植物营养与肥料学报 2011,17(4):773-781
Plant Nutrition and Fertilizer Science

两种生态条件下氮素调控对不同栽培方式水稻干物质积累和产量的影响

李旭毅,孙永健,程洪彪,郑宏祯,刘树金,胡 蓉,马 均*
(四川农业大学水稻研究所,四川温江 611130)

摘要:以Ⅱ优498水稻为试材,在温江和汉源两种生态条件下,研究了不同施氮量及氮肥运筹方式对宽窄行、三角形、扩行减株稀植和抛秧栽培4种栽培方式水稻干物质积累、产量及其构成因素的影响。结果表明,各栽培方式在两地最佳施氮量均为N 180 kg/hm^2。在此施氮量下,宽窄行和三角形栽培氮肥运筹措施以基肥∶蘖肥∶穗肥比例为6∶3∶1最佳,扩行减株稀植栽培方式以5∶2∶3最佳,抛秧栽培温江点和汉源点分别为4∶1∶5和5∶2∶3最佳。不同栽培方式在温江点均可通过适宜的氮肥调控,提高群体颖花量和生物产量而获得高产;汉源点三角形栽培通过适宜的氮肥调控措施不仅生物产量极显著提高,还维持了较高的收获指数(HI),增产潜力显著高于其他栽培方式。此外,宽窄行栽培较扩行减株稀植栽培具有一定的边际效应,生态条件和氮肥调控措施的改变对其物质积累和产量的影响与后期群体大小和温光条件有关;抛秧栽培抽穗前干物质生产优势明显,在不同生态条件下采取适宜的氮肥后移措施来提高其抽穗后的干物质积累是其高产的关键。

关键词:水稻;生态条件;栽培方式;氮素调控;干物质积累;产量
中图分类号:S511.062;S162.5$^+$1　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1008-505X(2011)04-0773-09

Effects of nitrogen regulation on dry matter accumulation and grain yield of rice under different cultivation models and two kinds of ecological conditions

LI Xu-yi, SUN Yong-jian, CHENG Hong-biao, ZHENG Hong-zhen, LIU Shu-jin, HU Rong, MA Jun*
(*Institute of Rice Research, Sichuan Agricultural University, Wenjiang, Sichuan 611130, China*)

Abstract: The effects of nitrogen regulation on dry matter accumulation, grain yield and its components under different cultivations were studied in Wenjiang(WJ) and Hanyuan(HY) by using hybrid rice, Ⅱ-you 498. The cultivation models were wide-narrow row spacing cultivation, triangle cultivation, sparse planting by expanding spacing and reducing plant space, and scattered planting cultivation. The result indicates that the 180 kg/ha of nitrogen application is the optimum amount for all cultivation models. When the total nitrogen application amount is 180 kg/ha, the rational ratio of nitrogen application at the transplanting stage, tillering stage and booting stage is 6∶3∶1 under the wide-narrow row spacing cultivation and triangle cultivation, and is 5∶2∶3 under sparse planting by expanding spacing and reducing plant space. The ratios are 4∶1∶5 and 5∶2∶3 under scattered planting cultivation in WJ and HY, respectively. Each cultivation model is cable of obtaining high yield by increasing population spikelets and biomass yield under suitable nitrogen regulation in WJ. In HY, the biomass yield is significantly increased in the triangle cultivation under suitable nitrogen regulation, and the harvest index (HI) is high as well, so its potential yield is higher than those of other cultivation models. Compared to the sparse planting by expanding spacing and reducing plant space, the wide-narrow row spacing cultivation has a certain degree marginal effect, the effects of ecological condition and nitrogen regulation on dry matter accumulation and grain yield depend on crop population sizes at the late stage and conditions of temperature and light. The scattered planting cultivation has a

收稿日期:2010-11-29　　**接受日期**:2011-03-01
基金项目:国家粮食丰产科技工程(2011BAD16B05);四川省农业产业体系建设项目;四川省教育厅资助科研项目(102A047)资助。
作者简介:李旭毅(1981—),男,四川成都人,博士,主要从事水稻栽培研究。E-mail:lixuyi_2005@sohu.com
* 通讯作者 E-mail:majunp2002@163.com

great advantage in dry matter production before the heading stage, so increasing dry matter accumulation after the heading is key to get high grain yield by suitable postponing nitrogen measures under different ecological conditions.
Key word: rice; ecological condition; cultivation model; nitrogen regulation; dry matter accumulation; grain yield

最大限度地挖掘作物品种的遗传潜力和提高栽培管理技术水平一直是农业上研究的重点[1]。水稻是人类重要的粮食作物[2]。在中国,水稻高产、超高产研究备受重视[3-6]。前人对不同水稻品种高产、超高产水稻物质生产、产量形成以及生态适应性研究甚多[7-11],并且普遍认为库容量大、生物产量高是高产水稻的基本特征;而在抽穗前后干物质积累、收获指数及其与产量的关系等方面的结论不尽一致。生态条件和栽培技术体系的差异可能是其中的两个重要原因,因此不同生态条件下栽培因素对水稻高产、超高产的影响尚待进一步研究。宽窄行栽培、三角形栽培、扩行减株稀植栽培及抛秧栽培作为四川水稻的主要模式,在产量形成上各有鲜明特点[12-15],而氮素对水稻生长发育影响最为活跃[16],氮肥施用量及氮肥运筹方式对水稻产量影响很大[14,17-19],但这几种栽培方式在不同氮素调控下的干物质积累和产量的差异尚未见报道。温江位于四川盆地,生态条件特点是光照不足、温差小、湿度大,水稻生长中后期常有阴雨天气,严重制约了水稻产量的提高;汉源地处四川西南山区,光照资源丰富,其水稻产量可达 15 t/hm^2,两个地区的光热资源差异造成水稻生产潜力差异很大[20]。因此,研究温江和汉源两地氮素调控对各栽培方式干物质积累和产量的影响,有利于了解不同栽培方式生态适应性及氮素调控方法,对充分发掘水稻品种的产量潜力,实现水稻大面积稳产、高产具有重要意义。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验于2009～2010年分别于四川成都市温江区四川农业大学水稻研究所试验田和四川汉源县九襄镇大庄村进行,供试品种为杂交稻Ⅱ优498。温江和汉源两地两年前茬均为大蒜,土壤类型为砂壤土,土壤养分含量及气象资料见表1。

表1 不同年份温江和汉源供试土壤养分含量和气象资料

Table 1 Nutrient contents of soil and meteorological data from March to September in Wenjiang(WJ) and Hanyuan(HY) in different years

年份 Year	地点 Location	土壤养分含量 Nutrient contents of soil							3～9月气象资料 Meteorological data from Mar. to Sep.				
		有机质 OM	全氮 TN	全磷 TP	全钾 TK	速效氮 AN	速效磷 AP	速效钾 AK	海拔 Altitude	气温 Avg. temp.	日照 Light time	太阳辐射 GSR	雨量 Precip.
		(g/kg)				(mg/kg)			(m)	(℃)	(h)	(J/m)	(mm)
2009	温江 WJ	23.82	1.69	0.231	15.32	95.47	62.31	43.18	530	21.8	598	2575	597.6
	汉源 HY	19.47	1.58	0.315	12.32	93.26	71.03	37.26	1000	22.2	918	3629	599.3
2010	温江 WJ	26.99	1.56	0.246	13.51	97.31	60.95	49.97	530	20.1	360	2253	9316
	汉源 HY	21.56	1.73	0.260	14.04	103.19	65.68	42.76	1000	19.8	673	3015	739

注(Note): OM—Organic matter; TN—Total nitrogen; TP—Total phosphorus; TK—Total potassium; AN—Available nitrogen; AP—Available phosphorus; AK—Available potassium; GSR—Gross solar radiation

试验采用二因素裂区设计。试验Ⅰ于2009年进行,以施氮量为主区,设施N 120、180、240 kg/hm^2(分别用N_{120}、N_{180}、N_{240}表示),底肥、分蘖肥、穗肥施用比例均为6∶3∶1;试验Ⅱ于2010年进行,氮肥运筹方式为主区,设底、蘖、穗肥比例分别为6∶3∶1、5∶2∶3、4∶1∶5(分别用N_1、N_2、N_3表示),氮肥用量均为N 180 kg/hm^2。两个试验均以栽培方式为副区,设4种栽培方式,即宽窄行栽培(A_1):插栽密度为18×10^{4}株/hm^2,插栽规格为(40+26.7)cm×16.7 cm。三角形栽培(A_2):插栽密度18.75×10^{4}株/hm^2,插栽规格为40 cm×40 cm,排行错窝,每穴按三角形栽3株,穴内三株株距10 cm。扩行减株稀植栽培(A_3):插栽密度为18×10^{4}株/hm^2,插栽规格为33.3 cm×16.7 cm。抛秧栽培(A_4):抛栽密度为18×10^{4}株/hm^2。小区面积15.0 m^2,3次重复,小区间间隔30 cm,重复间间隔50 cm,小区间作埂覆膜。

2009 年温江点播种、移栽和收获日期分别为 4 月 8 日、5 月 15 日和 9 月 7 日；汉源点分别为 3 月 26 日、5 月 4 日和 9 月 21 日；2010 年温江点分别为 4 月 2 日、5 月 11 日和 9 月 7 日，汉源点分别为 3 月 25 日、5 月 9 日和 9 月 16 日。试验Ⅰ和Ⅱ氮、磷、钾配比 2∶1∶2，磷肥全做底肥，钾肥底、穗肥比例 2∶1，分蘖肥于移栽后 7 d 施用，穗肥于拔节后 15 d 施用。A_1、A_2、A_3 处理均为常规插栽，A_4 处理移栽时带土抛栽；A_1、A_3、A_4 处理无效分蘖期以前保持 2 ～ 3 cm 水层淹水灌溉，无效分蘖期排水晒田，穗分化期淹水 3 cm 左右，抽穗后干湿交替灌溉。A_2 处理从移栽至拔节期水分管理为灌水 1 cm 左右，让其自然落干至田间无水层后再灌水 1 cm 左右（即从拔节至抽穗期，田间保持 1 ～ 2 cm 水层，以后干湿交替灌溉至成熟前 7 d 排干水）。其余田间管理措施各处理均保持一致。

1.2　取样与测定方法

分别于抽穗期和成熟期，每小区选取有代表性植株 5 株烘干称重，测定植株干物质重。成熟期每小区调查 30 株计算单位面积穗数，并取接近于平均穗数的植株 5 株，考查穗粒数、结实率、千粒重等产量构成因素。收获时除去四周杂株按实收面积计产。

试验数据用 DPS 软件进行方差分析，平均数用 LSD 法进行多重比较。

2　结果与分析

2.1　不同氮素调控下各栽培方式的产量及其性状

汉源点不同施氮量和氮肥运筹方式下水稻平均产量达 12.62 和 12.43 t/hm^2，较温江点高 41.99% 和 28.65%，差异达极显著水平，且以 N_{180} 和 N_2 处理为最高（表 2、表 3）。栽培方式受生态条件和氮素调控措施的影响显著，表现出随施氮量的增加各栽培方式水稻产量呈先升高后降低趋势，其中以 A_2 处理 N_{180} 下产量优势尤为突出。随氮肥后移程度的增加，温江点 A_1、A_2 处理产量呈下降趋势，A_3 处理是先增加后降低，A_4 处理则呈增加趋势；而汉源点则是 A_2 处理产量下降，A_1、A_3 和 A_4 处理先增后降。N_1 处理下，A_2 产量显著高于其他栽培方式处理，而 A_3 和 A_4 处理分别在 N_2 和 N_3 处理下较其他栽培方式处理产量优势明显。可见，不同的生态区域各栽培方式高产的实现有其适宜的氮素调控措施。

表 2、表 3 还看出，汉源点水稻各产量性状较温江点有不同程度的提高。随施氮量增加，单位面积颖花量先升后降，单位面积穗数有不同程度的提高，结实率则有不同程度的降低，每穗粒数温江点呈减少趋势，而汉源点则表现为先增后减，千粒重无显著变化；随氮肥后移程度的增加，两地水稻的穗数和群体颖花量不断下降，但每穗粒数、结实率和千粒重有不同程度的提高。从不同施氮量下各栽培方式的产量性状看，在温江点 A_1、A_2 处理单位面积穗数虽然低于 A_3、A_4 处理，但每穗粒数显著高于后者，最终各栽培方式群体颖花量无显著差异；但由于前者结实率提高，因而 A_1、A_2 处理平均产量显著高于 A_3、A_4 处理。在汉源点 A_2 处理单位面积穗数、每穗粒数以及群体颖花量均显著高于其他栽培方式，各栽培方式间结实率无显著差异。不同氮肥运筹方式下对各栽培方式的产量性状分析可知，A_4 处理单位面积穗数显著高于其他栽培方式，每穗粒数表现为 $A_2 > A_3 > A_1 > A_4$ 处理，栽培方式间群体颖花量和结实率与氮肥运筹方式间互作效应达极显著水平。各栽培方式群体颖花量 N_1 处理下表现为 A_1、A_2 高于 A_3、A_4 处理，N_2 和 N_3 处理下则相反；结实率则 N_1 处理下表现为 A_1、A_2 高于 A_3、A_4 处理，N_2 处理下表现为 A_2、A_3、A_4 显著高于 A_1 处理，N_3 处理下各栽培方式间无显著性差异。

2.2　产量构成因子对产量形成的影响

相关分析表明（表 4），两地的每穗粒数均与产量极显著正相关（$r > r_{0.01,67}$），而温江和汉源两地的单位面积穗数与产量分别呈显著负相关和极显著正相关（$r > r_{0.01,67}$）；此外，温江点结实率和产量的正相关关系也达极显著（$r > r_{0.01,67}$）水平。通径分析看出，温江点结实率对产量的贡献最大，其次是每穗粒数；而汉源点每穗粒数对产量的贡献最大，其次为单位面积穗数。可见，温江点为实现高产可适当降低单位面积穗数，以提高每穗粒数从而保证较高的群体颖花数，且以提高结实率尤为重要；而汉源点高产的关键是以足穗大穗形成高群体颖花量。

2.3　不同氮素调控措施下各栽培方式的干物质生产

由表 5 可知，汉源点抽穗前、后干物质积累量及生物产量均高于温江点，但两地间收获指数（HI）差异甚小。抽穗前干物质积累量随施氮量的减少或氮肥后移程度的增加呈降低趋势；抽穗后干物质积累量不同，施氮量间以 N_{180} 处理为最高。不同氮肥运筹方式间 N_2 和 N_3 处理在两地间互有高低，但均不同程度地高于 N_1 处理。不同施氮量间生物产量以 N_{180} 最高，不同氮肥运筹方式间表现为 N_1、N_2 均显著高于 N_3 处理；收获指数则随施氮量的减少和氮肥后移程度的增加而略有提高。

表2 温江和汉源两地不同施氮量下各栽培方式的水稻产量及其构成因素(2009)

Table 2 The grain yield and its components of different cultivation models under different nitrogen application rates in Wenjiang(WJ) and Hanyuan(HY)

地点 Location	施氮量 N rate	栽培方式 Cultivation model	产量 Yield (t/hm^2)	颖花量 Spikelets ($\times10^6$/hm^2)	穗数 Panicles ($\times10^4$/hm^2)	穗粒数 Grains (No./panicle)	结实率 Seed setting rate (%)	千粒重 1000-grain wt. (g)
温江 WJ	N_{120}	A_1	8.71 cde	355.25 def	180.87 i	196.71 ab	85.27 a	29.13 ab
		A_2	8.59 cdef	346.19 ef	182.08 hi	190.30 abc	84.45 ab	29.63 ab
		A_3	8.63 cdef	351.15 def	192.00 fg	183.25 bcde	84.11 ab	29.52 ab
		A_4	8.51 ef	343.65 f	191.24 gh	179.78 cde	83.40 abc	29.75 ab
		平均 Avg.	8.61	349.06	186.55	187.51	84.31	29.51
	N_{180}	A_1	9.38 ab	378.32 abc	202.10 de	187.26 bcd	83.82 abc	29.57 ab
		A_2	9.47 a	389.09 a	192.41 ef	202.40 a	83.33 abc	29.61 ab
		A_3	8.82 cde	371.16 abcd	203.42 d	182.73 cde	81.43 bcd	29.47 ab
		A_4	8.96 bc	380.20 abc	218.00 b	174.43 def	80.91 bcd	29.98 a
		平均 Avg.	9.16	379.69	203.98	186.71	82.37	29.66
	N_{240}	A_1	8.93 cd	388.27 ab	213.72 bc	181.76 cde	80.00 cd	28.76 b
		A_2	8.62 cdef	359.91 cdef	205.72 cd	174.95 def	80.08 cd	29.68 ab
		A_3	8.23 f	365.54 bcdef	214.91 bc	170.01 ef	78.23 d	29.44 ab
		A_4	8.53 def	367.49 abcde	227.80 a	161.49 f	78.19 d	29.52 ab
		平均 Avg.	8.58	370.30	215.54	172.05	79.12	29.35
汉源 HY	N_{120}	A_1	11.67 cde	431.80 de	225.80 bc	191.25 d	88.96 a	30.91 a
		A_2	13.05 b	465.20 bc	236.54 ab	196.66 cd	90.23 a	31.84 a
		A_3	12.54 bc	437.79 de	229.60 abc	190.50 d	88.97 a	31.94 a
		A_4	12.41 bc	419.94 ef	214.80 e	195.59 cd	89.74 a	32.26 a
		平均 Avg.	12.42	438.68	226.69	193.50	89.48	31.74
	N_{180}	A_1	13.15 b	476.22 b	233.20 abc	204.19 bc	89.60 a	31.25 a
		A_2	14.15 a	517.37 a	237.33 ab	218.00 a	88.73 a	31.73 a
		A_3	12.90 b	473.44 b	231.20 abc	204.75 bc	88.98 a	31.25 a
		A_4	12.78 b	455.72 bcd	220.20 de	207.05 b	89.68 a	31.73 a
		平均 Avg.	13.24	480.69	230.48	208.50	89.25	31.49
	N_{240}	A_1	12.13 bcd	444.86 cde	234.93 ab	189.39 d	89.14 a	31.57 a
		A_2	12.37 bc	464.49 bc	243.33 a	190.90 d	88.49 a	30.56 a
		A_3	11.15 e	404.07	232.40 abc	174.02 e	89.44 a	31.30 a
		A_4	11.34 de	404.53	228.00 bc	177.40 e	89.44 a	31.32 a
		平均 Avg.	11.75	429.49	234.67	182.93	89.13	31.19
方差分析	Analysis of variance							
温江 WJ	施氮量 N rate (N)		**	**	**	**	*	ns
	栽培方式 Cul. mod. (C)		**	ns	**	**	ns	ns
	N×C		ns	ns	ns	ns	ns	ns
汉源 HY	施氮量 N rate (N)		**	**	*	**	ns	ns
	栽培方式 Cul. mod. (C)		**	**	**	**	ns	ns
	N×C		*	ns	ns	ns	ns	ns

注(Note): A_1—宽窄行栽培 Wide-narrow row spacing cultivation; A_2—三角形栽培 triangle cultivation; A_3—稀植栽培 Sparse planting by expanding spacing and reducing plant space; A_4—抛秧栽培 Scattered planting cultivation. 同列数值后不同字母表示处理间差异达5%显著水平 Values followed by different small letters in the same column indicate significant among treatments at 5% level. *— $P<0.05$; **— $P<0.01$; ns—No significant.

表 3　温江和和汉源两地不同氮肥运筹方式下各栽培方式的水稻产量及其构成因素(2010)

Table 3　The grain yield and its components of different cultivation models under different nitrogen fertilizer operations in Wenjiang(WJ) and Hanyuan(HY)

地点 Location	氮肥运筹方式 N appl. mod.	栽培方式 Cultivation model	产量 Yield (t/hm^2)	颖花量 Spikelets ($\times10^6$/hm^2)	穗数 Panicles ($\times10^4$/hm^2)	穗粒数 Grains (No./panicle)	结实率 Seed setting rate (%)	千粒重 1000-grain wt. (g)
温江 WJ	N_1	A_1	9.93 bc	371.61 ab	200.53 abc	185.34 abc	89.10 cde	29.55 b
		A_2	10.53 a	388.41 a	197.93 bc	196.25 a	89.42 bcde	29.98 ab
		A_3	8.97 ef	342.30 cd	199.83 abc	171.45 cd	87.43 de	29.55 b
		A_4	8.80 f	340.68 cd	213.07 a	159.87 d	87.20 e	29.58 b
		平均 Avg.	9.56	360.75	202.84	178.23	88.29	29.67
	N_2	A_1	9.47 cde	353.94 bcd	187.80 cde	189.43 abc	89.90 abcd	29.56 b
		A_2	9.83 bcd	354.90 bcd	180.60 def	196.52 a	91.08 abc	30.02 ab
		A_3	10.27 ab	370.54 ab	189.30 cd	195.92 a	91.48 abc	29.88 ab
		A_4	9.87 bcd	358.14 bcd	202.80 ab	176.83 bcd	92.02 ab	29.87 ab
		平均 Avg.	9.86	359.38	190.13	189.68	91.12	29.83
	N_3	A_1	9.20 ef	335.72 d	174.90 ef	191.83 ab	91.60 abc	29.94 ab
		A_2	9.30 def	342.65 cd	173.53 f	197.85 a	92.15 a	30.11 ab
		A_3	9.53 cde	345.95 bcd	175.50 ef	197.04 a	92.19 a	30.43 a
		A_4	10.27 ab	363.28 abc	193.20 bcd	188.59 abc	92.26 a	30.26 ab
		平均 Avg.	9.58	346.90	179.28	193.83	92.05	30.19
汉源 HY	N_1	A_1	12.21 cde	424.37 bc	232.20 bcd	182.81 def	93.11 b	30.61 abcd
		A_2	13.99 a	483.22 a	248.53 a	194.45 abc	94.05 ab	30.69 abcd
		A_3	12.15 de	438.14 bc	236.50 bc	185.19 cde	90.88 c	30.27 cd
		A_4	12.04 e	430.43 bc	248.73 a	173.01 f	91.63 c	30.07 d
		平均 Avg.	12.60	444.04	241.49	183.87	92.42	30.41
	N_2	A_1	12.51 bcd	427.64 bc	226.50 de	188.83 bcde	93.36 ab	30.45 bcd
		A_2	12.71 bcd	431.98 bc	220.10 ef	196.23 ab	94.12 ab	30.94 ab
		A_3	13.02 b	443.73 b	231.73 bcd	191.56 abcde	93.64 ab	31.07 ab
		A_4	12.75 bc	436.99 bc	240.17 ab	182.01 ef	93.32 ab	30.51 abcd
		平均 Avg.	12.75	435.08	229.63	189.66	93.61	30.74
	N_3	A_1	12.05 e	413.50 cd	215.07 f	192.16 abcd	93.74 ab	31.12 a
		A_2	11.36 f	392.68 d	196.77 f	199.67 a	94.19 ab	30.52 abcd
		A_3	12.06 e	414.22 cd	216.07 f	191.73 abcde	94.19 ab	30.81 abc
		A_4	12.34 cde	423.32 bc	227.77 cde	185.92 cde	94.44 a	31.09 ab
		平均 Avg.	11.95	410.93	213.92	192.37	94.14	30.89
方差分析 Analysis of variance								
温江 WJ	氮肥运筹方式 N appl. mod.(N)		ns	*	**	**	**	ns
	栽培方式 Cul. mod.(C)		ns	ns	**	**	ns	ns
	N×C		**	*	ns	ns	**	ns
汉源 HY	氮肥运筹方式 N appl. mod.(N)		*	**	**	*	*	ns
	栽培方式 Cul. mod.(C)		*	ns	**	**	**	ns
	N×C		**	*	**	ns	**	ns

注(Note)：N_1—底、蘖、穗肥比例为 6∶3∶1 The ratio of N at the transplanting stage, tillering stage and booting stage is 6∶3∶1；N_2—底、蘖、穗肥比例为 5∶2∶3 The ratio of N at the transplanting stage, tillering stage and booting stage is 5∶2∶3；N_3—底、蘖、穗肥比例为 4∶1∶5 The ratio of N at the transplanting stage, tillering stage and booting stage is 4∶1∶5. A_1—宽窄行栽培 Wide-narrow row spacing cultivation；A_2—三角形栽培 Triangle cultivation；A_3—稀植栽培 Sparse planting by expanding spacing and reducing plant space；A_4—抛秧栽培 Scattered planting cultivation. 同列中不同字母表示处理间差异达 5% 显著水平 Different small letters in the same column indicate significant among treatments at 5% level. *—$P<0.05$；**—$P<0.01$；ns—No significant.

表4 产量性状(x)对产量(y)的作用

Table 4 The contribution of yield components(x) to grain yield(y)

地点 Location	产量性状 Yield components	相关系数 Correlation coefficient(r)				通径系数 Path coefficient($P_{i\to y}$)						贡献率 CR
		y	x_1	x_2	x_3	直接作用 DE	间接作用 Indirect effect					
							总和 Total	$x_1\to y$	$x_2\to y$	$x_3\to y$	$x_4\to y$	$P_{i\to y}\cdot r_{iy}$
温江	x_1	−0.253*				0.886	−1.139		−0.624	−0.514	−0.001	0.224
WJ	x_2	0.476**	−0.756**			0.826	−0.350	−0.670		0.319	0.001	0.393
	x_3	0.675**	−0.578**	0.359**		0.889	−0.214	−0.512	0.296		0.002	0.600
	x_4	0.229	−0.268*	0.176	0.356**	0.004	0.225	−0.237	0.145	0.316		0.001
汉源	x_1	0.372**				0.725	−0.354		−0.172	−0.122	−0.060	0.269
HY	x_2	0.600**	−0.231			0.746	−0.146	−0.167		−0.071	0.092	0.447
	x_3	0.044	−0.268*	−0.156		0.455	−0.410	−0.194	−0.116		−0.100	0.020
	x_4	0.231	−0.201	0.311**	−0.335**	0.297	−0.066	−0.146	0.232	−0.152		0.069

注(Note): x_1—单位面积穗数 No. of panicles; x_2—每穗粒数 No. of grains per panicle; x_3—结实率 Seed setting rate; x_4—千粒重 1000-grain weight; y—产量 Yield. DE—Direct effect; CR— Contribution rate. * — $P<0.05$; ** — $P<0.01$.

从各栽培方式干物质生产看,抽穗前干物质积累量以 A_4 处理为最高; 抽穗后干物质积累量在不同施氮量下表现为 $A_2 > A_1 > A_3 > A_4$ 处理。不同氮肥运筹方式下温江点以 N_3 下 A_4 处理最高,汉源点以 N_2 下 A_3 处理最高; 生物产量在不同施氮量和氮肥运筹方式下分别以 N_{180} 下 A_2 处理和 N_1 下 A_2 处理最高。不同施氮量下在温江点栽培方式间收获指数无显著差异; 汉源点 A_2 处理收获指数显著高于其他栽培方式。不同氮肥运筹方式下两地间收获指数表现为 A_1、A_2 和 A_3 处理间无显著差异,但均显著高于 A_4 处理。

3 讨论

3.1 产量及产量性状

许多研究认为,以足量大穗形成高群体颖花量是实现水稻高产的基础[9,11]; 也有的认为,产量水平由高产到超高产,主要是依靠提高有效穗数和增加每穗粒数来扩大库容[21]; 还有的认为,总库容量主要受基因型控制,超级杂交稻总库容量不是高产栽培的限制因子[10]。本试验表明,不同生态条件下,水稻高产的实现途径有所不同。温江的气候特点是"寡日照、高湿度、小温差",单位面积水稻容穗量有限,应适当降低单位面积穗数以提高每穗粒数,保证足量的群体颖花量和较高的结实率而实现高产; 汉源的气候特点是光照充足、昼夜温差大、湿度较小,单位面积容穗量较大,故而其实现高产的关键是足穗大穗。

有研究表明,施氮量和氮肥运筹方式对水稻产量及产量性状影响很大[16-19]。本试验看出,宽窄行栽培方式具有一定的边际效应,当温光条件较差时,其每穗粒数和结实率随氮素调控方式的改变比扩行减株稀植栽培变幅小,二者虽然单位面积穗数相近,但宽窄行栽培群体颖花量和结实率更高; 而在温光条件优越的汉源点此差异有所弱化,表明宽窄行栽培边际效应增产作用的体现可能不仅与后期群体大小有关,还与温光条件有关。三角形栽培在温光条件较差时每穗粒数和结实率在各栽培方式中相对较高,但存在有效穗不足的问题,当温光条件改善时有效穗数大幅提高,适宜氮素调控措施下其群体颖花量的优势凸显,增产潜力高于其他栽培方式。抛秧栽培在温江和汉源两地不同施氮量下分别表现为群体颖花量不足和结实率降低,导致其产量在各栽培方式中相对较低,而氮肥后移是解决其群体颖花量不足和结实率较低的关键。

结果表明,在两地不同栽培方式的最佳施氮量均为 N 180 kg/hm^2。该施用量下,温江点表现为宽窄行栽培和三角形栽培水稻产量显著高于其他栽培方式; 而汉源点则表现为三角形栽培水稻产量显著高于其他栽培方式。宽窄行栽培和三角形栽培最佳氮肥施用比例为 6∶3∶1,扩行减株稀植栽培最佳氮肥施用比例为 5∶2∶3,抛秧栽培在温江点最佳氮肥施用比例为 4∶1∶5,汉源点最佳氮肥施用比例为 5∶2∶3。温江点各栽培方式通过适宜的氮肥运筹方式,均能在本试验条件下达到高产; 汉源点三角形栽培在氮肥施用比例为 6∶3∶1 时增产潜力显著高于其他栽培方式。

表 5　温江和和汉源两地不同氮素调控措施下各栽培方式的水稻干物质积累

Table 5　The dry matter accumulation of different cultivation models under different nitrogen regulations in Wenjiang and Hanyuan

氮素调控措施 Nitrogen regulation		栽培方式 Cultivation model	温江 Wenjiang 干物质积累量(t/hm²) Dry matter accum. 抽穗前 BH	温江 Wenjiang 干物质积累量(t/hm²) Dry matter accum. 抽穗后 AH	温江 Wenjiang 生物量 Biomass (t/hm²)	温江 Wenjiang 收获指数 HI	汉源 Hanyuan 干物质积累量(t/hm²) Dry matter accum. 抽穗前 BH	汉源 Hanyuan 干物质积累量(t/hm²) Dry matter accum. 抽穗后 AH	汉源 Hanyuan 生物量 Biomass (t/hm²)	汉源 Hanyuan 收获指数 HI
施氮量 Nitrogen rate	N_{120}	A_1	13.11 de	4.21 bcd	17.32 cde	0.50 abc	16.88 ef	6.45 bc	23.33 ef	0.50 abc
		A_2	11.01 f	5.10 ab	16.11 e	0.53 a	17.02 def	7.94 a	24.96 bc	0.52 a
		A_3	12.12 ef	4.35 abc	16.46 e	0.53 ab	16.57 f	7.67 ab	24.24 cd	0.52 a
		A_4	14.86 abc	2.20 f	17.05 de	0.50 abc	17.96 bcd	6.13 cd	24.09 de	0.51 a
		平均 Avg.	12.77	3.96	16.74	0.52	17.11	7.05	24.16	0.51
	N_{180}	A_1	15.13 abc	4.44 abc	19.58 a	0.48 c	17.57 cde	8.71 a	26.29 a	0.50 abc
		A_2	14.14 abcd	5.63 a	19.76 a	0.48 c	17.91 bcd	8.73 a	26.63 a	0.53 a
		A_3	13.08 de	4.19 bcd	17.28 cde	0.51 abc	17.49 cdef	7.71 ab	25.20 b	0.51 ab
		A_4	15.23 ab	3.32 cdef	18.55 abc	0.48 bc	18.69 ab	6.47 bc	25.16 b	0.51 abc
		平均 Avg.	14.40	4.40	18.79	0.49	17.92	7.90	25.82	0.51
	N_{240}	A_1	14.93 abc	3.97 bcde	18.90 ab	0.47 c	18.28 abc	5.60 cde	23.88 def	0.51 abc
		A_2	13.64 cde	4.78 ab	18.41 abc	0.47 c	18.44 abc	5.47 cde	23.91 def	0.52 a
		A_3	13.73 bcd	2.93 def	16.66 e	0.50 abc	18.23 abc	4.96 de	23.19 f	0.48 bc
		A_4	15.48 a	2.70 ef	18.18 bcd	0.47 c	19.20 a	4.49 e	23.69 def	0.48 c
		平均 Avg.	14.44	3.60	18.04	0.48	18.54	5.13	23.67	0.50
氮肥运筹方式 Nitrogen application model	N_1	A_1	14.37 b	5.45 d	19.82 a	0.50 abc	15.85 bc	8.67 bc	24.52 de	0.50 abc
		A_2	14.10 b	5.94 bcd	20.04 a	0.52 ab	17.66 a	9.42 b	27.07 a	0.52 ab
		A_3	14.19 b	3.74 e	17.94 cd	0.50 abc	15.56 c	8.91 bc	24.46 de	0.50 abc
		A_4	15.46 a	3.34 e	18.79 b	0.47 c	17.26 a	8.19 c	25.45 bc	0.48 c
		平均 Avg.	14.53	4.62	19.15	0.50	16.58	8.80	25.38	0.50
	N_2	A_1	13.31 c	5.21 d	18.52 bc	0.51 ab	14.60 e	9.42 b	24.02 ef	0.52 a
		A_2	13.07 c	5.59 cd	18.65 b	0.53 ab	15.28 cd	9.66 b	24.94 cd	0.51 ab
		A_3	13.10 c	6.70 ab	19.80 a	0.52 ab	14.68 de	10.87 a	25.46 bc	0.51 ab
		A_4	14.30 b	5.52 d	19.82 a	0.50 bc	16.28 b	9.63 b	25.91 b	0.49 bc
		平均 Avg.	13.44	5.75	19.20	0.51	15.21	9.89	25.08	0.51
	N_3	A_1	12.16 de	5.19 d	17.35 d	0.53 ab	13.80 f	9.56 b	23.02 g	0.52 a
		A_2	12.03 ef	5.49 d	17.52 d	0.53 ab	12.78 g	8.89 bc	21.67 h	0.52 a
		A_3	11.46 f	6.36 abc	17.82 d	0.54 a	13.90 f	9.54 b	23.44 fg	0.51 ab
		A_4	12.79 cd	7.14 a	19.94 a	0.52 ab	14.61 e	9.48 b	23.97 ef	0.51 ab
		平均 Avg.	12.11	6.05	18.16	0.53	13.77	9.37	23.03	0.52

注(Note)：N_1—底、蘖、穗肥比例为 6∶3∶1 The ratio of N at the transplanting stage, tillering stage and booting stage is 6∶3∶1；N_2—底、蘖、穗肥比例为 5∶2∶3 The ratio of N at the transplanting stage, tillering stage and booting stage is 5∶2∶3；N_3—底、蘖、穗肥比例为 4∶1∶5 The ratio of N at the transplanting stage, tillering stage and booting stage is 4∶1∶5. A_1—宽窄行栽培 Wide-narrow row spacing cultivation；A_2—三角形栽培 triangle cultivation；A_3—稀植栽培 Sparse planting by expanding spacing and reducing plant space；A_4—抛秧栽培 Scattered planting cultivation. 同列数值后不同字母表示处理间差异达 5% 显著水平 Values followed by different small letters in the same column indicate significant among treatments at 5% level. BH—Before heading；AH—After heading；HI—Harvest index.

3.2 干物质积累

有关水稻高产群体抽穗前后的干物质生产特点的研究结论不一。有的认为高产水稻不同生长阶段的干物质生产的比例协调[22],有的认为水稻高产群体干物质生产优势在抽穗前[23-24];而有的则认为是在抽穗后[10,25-27]。本试验表明,各栽培方式干物质生产的表现随温光条件和氮素调控措施的改变各有不同。不同施氮量下,宽窄行栽培相对于扩行减株稀植栽培抽穗前物质生产优势明显,但温光条件改善后此差异减小;而各氮肥运筹方式下,这两种栽培方式抽穗前干物质生产并无显著差异,最终生物产量的差别源于抽穗后。三角形栽培的抽穗后干物质积累量在不同氮肥调控措施下的变幅相对较小,适当提高抽穗前干物质积累量是发掘其生物产量潜力的保证;在温光条件优越的汉源点,通过适宜氮素调控措施不仅生物产量显著提高,还维持了较高水平的收获指数,可能是其在当地增产潜力显著高于其他栽培方式关键原因。抛秧栽培抽穗前干物质生产优势明显,通过氮素调控措施保障其抽穗后的物质生产优势是提高其生物产量的关键。

总之,在温光条件较差的温江点实现高产的在于适当降低单位面积穗数以提高每穗粒数保证足量的群体颖花量和较高的结实率;而温光条件相对优越的汉源点提高群体颖花量的关键是足穗大穗实现高产。因此,在不同生态条件下,各栽培方式高产的实现需配合适宜的氮素调控方式。本试验条件下,在施氮量为 N 180 kg/hm^2 时,宽窄行和三角形栽培的氮肥运筹措施以基肥∶蘖肥∶穗肥比例为 6∶3∶1 为宜,扩行减株稀植栽培方式以 5∶2∶3 的氮肥运筹比例较好,抛秧栽培在温江点和汉源点适宜的氮肥运筹比例分别为 4∶1∶5 和 5∶2∶3。

参考文献:

[1] 凌启鸿,张洪程. 作物栽培学的创新与发展[J]. 扬州大学学报(农业与生命科学版),2002,23(4):66-69.
Ling Q H, Zhang H C. Innovation and development of crop cultivation [J]. J. Yangzhou Univ. (Agric. & Life Sci.), 2002, 23(4): 66-69.

[2] FAO. Statistical databases[M]. Rome: FAO of the United Nations, 2004.

[3] Yuan L P. Hybrid rice breeding in China[A]. Virmani S S, Siddiq A, Muralidharan K. Advances in hybrid rice technology[M]. Philippines: IRRI, 1998. 27-33.

[4] 邹应斌,周上游,唐启源. 中国超级杂交稻高产栽培研究的现状与展望[J]. 中国农业科技导报,2003,5(1):31-35.
Zou Y B, Zhou S Y, Tang Q Y. Status and outlook of high yielding cultivation researches on China super hybrid rice [J]. J. Agric. Sci. Tech., 2003, 5(1): 31-35.

[5] 郑景生,黄育民. 中国稻作超高产的追求与实践[J]. 分子植物育种,2003,1(5/6):585-596.
Zheng J S, Huang Y M. Thrust and practice of super high-yielding rice in China [J]. Mol. Plant Breed. 2003, 1 (5/6): 585-596.

[6] 黄英金,徐正进. 对超级稻研究中几个问题的思考[J]. 中国农业科技导报,2004,6(5):3-7.
Huang Y J, Xu Z J. Consideration of several questions of studies on super rice[J]. J. Agric. Sci. Tech., 2004, 6(5): 3-7.

[7] Ying J, Peng S, He Q, Yang H *et al*. Comparison of high-yield rice in tropical and subtropical environments I. Determinants of grain and dry matter yields [J]. Field Crops Res., 1998, 57: 71-84.

[8] 刘建丰,袁隆平,邓启云,等. 超高产杂交稻的光合特性研究[J]. 中国农业科学,2005,38(2):258-264.
Liu J F, Yuan L P, Deng Q Y *et al*. A study on characteristics of photosynthesis in super high-yielding hybrid rice [J]. Sci. Agric. Sin., 2005, 38(2): 258-264.

[9] 吴文革,张洪程,吴桂成,等. 超级稻群体籽粒库容特征的初步研究[J]. 中国农业科学,2007,40(2):250-257.
Wu W G, Zhang H C, Wu G C *et al*. Preliminary study on super rice population sink characters [J]. Sci. Agric. Sin., 2007, 40(2): 250-257.

[10] 敖和军,王淑红,邹应斌,等. 超级杂交稻干物质生产特点与产量稳定性研究[J]. 中国农业科学,2008,41(7):1927-1936.
Ao H J, Wang S H, Zou Y B *et al*. Study on yield stability and dry matter characteristics of super hybrid rice[J]. Sci. Agric. Sin., 2008, 41(7): 1927-1936.

[11] 杨惠杰,杨仁崔,李义珍,等. 水稻超高产品种的产量潜力及产量构成因素分析[J]. 福建农业学报,2000,15(3):1-8.
Yang H J, Yang R C, Li Y Z *et al*. Yield potential and yield components of super high-yielding rice cultivars[J]. Fujian J. Agric. Sci., 2000, 15 (3): 1-8.

[12] 马均,吕世华,梁南山. 四川水稻强化栽培体系(SRI)的应用研究与示范[A]. 袁隆平,马国辉,张玉烛. 超级杂交水稻强化栽培理论与实践[M]. 长沙:湖南科学技术出版社,2005. 43-52.
Ma J, Lü S H, Liang N S. Demonstration and practical study of system of rice intensification in Sichuan Province [A]. Yuan L P, Ma G H, Zhang Y Z. Theory and practice of the modified system of rice intensification for super hybrid rice [M]. Changsha: Hunan Science and Technology Press, 2005. 43-52.

[13] 龙旭,汪仁全,孙永健,马均. 不同施氮量下三角形强化栽培水稻群体发育与产量形成特征[J]. 中国水稻科学,2010,24(2):162-168.
Long X, Wang R Q, Sun Y J, Ma J. Characteristics of population development and yield formation in planting method of triangle of system of rice intensification under different n application amounts [J]. Chin. J. Rice Sci., 2010, 24(2): 162-168.

[14] 凌启鸿. 作物群体质量[M]. 上海: 上海科学技术出版社,2000.
Ling Q H. Crop population quality [M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 2000.

[15] 张洪程,戴其根,霍中洋,等. 中国抛秧稻作技术体系及其特征[J]. 中国农业科学,2008,41(1): 43-52.
Zhang H C, Dai Q G, Huo Z Y *et al*. Cultivation technical system of rice seedling broadcasting and its characteristics[J]. Sci. Agric. Sin., 2008, 41(1): 43-52.

[16] 张强,万靓军,戴其根,等. 水稻氮素的生物学特征及其高产运筹研究概况[J]. 垦殖与稻作,2004,(5): 41-43.
Zhang Q, Wan L J, Dai Q G *et al*. A review of the nitrogen on biological characteristics and its high produce management in rice [J]. Recl. Rice Cult., 2004, (5): 41-43.

[17] 张耀鸿,张亚丽,黄启为,等. 不同氮肥水平下水稻产量以及氮素吸收、利用的基因型差异比较[J]. 植物营养与肥料学报,2006,12(5): 616-621.
Zhang Y H, Zhang Y L, Huang Q W *et al*. Effects of different nitrogen application rates on grain yields and nitrogen uptake and utilization by different rice cultivar [J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2006, 12(5): 616-621.

[18] 吴文革,张四海,赵决建,等. 氮肥运筹模式对双季稻北缘水稻氮素吸收利用及产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2007,13(5): 757-764.
Wu W G, Zhang S H, Zhao J J *et al*. Nitrogen uptake, utilization and rice yield in the north rimland of double-cropping rice region as affected by different nitrogen management strategies [J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2007, 13(5): 757-764.

[19] 江立庚,曹卫星,甘秀芹,等. 不同施氮水平对南方早稻氮素吸收利用及其产量和品质的影响[J]. 中国农业科学,2004,37(4): 490-496.
Jiang L G, Cao W X, Gan X Q *et al*. Nitrogen uptake and utilization under different nitrogen management and influence on grain yield and quality in rice[J]. Sci. Agric. Sin., 2004, 37(4): 490-496.

[20] 童平,杨世民,马均,等. 不同水稻品种在不同光照条件下的光合特性及干物质积累[J]. 应用生态学报,2008,19(3): 505-511.
Tong P, Yang S M, Ma J *et al*. Photosynthetic characteristics and dry matter accumulation of hybrid rice varieties under different light conditions[J]. Chin. J. Appl. Ecol., 2008, 19(3): 505-511.

[21] 吴桂成,张洪程,钱银飞,等. 粳型超级稻产量构成因素协同规律及超高产特征的研究[J]. 中国农业科学,2010,43(2): 266-276.
Wu G C, Zhang H C, Qian Y F *et al*. Rule of grain yield components from high yield to super high yield and the characters of super-high yielding *Japonica* super rice [J]. Sci. Agric. Sin., 2010, 43(2): 266-276.

[22] 邹应斌,黄见良,屠乃美,等. "旺壮重"栽培对双季杂交稻产量形成及生理特性的影响[J]. 作物学报,2001,27(3): 343-350.
Zou Y B, Huang J L, Tu N M *et al*. Effects of the VSW cultural method on yield formation and physiological characteristics in double cropping hybrid rice[J]. Acta Agron. Sin., 2001, 27(3): 343-350.

[23] 陈温福,徐正进,张龙步. 水稻超高产育种生理基础[M]. 沈阳: 辽宁科学技术出版社,1995. 169-194.
Chen W F, Xu Z J, Zhang L B. Physiological basis of rice breeding for super high yield[M]. Shenyang: Liaoning Science and Technology Press, 1995. 169-194.

[24] 张洪松,岩田忠寿,佐滕勉, 等. 粳型杂交稻与常规稻的物质生产及营养特性的比较[J]. 西南农业学报,1995,8(4): 11-16.
Zhang H S, Tadatoshai I, Sato B *et al*. Comparison of matter production and nutrition characteristics for *Japonica* hybrid rice and convention rice [J]. Southwest China J. Agric. Sci., 1995, 8(4): 11-16.

[25] 朱庆森,张祖建,杨建昌,等. 亚种间杂交稻产量源库特征[J]. 中国农业科学,1997,30(3): 52-59.
Zhu Q S, Zhang Z J, Yang J C *et al*. Source-sink characteristics related to the yield in intersubspecific hybrid rice[J]. Sci. Agric. Sin., 1997, 30(3): 52-59.

[26] 杨惠杰,李义珍,杨仁崔,等. 超高产水稻的干物质生产特性研究[J]. 中国水稻科学,2001,15(4): 265-270.
Yang H J, Li Y Z, Yang R C *et al*. Dry matter production characteristics of super high-yielding rice [J]. Chin. J. Rice Sci., 2001, 15(4): 265-270.

[27] 马均,朱庆森,马文波,等. 重穗型水稻光合作用、物质积累与转运的研究[J]. 中国农业科学,2003,36(4): 375-381.
Ma J, Zhu Q S, Ma W B *et al*. Studies on the photosynthetic characteristics and assimilate's accumulation and transformation in heavy panicle type of rice [J]. Sci. Agric. Sin., 2003, 36(4): 375-381.