4%的产量增幅,其中以 D₂处理效果最佳,该处理的增产途径是提高了单位面积有效穗数和抽穗前叶面积指数,增加了抽穗期前后干物质积累量和生物产量,增强了抽穗期茎秆干物质生产及转运能力。综合分析表明,适当密植能够增加产量,促进水稻光合物质生产。

关键词:寒地水稻;密度;产量;光合物质

黑龙江省作为我国重要的产粮大省之一,目前水稻种植面积已超过 400 万 hm²,是中国乃至世界上最主要的粳稻生产基地之一,在保障全国粮食安全中起着十分重要的作用。在水稻实际生产过程中,提高种植密度是增加水稻产量的有效途径之一。相关研究表明,栽培密度对水稻茎蘖变化、干物质生产以及产量的影响显著,并认为只有在密度适宜的条件下,水稻个体与群体矛盾才

能得以缓解,并建立高质量群体,进而有利于产量构成要素之间的协调发育^[1-2];但也有研究认为,栽培密度对水稻产量及其构成因素的影响不明显^[3]。目前关于密度对水稻产量建成影响的研究已比较深入^[4-9],但是在寒地稻区研究密度对水稻产量及光合物质生产的调控效应鲜见报道。因此,本文以空育 131 为试验材料,从插秧密度角度出发,对寒地水稻分蘖、叶龄、群体干物质积累等方面进行了系统的研究,明确不同密度对水稻产量形成的影响,为寒地水稻生产提供技术支撑。

1 材料与方法

1.1 材料

供试水稻品种为空育 131,黑龙江省农垦科学院水稻研究所于 2001 年推广。

收稿日期:2018-10-16

基金项目:黑龙江省农垦总局重点科研资助项目(2018 GN1zp1431)。

第一作者简介:赵黎明(1980-),男,博士,副研究员,从事水稻高产栽培与化学调控研究。E-mail: nkzlm@126.com。

通讯作者:顾春梅(1973-),女,硕士,研究员,从事水稻高产栽培研究。E-mail: zpguchunmei@126.com。

Correlation and Path Analysis of Yield and Yield Characteristics of Maize

WANG Nan, WANG Shu-xing, ZHANG Le, REN Hong-li, DANG Run-hai, AN Lyu-yu

(Weinan Institute of Agriculture Sciences, Weinan 71400, China)

Abstract: In order to investigate the effect of main agronomic characters of maize on yield per plant and their correlation, in this paper, nine maize variety were applied to elucidate the yield performance and the correlation between yield per plant and yield characteristics based on the ten economical traits (i. e. spike position height coefficient, ear leaf area, ear length, bare tip length, ear diameter, ear rows, row grains, 100-kernel weight, kernel rate and yield per plant) of maize. The results showed that the variation of bald tip length in maize breeding process was large and the breeding potential was also large. The correlation between traits and maize yield per plant was ear length>ear leaf area>row grains>ear rows>ear diameter>100 grain weight. Path analysis showed that the direct contribution of each trait to yield was as follows: ear length>row grains>ear line rows>ear leaf area>ear diameter>100-grain weight. When selecting, the relationship of these characters must be well coordinated. Ear length, ear leaf area, row grains, ear rows, ear diameter, 100-kernel weight should be given more emphasis. Bare tip length, spike position height coefficient, and kernel rate came second.

Keywords: maize; yield per plant; path analysis; correlation analysis; yield characteristics

1.2 方法

1.2.1 试验设计 试验于2012-2013年在黑龙江省农垦科学院水稻研究所佳南试验区进行,两年生长期降水量分别为468.1和453.3 mm,活动积温分别为2 701.41和2 718.40℃,差异较小,年份间指标变化趋势大致相同,本文中数据以2012年为例。采用随机区组设计,设置行株距30 cm×8 cm(D₁)、30 cm×10 cm(D₂)、30 cm×12 cm(D₃)、30 cm×14 cm(D₄)、30 cm×16 cm(D₅)五个密度水平。采用轻干湿交替灌溉方式,即移栽后5~7 d保持浅水层,返青后监测水势,有效分蘖末期晒田(-30 kPa),其余时期浅水层自然落干至土壤水势为-15 kPa时,灌水2~4 cm,再落干,如此循环,收获前7 d断水。移栽叶龄3.5叶左右,插秧规格均为每穴4株,每小区占地面积24 m²,3次重复。施尿素250 kg·hm⁻²(含46%N),磷酸二铵100 kg·hm⁻²(含46%P₂O₅),氯化钾200 kg·hm⁻²(含60%K₂O)。氮肥按基肥、蘖肥、调节肥、穗肥施入,施用比例4:3:1:2,磷肥100%基肥,钾肥分基肥和穗肥施入,施用比例1:1。其它田间管理同大田常规。

1.2.2 测定项目及方法 返青后每个重复小区选长势一致的连续10穴,叶龄用红铅油标记,每周调查叶龄进程和茎蘖1次,叶龄调查至剑叶全展开,茎蘖调查至分蘖数稳定^[10]。对试验区进行

茎数调查,计算平均值,按平均数在水稻分蘖盛期、拔节期、抽穗期和蜡熟期进行取样分析。叶面积测定采用方格法。2 m²实收测产。每小区调查28穴有效穗数,根据平均值每点取3穴,调查分析植株粒数、结实率和千粒重等指标。

1.2.3 数据分析 使用Excel 2007绘制相关图表,DPS 7.05进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 不同密度对水稻叶龄和茎蘖动态的影响

由图1a可以看出,叶龄值曲线呈直线上升趋势,其中5月24日后叶龄变化随密度降低而呈现增加趋势,6月8日至7月3日阶段效果明显,7月11日剑叶展开时,D₅处理叶龄值最高。不难看出,高密度主茎叶龄进程慢,低密度快,综合最终叶龄值可知,高密度对品种叶龄的影响较大,剑叶展开快,抽穗时期略早,但减叶率高。分蘖作为水稻的重要农艺性状,影响水稻个体健壮程度。水稻每穴茎数和每平方米分蘖茎数变化均呈现单峰曲线变化趋势(图1b和图1d),其中每穴茎数随密度增加而降低,而每平方米分蘖茎数变化则与之相反。在6月25日,D₁、D₂和D₃处理每平方米分蘖茎数达到最高值,而D₄、D₅处理要略晚一些。此外,从图1c可知,密度与成穗率呈二次曲线关系,说明密度过高或过低均会导致成穗率降低。

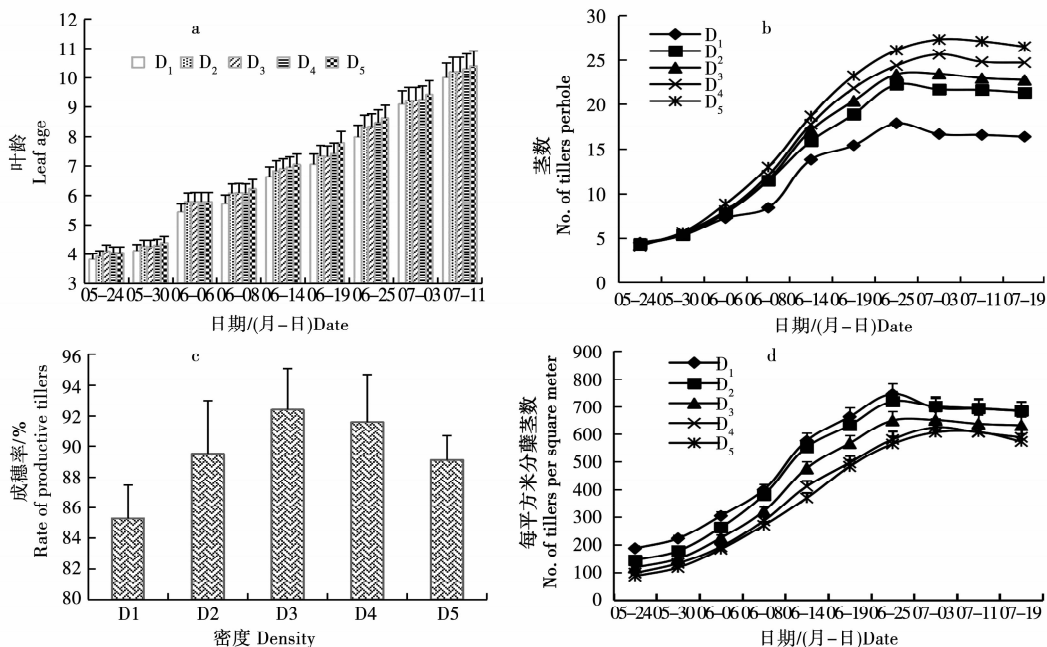


图1 不同密度对水稻叶龄动态、茎蘖动态和茎蘖成穗的影响

Fig. 1 Effect of different densities on changes of leaf age, tiller and the rate of productive tillers in rice

2.2 不同密度对水稻光合生产特性的影响

2.2.1 叶面积指数和 SPAD 值变化 由图 2a 可知,抽穗期叶面积指数达最高,各生育时期表现为 H(抽穗期)>J(拔节期)>F(灌浆期)>D(蜡熟期)>T(分蘖期)。拔节期之后不同密度间叶面积指数存在极显著差异($P<0.01$),抽穗前以 D_1 处理最高,抽穗期后 D_3 处理表现最佳。说明在

D_3 密度处理下,能使水稻抽穗后期降低叶面积衰减保持较高的绿叶面积。上述说明, D_3 处理可以提高抽穗后叶面积指数,促进了水稻生育后期光合物质生产。由图 2b 可知,SPAD 平均值以 H(抽穗期)最高,其次是灌浆期(F),其中灌浆初期以倒 1、2 叶 SPAD 值最佳,而抽穗期出现在倒 3 叶,拔节孕穗期则出现在 L4(倒 4 叶)。

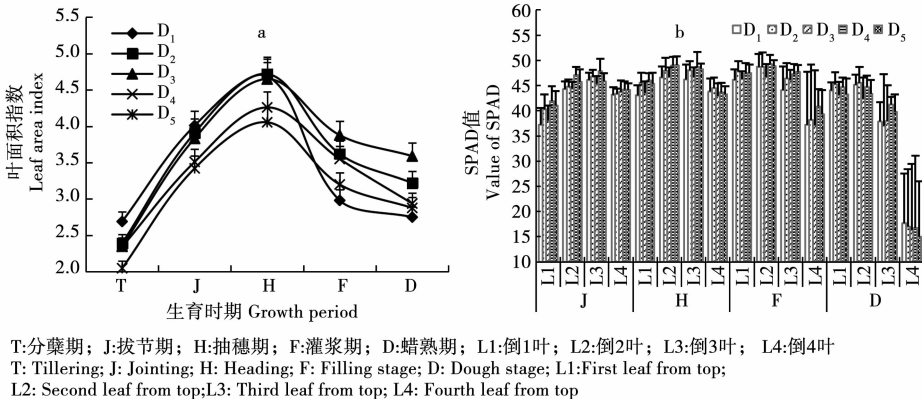


图 2 不同密度对水稻叶面积指数(LAI)和 SPAD 值的影响

Fig. 2 Effect of different densities on leaf area index and SPAD value of leaf in rice

2.2.2 干物质积累变化 图 3a 表明,不同密度对叶片干物质积累的作用效果明显,曲线呈现单峰曲线变化趋势,并以拔节期之后表现最明显。其中抽穗期(H)各处理叶片干物质积累均达到最佳值,抽穗期后 D_2 处理明显高于 D_1 处理,说明 D_1 处理在水稻生育后期叶片失绿快,逐渐被 D_2 处理赶上并超过。各处理均在抽穗期达最大,表现为 $D_5<D_4<D_1<D_2<D_3$;灌浆期(F)和蜡熟期(D)

叶片干物质重表现为 $D_5<D_1<D_4<D_2<D_3$ 。茎鞘干物质积累也呈单峰曲线变化,分蘖期(T)和拔节孕穗期(J)差异较小,抽穗期(H)处理间存在明显差异,且均达到最大值,以 D_2 处理作用效果最佳,而灌浆期茎鞘干物质重则以 D_3 处理最高,说明该时期 D_2 、 D_3 处理对群体茎鞘干物质积累促进明显(图 3b)。比较之下,抽穗前 D_2 处理生物产量最高,而抽穗期后则是 D_3 处理最高(图 3c)。

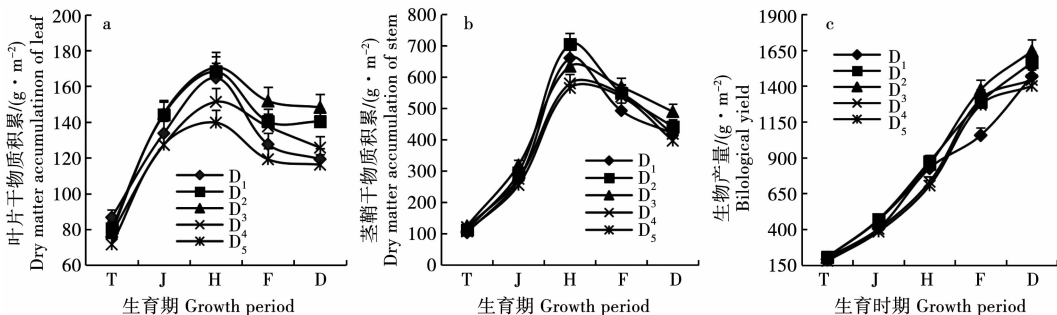


图 3 不同密度对寒地水稻叶片、鞘干物质积累以及生物产量的影响

Fig. 3 Effect of different densities on dry matter accumulation of leaf and stem and biological yield in rice

2.2.3 干物质生产及转运变化 由表 1 可知,分蘖期至拔节期,群体干物质积累量及其比例均以 D_3 处理最高,分别表现为 260.21 g·m⁻² 和 18.15%,显著高于 D_1 、 D_4 和 D_5 处理;拔节期至抽穗期,群体干物质积累量则以 D_2 处理最高,表现为 433.54 g·m⁻²,所占比例则以 D_1 处理最高,为

31.65%;抽穗期至成熟期,群体干物质积累量及所占比例以 D_4 处理最佳,分别表现为 328.41 g·m⁻² 和 23.33%。每平方米粒重以 D_2 处理最佳,其次 D_3 处理。从表 2 可看出,水稻抽穗期至成熟期干物质生产受密度的影响显著,其中 D_2 处理的抽穗期和成熟期生物产量及茎鞘干质

量均最高,且增幅明显。在干物质运转上,转运和花后干物质积累多,对花前干物质再分配需求少。输出效果随密度增加而增加,说明低密度处理下

表 1 不同密度对水稻干物质积累量的影响

Table 1 Effects of different densities on dry matter accumulation of rice

处理 Treatments	分蘖—拔节 Tillering—Jointing		拔节—抽穗 Jointing—Heading		抽穗—成熟 Heading—Maturity		粒重/ (g·m ⁻²) Grain weight
	积累量/(g·m ⁻²)	比例/%	积累量/(g·m ⁻²)	比例/%	积累量/(g·m ⁻²)	比例/%	
	Dry matter accumulation	Ratio to total	Dry matter accumulation	Ratio to total	Dry matter accumulation	Ratio to total	
D ₁	215.35 bB	16.22 bc	420.16 aA	31.65 a	152.07 c	11.46 b	816.04 c
D ₂	246.47 aA	16.38 bc	433.54 aA	28.81 a	292.57 b	19.44 ab	927.43 a
D ₃	260.21 aA	18.15 a	340.52 bB	23.75 b	281.50 b	19.63 ab	894.02 ab
D ₄	203.39 bB	14.75 c	328.67 bB	23.35 b	328.41 a	23.33 a	865.85 b
D ₅	204.05 bB	15.08 c	321.88 bB	23.78 b	292.87 b	21.64 a	811.26 c

表中不同大小字母表示在 1%和 5%水平上差异显著,下同。
The letters with different sizes in the table indicate significant differences at the level of 1% and 5%,the same below.

表 2 不同密度对水稻干物质生产及运转的影响

Table 2 Effects of different densities on accumulation and transportation of dry matter in rice

处理 Treatments	抽穗期 Heading		成熟期 Maturity		转运量/g Exportation	转化率/% Translocation rate	输出率/% Export rate
	生物产量 (g·m ⁻²)	茎鞘干质量/ (g·m ⁻²)	生物产量/ (g·m ⁻²)	茎鞘干质量/ (g·m ⁻²)			
	Biological yield	Dry weight of stem sheath	Biological yield	Dry weight of stem sheath			
D ₁	1175.24 ab	810.53 bc	1327.31 cC	511.27 c	299.26 aA	36.67 aA	36.92 a
D ₂	1212.47 a	854.30 a	1505.04 aAB	577.61 a	276.69 abA	29.83 bAB	32.39 a
D ₃	1152.42 ab	784.26 c	1433.92 bB	549.66 b	244.36 cB	27.33 bB	31.16 a
D ₄	1079.31 b	729.53 d	1407.72 bB	542.87 b	187.66 dC	21.67 cC	25.72 b
D ₅	1060.53 b	714.72 d	1353.40 cC	542.14 b	172.58 dC	21.27 cC	24.15 b

2.3 不同密度对水稻产量及其构成的影响

从产量构成上看(表 3),每平方米有效茎数以 D₂处理最多,为 692.5 个,D₁处理次之;穗粒数与粒重随密度增加而降低;D₃处理结实率和千粒重最高,分别为 85.61%和 26.48 g,与其它处理

相比,达到了显著或极显著差异。从产量上看,D₂处理显著提高了产量,产量为9.27 t·hm⁻²,D₃处理次之。上述说明,密度过高或过低均会对结实率和千粒重产生不利的影响,最终导致产量下降。

表 3 不同密度对水稻产量及其构成的影响

Table 3 Effects of different densities on yield and component of rice

处理 Treatments	有效茎数/(个·m ⁻²) Effective stem number	每穗粒数/个 No. of perpanicles	每穗粒重/g Weight of perpanicles	千粒重/g 1000-grain weight	结实率/% Seed-setting rate	产量/ (t·hm ⁻²) Yield
D ₁	687.6 aA	61.5 c	1.20 dC	25.88 b	75.56 cC	8.16 bB
D ₂	692.5 aA	63.9 bc	1.33 cB	26.08 ab	80.14 bB	9.27 aA
D ₃	642.3 bA	63.5 b	1.43 bA	26.48 a	85.61 aA	8.94 aAB
D ₄	589.1 cB	66.1 a	1.46 abA	26.29 ab	84.45 aA	8.66 abAB
D ₅	544.8 dC	68.2 a	1.51 aA	25.72 b	83.25 aA	8.11 bB

3 结论与讨论

插秧密度是影响水稻生长发育和产量形成的重要因素^[11]。一些学者研究表明,随着密度的降低,茎蘖成穗率下降,田间有效穗数显著降低,产量随之减少^[12-13];而密度过高又会造成个体发育不良,易发生倒伏^[14]。而本研究发现,每平方米分蘖茎数随密度减小而减小,抽穗时间则随密度减小而推迟,且密度过高或过低均会降低水稻成穗率。在产量及其构成研究上,许俊伟等^[15]研究表明,随着密度的增加,水稻产量呈先升后降的趋势。吴建平等^[16]研究认为,随着密度的增大,水稻茎蘖数峰值提高、有效穗数增多、每穗实粒数减少。还有一些学者研究认为,合理密植可以通过提高单位面积的有效穗数^[17-18]、每穗总粒数和实粒数来增加产量^[8-9,19-20]。本研究发现,水稻单株粒数和粒重随密度增加而降低;其中D₂(30 cm×10 cm)处理提高了水稻产量,明显增加了单位面积有效茎数,D₃(30 cm×12 cm)处理次之。

光合物质生产是水稻产量形成的基础^[21]。相关研究表明,水稻抽穗后干物质积累量、群体生长率和光合势等指标随密度降低而极显著减小^[5],SPAD 值随栽植密度增加而减小^[22]。李宗新等^[23]研究表明,群体叶面积指数和干物质积累随着密度的增加均呈现出增高的趋势。潘圣刚等^[24]研究认为,水稻分蘖盛期和幼穗分化期叶面积指数随着栽插密度增加而增加。葛均筑等^[25]研究表明,增密可增加早期光能截获,但后期会导致 LAI 显著降低。龙文飞等^[26]研究表明,密植可显著提高生物产量,增加穗后干物质积累量。李静^[27]研究认为,不同时期水稻干物质积累随密度增加而增加,抽穗期穗中干物质分配率显著增加。陈海飞等^[28]研究表明,合理的栽培密度能充分发挥水稻的分蘖和群体自身调节能力,能够积累足够干物质,提高水稻产量。本研究发现,抽穗期叶面积指数和 SPAD 值达最大,增密有利于抽穗前叶面积指数的提高,干物质运转效果随密度增加而增加。

总之,高质量的群体是水稻高产的前提,而栽培密度是调控产量形成的一种重要手段。在本试

验中,密度过高或过低均不利于产量的形成,而在有限的密度范围内,适当增加密度可以获得高产。与其它处理相比,D₂处理主要是通过增加单位面积有效穗数和抽穗期前后干物质积累量来提高产量,而 D₃处理虽然在单位面积有效穗数不如 D₂处理,但却提高了成穗率和结实率,增加了千粒重,弥补了其单位面积有效穗数较低的不足,导致二者产量差异不明显。上述说明,科学合理的密植不仅能够充分挖掘品种与群体的增产潜力,还可以促进产量构成因素的优势互补与协调发展,最终实现产量的增加。然而,在目前的水稻生产中,基于对环境因素多变、品种更新快以及稻米优质需求等双重或多重因素的考虑,要求在未来的研究过程中应注重目标的可调性和均衡性。

参考文献:

- [1] 杨波,任万军,杨文钰.密度对优化定抛水稻产量和群体质量的影响[J].杂交水稻,2006,21(5):64-68
- [2] 潘圣刚,黄胜奇,江洋,等.秧龄和栽插密度对水稻生物学特性的影响[J].华北农学报,2011,26(3):134-138.
- [3] 徐春梅,王丹英,邵国胜,等.施氮量和栽插密度对超高产水稻中早 22 产量和品质的影响[J].中国水稻科学,2008,22(5):507-512.
- [4] 周兴涛,张洪程,许轲,等.不同类型钵苗摆栽密度对粳型超级稻产量及光合物质生产特征的影响[J].中国农业科学,2013,46(17):3545-3561.
- [5] 朱聪聪,张洪程,郭保卫,等.钵苗机插密度对不同类型水稻产量及光合物质生产特性的影响[J].作物学报,2014,40(1):122-133.
- [6] 许俊伟,孟天瑶,荆培培,等.机插密度对不同类型水稻抗倒伏能力及产量的影响[J].作物学报,2015,41(11):1767-1776.
- [7] 王建,许蓓蓓,丁艳锋,等.种植密度对粳稻群体内部生态因子的影响[J].南京农业大学学报,2016,39(1):1-9.
- [8] 蒋鹏,熊洪,张林,等.不同生态条件下施氮量和移栽密度对杂交稻旌优 127 产量及稻米品质的影响[J].核农学报,2017,31(10):2007-2015.
- [9] 王海月,殷尧翥,孙永健,等.不同株距和缓释氮肥配施量下机插杂交稻的产量及光合特性[J].植物营养与肥料学报,2017,23(4):843-855.
- [10] 赵黎明.寒地水稻产量形成及灌水方式和种植密度调控影响[D].哈尔滨:东北农业大学,2015.
- [11] 施伏芝,苏泽胜,罗志祥,等.不同茎蘖苗和栽插密度对协优 57 产量及其主要经济性状的影响[J].安徽农业科学,2001,29(4):439-440,446.

- [12] 孙永健,陈宇,孙园园,等.不同施氮量和栽插密度下三角形强化栽培杂交稻抗倒伏性与群体质量的关系[J].中国水稻科学,2012,26(2):189-196.
- [13] 滕飞,李传友,陈惠哲,等.机插密度对杂交稻干物质积累及产量形成的影响[J].中国农业大学学报,2016,21(3):1-7.
- [14] 李杰,张洪程,龚金龙,等.不同种植方式对超级稻植株抗倒伏能力的影响[J].中国农业科学,2011,44(11):2234-2243.
- [15] 许俊伟,孟天瑶,荆培培,等.机插密度对不同类型水稻抗倒伏能力及产量的影响[J].作物学报,2015,41(11):1767-1776.
- [16] 吴建平,陈少愚,李阳,等.栽植密度和播期对水稻广两优5号产量形成的影响[J].湖北农业科学,2015,54(24):6157-6160.
- [17] 刘怀珍,黄庆,陆秀明,等.插植密度与插植苗数对超级稻产量和抗倒力的影响[J].中国稻米,2013,19(4):91-93,100.
- [18] 周江明,赵琳,董越勇,等.氮肥和栽植密度对水稻产量及氮肥利用率的影响[J].植物营养与肥料学报,2010,16(2):274-281.
- [19] 张江林,侯文峰,鲁剑巍,等.不同施氮量和移栽密度对水稻产量及灌浆特性的影响[J].中国农业科技导报,2017,19(2):75-85.
- [20] 郎有忠,王美娥,吕川根,等.水稻叶片形态、群体结构和产量对种植密度的响应[J].江苏农业学报,2012,28(1):7-11.
- [21] Rohacek K,Bartak M. Technique of the modulated chlorophyll fluorescence: basic concepts, useful parameters, and some applications [J]. Photosynthetica, 1999, 37(3):339-363.
- [22] 丁国华,杨光,白良明,等.插秧密度与苗数对不同分蘖类型寒地水稻群体构成的影响[J].华北农学报,2015,30(6):146-152.
- [23] 李宗新,陈源泉,王庆成,等.密植条件下种植方式对夏玉米群体根冠特性及产量的影响[J].生态学报,2012(23):7391-7401.
- [24] 潘圣刚,黄胜奇,江洋,等.秧龄和栽插密度对水稻生物学特性的影响[J].华北农学报,2011,26(3):134-138.
- [25] 葛均筑.气象资源特性对玉米产量形成的影响及长江中游玉米高产关键技术研究[D].武汉:华中农业大学,2015.
- [26] 龙文飞,傅志强,钟娟,等.节水灌溉条件下氮密互作对双季晚稻丰源优299物质生产特性的影响[J].华北农学报,2017,32(2):185-193.
- [27] 李静.2种生态条件下栽培密度对水稻干物质积累与转运的影响[J].西南农业学报,2016,29(7):1559-1565.
- [28] 陈海飞,冯洋,蔡红梅,等.氮肥与移栽密度互作对低产田水稻群体结构及产量的影响[J].植物营养与肥料学报,2014,20(6):1319-1328.

Effects of Different Densities on Rice Yield and Photosynthetic Substance Production in Cold Region

ZHAO Li-ming, GU Chun-mei, WANG Shi-qiang, WANG Li-ping, WANG He, NA Yong-guang, XIE Bao-sheng

(Rice Research Institute of Heilongjiang Academy of Land Reclamation Sciences, Jiamusi 154007, China)

Abstract: In order to clarify the effect of different density on the yield formation process of rice in cold area, the experiment was carried out in the land for growing field crops, and took 'Kongyu131' as the experimental material. The spacing between rows and plants was 308 cm(D_1), 30 cm \times 10 cm(D_2), 30 cm \times 12 cm(D_3), 30 cm \times 14 cm(D_4) and 30 cm \times 16 cm(D_5), respectively. The effects of density on rice yield and photosynthetic substance production were analyzed. The results showed that compared with D_1 and D_5 treatments, D_2 and D_3 treatments significantly increased the yield, achieving 13.5%-14.6% and 9.5%-10.4% yield increments, respectively. The effect of D_2 treatment was the best. The way to increase yield was to increase effective panicles per unit area and leaf area index before and after heading, increase dry matter accumulation and biomass before and after heading, and enhance dry matter production and transport capacity of stem and sheath during heading. Comprehensive analysis showed that proper dense planting could increase yield and promote photosynthetic material production.

Keywords: rice in cold region; density; yield; photosynthetic substance