植物营养与肥料学报 2012,18(2):273 -282
Plant Nutrition and Fertilizer Science

西南稻区杂交中稻产量的地域差异及其高效施氮量研究

徐富贤,熊 洪,张 林,郭晓艺,朱永川,刘 茂,周兴兵
(四川省农业科学院水稻高粱研究所,四川泸州 646000)

摘要: 为了提高西南稻区水稻施氮效率,2009 年以杂交中稻Ⅱ优 7 号和渝香优 203 为材料,在西南稻区 4 省(市)的 7 个生态点采用相同的试验方案,研究了试验点的地理位置、土壤养分、施氮量对水稻产量、穗粒结构及氮高效施用量的影响。结果表明,除品种间的最高苗数和有效穗差异不显著外,产量及其穗粒结构在品种间、试验地点间及施氮水平间达显著或极显著差异水平;有效穗、穗粒数、结实率和千粒重对产量的偏相关系数达显著或极显著水平,增加有效穗和提高结实率是西南地区提高水稻产量的主攻目标,而实现的途径是增施有机肥和提高土壤有效氮含量。经逐步回归分析,杂交中稻的氮高效施用量与试验所处的地理位置和土壤养分呈极显著线性关系,决定系数为 0.9995 ~ 0.9999,可作为制定各地水稻高产高效氮肥施用量的科学依据。

关键词: 杂交中稻;地理位置;土壤养分;高效施氮量
中图分类号: S511.3+2.06　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1008 -505X(2012)-02 -0273 -10

Regional yield variations and optimized application amounts of nitrogen of mid-season hybrid rice in Southwest China

XU Fu-xian, XIONG Hong, ZHANG Lin, GUO Xiao-yi, ZHU Yong-chuan, LIU Mao, ZHOU Xing-bing
(*Rice and Sorghum Institute, Sichuan Academy of Agricultural Sciences, Luzhou, Sichuan 646000, China*)

Abstract: The variations of yield, panicle-grain structure and the optimum application amount of nitrogen of mid-season hybrid rice were studied by using the cultivars, II-you 7 and Yuxiang-you 203, in different ecological sites, soil nutrient statuses and N application levels in 2009. Data were analyzed by using variance, correlation, regression, path and partial correlations. The results show that there are significant or highly significant differences of grain yields and panicle-grain structure between the 7 sites, 4 fertilizer application treatments and 2 combination except for the maximum tillers and productive panicle. There are highly significant correlations between spikelets per panicle, seed setting percentage, 1000-grain weight and yield. The main goals for high yield would be increase the productive panicle and seed setting percentage, which would be achieved by increasing soil organic matter and available nitrogen content in southwest China. Multiple stepwise regression analysis shows that the optimize application amount of nitrogen of mid-season hybrid rice are significantly influenced by different ecological sites and soil nutrient statuses, and the determination coefficient ranges from 0.9995 –0.9999, which would be used as the scientific basis for the determination of the efficient applied N amount for full scale rice cultivation.

Key words: mid-season hybrid rice; ecological site; soil nutrient; optimized nitrogen amount

近年来,我国各地水稻高产纪录层出不穷,但施氮水平也显著增加,高产与高效的统一性较差。同一水稻品种(组合)在不同生态区种植不仅产量差异较大[1-2],而且对氮肥的吸收利用特点也截然不

收稿日期: 2011 -09 -05　　**接受日期:** 2011 -10 -19
基金项目: 粮食科技丰产工程(2011BAD16B05 -1);西南水稻创新体系建设;四川省学术带头人培养基金;四川省水稻育种攻关;四川省财政推广项目资助。
作者简介: 徐富贤(1965—),男,四川泸县人,研究员,主要从事水稻栽培和生理生态研究。E-mail: Xu6501@163.com

同[3]。因此,探明不同地区水稻高产现状及高效施氮量十分重要。提高稻田氮肥利用率是国内外长期以来研究的热点课题[4-5]。氮肥的精准施用包括计算机决策支持系统指导施肥和实地氮肥管理技术两个方面。前者有水稻管理系统[6]、氮素管理模式[7]和实地施肥管理模式[8]3种,它们的共同持点是根据土壤养分供给状况、气候条件、施肥水平、目标产量及水稻不同生长时期的营养状况等,通过计算机模拟为稻农提出更为经济有效的施肥方案,虽然其具有较好的增产增收效果[9],但受条件限制很难在水稻大面积生产上推广应用。水稻实地氮肥管理技术是以氮肥管理为中心,多元素配合的水稻优质高产高效施肥模式。在东南亚应用该模式可以使水稻增产11%,同时可较大幅度地提高氮肥吸收利用效率[10-11]。刘立军等[12-13]的研究证明,采用实地氮肥管理在不降低水稻产量的前提下,对氮、磷、钾的吸收高峰均出现在穗分化至抽穗期,此阶段氮、磷、钾的吸收量约占最终总吸收量的比例均明显高于农民习惯施肥方法。氮肥精准施用技术在不同地区应有不同的模式。西南地区包括四川、重庆、贵州、云南四省(市)的345个县(区),现有稻田面积467万公顷以上。该区生态条件复杂,水稻以杂交一季中籼为主,三系杂交水稻种植面积比例大,全国较多水稻高产纪录出自该区,但缺乏相应的水稻精准施肥系统[14]。为此,本文以2个杂交中稻品种为材料,在7个不同生态点,设统一的施氮处理和栽培密度,研究杂交中稻产量及其穗粒结构与试验地点、土壤养分、施氮水平及其互作关系,以期为该生态区杂交中稻高产、氮肥高效利用栽培提供理论与实践依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验于2009年在西南稻区的四川、重庆、云南、贵州4省(市)的7个生态点进行(表1),均采用相同的试验方案。

以大面积推广的杂交中稻高产品种Ⅱ优7号和高产优质新品种渝香优203为材料,按各地常年春季高产播种期播种,地膜湿润育秧,中苗移栽,按30 cm×16.7 cm规格每穴栽双株。试验设4个施氮水平,即在施P_2O_5 75 kg/hm^2、K_2O 75 kg/hm^{2}作底肥的基础上,分别设施氮N 0、90、150、210 kg/hm^2(其中底肥占60%、蘖肥20%、穗肥20%),分别表示为N0、N90、N150、N210。试验采用裂区设计,以肥料为主处理,品种为副处理,共8个处理,3次重复。小区面积16.5 m^2,区间走道53.3 cm,扎单埂,区组间走道86.6 cm,扎双埂,均用地膜包覆。

表1 各试验点的地理位置及土壤养分状况

Table 1 Geography position and nutrient status of soil for tested sites

项目 Item	四川泸县 Luxian, Sichuan	重庆永川 Yongchuan, Chongqing	四川广汉 Guanghan, Sichuan	云南宾川 Binchuan, Yunnan	四川东坡 Dongpo, Sichuan	贵州小河 Xiaohe, Guizhou	四川中江 Zhongjiang, Sichuan
经度 Longitude (°)	105.23	105.71	104.11	100.35	103.83	106.39	105.02
纬度 Latitude (°)	29.10	29.75	31.03	25.49	30.12	36.30	30.61
海拔 Altitude (m)	301	297	450	1420	420	1134	350
有机质 OM (g/kg)	26.11	27.16	23.73	34.93	27.02	29.40	25.60
全氮 Total N(g/kg)	1.39	1.31	1.65	2.48	1.93	1.98	1.59
全磷 Total P(g/kg)	0.42	0.39	0.68	0.87	0.58	1.10	0.66
全钾 Total K (g/kg)	13.5	12.0	11.5	15.0	13.0	11.0	17.0
pH值 pH value	6.07	5.98	5.85	7.73	6.32	6.78	6.71
有效氮 Avail. N(mg/kg)	110	134	183	123	108	130	90
有效磷 Avail. P(mg/kg)	6.3	8.7	31.0	14.0	33.0	13.0	9.0
有效钾 Avail. K(mg/kg)	81.8	168.0	44.9	148.0	92.4	206.0	163.0

1.2　测定项目与方法

用西安诺泰精密仪器有限公司生产的 TZS - IIW GPS 定时定位土壤水分测定仪测定各点试验田所处位置的经度、纬度，用北京首纬世纪科技有限公司生产的 180 K 海拔仪测海拔高度。在本田施肥前按梅花五点取样法，采取稻田 0—20 cm 耕作层混合土样 2 kg 并风干，各地样品统一送四川省农业科学院分析测试中心，分析各试验点土壤有机质，全氮，全磷，全钾，pH，有效氮，有效磷，有效钾含量。水稻分蘖期每小区定点 10 穴，调查分蘖动态；成熟期各处理每次重复均按小区平均有效茎数取样 5 穴，在室内用常规方法考查穗部性状，并实收小区产量（按 13.5% 的子粒含水量折合单产）。

1.3　统计分析

首先进行各处理间子粒实收产量和穗粒结构的方差分析，确定各试验点的氮素高效施用量；然后开展产量穗粒结构（y_i）对其产量（y_y）的回归与通径分析，产量及其穗粒结构与试验因子（后同）如经度（x_1）、纬度（x_2）、海拔（x_3）、施氮量（x_4）、土壤有机质（x_5）、全氮（x_6）、全磷（x_7）、全钾（x_8）、pH（x_9）、有效氮（x_{10}）、有效磷（x_{11}）、有效钾（x_{12}）（表 1）间的偏相关分析，明确水稻高产主攻的穗粒结构目标和重要的环境影响因子，最后对氮素高效施用量（y）与试验因子间进行偏相关、逐步回归分析，建立氮高效施用量的预测模型。

所有计算由 DPS 数据处理系统和 Excel 操作系统完成。

2　结果与分析

2.1　不同试验地点不同施氮水平下稻谷产量及其穗粒结构

2.1.1 各试验地点不同施氮水平下稻谷产量及其穗粒结构的差异　从试验结果（表 2）可见，相同地点各试验处理间产量及其相关性状有不同程度的差异。联合方差分析结果（表 3）显示，产量在试验地点间、供试品种间、施氮处理间及以上 3 因子间的互作均达显著或极显著差异，部分产量相关性状的差异达显著水平。表明在不同生态条件下，选择品种和确定适宜的施氮量均是水稻高产、高效的重要途径。

2.1.2 西南区水稻高产的重要穗粒结构目标　穗粒结构决定产量的高低，不同地区因生态条件及土壤条件的差异，水稻高产主攻的穗粒结构目标各异。从试验结果（表 4）可以看出，有效穗（y_2）、穗粒数（y_3）、结实率（y_4）和千粒重（y_5）对产量的偏相关系数达显著或极显著水平，表明这 4 个性状对产量均具有重要贡献。其中，有效穗（y_2）和结实率（y_4）的直接通径系数明显高于穗粒数（y_3）和千粒重（y_5），两个品种均表现一致。因此，增加有效穗和提高结实率是西南地区提高水稻产量的主攻目标。

2.1.3 影响产量及其穗粒结构的关键环境因子　从 7 个产量及穗粒结构性状分别与试验因子（表 1）的偏相关分析结果（表 5）可见，不同产量性状间受环境影响的关键因子不同，品种间的响应也有一定差异。从参试的两个品种同时受相同的环境因子影响看，最高苗分别与施氮水平（X_4）和全氮（x_6）呈正相关，有效穗只与施氮水平（X_4）呈正相关，穗粒数在两个品种间没有相同响应因子；结实率分别与施氮水平（X_4）、有效磷（x_{11}）呈负相关，与有效氮（x_{10}）呈正相关；千粒重与有机质（x_5）和有效磷（x_{11}）呈正相关，与有效氮（x_{10}）呈负相关；产量与施氮水平（X_4）呈正相关。据此，增施有机肥，适当提高氮肥施用量（过高会降低结实率），是西南区水稻高产的普遍措施。其他响应因子在品种间表现不尽相同，说明因种施肥是十分必要的。

2.2　西南区水稻氮素高效施用量的预测

方差分析结果（表 6）表明，II 优 7 号和渝香优 203 两个品种产量分别在 7 个地点的施氮水平间差异达显著或极显著水平。根据同一个地点不同施氮量间产量的多重比较结果，确定两个品种分别在 7 个地点的高效施氮量，方法是在同一个地点不同施氮量间，在较高产的同一档次的施氮处理中，将施氮量较低处理的施氮量确定为高效施氮量。以 II 优 7 号在四川泸县点为例，N90、N150、N210 3 个施氮水平间的产量差异不显著，但均分别比 N0 处理显著增产，则将在该地点的高效施氮量确定为 90 kg/hm^2，以此类推。

将表 6 中确定的高效施氮量与试验因子（表 1）进行回归分析，从表 7 可以看出，II 优 7 号的高效施氮量由纬度（x_2）、全钾（x_8）、有效氮（x_{10}）、有效磷（x_{11}）4 个因子决定；渝香优 203 则由经度（x_1）、海拔（x_3）、全氮（x_6）、pH（x_9）、有效钾（x_{12}）5 个因子决定。两个品种的预测高效施氮量回归方程的决定系数均高达近 100%（表 7）。因此，利用该回归方程预测两个品种在不同地区种植的高效施氮量具有较高的可靠性。

表2 不同地点和施氮量下的产量及其穗粒结构

Table 2 Yield and panicle-grain structure under the condition of different N fertilizer rates in the tested sites

地点 Site	品种 Cultivar	施氮量 N rate (kg/hm²)	最高苗数 Max. tiller (×10⁴/hm²)	有效穗 Productive panicle (×10⁴/hm²)	穗粒数 Spikelets per panicle	结实率 Seed setting (%)	千粒重 1000-grain weight (g)	产量 Yield (kg/hm²)
四川泸县 Luxian, Sichuan	II优7号 II-you 7	N0	238.65 b	169.35 c	189.65 a	89.45 a	28.37 a	8176.87 b
		N90	324.00 a	205.95 b	168.90 b	89.56 a	28.58 a	8833.76 a
		N150	328.05 a	210.00 ab	167.75 b	87.21 a	28.42 a	8759.21 a
		N210	355.95 a	224.70 a	154.62 c	88.11 a	28.79 a	8775.33 a
	渝香优203 Yuxiang-you 203	N0	225.30 c	184.35 c	187.07 a	81.07 a	29.35 a	8019.70 b
		N90	292.65 b	204.00 b	180.65 b	80.70 a	29.15 a	8507.33 a
		N150	350.70 a	227.40 a	167.51 c	80.61 a	29.01 a	8493.23 a
		N210	371.25 a	223.95 a	166.34 c	80.99 a	29.28 a	8287.70 ab
重庆永川 Yongchuan, Chongqing	II优7号 II-you 7	N0	259.50 c	205.50 b	173.90 a	90.80 a	30.00 a	8308.85 b
		N90	280.50 b	222.00 a	174.70 a	88.60 ab	30.20 a	8725.93 ab
		N150	346.50 a	231.00 a	175.80 a	89.90 ab	29.50 a	9061.23 a
		N210	349.50 a	220.50 a	176.50 a	88.30 b	29.40 a	8613.48 ab
	渝香优203 Yuxiang-you 203	N0	262.50 c	196.50 b	178.50 a	90.30 a	30.00 a	8229.11 b
		N90	303.00 b	222.00 a	179.10 a	88.50 ab	29.10 ab	8680.95 a
		N150	337.50 a	231.00 a	181.90 a	87.60 ab	28.90 b	8877.22 a
		N210	355.50 a	223.50 a	180.50 a	85.90 b	28.60 b	8376.32 b
四川广汉 Guanghan, Sichuan	II优7号 II-you 7	N0	233.25 c	204.60 c	161.26 c	92.27 a	27.29 a	8174.85 d
		N90	338.85 b	221.40 b	167.39 b	90.14 ab	27.06 a	9161.05 b
		N150	348.15 b	226.65 b	173.61 a	87.62 b	26.82 a	9363.65 a
		N210	392.25 a	245.70 a	149.35 d	87.32 b	26.81 a	8645.10 c
	渝香优203 Yuxiang-you 203	N0	211.50 d	177.15 c	176.28 a	78.56 a	29.40 a	7302.90 b
		N90	331.95 c	224.55 b	166.01 b	77.74 a	28.64 ab	8442.00 a
		N150	399.45 b	228.30 ab	160.18 c	80.29 a	28.58 ab	8380.95 a
		N210	440.10 a	244.65 a	153.93 d	63.98 b	28.16 b	6901.55 c
四川东坡 Dongpo, Sichuan	II优7号 II-you 7	N0	281.25 c	177.00 b	147.76 c	87.59 a	29.75 a	5621.52 c
		N90	362.10 b	210.15 a	157.08 b	85.76 ab	30.20 a	7292.23 b
		N150	411.00 a	222.15 a	165.63 a	86.58 ab	29.44 a	7907.76 a
		N210	426.30 a	225.45 a	153.93 b	85.01 b	29.78 a	7643.96 ab
	渝香优203 Yuxiang-you 203	N0	275.55 c	186.90 b	160.58 c	75.43 a	30.23 a	5744.22 c
		N90	354.15 b	210.75 a	180.64 b	74.82 a	29.85 a	7388.35 b
		N150	395.40 a	225.75 a	192.81 a	73.36 a	29.86 a	7875.04 a
		N210	421.35 a	222.90 a	184.29 b	69.03 b	29.79 a	7316.77 b

续表 2　Table 2 continued

地点 Site	品种 Cultivar	施氮量 N rate (kg/hm²)	最高苗数 Max. tiller (×10⁴/hm²)	有效穗 Productive panicle (×10⁴/hm²)	穗粒数 Spikelets per panicle	结实率 Seed setting (%)	千粒重 1000-grain weight (g)	产量 Yield (kg/hm²)
贵州小河 Xiaohe, Guizhou	II 优 7 号 II - you 7	N0	256.80 d	207.75 c	149.96 c	88.29 a	27.51 a	7267.00 c
		N90	335.25 c	235.35 b	154.29 b	86.67 a	27.70 a	8664.90 b
		N150	384.00 b	238.80 ab	162.01 a	88.93 a	27.72 a	9491.55 a
		N210	433.50 a	250.05 a	162.30 a	86.55 a	27.62 a	9482.70 a
	渝香优 203 Yuxiang-you 203	N0	280.95 c	191.25 d	144.75 b	85.80 a	30.16 a	7115.90 b
		N90	322.80 b	214.05 c	150.46 a	85.25 a	30.30 a	8129.30 a
		N150	352.20 b	221.55 bc	153.37 a	84.20 ab	30.16 a	8515.95 a
		N210	408.15 a	241.50 a	152.92 a	82.70 b	30.15 a	8304.90 a

注(Note): 数值后不同字母表示同一地点同一品种同一列平均值比较在 5% 水平差异显著 Values followed by different letters in a column represent significant difference at the 0.05 level between different treatments for the same tested site and cultivar.

3　讨论

3.1　杂交中稻的高产栽培策略

不同稻区因生态条件的差异,其高产栽培策略有所不同。邹应斌[15]指出,水稻进一步高产或超高产栽培的技术策略应是选用分蘖能力中等、株高中杆或偏矮杆(90 ~ 100cm),大穗型(120 ~ 170 粒)品种,采用壮杆重穗栽培法,运用"稳前攻中促后"的水肥运筹原则,以壮杆大穗和高结实率而获得高产,是今后水稻超高产栽培的一条可能途径。徐富贤等[16]根据川东南冬水田地区日照条件差的生态特点,认为应采用稀植足肥促进扩"库"增"源"的高产栽培策略。周开达等[17]和袁隆平[18]认为重穗籼型杂交稻育种是我国水稻超高产育种的一条重要途径。郑家国等[14]指出川西平源杂交中稻的高产栽培策略是在适宜有效穗数的基础上增加穗粒数。以上研究结论均为局部地区的局部试验结果,难以据此推断某一个大的生态区的高产栽培策略。本研究以两个不同类型的杂交中稻品种为材料,在西南稻区的 7 个生态点采用相同的试验处理,通过联合方差分析与逐步回归分析,解析了该区杂交中稻高产的影响因子与主攻策略。结果表明,选择品种和确定适宜的施氮量均是水稻高产、高效的重要途径,增施有机肥和提高土壤有效氮含量,是西南区水稻高产的共性措施;在产量构成因素中的有效穗数、穗粒数、结实率和千粒重均不同程度地对产量有显著贡献,但增加有效穗和提高结实率的直接作用较大,应是西南地区提高水稻产量的主攻目标。

3.2　水稻精准施氮量的预测

精准施氮是提高稻田氮肥利用效率的重要途径,如何确定目标稻田的高效施氮量是基础。先期研究形成的水稻管理系统[6]、氮素管理模式[7]和实地施肥管理模式[8]均具较好的节肥增产效果,但应同时满足的已知条件太多,如水稻品种只考虑到品种的籼、粳之分,种植季节之分,生育期长短之分,而实际上即使是生育期相同的同类型品种,因品种间氮素的吸收利用率存在较大差异[5],相同目标产量的氮素需求量也有所不同。

近年较多学者就水稻肥料高效利用途经进行了探索。郑圣先等[19]研究了不同生产力水稻土的有机质和养分含量状况,认为低产田与水稻土的结构差、养分缺乏有关。张秀芝等[20]模拟了潜江地区水稻产量(y)和施氮量(x)拟合得出一元二次关系式: $y = -0.0728x^2 + 22.335x + 6811.5$, $R^2 = 0.9442$。杨梢娜等[21]指出,在施 N 150 kg/hm² 基础上,配施适量有机肥有助于提高氮素利用率和产量。王伟妮等[22]研究表明,目前湖北省水稻平衡施用氮、磷、钾肥的增产与增收效果显著。

以上研究成果对指导局部地区水稻高效施肥有较大作用。由于气候条件一般县级以上才有观测数

表3 试验地点、品种及施肥水平间产量和穗粒结构的差异比较

Table 3 Comparison on yield and panicle-grain structure under different experiment sites, cultivars and N application rates

项目 Item	变异来源 Variation source	最高苗数 Max. tiller ($\times10^4/hm^2$)	有效穗 Productive panicle ($\times10^4/hm^2$)	穗粒数 Spikelets per panicle	结实率 Seed setting (%)	千粒重 1000-grain weight (g)	产量 Yield (kg/hm^2)
试验地点 Site	四川泸县 Luxian, Sichuan	310.82 c	206.21 b	172.81 ab	84.71 c	28.87 c	8481.64 ab
	重庆永川 Yongchuan, Chongqing	311.81 c	219.00 a	177.61 a	88.74 a	29.46 b	8609.13 a
	四川广汉 Guanghan, Sichuan	336.94 b	221.63 a	163.50 c	82.24 d	27.85 d	8296.51 c
	云南宾川 Binchuan, Yunnan	369.66 a	205.28 b	151.00 d	87.70 ab	29.69 ab	8022.57 d
	四川东坡 Dongpo, Sichuan	365.89 a	210.13 b	167.84 bc	79.70 e	29.86 a	7098.73 f
	贵州小河 Xiaohe, Guizhou	346.71 b	225.04 a	153.76 d	86.05 bc	28.92 c	8371.52 bc
	四川中江 Zhongjiang, Sichuan	353.06 ab	210.56 b	168.75 b	80.74 de	27.05 e	7251.18 e
供试品种 Cultivar	II优7号 II-you 7	344.48 a	215.44 a	162.32 b	88.18 a	28.50 b	8235.35 a
	渝香优203 Yuxiang-you 203	339.77 a	212.51 a	167.75 a	80.35 b	29.13 a	7802.17 b
施氮量 N rate (kg/hm^2)	N0	262.52 d	187.96 c	164.43 ab	85.17 a	28.87 a	7166.77 c
	N90	333.01 c	214.08 b	165.23 ab	84.68 a	29.46 ab	8182.04 b
	N150	373.18 b	224.52 a	168.02 a	85.05 a	27.85 b	8535.92 a
	N210	399.79 a	229.35 a	162.48 b	82.17 b	29.69 b	8190.30 b
显著水平(P) Significant level(P)							
品种 Cultivar(A)		0.2764	0.1400	0.0003	<0.0001	<0.0001	<0.0001
地点 Site(B)		<0.0001	0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001
施氮量 N rate(C)		<0.0001	<0.0001	0.0368	0.0069	0.0442	<0.0001
A×B		0.1440	0.0581	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001
A×C		0.9262	0.7674	0.5952	0.4141	0.3138	0.0134
B×C		0.0429	0.4042	0.0007	0.2480	0.3265	<0.0001
A×B×C		0.1738	0.1857	0.096	0.0744	0.1670	0.0079

注(Note): 同一列数值后不同字母表示同一项目不同处理间在5%水平差异显著 For the same item, values followed by different letters in the same column represent significant difference between different treatments at the 0.05 level.

表 4　穗粒结构(Y_t) 对其产量(y_y)的回归与通径分析

Table 4　Regression and path analysis of pencile-grain structure on grain yield

品种 Cultivar	因子 Factor	*R*p	*t*	*P*	De	间接作用 Indirect effect				
						总和 Total	→x_2	→x_3	→x_4	→x_5
Ⅱ优 7 号 Ⅱ-you 7	y_2	0.8862	9.17**	<0.0001	0.7652	-0.1054		-0.0051	-0.1551	0.0548
	y_3	0.7939	6.26**	<0.0001	0.5568	-0.2999	-0.0071		-0.3348	0.0349
	y_4	0.8471	7.64*	<0.0001	0.7278	-0.3266	-0.1631	-0.2561		-0.0705
	y_5	-0.3884	2.02*	0.0545	-0.1781	0.1791	-0.2356	-0.1090	0.2881	
渝香优 203 Yuxiang-you 203	y_2	0.7583	5.58**	<0.0001	0.6203	-0.0953		-0.0059	-0.0694	-0.0200
	y_3	0.4491	2.41**	0.0240	0.2661	-0.0307	-0.0138		-0.0111	-0.0196
	y_4	0.7233	5.02**	<0.0001	0.5576	0.0081	-0.0772	-0.0053		0.0134
	y_5	0.4578	2.47*	0.0210	0.2734	0.0082	-0.0453	-0.0190	0.0272	

注(Note): Rp—偏相关系数 Partial correlation coefficient; *t* — *t* 值 *t* value; *P*—*P* 值 *P* value; De—直接作用 Direct effect. *, ** —分别表示差异显著和极显著 Indicate significant difference at $P<0.05$ and $P<0.01$ levels, respectively.

表 5　产量及其穗粒结构与试验因子间的偏相关分析

Table 5　Significance test for partial correlation coefficients of experiment factors on yield and panicle-grain structure

性状 Trait	Ⅱ优 7 号 Ⅱ-you 7				渝香优 203 Yuxiangyou 203			
	RI	*R*p	*t*	*P*	RI	*R*p	*t*	*P*
最高苗 Max. tiller ($\times10^4/hm^2$)	r(y_1,x_4)	0.9502	14.62**	<0.0001	r(y_1,x_4)	0.9370	13.14**	<0.0001
	r(y_1,x_5)	-0.5843	3.45**	0.0021	r(y_1,x_6)	0.6091	3.76**	0.0009
	r(y_1,x_6)	0.8011	6.42**	<0.0001	r(y_1,x_{11})	0.3818	2.02*	0.0538
	r(y_1,x_{10})	-0.3961	2.07*	0.0495				
有效穗 Productive panicle ($\times10^4/hm^2$)	r(y_2,x_2)	0.6360	3.95**	0.0006	r(y_2,x_4)	0.8867	9.59**	<0.0001
	r(y_2,x_4)	0.9169	11.02**	<0.0001	r(y_2,x_8)	-0.5161	3.01**	0.0057
	r(y_2,x_{10})	0.5817	3.43**	0.0022				
	r(y_2,x_{12})	0.4215	2.23*	0.0354				
穗粒数 Spikelets per panicle	r(y_3,x_6)	-0.7010	4.92**	<0.0001	r(y_3,x_7)	-0.7838	6.18**	<0.0001
	r(y_3,x_9)	0.2484	1.28	0.2112	r(y_3,x_{11})	0.3738	1.97	0.0595
结实率 Seed setting (%)	r(y_4,x_2)	-0.6856	4.42**	0.0002	r(y_4,x_4)	-0.3583	1.80	0.0850
	r(y_4,x_4)	-0.4689	2.49*	0.0205	r(y_4,x_7)	-0.4422	2.31*	0.0301
	r(y_4,x_5)	0.8925	9.28**	<0.0001	r(y_4,x_{10})	0.5664	3.22**	0.0038
	r(y_4,x_{10})	0.7550	5.40**	<0.0001	r(y_4,x_{11})	-0.5300	2.93**	0.0075
	r(y_4,x_{11})	-0.3587	1.80	0.0846	r(y_4,x_{12})	0.6270	3.78**	0.0010
千粒重 1000-grain weight (g)	r(y_5,x_5)	0.9391	12.82**	<0.0001	r(y_5,x_4)	-0.5964	3.49**	0.0020
	r(y_5,x_7)	-0.9147	10.61**	<0.0001	r(y_5,x_5)	0.9384	12.73**	<0.0001
	r(y_5,x_{10})	-0.6793	4.34**	0.0002	r(y_5,x_8)	-0.8592	7.88**	<0.0001
	r(y_5,x_{11})	0.7848	5.94**	<0.0001	r(y_5,x_{10})	-0.7499	5.32**	<0.0001
	r(y_5,x_{12})	0.7309	5.02**	<0.0001	r(y_5,x_{11})	0.6061	3.57**	0.0016
产量 Yield (kg/hm^2)	r(y_y,x_4)	0.7389	5.26**	<0.0001	r(y_y,x_2)	-0.4871	2.67**	0.0133
	r(y_y,x_8)	-0.3056	1.54	0.1368	r(y_y,x_4)	0.5960	3.56**	0.0016
	r(y_y,x_{10})	0.6290	3.88**	0.0007	r(y_y,x_8)	-0.7048	4.76**	0.0001
					r(y_y,x_{11})	-0.6499	4.10**	0.0004

注(Note): RI—偏相关项 Partial correlation item; *R*p—偏相关系数 Partial correlation coefficient; *t* — *t* 值 *t* value; *P*—*P* 值 *P* value; *, ** —分别表示差异显著和极显著 Indicate significant difference at $P<0.05$ and $P<0.01$ levels, respectively.

表6 不同地点和施氮量下的收获产量

Table 6 The harvest grain yield under the condition of different N application rates and tested sites

品种 Cultivar	地点 Site	水稻产量 (kg/hm²) Rice yield				F值 F value	高效施氮量 ONFA (kg/hm²)
		N0	N90	N150	N210		
Ⅱ优7号 Ⅱ-you 7	四川泸县 Luxian, Sichuan	8176.87 b	8833.76 a	8759.21 a	8775.33 a	4.57*	90
	重庆永川 Yongchuan, Chongqing	8308.85 b	8725.93 ab	9061.23 a	8613.48 ab	4.56*	90
	四川广汉 Guanghan, Sichuan	8174.85 d	9161.05 b	9363.65 a	8645.10 c	140.11**	150
	云南宾川 Binchuan, Yunnan	6923.76 b	8349.24 a	8383.18 a	8790.46 a	9.95**	90
	四川东坡 Dongpo, Sichuan	5621.52 c	7292.23 b	7907.76 a	7643.96 ab	63.66**	150
	贵州小河 Xiaohe, Guizhou	7267.00 c	8664.90 b	9491.55 a	9482.70 a	40.88**	150
	四川中江 Zhongjiang, Sichuan	6889.61 d	7379.95 c	8218.94 a	7683.61 b	165.86**	150
渝香优203 Yuxiang-you 203	四川泸县 Luxian, Sichuan	8019.70 b	8507.33 a	8493.23 a	8287.70 ab	5.75*	90
	重庆永川 Yongchuan, Chongqing	8229.11 b	8680.95 a	8877.22 a	8376.32 b	86.40**	150
	四川广汉 Guanghan, Sichuan	7302.90 b	8442.00 a	8380.95 a	6901.55 c	40.93**	90
	云南宾川 Binchuan, Yunnan	6923.76 b	7941.96 a	8417.12 a	8451.06 a	7.22**	90
	四川东坡 Dongpo, Sichuan	5744.22 c	7388.35 b	7875.04 a	7316.77 b	66.47**	150
	贵州小河 Xiaohe, Guizhou	7115.90 b	8129.30 a	8515.95 a	8304.90 a	8.51**	90
	四川中江 Zhongjiang, Sichuan	5636.75 d	7051.56 c	7757.84 a	7391.20 b	271.29**	150

注(Note): 同一行不同字母表示施肥处理之间差异显著;同一列不同字母表示地点间差异显著 The different letter in a row represents significant difference between different N rates at the 0.05 level; The different letter in a column represents significant difference between different sites at the 0.05 level compared. ONFA—Optimal for N fertilizer application rate. *, ** —分别表示差异显著和极显著 Indicate significant difference at $P<0.05$ and $P<0.01$ levels, respectively.

据,但在水稻生产实践中的生态条件较为复杂,同一个县不同镇、村、社因所处地理位置不同,其生态小气候差异极大[23];土壤养分供给状况在同一地区不同田块间更是千差万别,而且测试项目较多。这些因素严重制约了先期成果的应用效果与规模。因此,本研究通过不同生态区的施氮量试验,根据地理位置和土壤养分状况,建立了Ⅱ优7号和渝香优203两个品种的高效施氮量的预测模型,与先期同类研究相比具有三方面特点:一是因为经度、纬度和海拔与气候条件关系密切[23],利用目标稻田所处地理位置的经度、纬度和海拔取代气候条件,较好地解决了很多地区没有气候资料的问题,而且可精确到具体的每一块目标稻田,取得经度、纬度和海拔数据方便快速;二是只需选择部分土壤养分指标,有利于提高工作效率;三是因水稻品种而建立了相应的氮高效施用量预测模型,能较好地反映出品种对温光及肥料的反应特性,具有更强的生态适应性。

3.3 氮高效施用量预测模型的应用

本文建立了目前已大面积推广的Ⅱ优7号和新品种渝香优203的高效氮施用量预测模型。利用

表 7　氮素高效施用量(y)与试验点的地理位置、土壤养分和施氮水平(x)的回归分析

Table 7　Regression analysis between optimal N fertilizer application (y) and geographic sites, soil nutrients for the tested sites and N application lever(x)

品种 Cultivar	回归方程 Regression equation	R^2	F 值 F value	偏相关系数 Partial correlation coefficient	t 检验值 t values	显著水平 Significant level
II 优 7 号 II - you 7	$Y = -392.9791 + 10.0132x_2 + 118.6870 + 0.1744x_{10} + 2.0624x_{11}$	0.9995	910.57**	$r(y,x_2) = 0.9996$	47.96**	<0.0001
				$r(y,x_8) = 0.9987$	27.55**	0.0001
				$r(y,x_{10}) = 0.9754$	6.26**	0.0082
				$r(y,x_{11}) = 0.9993$	37.76**	<0.0001
渝香优 203 Yuxiang-you 203	$Y = 1388.4615 - 11.7761x_1 - 0.1548x_3 + 116.7833x_6 - 39.7697x_9 + 0.8173x_{12}$	0.9999	1801.85**	$r(y,x_1) = -0.9993$	27.09**	0.0014
				$r(y,x_3) = -0.9999$	76.40**	0.0002
				$r(y,x_6) = 0.9997$	43.50**	0.0005
				$r(y,x_9) = -0.9989$	21.37**	0.0022
				$r(y,x_{12}) = 0.9999$	58.54**	0.0003

注(Note): *, ** 表示差异显著和极显著 Indicate significant difference at $P<0.05$ and $P<0.01$ levels, respectively.

该模型,需用 GPS 定位仪和海拔仪测定目标田的经度、纬度和海拔,土壤养分查各县区测土配方施肥项目的田间档案,即可预测出相应的氮高效施用量,从而提高 II 优 7 号在大面积推广中的增产、节肥效益,加快新品种渝香优 203 的推广进程。从本研究结果看,由于参试的两个品种对温光、土壤肥力反应各异,氮高效施用量的预测模型也不同。而目前全国每年有大量的新品种通过审定后投入大面积生产,建议选择各生态区重点推广的新品种,通过类似本文的栽培试验建立相应的预测模型。对同类型的品种若采用本预测模型,可能具有一定的高产节肥效果,但不能发挥到最佳水平。因此,尚需通过多个品种的类似研究,进一步根据品种的某些特征,对模型进行修订,以提高该氮高效施用量预测模型的普适性。

致谢: 马均、郑家国、涂士华、李经勇、周维佳、杨丛党、秦鱼生等专家参加了部分试验工作,特此深表谢意!

参 考 文 献:

[1] 敖和军, 王淑红, 邹应斌, 等. 不同施肥水平下超级杂交稻对氮、磷、钾的吸收累积[J]. 中国农业科学, 2008, 41 (10): 3123-3132.
Ao H J, Wang S H, Zou Y B *et al*. Charactertics of nutrient uptake and utilization of super hybrid rice under different fertilizer application rates[J]. Sci. Agric. Sin., 2008, 41 (10): 3123-3132.

[2] Ying J F, Peng S B, He Q R *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.

[3] Ying J F, Peng S B, Yang G Q *et al*. Comparison of high-yield rice in tropical and subtropical environments II. Nitrogen accumulation and utilization efficiency[J]. Field Crops Res., 1998, 57: 85-93.

[4] 彭少兵, 黄见良, 钟旭华, 等. 提高中国稻田氮肥利用率的研究策略[J]. 中国农业科学, 2002, 35(9): 1095-1103.
Peng S B, Huang J L, Zhong X H *et al*. Research strategy in improving fertilizer-nitrogen use efficiency of irrigated rice in China [J]. Sci. Agric. Sin., 2002, 35(9): 1095-1103.

[5] 徐富贤, 熊洪, 谢戎, 等. 水稻氮素利用效率的研究进展及其动向[J]. 植物营养与肥料学报, 2009, 15(5): 1215-1225.
Xu F X, Xiong H, Xie R *et al*. Advance of rice fertilizer-nitrogen use efficiency[J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2009, 15(5): 1215-1225.

[6] Angus J F, Williams R L, Durkin C O. Manage rice: decision support for tactical crop management[A]. Ishii R, Horie T. Crop research in Asia: Achievements and perspective[C]. Fukui, Japan: Proceedings of the 2nd Asian Crop Science Conference, 1995. 274-279.

[7] Ten Berge H F M, Thiyagarajan T M, Drenth D P, Jansen M J W. Numerical optimization of nitrogen application to rice. Part. I. Description of MANAGE-N[J]. Field Crops Res. 1997, 51: 29-42.

[8] Dobermana A, Cassman K G, Peng S B *et al*. Precision nutrient management in intensive irrigated rice systems[A]. Proceedings of the international symposium on maximizing sustainable rice yields through improved soil and environmental mangagement, 1996 [C]. Khon Kaen, Thailand: Department of Agriculture, Soil and Fertilizaer Society of Thailand, 1996. 133-154.

[9] Ten Berge H F M, Shi Q, Zheng Z *et al*. Numerical optimization of nitrogen application to rice. Part II. Field evaluations [J]. Field Crops Res. 1997, 51: 43-54.

[10] Dobermann A, Witt C, Dawe D. Site-specific nutrient management for intensive rice cropping systems in Asia[J]. Field Crops Res., 2002, 74: 37-66.

[11] Dobermann A, Witt C. The evolution of site-specific nutrient management in irrigated rice systems of Asia[A]. Dobermann A, Witt C. Increasing productivity of intensive rice systems through site-specific nutrient management[M]. Los Banos, Philippines: International Rice Reseach Institute, 2004. 75-100.

[12] 刘立军，徐伟，桑大志，等. 实地氮肥管理提高水稻氮肥利用效率[J]. 作物学报，2006，32(7)：987-994.
Liu L J, Xu W, Sang D Z *et al*. Site-specific nitrogen management increases fertilizer-nitrogen use efficiency in rice[J]. Acta Agron. Sin., 2006, 32(7): 987-994.

[13] 刘立军，徐伟，吴长付，杨建昌. 实地氮肥管理下的水稻生长发育和养分吸收特性[J]. 中国水稻科学，2007，21(2)：167-173.
Liu L j, Xu W, Wu C F, Yang J C. Characteristics of growth, development and nutrient uptake in rice under site-specific nitrogen management[J]. Chin. J. Rice Sci., 2007, 21(2): 167-173.

[14] 郑家国，张洪松，熊洪. 西南杂交稻目标产量生产技术规范[M]. 成都：四川科学技术出版社，2008. 1-37.
Zheng J G, Zhang H S, Xiong H. Production technology standard of target yield for hybrid rice in south-west district of China [M]. Chengdu: Sichuan Agricultural Science and Technology Publishers, 2008. 1-37.

[15] 邹应斌. 水稻超高产栽培的理论与技术策略—兼论壮秆重穗栽培法[J]. 农业现代化研究，1997，17(1)：32-38.
Zou Y B. Theory and technique of supper high yielding of rice - the cultural method of strong individual plants and weighty panicles. Res. Agric. Moder. [J]. 1997, 17(1): 32-38.

[16] 徐富贤，熊洪，朱永川，等. 川东南冬水田杂交中稻进一步高产的栽培策略[J]. 作物学报，2007，33(6)：1004-1009.
Xu F X, Xiong H, Zhu Y C *et al*. Cultivation strategy of hybrid mid-season rice for further high yield in winter water-logged field in the southeast of Sichuan province[J]. Acta Agron. Sin., 2007, 33(6): 1004-1009.

[17] 周开达，马玉清，刘太清. 穗重型杂交稻育种[J]. 四川农业大学学报，1995，13(4)：403-408.
Zhou K D, Ma Y Q, Liu T Q. The breeding of subspecific heavy ear hybrid rice[J]. J. Sichuan Agric. Univ., 1995, 13(4): 403-408.

[18] 袁隆平. 杂交水稻超高产育种[J]. 杂交水稻，1997，12(6)：1-6.
Yuan L P. Hybrid rice breeding for super high yield[J]. Hybrid Rice, 1997, 12(6): 1-6.

[19] 郑圣先，廖育林，杨曾平，等. 湖南双季稻种植区不同生产力水稻土肥力特征的研究[J]. 植物营养与肥料学报，2011，17(5)：1108-1121.
Zheng S X, Liao Y L, Yang Z P *et al*. Studies on fertility characteristics of different productive paddy soils in double-rice copping regions of Hunan province [J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2011, 17(5): 1108-1121.

[20] 张秀芝，易琼，朱平，等. 氮肥运筹对水稻农学效应和氮素利用的影响[J]. 植物营养与肥料学报，2011，17(4)：782-788.
Zhang X Z, Y Q, Zhu P *et al*. Agronomic responses to nitrogen application and nitrogen utilization in rice fields[J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2011, 17(4): 782-788.

[21] 杨梢娜，俞巧钢，叶静，等. 施氮水平对杂交晚粳"浙优12"产量及氮素利用效率的影响[J]. 植物营养与肥料学报，2010，16(5)：1120-1125.
Yang S N, Yu Q G, Ye J *et al*. Effects of nitrogen fertilization on yield and nitrogen use efficiency of hybrid rice[J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2010, 16(5): 1120-1125.

[22] 王伟妮，鲁剑巍，陈防，等. 湖北省水稻施肥效果及肥料利用效率现状研究[J]. 植物营养与肥料学报，2010，16(2)：289-295.
Wang W N, Lu J W, Cheng F *et al*. Study on fertilization effect and fertilizer use efficiency of rice in Hubei Province[J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2010, 16(2): 289-295.

[23] 徐富贤，熊洪. 地膜湿润育秧和旱育秧膜内外气温关系及其应用[J]. 四川农业大学学报，1998，16(2)：60-63.
Xu F X, Xiong H. Relation between temperatures in film and out film for lowland seedling and upland in thiner film of rice and its applying[J]. J. Sichuan Agric. Univ., 1998, 16(2): 60-63.