

DOI: 10.3724/SP.J.1006.2012.01930

不同生态条件下栽培方式对水稻干物质生产和产量的影响

邓 飞¹ 王 丽¹ 刘 利¹ 刘代银² 任万军^{1,*} 杨文钰^{1,*}

¹ 四川农业大学 / 农业部西南作物生理生态与耕作重点实验室, 四川温江 611130; ² 四川省农业技术推广总站, 四川成都 610041

摘 要: 为明确不同生态条件下栽培方式对水稻干物质生产及产量的影响, 采用随机区组多点试验设计, 研究了不同秧龄和移栽方式对四川仁寿、郫县和雅安生态点水稻干物质积累与分配、茎鞘干物质输出与转化、产量及构成因素的影响。结果表明: (1) 水稻的干物质积累特性为生态条件、秧龄、移栽方式及其互作效应共同作用的结果。水稻单茎和群体干物重均受三者显著主效作用; 生态条件与秧龄互作效应极显著影响分蘖盛期至抽穗期群体干物重, 而生态条件与移栽方式、秧龄与移栽方式及三者互作则主要影响抽穗后水稻单茎和群体干物重。(2) 高产水稻干物质生产特性因生态条件的变化而改变。仁寿的产量主要来自抽穗后光合产物在籽粒中的积累, 与茎鞘物质的输出和转化相关不显著; 在郫县, 茎鞘物质输出和转化对产量贡献大于在仁寿, 产量与孕穗期茎鞘干物质分配比例显著正相关($r = 0.775^*$), 与成熟期茎鞘干物质分配比例则呈显著负相关($r = -0.757^*$); 在雅安, 抽穗后茎鞘干物质的输出和转化与产量正相关。(3) 水稻产量以仁寿最高, 较郫县和雅安高 5.52% 和 17.65%; 秧龄和移栽方式均能影响水稻最终产量, 不同栽培方式间产量差异显著; 仁寿的栽培方式主要通过单位面积有效穗数、结实率和千粒重来影响产量, 在郫县则通过影响单位面积有效穗数和每穗颖花数实现对产量的调控, 雅安的栽培方式主要通过群体颖花量和千粒重调控产量。(4) 适宜的栽培方式能有效调控水稻干物质生产, 促进产量的提高。在仁寿和郫县, 50 d 秧龄单苗优化定抛有效地协调了不同生育阶段干物质积累量, 促进水稻增产; 在雅安, 50 d 秧龄单苗手插具有较高穗前干物质积累量和抽穗后茎鞘干物质输出与转化效率, 增产显著。

关键词: 生态条件; 栽培方式; 水稻; 干物质生产; 产量

Effects of Cultivation Methods on Dry Matter Production and Yield of Rice under Different Ecological Conditions

DENG Fei¹, WANG Li¹, LIU Li¹, LIU Dai-Yin², REN Wan-Jun^{1,*}, and YANG Wen-Yu^{1,*}

¹ Sichuan Agricultural University / Key Laboratory of Crop Ecophysiology and Farming System in Southwest China, Ministry of Agriculture, P. R. China, Wenjiang 611130, China; ² Sichuan General Popularization Centre of Agricultural Technique, Chengdu 610041, China

Abstract: To explore the effects of cultivation methods on dry matter production and grain yield of rice under different ecological conditions, we measured dry matter accumulation, distribution, translocation, grain yield and its components in a field experiment with different seedling ages and transplanting methods in Renshou, Pixian, and Ya'an of Sichuan Province using a randomized block experimental design. The results showed as follows: (1) The dry matter accumulation of rice such as dry matter weight per stem or in a population was clearly influenced by ecological condition, seedling age, transplanting method, and there were significant interactions of ecological condition and seedling age on dry matter weight of population from tillering to heading stages. Moreover, the interactions of ecological condition and transplanting method, seedling age and transplanting method, and all of the three factors mainly affected dry matter weight per stem and in a population after heading stage. (2) The diversification of dry matter production characteristics was due to the ecological condition changes. The grain yield was primarily come from the accumulation of photosynthate after heading stage in Renshou, but not significantly correlated with the dry matter translocation from stem-sheath. In Pixian, the dry matter translocation from stem-sheath affected grain yield intensely, rice yield was positively correlated with dry matter translocation ratio from stem-sheath at booting stage ($r = 0.775^*$), but negatively with that at maturity (r

本研究由国家粮食丰产科技工程项目(2011BAD16B05), 四川新农村建设技术集成研究与示范项目和四川农业大学优秀硕士论文培育基金资助。

* 通讯作者(Corresponding authors): 任万军, E-mail: rwjun@126.com; 杨文钰, E-mail: wenyu.yang@263.net

Received(收稿日期): 2012-02-27; Accepted(接受日期): 2012-05-20; Published online(网络出版日期): 2012-07-27.

URL: <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.1809.S.20120727.0842.005.html>

$= -0.757^*$), significantly. In addition, the dry matter redistribution from stem-sheath after heading was positively correlated with rice yield in Ya'an. (3) The yield in Renshou increased by 5.52% and 17.65%, respectively, compared with that in Pixian and Ya'an. Seedling age and transplanting method had an effect on the yield, that was significantly different under the different cultivation methods. Cultivation methods influenced the yield through changing effective panicles per unit area, seed-setting rate, and 1000-grain weight in Renshou, while by changing effective panicles per unit area and spikelets per panicle in Pixian, and by changing total spikelets and 1000-grain weight in Ya'an. (4) It was suggested that, with the effective regulation of cultivation methods on rice dry matter production, a higher yield would be reached. Overall, the 50 d single seedling with optimized-broadcasting treatment could coordinate the dry matter accumulation at different growth stages to promote the grain yield in Renshou and Pixian. Furthermore, the 50 d single seedling with hand-transplanting treatment enhanced the dry matter accumulation before heading and the dry matter translocation from stem-sheath after heading, resulting in the extraordinarily increased rice yield in Ya'an.

Keywords: Ecological condition; Cultivation method; Rice; Dry matter production; Yield

生产实践中,栽培方式是实现水稻高产优质的主要途径之一。有关栽培方式对水稻的影响,已有大量研究结果^[1-7]。李杰等^[1]认为不同栽培方式水稻由于生育进程不同,对温光资源的利用情况发生改变,导致产量的差异。不同栽插方式对水稻生长发育^[1]、氮素利用^[2]、根系生长^[3]、干物质积累与分配^[4]、产量与品质形成也存在显著影响^[5-7]。生态环境对水稻产量和干物质积累量影响显著^[8],良好的光温条件是水稻正常生长与高产的基础^[1,9]。李旭毅等^[10]研究认为温光条件缺乏地区通过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,而温光条件充足地区则以足穗大穗实现高产。水稻的正常生长,产量与品质的形成是品种、生态条件和栽培措施三者协调的结果^[9]。我们前面的研究表明,稻米 RVA 谱特性及蛋白质含量受生态条件、栽培方式及其互作效应的影响^[11]。目前有关生态条件或栽培方式对水稻干物质生产和产量的影响研究已较为深入,而同时针对生态条件、栽培方式及其互作效应对水稻影响的研究不足,需进一步探讨其作用机理。为此,本研究选取四川杂交中籼稻不同典型生态稻区的仁寿(光温充足、降雨量偏低)、郫县(光温适中)及雅安(高湿寡照),研究各生态条件下秧龄和移栽方式的变化对水稻干物质积累、分配和产量的影响,以期对不同生态稻区栽培方式的选择提供理论与实践依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

四川农业大学水稻研究所引进的不育系 II-32A 与自育恢复系蜀恢 498 组配而成中籼迟熟杂交稻组合 II 优 498。

1.2 试验地点

试验于 2010 年和 2011 年分别在四川仁寿、郫

县和雅安雨城区 3 个试验点实施。试验点分布情况及气象资料见表 1; 土壤肥力资料见表 2。

1.3 试验设计

各试验点均采用二因素随机区组设计。设秧龄(A)为 30 d (A1)和 50 d (A2) 2 个水平。移栽方式(B), 2010 年为双苗手插(B2)、单苗优化定抛(B3)和双苗优化定抛(B4) 3 个水平; 2011 年为单苗手插(B1)、双苗手插(B2)、单苗优化定抛(B3)和双苗优化定抛(B4) 4 个水平。优化定抛是在旱育秧的基础上,将带泥秧苗在秧绳的控制下按预定行穴距定点抛栽^[12],单苗为 22.5 万穴 hm^{-2} (行穴距为 26.7 cm \times 16.7 cm),双苗为 11.25 万穴 hm^{-2} (行穴距为 33.3 cm \times 26.7 cm),每处理重复 3 次。仁寿小区面积为 6.0 m \times 4.0 m=24.0 m^2 (2010 年,前茬作物为小麦)、6.0 m \times 3.0 m=18.0 m^2 (2011 年,前茬作物为油菜); 郫县小区面积为 8.0 m \times 3.0 m=24.0 m^2 (2010 年,前茬作物为油菜)、10.0 m \times 3.0 m=30.0 m^2 (2011 年,前茬作物为蔬菜); 雅安小区面积两年均为 4.0 m \times 3.5 m=14.0 m^2 (均冬闲田)。施纯氮 180 kg hm^{-2} ,按基肥:穗肥=6:4,其中,基肥:分蘖肥=7:3、促花肥:保花肥=6:4 施用。按 N:P₂O₅:K₂O 为 2:1:2 确定磷、钾肥施用量。磷肥全作基肥,按基肥:穗肥(促花肥)=5:5 比例施钾肥。采用旱育秧方式培育壮秧,秧苗素质及主要农作时期见表 3。统一采用高效灌溉技术,前期湿润或浅水干湿交替灌溉促分蘖,并做到适时晒田;中期浅水灌溉促大穗;后期干湿交替灌溉保根促灌浆。同时做好病虫害草害防除。

1.4 测定项目与方法

1.4.1 干物质生产特性 每小区定点 20 穴分别于分蘖盛期(移栽后 20 d)、拔节期、孕穗期、抽穗期和成熟期调查茎蘖数。按平均茎蘖法取 5 穴(小区边行不取),分成叶片、茎鞘和穗(抽穗后)等部分装袋,于 105℃条件下杀青 60 min,再经 70℃烘干至

表 1 试验点分布情况及气象资料
Table 1 Distribution and meteorological condition of experimental locations

生态点 Location	秧龄 Seedling Age (d)	分布 Distribution			气象条件 Meteorological condition					
		经度 Longitude (E)	纬度 Latitude (N)	海拔 Altitude (m)	全生育期 Whole growth period			日均 Daily average		
					积温 Accumulated temp. (°C)	降雨量 Rainfall (mm)	日照时数 Sunshine hours (h)	温度 Temp. (°C)	降雨量 Rainfall (mm)	日照时数 Sunshine hours (h)
2010										
仁寿 Renshou	30	104°18′	30°07′	395	3286.5	666.7	461.7	22.7	4.6	3.2
	50				3595.0	651.0	472.2	22.3	4.0	2.9
郫县 Pixian	30	103°85′	30°78′	558	3479.2	731.4	512.6	22.4	4.7	3.3
	50				3666.6	732.3	553.1	21.4	4.3	3.2
雅安 Ya'an	30	102°98′	29°98′	595	3735.3	1805.3	512.2	23.1	11.1	3.2
	50				3927.8	1857.4	549.8	21.9	10.4	3.1
2011										
仁寿 Renshou	30	104°18′	30°07′	395	3570.0	438.4	659.7	25.1	3.1	4.6
	50				3721.3	453.6	713.6	23.6	2.9	4.5
郫县 Pixian	30	103°55′	30°52′	556	3601.5	777.0	653.4	22.9	4.9	4.2
	50				3800.2	756.9	719.6	22.4	4.5	4.2
雅安 Ya'an	30	102°98′	29°98′	595	3724.6	1195.0	631.1	23.4	7.5	4.0
	50				3902.8	1212.5	667.0	22.8	7.1	3.9

表 2 生态点土壤理化性状
Table 2 Soil conditions of experimental locations

生态点 Location	水稻土母质 Rice soil constitution	土壤类型 Soil type	pH	有机质 Organic matter (g kg ⁻¹)	全氮 Total N content (g kg ⁻¹)	全磷 Total P content (g kg ⁻¹)	全钾 Total K content (g kg ⁻¹)	速效氮 Available N (mg kg ⁻¹)	速效磷 Available P (mg kg ⁻¹)	速效钾 Available K (mg kg ⁻¹)
2010										
仁寿 Renshou	紫色土母质	重壤土	7.54	29.10	0.54	0.21	29.70	107.11	77.39	94.52
郫县 Pixian	冲积土母质	中壤土	6.51	31.11	1.41	0.30	31.42	145.35	71.44	81.00
雅安 Ya'an	紫色土母质	重壤土	5.93	19.74	2.14	0.24	27.60	161.47	82.24	97.61
2011										
仁寿 Renshou	紫色土母质	重壤土	6.76	18.67	0.82	0.24	20.48	57.84	13.20	119.03
郫县 Pixian	冲积土母质	中壤土	5.14	22.91	1.41	0.11	32.35	84.65	91.62	209.46
雅安 Ya'an	紫色土母质	重壤土	5.58	40.31	1.97	0.33	29.11	99.89	25.75	127.77

恒重,测定各处理植株干物质积累与分配情况。

茎鞘物质输出率(%)=(抽穗期茎鞘干物质重-成熟期茎鞘干物质重)/抽穗期茎鞘干物质重×100

茎鞘物质转化率(%)=(抽穗期茎鞘干物质重-成熟期茎鞘干物质重)/成熟期籽粒干物质重×100

1.4.2 产量及其构成因素 于成熟期调查每小区60穴计算单位面积有效穗数,按平均穗数取样法取5穴,考查穗粒数、结实率、千粒重等产量构成因素

及籽粒充实情况,最后分小区单打实收测产。按朱庆森等^[13]方法测定充实度、充实率。

籽粒充实度(%)=实粒千粒重/饱粒千粒重×100

籽粒充实率(%)=饱粒数/实粒数×100

1.5 统计分析

运用 Microsoft Excel 处理数据。用 DPS V7.05 系统软件分析数据,用 LSD (least significant difference test)进行样本平均数的差异显著性比较。两年

表 3 秧苗素质及主要农作时期
Table 3 Seedling quality and farming period of experimental locations

生态点 Location	秧龄 Seedling age	株高 Plant height (cm)	茎蘖数 Tiller number	叶龄 Leaf age	播种期 Date of sowing (month/day)	移栽期 Date of transplanting (month/day)	成熟期 Date of maturity (month/day)	生育期 Growth period (d)
2010								
仁寿	30 d	29.4	3.7	6.1	4/15		9/6	145
Renshou	50 d	38.1	5.1	7.7	3/26	5/15	9/2	161
郫县	30 d	21.0	3.4	5.9	4/15		9/16	155
Pixian	50 d	27.1	4.0	6.7	3/26	5/15	9/12	171
雅安	30 d	21.9	3.2	5.6	4/20		9/28	162
Ya'an	50 d	31.0	3.5	6.6	3/31	5/20	9/25	179
2011								
仁寿	30 d	27.1	4.0	6.8	4/14		9/2	142
Renshou	50 d	42.5	4.7	8.1	3/25	5/14	8/29	158
郫县	30 d	26.1	2.9	6.5	4/19		9/22	157
Pixian	50 d	37.7	4.3	8.2	3/30	5/19	9/15	170
雅安	30 d	18.2	2.5	5.5	4/22		9/27	159
Ya'an	50 d	29.3	3.4	6.8	4/2	5/22	9/19	171

趋势一致, 本文主要取 2011 年数据。

2 结果与分析

2.1 生态条件与栽培方式对水稻干物质积累的影响

2.1.1 各生育时期单茎干物重和群体干物重 水稻干物质积累特性为生态条件、秧龄、移栽方式及其互作效应共同作用的结果(表 4)。除抽穗期群体干物重外, 水稻单茎和群体干物重均受生态条件显著

水平以上主效作用; 秧龄对分蘖盛期、拔节期、抽穗期干物重及孕穗期单茎干物重均存在极显著的主效应; 除分蘖盛期单茎干物重, 移栽方式也存在显著或极显著主效应。生态条件与秧龄互作效应极显著影响分蘖盛期至抽穗期群体干物重, 而生态条件与移栽方式、秧龄与移栽方式及三者互作则主要影响抽穗后水稻单茎和群体干物重。

不同生态条件下, 秧龄或移栽方式的改变均能导致干物重的改变(表 5)。从单茎干物重来看, 不同

表 4 单茎和群体干物重联合方差分析(F 值)
Table 4 Variance analysis of dry matter weight in single stem and population (F-value)

变异来源 Variation source	分蘖盛期 Tillering stage		拔节期 Jointing stage		孕穗期 Booting stage		抽穗期 Heading stage		成熟期 Maturity	
	单茎	群体	单茎	群体	单茎	群体	单茎	群体	单茎	群体
	DMWPS	DMWP	DMWPS	DMWP	DMWPS	DMWP	DMWPS	DMWP	DMWPS	DMWP
生态点 Location	93.54**	62.99**	3.49*	23.82**	17.65**	12.75**	7.29**	2.64	51.49**	3.53*
秧龄 Seedling age	130.78**	42.32**	28.87**	16.74**	18.44**	3.52	10.63**	11.17**	1.75	2.29
移栽方式 Transplanting method	1.28	7.51**	5.48**	11.35**	3.19*	5.11**	3.57*	7.47**	6.40**	6.41**
生态条件×秧龄 Location×Seedling age	2.72	10.32**	20.24**	5.46**	32.57**	26.56**	14.93**	8.28**	0.09	1.18
生态条件×移栽方式 Location×Trans. method	2.55*	1.50	0.79	0.94	0.76	1.24	4.87**	3.67**	2.37*	2.76*
秧龄×移栽方式 Seed. age×Trans. method	1.21	0.88	0.42	0.50	0.05	0.45	6.23**	2.94*	8.91*	6.33**
生态条件×秧龄×移栽方式 Location×Seed. age×Trans. method	0.65	0.61	0.49	0.12	1.00	0.96	4.51**	2.77*	2.05	2.56*

** 表示 1%显著水平; * 表示 5%显著水平。

** Significant at the 1% probability level; * Significant at the 5% probability level. DMWPS: dry matter weight per stem; DMWP: dry matter weight of population; Trans.: transplanting; Seed: seedling.

表 5 不同生态条件和栽培方式下水稻主要生育时期单茎干物重和群体干物重

Table 5 Dry matter weight of single stem and population at main stages of rice under different ecological conditions and cultivation methods

栽培方式 Cultivation	分蘖盛期 Tillering stage		拔节期 Jointing stage		孕穗期 Booting stage		抽穗期 Heading stage		成熟期 Maturity	
	单茎	群体	单茎	群体	单茎	群体	单茎	群体	单茎	群体
	DMWPS (g)	DMWP (t hm ⁻²)	DMWPS (g)	DMWP (t hm ⁻²)	DMWPS (g)	DMWP (t hm ⁻²)	DMWPS (g)	DMWP (t hm ⁻²)	DMWPS (g)	DMWP (t hm ⁻²)
仁寿 Renshou										
A1B1	0.45 cd	1.14 a	1.05 ab	2.73 a	4.59 a	8.43 a	5.68 bcd	9.74 abc	9.96 a	17.18 a
A1B2	0.43 d	0.78 b	0.94 ab	1.94 b	4.56 a	8.33 a	5.38 d	8.65 de	10.02 a	15.55 bc
A1B3	0.43 d	1.05 ab	0.84 b	2.24 ab	4.30 a	8.13 ab	5.96 abc	10.20 ab	8.77 c	15.14 bc
A1B4	0.48 bcd	1.06 ab	0.85 b	2.19 ab	4.18 ab	7.61 abc	5.28 d	9.08 cde	9.14 bc	15.14 bc
A2B1	0.53 abc	1.05 ab	1.18 a	2.58 ab	3.41 bc	6.63 bcd	5.63 bcd	9.26 cde	9.71 ab	16.10 ab
A2B2	0.55 ab	0.88 ab	0.95 ab	1.98 b	2.83 c	5.14 d	6.28 a	9.37 bcd	9.56 ab	14.55 c
A2B3	0.54 abc	1.18 a	1.02 ab	2.45 ab	3.18 c	6.17 cd	6.00 ab	10.40 a	9.79 ab	17.00 a
A2B4	0.60 a	1.13 a	0.97 ab	2.13 ab	2.79 c	5.20 d	5.50 cd	8.44 e	9.63 ab	14.87 c
平均 Mean	0.50	1.03	0.98	2.28	3.73	6.96	5.71	9.39	9.57	15.69
郫县 Pixian										
A1B1	0.38 b	0.95 abc	1.24 a	3.43 a	4.18 a	7.81 abc	6.15 a	11.31 a	8.81 a	15.93 ab
A1B2	0.37 b	0.76 c	1.07 ab	2.70 bc	4.06 a	7.14 c	6.29 a	10.50 ab	9.11 a	14.67 b
A1B3	0.35 b	1.05 ab	1.09 ab	3.47 a	4.01 a	8.60 ab	5.32 bc	10.27 ab	8.47 a	16.10 ab
A1B4	0.35 b	0.74 c	1.04 abc	2.55 bc	4.17 a	7.38 bc	5.68 ab	9.87 ab	8.80 a	14.94 b
A2B1	0.52 a	1.04 ab	0.94 bcd	2.84 bc	4.38 a	9.08 a	4.89 cd	9.09 bc	8.47 a	15.74 ab
A2B2	0.53 a	0.94 bc	0.92 bcd	2.37 c	4.15 a	7.44 bc	4.59 d	7.90 c	9.01 a	15.15 b
A2B3	0.49 a	1.19 a	0.84 cd	3.00 ab	4.21 a	8.27 abc	4.95 cd	9.56 b	9.16 a	17.18 a
A2B4	0.53 a	1.06 ab	0.80 d	2.33 c	4.26 a	7.75 abc	5.66 ab	9.63 b	9.01 a	15.37 b
平均 Mean	0.44	0.97	0.99	2.84	4.18	7.93	5.44	9.77	8.86	15.64
雅安 Ya'an										
A1B1	0.27 d	0.45 c	1.44 ab	3.88 a	4.75 a	8.49 abc	6.23 a	10.86 a	7.97 cde	14.11 c
A1B2	0.29 cd	0.37 c	1.50 a	3.18 abc	4.12 bcd	7.02 e	5.57 b	9.27 bc	9.64 a	16.81 a
A1B3	0.28 cd	0.39 c	1.19 abc	3.38 ab	4.17 bcd	7.38 de	5.33 b	9.23 bc	7.72 de	14.16 c
A1B4	0.27 d	0.40 c	1.14 bcd	3.09 bc	4.11 cd	7.59 cde	4.71 c	8.29 d	7.55 e	13.98 c
A2B1	0.34 bc	0.82 ab	0.89 cde	2.92 bc	4.55 ab	8.90 a	5.38 b	9.87 b	8.65 b	15.99 ab
A2B2	0.46 a	0.78 b	0.93 cde	2.52 c	4.52 abc	8.34 abcd	5.51 b	9.38 bc	8.23 bcd	14.63 bc
A2B3	0.38 b	0.94 a	0.77 e	2.71 bc	4.01 d	7.83 bcde	4.60 c	8.61 cd	8.52 bc	16.20 a
A2B4	0.32 bcd	0.72 b	0.82 de	2.47 c	4.46 abc	8.83 ab	5.36 b	9.41 bc	7.89 de	14.74 bc
平均 Mean	0.33	0.61	1.09	3.02	4.34	8.05	5.34	9.37	8.27	15.08

A1B1: 30 d 秧龄单苗手插; A1B2: 30 d 秧龄双苗手插; A1B3: 30 d 秧龄单苗优化定抛; A1B4: 30 d 秧龄双苗优化定抛; A2B1: 50 d 秧龄单苗手插; A2B2: 50 d 秧龄双苗手插; A2B3: 50 d 秧龄单苗优化定抛; A2B4: 50 d 秧龄双苗优化定抛。小写字母不同表示在 0.05 水平差异显著, 具有相同字母的值表示差异不显著。

A1B1: 30 d single seedling hand-transplanted treatment; A1B2: 30 d double seedlings hand-transplanted treatment; A1B3: 30 d single seedling optimized-broadcasting treatment; A1B4: 30 d double seedlings optimized-broadcasting treatment; A2B1: 50 d single seedling hand-transplanted treatment; A2B2: 50 d double seedlings hand-transplanted treatment; A2B3: 50 d single seedling optimized-broadcasting treatment; A2B4: 50 d double seedlings optimized-broadcasting treatment. Values followed by the same letter are not significantly different at $P<0.05$ according to LSD test. DMWPS: dry matter weight per stem; DMWP: dry matter weight of population.

生态条件下, 分蘖盛期、抽穗期和成熟期均以仁寿最高, 郫县次之, 雅安最低, 拔节期和孕穗期则以雅安最高。秧龄改变导致其明显差异, 分蘖盛期和成熟期不同生态条件间均以 50 d 秧龄高于 30 d 秧龄;

而拔节期和抽穗期, 仁寿以 50 d 秧龄较高, 郫县和雅安以 30 d 秧龄较高, 孕穗期则呈相反趋势。不同移栽方式下, 各时期单茎干物重发生明显变化, 且生态点间趋势不同, 抽穗期仁寿单苗优化定抛单茎

干物重最大, 邳县双苗优化定抛最高, 雅安则以单苗手插最大; 成熟期仁寿单苗手插最高, 邳县和雅安以双苗手插最高。从群体干物重变化看, 仁寿分蘖盛期和成熟期高于邳县和雅安; 拔节期和孕穗期则以雅安最高, 仁寿最低; 抽穗期邳县分别比仁寿和雅安高 4.05% 和 4.26%。不同秧龄条件下, 各生育时期群体干物重差异显著, 分蘖盛期 3 点均以 50 d 秧龄最大; 拔节期仁寿以 50 d 秧龄最大, 邳县和雅安以 30 d 秧龄最大, 成熟期则与拔节期趋势相反。不同移栽方式下, 仁寿除分蘖盛期和抽穗期单苗优化定抛群体干物重最大外, 其他时期均以单苗手插最高; 邳县单苗优化定抛分蘖盛期、拔节期和成熟

期干物重最大, 孕穗期和抽穗期则以单苗手插最大; 雅安分蘖盛期以单苗优化定抛最高, 拔节、孕穗和抽穗期则以单苗手插最高, 至成熟期是双苗手插最高。整体看来, A2B3 方式较其他栽培方式能获得较高的生物量, 仁寿、邳县和雅安分别比平均值高 8.35%、9.85% 和 7.43%。

2.1.2 各生育阶段干物质积累 表 6 表明, 不同生态条件下, 各生育阶段水稻干物质积累量差异明显, 仁寿除分蘖盛期至拔节期和拔节期至孕穗期低于其他两点外, 其他阶段均最高。同时可知, 水稻拔节期至孕穗期和抽穗期至成熟期两个生育阶段干物质积累量最大, 仁寿、邳县和雅安生态点这 2 个

表 6 不同生态条件和栽培方式下水稻主要生育阶段干物质积累量和比例

Table 6 Dry matter accumulation and its ratio to total dry matter in main growth periods of rice under different locations and cultivation methods

栽培方式 Cultivation method	播种-分蘖盛期 Sowing-tillering		分蘖盛期-拔节期 Tillering-jointing		拔节期-孕穗期 Jointing-booting		孕穗期-抽穗期 Bootting-heading		抽穗期-成熟期 Heading-maturity	
	积累量		积累量		积累量		积累量		积累量	
	DMA (t hm ⁻²)	RTDM (%)	DMA (t hm ⁻²)	RTDM (%)	DMA (t hm ⁻²)	RTDM (%)	DMA (t hm ⁻²)	RTDM (%)	DMA (t hm ⁻²)	RTDM (%)
仁寿 Renshou										
A1B1	1.14 ab	6.63	1.59 a	9.27	5.70 ab	33.21	1.31 cd	7.63	7.43 a	43.27
A1B2	0.78 b	5.03	1.16 a	7.45	6.39 a	41.12	0.32 d	2.03	6.90 a	44.37
A1B3	1.05 ab	6.93	1.19 a	7.84	5.89 a	38.90	2.07 bc	13.66	4.95 c	32.68
A1B4	1.06 ab	7.03	1.13 a	7.46	5.42 ab	35.79	1.46 cd	9.64	6.07 abc	40.08
A2B1	1.05 ab	6.54	1.53 a	9.51	4.05 bc	25.14	2.63 bc	16.32	6.84 a	42.49
A2B2	0.88 ab	6.06	1.09 a	7.52	3.16 c	21.73	4.24 a	29.13	5.17 bc	35.57
A2B3	1.18 a	6.92	1.27 a	7.49	3.72 c	21.88	4.23 a	24.88	6.60 ab	38.83
A2B4	1.13 ab	7.57	1.01 a	6.76	3.07 c	20.66	3.23 ab	21.72	6.44 ab	43.29
平均 Mean	1.03	6.59	1.25	7.91	4.68	29.80	2.44	15.63	6.30	40.07
邳县 Pixian										
A1B1	0.95 abc	5.94	2.49 a	15.60	4.38 b	27.49	3.50 a	21.97	4.62 cd	29.00
A1B2	0.76 c	5.20	1.94 ab	13.21	4.44 b	30.24	3.36 ab	22.89	4.18 d	28.46
A1B3	1.05 ab	6.50	2.42 a	15.04	5.14 ab	31.92	1.66 abcd	10.34	5.83 abcd	36.20
A1B4	0.74 c	4.92	1.82 ab	12.17	4.82 ab	32.28	2.49 abc	16.68	5.07 bcd	33.95
A2B1	1.04 ab	6.59	1.80 ab	11.45	6.24 a	39.64	0.01 d	0.08	6.65 abc	42.24
A2B2	0.94 bc	6.17	1.44 b	9.49	5.06 ab	33.42	0.46 cd	3.03	7.26 ab	47.89
A2B3	1.19 a	6.91	1.82 ab	10.58	5.26 ab	30.64	1.29 bcd	7.50	7.62 a	44.37
A2B4	1.06 ab	6.88	1.27 b	8.29	5.42 ab	35.26	1.88 abcd	12.22	5.74 abcd	37.35
平均 Mean	0.97	6.14	1.88	11.98	5.10	32.61	1.83	11.84	5.87	37.43
雅安 Ya'an										
A1B1	0.45 c	3.19	3.43 a	24.30	4.61 bc	32.70	2.36 a	16.75	3.25 c	23.06
A1B2	0.37 c	2.18	2.81 abc	16.73	3.84 c	22.85	2.25 ab	13.37	7.54 a	44.87
A1B3	0.39 c	2.79	2.98 ab	21.07	4.00 c	28.26	1.85 abc	13.10	4.93 b	34.79
A1B4	0.40 c	2.87	2.69 bc	19.24	4.49 bc	32.14	0.71 c	5.06	5.69 b	40.69
A2B1	0.82 ab	5.14	2.20 cd	13.12	5.98 a	37.40	0.97 bc	6.04	6.12 b	38.29
A2B2	0.78 b	5.36	1.73 d	11.85	5.82 ab	39.77	1.04 bc	7.09	5.26 b	35.93
A2B3	0.94 a	5.78	1.78 d	10.98	5.11 abc	31.56	0.78 c	4.84	7.59 a	46.84
A2B4	0.72 b	4.91	1.75 d	11.86	6.35 a	43.10	0.58 c	3.96	5.33 b	36.16
平均 Mean	0.61	4.03	2.42	16.14	5.03	33.47	1.32	8.77	5.71	37.58

A1B1~A2B4 注解同表 5。小写字母不同表示在 0.05 水平差异显著, 具有相同字母的值表示差异不显著。

The annotations of A1B1 to A2B4 in this table are the same as those given in Table 5. Values followed by the same letter are not significantly different at $P < 0.05$ according to LSD test. DMA: dry matter accumulation; RTDM: ratio to total dry matter.

生育阶段干物质积累量分别达到成熟期干物重的 69.87%、70.04%和 71.05%; 孕穗期至抽穗期是物质快速积累的阶段, 但由于其历期较短, 干物质积累较少, 而播种至分蘖盛期不同生态点干物质积累所占比例均最低。不同秧龄导致仁寿生态点干物质积累差异显著, 除播种至分蘖盛期和孕穗期至抽穗期两阶段 50 d 秧龄干物质积累量和比例较高外, 其他阶段均低于 30 d 秧龄; 不同移栽方式间, 播种至分蘖盛期和孕穗期至抽穗期干物质积累量以单苗优化定抛最高, 其他阶段则以单苗手插较高。因秧龄差异, 郫县除分蘖盛期至拔节期和孕穗期至抽穗期 30 d 秧龄具有较高干物质积累量外, 其他阶段均以 50 d 秧龄最高; 单苗优化定抛在水稻生育前期和后期具有较高的干物质积累量, 而单苗手插则在分蘖盛期至孕穗期具有最高的干物质积累量, 孕穗期至抽

穗期则以双苗优化定抛最高。雅安生态点, 不同秧龄间干物质积累变化趋势同郫县; 播种至分蘖盛期单苗优化定抛具有较高的干物质积累量, 分蘖盛期至拔节期和孕穗期至抽穗期单苗手插干物质积累量最高, 拔节期至孕穗期和抽穗期至成熟期分别以双苗优化定抛和双苗手插最高。可见, 不同生态条件下, 水稻干物质积累特性不同, 而秧龄和移栽方式的改变均对水稻各生育阶段干物质积累量和所占比例存在显著影响。生态条件与栽培方式互作效应下, A2B1 和 A2B3 方式在播种至分蘖盛期生长迅速, 为植株干物质积累奠定基础, 同时抽穗后能保持较高的干物质积累, 保证群体生物量提高, 具有较高增产潜力。

2.1.3 中、后期干物质分配及输出转化特性 由表 7 可知, 干物质在叶片的分配比例在孕穗期最大,

表 7 不同生态条件和栽培方式下水稻中、后期干物质在叶片、茎鞘和穗分配情况

Table 7 Dry weight ratio of leaf, stem-sheath, panicle to total plant at middle and late stages of rice under different locations and cultivation methods (%)

栽培方式 Cultivation method	叶片比例 Ratio of leaf			茎鞘比例 Ratio of stem-sheath			穗比例 Ratio of panicle	
	孕穗期 Booting stage	抽穗期 Heading stage	成熟期 Maturity	孕穗期 Booting stage	抽穗期 Heading stage	成熟期 Maturity	抽穗期 Heading stage	成熟期 Maturity
仁寿 Renshou								
A1B1	35.65 c	30.61 a	14.01 a	64.35 a	54.91 e	28.30 a	14.48 bc	57.69 b
A1B2	35.90 c	28.33 bc	13.83 a	64.09 a	56.28 cd	26.63 ab	15.39 ab	59.54 ab
A1B3	35.96 c	27.17 c	13.57 a	64.04 a	56.99 bc	26.70 ab	15.85 a	59.73 ab
A1B4	35.21 c	30.82 a	14.06 a	64.79 a	55.65 de	27.12 ab	13.53 cde	58.82 b
A2B1	40.83 b	27.47 bc	13.34 a	59.17 b	56.60 cd	27.39 ab	15.93 a	59.27 ab
A2B2	42.47 ab	28.91 b	13.70 a	57.56 bc	58.74 a	27.31 ab	12.35 e	59.00 b
A2B3	44.00 a	28.92 b	13.64 a	56.00 c	57.36 bc	26.57 ab	13.72 cd	59.79 ab
A2B4	41.74 ab	28.80 b	12.38 b	58.26 bc	58.11 ab	25.84 b	13.09 de	61.78 a
平均 Mean	38.97	28.88	13.57	61.03	56.83	26.98	14.29	59.45
郫县 Pixian								
A1B1	39.59 abc	30.79 cd	15.66 abc	60.41 cde	55.29 ab	27.72 bc	13.92 ab	56.63 bc
A1B2	40.38 ab	30.21 de	16.61 a	59.62 de	56.11 ab	29.70 a	13.69 ab	53.70 e
A1B3	41.19 a	31.82 bc	15.20 bcd	58.81 e	55.98 ab	28.53 ab	12.21 bcd	56.27 cd
A1B4	39.60 abc	30.23 de	16.21 ab	60.40 cde	56.79 a	29.75 a	12.99 abc	54.04 de
A2B1	37.97 bcd	34.50 a	15.42 abc	62.03 bcd	54.85 bc	27.51 bc	10.65 d	57.07 bc
A2B2	37.00 de	33.08 ab	14.15 d	63.00 ab	53.49 c	26.05 c	13.43 ab	59.80 a
A2B3	37.42 cde	32.47 b	14.62 cd	62.58 abc	55.97 ab	26.53 c	11.56 cd	58.85 ab
A2B4	35.20 e	29.00 e	15.37 abcd	64.80 a	56.80 a	26.62 c	14.20 a	58.01 abc
平均 Mean	38.54	31.51	15.41	61.46	55.66	27.80	12.83	56.80
雅安 Ya'an								
A1B1	41.91 c	32.24 c	17.18 a	58.09 a	52.95 abc	27.59 d	14.81 a	55.23 a
A1B2	44.20 a	34.10 bc	16.53 a	55.80 c	51.87 cd	29.06 cd	14.04 a	54.41 ab
A1B3	43.77 ab	35.24 ab	17.76 a	56.23 bc	51.03 d	30.17 abcd	13.73 a	52.07 ab
A1B4	44.14 a	34.75 bc	16.71 a	55.86 c	51.98 bcd	29.50 bcd	13.27 ab	53.79 ab
A2B1	42.26 bc	34.92 abc	17.20 a	57.74 ab	53.43 a	30.08 abcd	11.64 bc	52.72 ab
A2B2	41.32 c	35.94 ab	16.38 a	58.68 a	53.26 abc	30.97 abc	10.80 cd	52.65 ab
A2B3	44.13 a	37.79 a	16.56 a	55.87 c	52.61 abc	32.53 a	9.61 d	50.91 b
A2B4	41.28 c	34.64 bc	16.91 a	58.72 a	53.40 ab	31.80 ab	11.96 bc	51.28 ab
平均 Mean	42.88	34.95	16.90	57.12	52.57	30.21	12.48	52.88

A1B1~A2B4 注解同表 5。小写字母不同表示在 0.05 水平差异显著, 具有相同字母的值表示差异不显著。

The annotations of A1B1 to A2B4 in this table are the same as those given in Table 5. Values followed by the same letter are not significantly different at $P<0.05$ according to LSD test.

并随着生育进程不断降低,成熟期最低,不同生态点各栽培方式下从 35.20%~44.20%降低至 12.38%~17.76%;除仁寿 A2B2 和 A2B3 方式外,茎鞘的分配比例均以孕穗期最大,并从该期的 56.00%~64.80%降低至成熟期的 25.84%~32.53%。不同生态条件下,孕穗期叶片所占比例雅安>仁寿>郫县;抽穗期和成熟期叶片所占比例雅安>郫县>仁寿,而穗所占比例则呈相反趋势;雅安除成熟期茎鞘所占比例较高外,孕穗期和抽穗期均低于其他 2 个点。秧龄和移栽方式的改变均导致水稻中、后期干物质在各器官中的分配比例发生显著变化。栽培方式对仁寿和雅安两生态点孕穗期和抽穗期叶片和茎鞘所占比例影响大于成熟期,而郫县各时期叶片和茎鞘所占比例所受影响均较大。仁寿孕穗期和抽穗期叶片所占干物质的比例分别以 A2B3 和 A1B4 方式最高,

茎鞘干物质所占比例则以 A1B4 和 A2B2 方式最高;郫县则分别以 A1B3、A2B1 方式叶片比例最大, A2B4 方式茎鞘比例最大;雅安孕穗期和抽穗期叶片比例以 A1B2、A2B3 方式较高,茎鞘比例最高的则分别是 A2B4 和 A2B1 方式。穗所占比例受栽培方式影响显著,成熟期仁寿 A2B4 方式、郫县 A2B2 方式和雅安 A1B1 方式具有最高的穗干物重比例。

抽穗前茎鞘所储藏的光合产物向穗的输出与转换特性直接影响着水稻产量的形成。不同生态条件和栽培方式下,水稻的茎鞘物质输出和转化情况差异明显(图 1)。二者互作效应下,水稻茎鞘物质输出率和转化率分别在-16.62%~32.16%和-8.55%~20.16%范围内波动。物质输出率和转化率在仁寿均以 A1B3 方式最高, A1B1 方式最低,两者输出率相

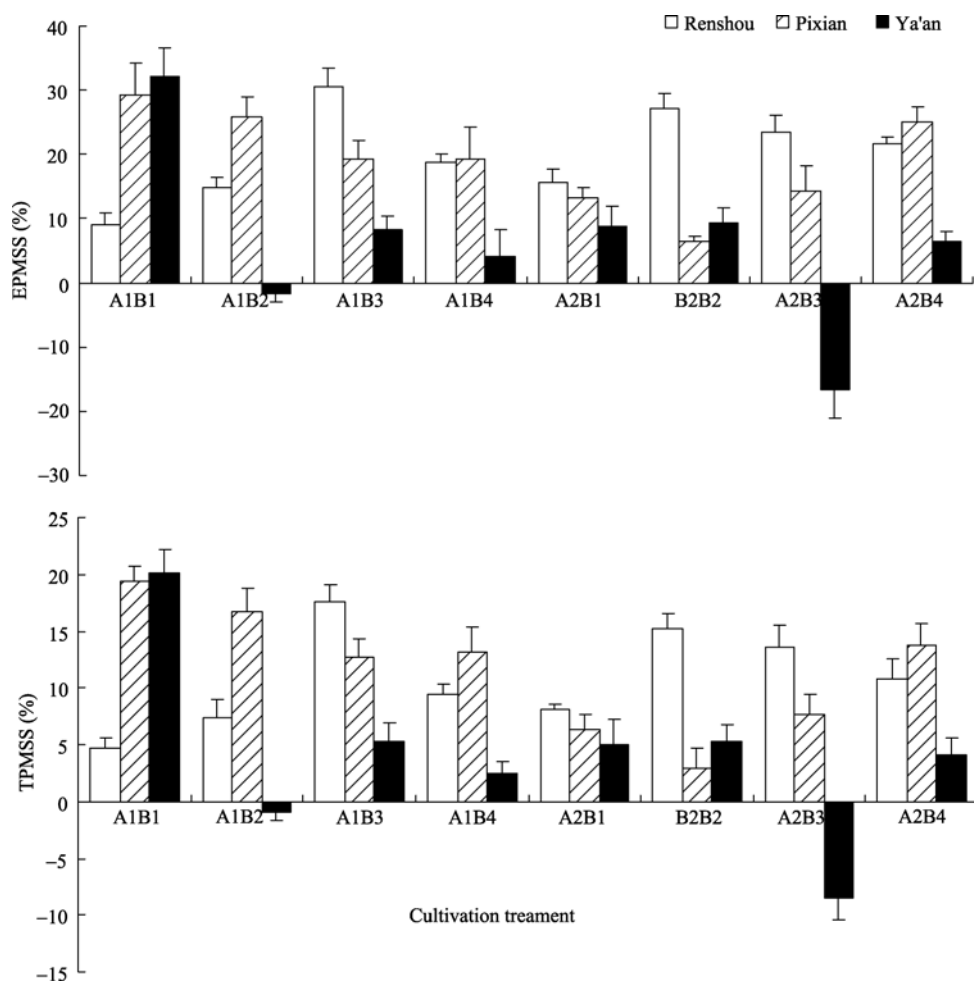


图 1 不同生态条件下各栽培方式的茎鞘物质输出率(EPMSS)和茎鞘物质转化率(TPMSS)

Fig. 1 Percentage of the matter exportation from stem-sheath (EPMSS) and transformation from stem-sheath (TPMSS) under different locations and cultivation methods

A1B1~A2B4 缩写的含义同表 5。The meanings of A1B1 to A2B4 in this figure are the same as those given in Table 5.

差 220.04%，转化率相差 273.63%；郫县和雅安荃鞘输出率和转化率均以 A1B1 方式最高，而分别以 A2B2 和 A2B3 方式最低。

2.2 生态条件与栽培方式对水稻产量的影响

表 8 表明，水稻产量以仁寿最高，各栽培方式平均值分别比郫县和雅安高出 5.52% 和 17.65%。该点有效穗、结实率和千粒重均低于其他两点，但其每穗颖花数最高，从而具有较高的群体颖花量，保

证了最终的产量。秧龄和移栽方式均能影响水稻最终产量，不同栽培方式间产量差异显著。仁寿生态点，栽培方式主要通过单位面积有效穗数、结实率和千粒重来影响产量。A2B3 方式能有效提高单位面积有效穗数，保证籽粒的充实过程，千粒重显著高于其他栽培方式，产量达 10.79 t hm^{-2} ，比平均产量高出 6.25%。郫县生态点，栽培方式主要影响单位面积有效穗数和每穗颖花数，最终导致产量的差异。

表 8 不同生态条件和栽培方式下水稻产量及充实程度
Table 8 Yield and its grain-filling level of rice under different locations and cultivation methods

栽培方式 Cultivation method	有效穗 Effective panicle ($\times 10^4 \text{ ear hm}^{-2}$)	颖花数 Spikelets per ear (No. ear $^{-1}$)	结实率 Seed-setting rate (%)	千粒重 1000-grain weight (g)	充实度 Filled degree of grain (%)	充实率 Filled grain percentage (%)	产量 Yield (t hm^{-2})
仁寿 Renshou							
A1B1	171.88 ab	250.51 a	87.41 c	27.04 d	93.07 bc	81.20 b	10.33 b
A1B2	154.59 c	249.71 a	90.88 ab	27.39 d	92.39 c	81.87 b	9.91 d
A1B3	171.81 ab	234.29 a	87.46 c	27.69 bcd	93.49 abc	82.60 b	10.01 cd
A1B4	164.81 b	242.77 a	87.37 c	27.62 cd	93.47 abc	81.60 b	9.97 cd
A2B1	165.19 b	232.78 a	92.36 a	28.50 ab	96.05 ab	89.33 a	10.24 bc
A2B2	151.22 c	249.46 a	90.02 abc	27.79 abcd	93.26 abc	82.60 b	9.96 cd
A2B3	173.50 a	249.12 a	89.54 bc	28.53 a	95.99 a	88.07 a	10.79 a
A2B4	153.66 c	233.53 a	89.91 abc	28.44 abc	95.77 ab	87.73 a	9.80 d
平均 Mean	163.33	242.77	89.37	27.88	94.19	84.38	10.13
郫县 Pixian							
A1B1	180.77 ab	184.48 bc	94.64 a	29.75 a	97.46 b	94.20 a	9.49 bc
A1B2	162.00 c	202.71 a	92.72 a	29.77 a	98.41 ab	95.13 a	9.15 cd
A1B3	189.97 a	172.49 c	92.37 a	30.02 a	98.82 ab	93.80 a	9.12 d
A1B4	170.81 bc	184.23 bc	92.89 a	29.73 a	97.43 b	92.07 a	9.04 d
A2B1	185.57 a	194.84 ab	94.27 a	30.23 a	97.24 b	92.13 a	10.16 a
A2B2	168.84 c	196.74 ab	93.83 a	30.54 a	98.37 ab	94.07 a	9.54 b
A2B3	187.95 a	197.72 ab	92.37 a	30.27 a	99.24 a	93.07 a	10.23 a
A2B4	171.84 bc	201.36 a	94.40 a	30.59 a	98.95 ab	95.87 a	10.07 a
平均 Mean	177.22	191.82	93.44	30.11	98.24	93.79	9.60
雅安 Ya'an							
A1B1	176.88 bc	202.06 ab	90.45 a	27.98 bc	97.51 a	91.87 a	9.18 ab
A1B2	162.00 d	208.56 a	88.09 a	27.70 bc	97.21 a	91.47 a	8.03 de
A1B3	183.38 ab	190.09 abc	87.84 a	27.49 c	96.81 a	90.67 a	8.26 cde
A1B4	170.81 cd	167.93 c	90.86 a	27.62 c	96.80 a	91.27 a	7.77 e
A2B1	185.00 ab	202.48 ab	89.01 a	29.92 a	98.78 a	93.20 a	9.47 a
A2B2	168.84 cd	200.74 ab	91.18 a	29.03 ab	96.85 a	91.40 a	8.74 abcd
A2B3	189.88 a	179.23 bc	89.49 a	29.61 a	98.32 a	93.33 a	8.77 abc
A2B4	171.84 cd	195.99 ab	91.01 a	28.84 abc	96.51 a	91.07 a	8.67 bcd
平均 Mean	176.08	193.39	89.74	28.52	97.35	91.79	8.61

A1B1~A2B4 注解同表 5。小写字母不同表示在 0.05 水平差异显著，具有相同字母的值表示差异不显著。

The annotations of A1B1 to A2B4 in this table are the same as those given in Table 5. Values followed by the same letter are not significantly different at $P < 0.05$ according to LSD test.

A2B3 方式下, 水稻具有较高的单位面积有效穗和每穗颖花数, 群体颖花量最大, 较平均产量增加 6.56%。雅安生态点, 栽培方式主要通过群体颖花量和千粒重调控产量。A2B1 方式促进籽粒的灌浆充实, 提高千粒重, 并保证群体颖花量, 其产量可达 9.47 t hm⁻²。

仁寿点的单位面积有效穗、郫县和雅安点的千粒重与水稻产量显著正相关(表 9)。通径分析表明, 产量构成因素对产量的贡献情况因生态条件而异, 仁寿点的单位面积有效穗数的贡献率最大, 每穗颖花数次之; 郫县点的每穗颖花数的贡献率则大于单位面积有效穗数; 在雅安二者贡献率相当。

表 9 产量构成因素对产量的作用
Table 9 Contribution of yield components to grain yield

构成因素 Yield components		相关系数 Correlation coefficient	通径系数 Path coefficient						贡献率 Contribution rate
			直接作用 Direct effect	间接作用 Indirect effect					
				总和 Total	EP→Y	S→Y	SR→Y	TGW→Y	
仁寿 Renshou									
有效穗 EP	0.721*	0.870	-0.150		-0.016	-0.113	-0.021	0.627	
颖花数 S	0.337	0.662	-0.325	-0.021		-0.042	-0.263	0.223	
结实率 SR	-0.006	0.238	-0.243	-0.413	-0.116		0.285	-0.001	
千粒重 TGW	0.266	0.510	-0.244	-0.036	-0.341	0.133		0.136	
郫县 Pixian									
有效穗 EP	0.379	0.837	-0.458		-0.442	-0.027	0.012	0.317	
颖花数 S	0.529	0.839	-0.310	-0.441		0.053	0.078	0.444	
结实率 SR	0.377	0.236	0.140	-0.097	0.187		0.050	0.089	
千粒重 TGW	0.679*	0.173	0.507	0.058	0.381	0.069		0.117	
雅安 Ya'an									
有效穗 EP	0.510	0.837	-0.327		-0.253	-0.127	0.054	0.427	
颖花数 S	0.465	0.829	-0.364	-0.256		-0.122	0.013	0.385	
结实率 SR	0.128	0.512	-0.384	-0.208	-0.198		0.022	0.066	
千粒重 TGW	0.723*	0.110	0.614	0.411	0.101	0.102		0.079	

* 表示 5%显著水平。
* Significant at the 5% probability level. EP: effective panicle; S: spikelet; SR: seed-setting rate; TGW: 1000-grain weight; Y: yield.

3 讨论

3.1 不同生态条件与栽培方式下水稻干物质生产特点

水稻干物质的生产特性是光合产物在植株不同器官中积累与分配的结果, 而生态条件、栽培方式及二者互作效应对水稻干物质的积累和分配存在极显著的影响。王勋等^[8]、童平等^[14]和任万军等^[15]研究指出生态环境对水稻干物质积累量影响显著, 本研究结果表明, 生育期与积温($r = 0.898^{**}$)及日均温($r = -0.919^{**}$)呈极显著相关关系; 茎鞘物质输出率和茎鞘物质转化率与积温和降雨量呈显著负相关, 单茎干物重则与日照时数呈显著正相关(表 10), 充足的光温条件能有效提高干物质积累和运转效率, 加快水稻的生育进程, 缩短生育期。同时可知, 水稻拔节期至孕穗期和抽穗期至成熟期两个阶段干物质积

累量最大, 仁寿等光温条件充足地区, 其干物质积累优势主要体现在水稻生长的前期(播种至分蘖盛期)和后期(抽穗期至成熟期), 播种至分蘖盛期生长迅速, 为植株干物质积累奠定基础, 抽穗后则能保持较高的干物质积累速率, 保证群体生物量的快速提高。李杰等^[1,16]和 Sharma 等^[17]研究表明栽培方式能有效调控水稻的干物质积累与分配, 这与本研究结果一致。不同秧龄移栽, 水稻所遇光温条件随之改变(长秧龄移栽显著提高水稻全生育期的积温和日照时数), 进而光合产物在植株中的积累与分配情况也发生改变; 不同移栽方式下植株空间分布改变, 导致其光合特性的差异^[16], 最终导致干物质在各器官中的分配比例和各生育阶段干物质积累量的差异。整体看来, 50 d 秧龄单苗优化定抛和单苗手插干物质在各器官中具有较合理的分配比例, 各生育阶段均能保持较高的干物质积累量, 具有较高的增产潜力。

表 10 水稻干物质及产量与生态因子的相关系数
Table 10 Correlation coefficients of dry matter and grain yield of rice with ecological factors

指标 Index	全生育期 Whole growth period			日均 Daily average		
	积温	降雨量	日照时数	温度	降雨量	日照时数
	Accumulated temperature	Rainfall	Sunshine hours	Temperature	Rainfall	Sunshine hours
茎鞘物质输出率 EPMSS	-0.518**	-0.524**	0.150	0.187	-0.503*	0.466*
茎鞘物质转化率 TPMSS	-0.527**	-0.434*	0.046	0.132	-0.410*	0.364
单茎生物量 BPS	-0.382	-0.753**	0.434*	0.416*	-0.757**	0.744**
群体生物量 BP	-0.034	-0.275	0.287	0.041	-0.296	0.251
有效穗 Effective panicle	0.304	0.444*	-0.112	-0.445*	0.426*	-0.486*
颖花数 Spikelet	-0.352	-0.739**	0.313	0.729**	-0.728**	0.822**
结实率 Seed-setting rate	0.138	0.000	0.403*	-0.683**	-0.049	-0.168
千粒重 1000-grain weight	0.403*	0.171	0.443*	-0.825**	0.095	-0.343
产量 Yield	-0.230	-0.816**	0.703**	0.268	-0.849**	0.781**

EPMSS: percentage of the matter exportation from stem-sheath; TPMSS: percentage of the matter transformation from stem-sheath. BPS: biomass per stem; BP: biomass of population.

3.2 生态条件与栽培方式对水稻产量的影响

水稻产量各构成因素直接决定产量的高低, 李旭毅等^[10]、杨惠杰等^[18]和吴文革等^[19]研究认为群体颖花量对水稻产量贡献最大; 吴桂成等^[20]认为高产主要是依靠提高有效穗数和增加每穗粒数。本研究结果表明, 水稻产量与全生育期及日均日照时数极显著正相关, 与降雨量极显著负相关, 日均温则显著影响产量构成因素(表 10), 充足的光温条件是水稻产量形成的基础。群体颖花量是决定水稻产量的最主要因素, 不同生态条件水稻高产的实现途径不同。在仁寿主要通过提高单位面积有效穗数来保证较高群体颖花量, 同时增加籽粒的充实情况, 实现水稻高产; 在郫县每穗颖花数对产量的贡献率大于单位面积有效穗数, 在保证适当单位面积有效穗数的条件下, 提高每穗颖花数是该生态点高产的主要途径; 在雅安则以单位面积有效穗数和每穗颖花数共同的提高来实现水稻产量的提高。

不同栽培方式间水稻产量差异显著, 而前人研究结果不一^[5-6,21]。李杰等^[11]认为其原因可能与播栽期设置和密、肥、水等栽培管理措施是否配套及其到位情况不同有关。本研究进一步证明, 生态条件和秧龄等栽培措施的改变均能导致水稻产量的差异。因此, 在实际生产中应根据不同的生态条件选取适宜的栽培方式和管理措施。潘圣刚等^[21]研究指出秧龄对水稻单位面积有效穗数、每穗总粒数、实粒数和收获产量存在显著影响, 合理苗龄移栽有利于产量的提高和稻米品质的改善。本研究结果表明, 长秧龄移栽能有效提高产量的全部或者几个构成因素, 从而提高产量; 仁寿和郫县长秧龄单苗优化定

抛栽培方式能有效提高单位面积有效穗数和每穗颖花数, 确保较高的群体颖花量, 显著增产; 雅安长秧龄单苗手插在保证较高群体颖花量的情况下, 能促进籽粒充实灌浆, 有效提高水稻产量。

3.3 干物质生产与产量的关系

水稻产量是植株干物质积累、分配、运输与转化的结果。有关高产水稻干物质积累特性已有大量报道^[18-20,22-25]。杨惠杰等^[18,22-23]、马均等^[22]和敖和军^[23]研究认为抽穗至成熟阶段干物质的积累量与水稻产量密切相关; 陈温福等^[24]则认为水稻高产群体干物质积累的优势在于抽穗前; 邹应斌等^[25]研究指出不同生长阶段的干物质积累的比例协调是水稻高产的前提。本研究结果表明, 不同生态条件下, 高产水稻干物质生产特性不同。仁寿生态点, 产量与成熟期干物质积累总量($r = 0.849^{**}$)及抽穗前干物质积累量($r = 0.745^{*}$)都呈显著正相关; 郫县生态点, 产量则与播种至分蘖盛期($r = 0.771^{*}$)及拔节期至孕穗期($r = 0.688^{*}$)干物质积累量显著正相关, 与抽穗至成熟阶段干物质积累也呈正相关关系($r = 0.649$); 雅安生态点, 产量与抽穗前干物质积累量($r = 0.700^{*}$)显著正相关。而水稻籽粒的产量一部分来自抽穗后的光合产物, 另外一部分来自叶与茎鞘贮藏物质的再分配。凌启鸿等^[26]研究则指出, 产量的高低, 最终决定于抽穗至成熟阶段的光合生产能力。本研究则表明, 不同生态条件下, 抽穗后的光合生产能力及茎鞘干物质的转化与输出对产量的贡献不同。仁寿产量主要来自抽穗后的光合产物在籽粒中的积累, 与茎鞘物质的输出与转化相关不显著; 郫县茎鞘物质输出与转化对产量的贡献大于仁寿, 产量与孕穗

期茎鞘干物质比例($r=0.775^*$)显著正相关, 与成熟期茎鞘干物质比例($r=-0.757^*$)则呈显著负相关; 雅安抽穗后茎鞘干物质的输出和转化与产量均呈正相关, 对产量的作用明显。

4 结论

不同生态条件下, 实现水稻高产的途径不同, 仁寿等光温充足稻区主要通过提高单位面积有效穗数; 郫县(光温适中)是在保证适当单位面积有效穗数的条件下, 提高每穗颖花数; 雅安等高湿寡照稻区则靠单位面积有效穗数和每穗颖花数的共同提高。不同生态条件下, 水稻具有不同的干物质积累与分配特性。为获得高产, 应根据具体的生态条件, 采用合理的栽培措施对其有效调控。以仁寿为代表的光温资源充足地区, 采用 50 d 秧龄优化定抛能有效地协调不同生育阶段干物质的积累量, 提高叶片干物质的分配比例, 保持较高的光合生产能力, 促进水稻的增产; 在郫县等光温适中地区, 50 d 秧龄单苗优化定抛能显著提高播种至分蘖盛期和拔节期至孕穗期水稻干物质的积累, 同时提高孕穗期茎鞘干物质比例, 增产效益显著; 雅安等高湿寡照地区, 50 d 秧龄单苗手插具有较高穗前干物质积累量和抽穗后茎鞘干物质输出与转化效率, 能显著提高产量。

References

- [1] Li J(李杰), Zhang H-C(张洪程), Dong Y-Y(董洋阳), Ni X-C(倪晓诚), Yang B(杨波), Gong J-L(龚金龙), Chang Y(常勇), Dai Q-G(戴其根), Huo Z-Y(霍中洋), Xu K(许轲), Wei H-Y(魏海燕). Effects of cultivation methods on yield, growth stage and utilization of temperature and illumination of rice in different ecological regions. *Sci Agric Sin* (中国农业科学), 2011, 44(13): 2661–2672 (in Chinese with English abstract)
- [2] Liang T-F(梁天锋), Xu S-H(徐世宏), Liu K-Q(刘开强), Wang D-J(王殿君), Liang H(梁和), Dong D-F(董登峰), Wei S-Q(韦善清), Zhou J-M(周佳民), Hu J-M(胡钧铭), Jiang L-G(江立庚). Studies on influence of cultivation patterns on characteristics of nitrogen utilization and distribution in rice. *Plant Nutr Fert Sci* (植物营养与肥料学报), 2010, 16(1): 20–26 (in Chinese with English abstract)
- [3] Ren W-J(任万军), Yang W-Y(杨文钰), Fan G-Q(樊高琼), Chen D-C(陈德春), Wu J-X(吴锦秀). Effect of different tillage and transplanting methods on soil fertility and root growth of rice. *J Soil Water Conser* (水土保持学报), 2007, 21(2): 108–110 (in Chinese with English abstract)
- [4] Sanoh Y, Mano Y, Ookawa T, Hirasawa T. Comparison of dry matter production and associated characteristics between direct-sown and transplanted rice plants in a submerged paddy field and relationships to planting patterns. *Field Crops Res*, 2004, 87: 43–58
- [5] He R-Y(何瑞银), Luo H-Y(罗汉亚), Li Y-T(李玉同), Wang X-H(汪小函), Zhang L(张璐). Comparison and analysis of different rice planting methods in China. *Trans CSAE* (农业工程学报), 2008, 24(1): 167–171 (in Chinese with English abstract)
- [6] Luo X-W(罗锡文), Xie F-P(谢方平), Ou Y-G(区颖刚), Li B-X(李佰祥), Zheng D-K(郑丁科). Experimental investigation of different transplanting methods in paddy production. *Trans CSAE* (农业工程学报), 2004, 20(1): 136–139 (in Chinese with English abstract)
- [7] Chen S, Cai S G, Chen X, Zhang G P. Genotypic differences in growth and physiological responses to transplanting and direct seeding cultivation in rice. *Rice Sci*, 2009, 16: 143–150
- [8] Wang X(王勋), Dai T-B(戴廷波), Jiang D(姜东), Jing Q(荆奇), Cao W-X(曹卫星). Yield-formation and source-sink characteristics of rice genotypes under two different eco-environments. *Chin J Appl Ecol* (应用生态学报), 2005, 16(4): 615–619 (in Chinese with English abstract)
- [9] Dong Z(董钻), Shen X-Y(沈秀瑛). Introduction to Crop Cultivation (作物栽培学总论). Beijing: China Agriculture Press, 2000. p 114
- [10] Li X-Y(李旭毅), Sun Y-J(孙永健), Cheng H-B(程宏彪), Zheng H-Z(郑洪幛), Liu S-J(刘树金), Hu R(胡蓉), Ma J(马均). Effects of nitrogen regulation on dry matter accumulation and grain yield of rice under different cultivation models and two kinds of ecological conditions. *Plant Nutr Fert Sci* (植物营养与肥料学报), 2011, 17(4): 773–781 (in Chinese with English abstract)
- [11] Deng F(邓飞), Wang L(王丽), Ye D-C(叶德成), Ren W-J(任万军), Yang W-Y(杨文钰). Effects of ecological conditions and cultivation methods on rice starch RVA profile characteristics and protein content. *Acta Agron Sin* (作物学报), 2012, 38(4): 717–724 (in Chinese with English abstract)
- [12] Yang B(杨波), Ren W-J(任万军), Yang W-Y(杨文钰). Effects of density on grain yield and population growth quality of rice in the optimized seedling-broadcasting technique. *Hybrid Rice* (杂交水稻), 2006, 21(5): 64–68 (in Chinese with English abstract)
- [13] Zhu Q-S(朱庆森), Wang Z-Q(王志琴), Zhang Z-J(张祖建), Hui D-F(惠大丰). Study on indicators of grain-filling of rice. *J Jiangsu Agric Coll* (江苏农学院学报), 1995, 16(2): 1–4 (in Chinese with English abstract)

- [14] Tong P(童平), Yang S-M(杨世民), Ma J(马均), Wu H-Z(吴合洲), Fu T-L(傅泰露), Li M(李敏), Wang M-T(王明田). Photosynthetic characteristics and dry matter accumulation of hybrid rice varieties under different light conditions. *Chin J Appl Ecol* (应用生态学报), 2008, 19(3): 505–511 (in Chinese with English abstract)
- [15] Ren W-J(任万军), Yang W-Y(杨文钰), Fan G-Q(樊高琼), Zhu X-M(朱雪梅), Ma Z-H(马周华), Xu J-W(徐精文). Effect of low light on dry matter accumulation and yield of rice. *J Sichuan Agric Univ* (四川农业大学学报), 2003, 21(4): 292–296 (in Chinese with English abstract)
- [16] Li J(李杰), Zhang H-C(张洪程), Chang Y(常勇), Gong J-L(龚金龙), Guo Z-H(郭振华), Dai Q-G(戴其根), Huo Z-Y(霍中洋), Xu K(许珂), Wei H-Y(魏海燕), Gao H(高辉). Characteristics of photosynthesis and matter production of rice with different planting methods under high-yielding cultivation condition. *Acta Agron Sin* (作物学报), 2011, 37(7): 1235–1248 (in Chinese with English abstract)
- [17] Sharma A P, Singh S P. Relationship of physiological attributes with grain yield in rice. *Agric Sci Digest*, 2000, 20: 191–192
- [18] Yang H-J(杨惠杰), Li Y-Z(李义珍), Yang R-C(杨仁崔), Jiang Z-W(姜照伟), Zheng J-S(郑景生). Dry matter production characteristics of super high yielding rice. *Chin J Rice Sci* (中国水稻科学), 2001, 15(4): 265–270 (in Chinese with English abstract)
- [19] Wu W-G(吴文革), Zhang H-C(张洪程), Wu G-C(吴桂成), Zhai C-Q(翟超群), Qian Y-F(钱银飞), Chen Y(陈烨), Xu J(徐军), Dai Q-G(戴其根), Xu K(许珂). Preliminary study on super rice population sink characters. *Sci Agric Sin* (中国农业科学), 2007, 40(2): 250–257 (in Chinese with English abstract)
- [20] Wu G-C(吴桂成), Zhang H-C(张洪程), Qian Y-F(钱银飞), Li D-J(李德剑), Zhou Y-Y(周有炎), Xu J(徐军), Wu W-G(吴文革), Dai Q-G(戴其根), Huo Z-Y(霍中洋), Xu K(许珂), Gao H(高辉), Xu Z-J(徐宗进), Qian Z-H(钱宗华), Sun J-Y(孙菊英), Zhao P-H(赵品恒). Rule of grain yield components from high yield to super high yield and the characters of super-high yielding *Japonica* super rice. *Sci Agric Sin* (中国农业科学), 2010, 43(2): 266–276 (in Chinese with English abstract)
- [21] Pan S-G(潘圣刚), Huang S-Q(黄胜奇), Jiang Y(江洋), Cai M-L(蔡明历), Cao C-G(曹凑贵), Tang X-R(唐湘如), Li G-X(黎国喜). Effects of rice seedling age and transplanting density on the biological characteristics of rice. *Acta Agric Boreali-Sin* (华北农学报), 2011, 26(3): 134–138 (in Chinese with English abstract)
- [22] Ma J(马均), Zhu Q-S(朱庆森), Ma W-B(马文波), Tian Y-H(田彦华), Yang J-C(杨建昌), Zhou K-D(周开达). Studies on the photosynthetic characteristics and accumulation and transformation of assimilation product in heavy panicle type of rice. *Sci Agric Sin* (中国农业科学), 2003, 36(4): 375–381 (in Chinese with English abstract)
- [23] Ao H-J(敖和军), Wang S-H(王淑红), Zou Y-B(邹应斌), Peng S-B(彭少兵), Tang Q-Y(唐启源), Fang Y-X(方远祥), Xiao A-M(肖安民), Chen Y-M(陈玉梅), Xiong C-M(熊昌明). Study on yield stability and dry matter characteristics of super hybrid rice. *Sci Agric Sin* (中国农业科学), 2008, 41(7): 1927–1936 (in Chinese with English abstract)
- [24] Chen W-F(陈温福), Xu Z-J(徐正进), Zhang L-B(张龙步). Physiological Basis of Rice Breeding for Super High Yield (水稻超高产育种生理基础). Shenyang: Liaoning Science and Technology Publishing House, 1995. pp 69–94
- [25] Zou Y-B(邹应斌), Huang J-L(黄见良), Tu N-M(屠乃美), Li H-S(李合松), Huang S-P(黄升平), Zhang Y-Z(张杨珠). Effects of the VSW cultural method on yield formation and physiological characteristics in double cropping hybrid rice. *Acta Agron Sin* (作物学报), 2001, 27(3): 343–350 (in Chinese with English abstract)
- [26] Ling Q-H(凌启鸿), Zhang H-C(张洪程), Cai J-Z(蔡建中), Su Z-F(苏祖芳), Ling L(凌励). Investigation on the population quality of high yield and its optimizing control programme in rice. *Sci Agric Sin* (中国农业科学), 1993, 26(6): 1–11 (in Chinese with English abstract)