

水稻叶色氮素反应的基因型间差异

张 静 史慧琴 杜彦修 李俊周 赵全志

(河南农业大学水稻工程技术研究中心/河南省粮食作物生理生态与遗传改良重点实验室, 郑州 450002)

摘要: 在大田不施氮素及高氮两个处理下, 以叶片的 SPAD 值作为评价水稻氮素利用能力的参数, 对 146 个不同基因型水稻进行了叶色深浅及对氮素敏感性不同的种质资源鉴定。通过测定抽穗前不同生育时期不同基因型水稻叶片的 SPAD 值, 筛选出对氮素反应迟钝且叶色较浅的基因型 19 个、对氮素反应迟钝且叶色较深的基因型 20 个和对氮素敏感且叶色较浅的基因型 20 个、对氮素敏感且叶色较深的基因型 11 个。

关键词: 水稻; SPAD 值; 叶色; 氮素; 敏感; 基因型

Genotypic Difference of Rice Leaf Color in Response to Nitrogen

ZHANG Jing, SHI Hui-Qin, DU Yan-Xiu, LI Jun-Zhou, ZHAO Quan-Zhi

(Rice Engineering Research Center and Key Laboratory of Physiology/Ecology and Genetic Improvement of Food Crops
in Henan Province, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450002)

Abstract: The experiment was conducted in two nitrogen treatments: one is with high nitrogen application; the other is without nitrogen supply. The indexes coming from leaf SPAD-value were used to evaluate leaf color and nitrogen sensitivity of rice among 146 genotypes before heading stage. All the tested genotypes were divided into 4 types according to their leaf SPAD-value. Type I of 19 genotypes had lower SPAD-value and lower nitrogen sensitivity. Type II of 20 genotypes had deeper leaf color and is also insensitive to nitrogen. Type III and IV included 20 and 11 genotypes of higher nitrogen sensitivity with lower and higher SPAD-value, respectively.

Key words: Rice; SPAD-value; Leaf color; Nitrogen; Sensitivity; Genotype

全世界 60% 以上的人口以大米为主食, 在亚洲水稻也是重要的粮食作物之一。施用氮肥是提高水稻产量的重要栽培技术措施, 而随着水稻单产水平的不断提高, 氮肥的施用量不断趋于增加。研究表明, 中国单季稻田氮肥用量平均为 $180\text{kg}/\text{hm}^2$, 比世界稻田氮肥平均用量约高 75%, 然而中国水稻氮肥利用率仅在 28%~37% 之间, 比世界一般水平要低 15%~20%^[1]。因此, 筛选氮素高效利用水稻品种是我国水稻资源及育种工作者一直关注的热点研究领域^[2-5]。

在已报道的氮素高效利用基因型的鉴定和筛选中, 基本都进行植株含氮量的测定, 而含氮量的测定不仅需要破坏性取样, 而且成本较高, 不利于对大量资源材料进行鉴定筛选。另一方面, 在我国人们素有依作物叶色确定施追肥的传统经验。前人研究证明, 叶色是反映作物生长、代谢和营养状况的一个敏感指标, 叶色与叶片光合色素—叶绿素、类胡萝卜素的含量密切相关, 且与叶片含氮量呈正相关, 因此, 叶色是一个重要

收稿日期: 2010-09-27 修回日期: 2011-07-26

基金项目: 河南省重大公益性科研项目 (091100910100); 河南省高校科技创新团队支持计划项目 (2010IRTSTHN005)

作者简介: 张静, 博士, 讲师, 主要从事作物生理生态研究。E-mail: zhijing98@126.com

通讯作者: 赵全志, 博士, 教授。E-mail: qzhaoh@126.com

的苗诊断指标^[6],是水稻体内氮素营养状况的外在表现^[7],可被用来诊断水稻的氮素营养状况^[8]。近年来,叶绿素计测定结果(SPAD 值) 已被广泛地用来反映水稻^[9-10]、小麦^[11-12]、玉米^[13]和棉花^[14-15]及园艺作物^[16]等作物叶片单位面积的叶绿素含量,进而诊断和评价作物氮素营养状况^[17-20]。因此,通过叶色对氮素的反应差异进行无损诊断水稻植株对氮素的吸收和利用,将有利于快速对大量的种质资源进行筛选鉴定。

本研究在大田条件下,通过设置高施氮肥和不施氮肥处理,对 146 个水稻基因型不同生育期的叶

片 SPAD 值进行测定,分析了营养生长期叶色深浅及氮素敏感性在基因型间的差异,以期水稻氮素高效利用品种鉴定提供材料,并为大田水稻氮素营养诊断提供参考指标。

1 材料与方法

1.1 供试材料

以 146 份水稻基因型为试验材料,分别来源于中国(河南、江苏、山东、辽宁、天津、湖北、贵州、安徽、北京、陕西等省)、日本、IRRI 等地(表 1) 。

表 1 供试水稻品种名称及其来源

Table 1 Name and source of materials

来源 Source	省份 Province	数量 Amount	供试材料名称 Name of experimental materials	亚种类型 Sub-species
中国	河南	73	新丰 05-198、信粳 06j1、838-1、优糯、988、原香一号、新丰矮优、9618、9804、旱稻 8388、新稻 05-1799、新丰 05-8、新糯 03-34、豫粳 6 号、早大穗、牟香粳、偃 9003、杜粳 3 号、杜粳 5 号、光粳 14-8、9103、白香粳、阳光 2000、6811、郑稻 11、蒲粳 2 号、新稻 06G88、农博 5 号、82-1、9668、矮香、郑稻 18、标粳 321、H301、新选 1 号、丰糯、偃 9002、郑早 967、郑选 3 号、新粳 7 号、838 优、原 06121、惠粳 20681、焦杂粳 1 号、郑稻 5 号、卷叶粳、郑稻 107 变、水晶 3 号、焦粳 2 号、荃选 196、9002-1-1、郑粳 5 号、白毛香、农香稻、阳光 2000 优系、阳光香稻、新粳优 1 号、郑 9807-4、新稻 18、新 7 粳 201、新粳糯 1 号、西优豫 101、郑稻 05044、年香粳、五粳 0413、方欣 4 号、信粳 1 号、原 06073、9910-2、3114、郑粳 107、长粳 1 号	粳稻
	江苏	23	新引香粳、苏北 592、两优培粳、徐 52837、武运粳 7 号、中平选、连香粳、武香糯 8333、泗优 418、武育粳 14、引大库种、华粳优 1 号、新引 1 号、早丰 9 号、武育粳 4 号、泗稻 9 号、武粳 15 号、镇稻 88、武粳 15-1、泗阳 2524、盐丰 47-1、宁粳一号、盐粳 95-3	粳稻
	山东	11	金稻 1 号、金优 607、KT28、金稻 1008、临粳 8 选系、金优 302、金优 1 号、临稻 11、临稻 10 号、金优 502、金优 702	粳稻
	辽宁	6	辽 D-12、辽优 5128、沈农 265、辽粳 371、辽粳 454、辽星 1 号	粳稻
	天津	2	津原 45.3 优 32	粳稻
	湖北	5	6329、糯稻 626、抗优 63、96-2、香宝 3 号	籼稻
	安徽	2	淮稻 6 号、双晴南	粳稻
	陕西	2	西安大穗、西晴北	粳稻
	北京	2	297、中粳 88	粳稻
	天津	1	津原 D1	粳稻
日本	贵州	7	魔王谷、三维稻、七星 1 号、奇香珍珠糯、红米稻、黑稻、琴光	籼稻
		9	黄金晴、一目惚、越光、屈优 418、秋田小町、西光、日本晴、日本早稻、金世纪	粳稻
IRRI		4	Mudgo、IR36、ASD-1 早熟系、PTB33	籼稻

1.2 试验设计

试验于 2007 年在河南农业大学科教园区进行,5 月 5 日秧盘育苗,每穴 1 粒。6 月 15 日选

取生长一致的苗移栽,每个品种栽插两行,每行 10 穴,单本移栽。从移栽 7d 后开始进行 SPAD 值测定,每 7d 测定一次,至穗抽出后停止测定。

试验采用大田试验, 设不施氮与高氮两个处理, 高氮区全生育期施氮肥(以 N 计) 225 kg/hm², 按 35%、35%、30% 的比例分别以基肥、分蘖肥、穗肥方式施用。

1.3 叶绿素计测定 SPAD 值

采用 SPAD-502 型叶绿素计(Minolta, 日本) 测定水稻上部 3 张完全展开叶的中部(避开主脉), 在分蘖初期每株测定主茎叶片, 以后每株测定包括主茎在内的 4 个分蘖的叶片。测定时间从分蘖期开始, 每 7d 测定一次, 直到水稻全部叶片抽出, 用各生育期的平均值表示叶色值。5 次重复, 每个重复 5 株。

1.4 统计分析方法

运用 Microsoft Excel 2000 和 SPSS 16.0 对试验数据进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 不同基因型水稻叶片 SPAD 值分析

图 1 表明, 经 Kolmogorov-Smirnov 即 D 检验, 在不施氮肥条件下, 146 个基因型叶片 SPAD 值服从正态分布, 而在高氮水平下 146 个基因型叶片 SPAD 值服从偏态分布, 说明在两个氮素水平下 146 个基因型叶色表现不同。因此, 根据叶片 SPAD 值可对不同基因型水稻进行叶色及氮肥响应差异鉴定。

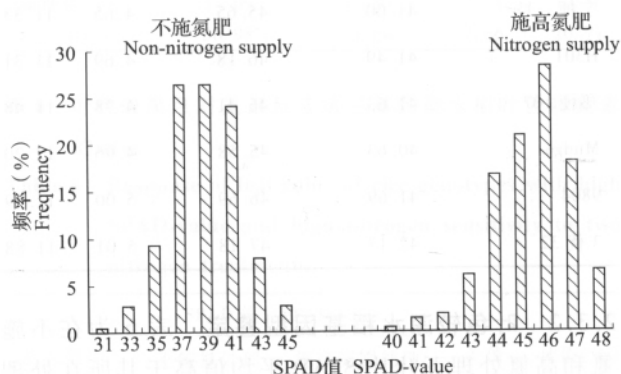


图 1 两种氮素水平下不同基因型水稻品种叶片 SPAD 值频率分布

Fig.1 Frequency distributions of leaf SPAD-value of different rice genotypes in two nitrogen treatments

由表 2 可见, 在高氮处理下 146 个水稻基因型的叶片 SPAD 平均值明显高于不施氮处理; 而在不施氮条件下水稻基因型间 SPAD 值的极差大于高氮处理, 并在不施氮处理下不同水稻基因型间 SPAD 值的变异系数大于高氮处理, 说明不施氮处理下水

稻基因型间 SPAD 值表型差异较大, 而增加氮素后水稻基因型间 SPAD 值表型差异减小。

表 2 两种氮素水平下不同基因型水稻叶片 SPAD 值变化分析

Table 2 Changes analysis of leaf SPAD-value of different rice genotypes in two nitrogen treatments

项目 Item	不施氮肥 Non-nitrogen supply	施高氮肥 High nitrogen supply
平均值 mean	38.78	45.45
变幅 Amplitude	31.23 ~ 44.53	40.35 ~ 48.18
极差 range	13.30	7.83
变异系数(%) CV	6.70	3.30

2.2 氮素反应较迟钝的水稻基因型鉴定

2.2.1 叶色较浅基因型鉴定 表 3 列出了在不施氮和高氮处理下叶片 SPAD 平均值及低于其所在处理所有品种的 SPAD 平均值, 并且高氮处理与不施氮处理的 SPAD 值间差值及比值较小且低于差值及比值平均值的水稻基因型。在不施氮肥条件下, 所列出的 19 个基因型 SPAD 值变化范围为 35.06 ~ 38.35; 施高氮肥处理下, 19 个基因型 SPAD 值变化范围为 40.05 ~ 44.95。19 个基因型高氮处理与不施氮处理叶片 SPAD 值差值变化范围为 4.45 ~ 6.59, 比值变化范围为 10.79% ~ 17.67%。认为这 19 个基因型叶色较浅且受氮素处理水平影响较小, 是叶色较浅且对氮素反应迟钝的基因型。

2.2.2 叶色较深基因型水稻鉴定 表 4 中列出了在不施氮和高氮处理下叶片 SPAD 平均值高于其所在处理的所有品种的 SPAD 平均值, 并且高氮处理与不施氮处理的 SPAD 值间差值及比值较小且低于差值及比值平均值的前 20 个基因型。在不施氮肥条件下, 所列出的 20 个基因型 SPAD 值变化范围为 40.63 ~ 43.79。施高氮肥处理中, 20 个基因型 SPAD 值变化范围为 45.18 ~ 47.61。20 个基因型高氮处理与不施氮处理叶片 SPAD 值差值变化范围为 2.30 ~ 5.01, 比值的范围变化为 5.25% ~ 12.20%。因此, 在不施氮和施氮条件下这 20 个基因型叶色均较深, 即其较深的叶色受氮素处理水平影响较小, 是叶色较深且对氮素反应迟钝的基因型。

2.3 氮素敏感的水稻基因型鉴定

2.3.1 叶色较浅水稻基因型鉴定 表 5 为在不施氮和高氮处理下叶片 SPAD 平均值低于其所在处理的所有品种的 SPAD 平均值, 而高氮与不施氮处理的 SPAD 值间差值及比值较大且高于差值及

表 3 叶色较浅且对氮素反应迟钝基因型水稻叶色对氮素的响应

Table 3 Response of leaf color of rice genotypes with low SPAD-value and low nitrogen sensitivity to two nitrogen treatments

基因型 Genotype	SPAD 值 SPAD-value		差值 D-value	比值(%) Ratio
	不施氮处理	施高氮肥处理		
	Non-nitrogen treatment	High nitrogen treatment		
9618	37.02	41.02	4.00	10.79
沈农 265	37.16	41.62	4.46	11.99
信粳 1 号	37.52	42.25	4.73	12.62
丰糯	35.06	40.05	4.99	14.22
标粳 321	37.61	43.26	5.64	15.01
9668	38.16	43.80	5.65	14.80
红米稻	35.61	41.31	5.71	16.02
新引 1 号	38.24	43.96	5.72	14.95
早丰 9 号	38.15	43.95	5.80	15.19
金优 302	37.42	43.29	5.86	15.67
水晶 3 号	37.78	43.66	5.88	15.57
武粳 15 号	36.85	42.85	6.00	16.28
越光	37.63	43.76	6.13	16.29
郑 9807-4	37.03	43.26	6.23	16.82
秋田小町	38.01	44.38	6.37	16.76
西优豫 101	36.48	42.93	6.45	17.67
郑稻 11	38.26	44.84	6.57	17.17
辽粳 371	37.40	43.99	6.58	17.60
郑早 967	38.35	44.95	6.59	17.19

差值 = 高氮处理下水稻基因型的 SPAD 值 - 不施氮处理下水稻基因型的 SPAD 值; 比值 = (高氮处理下水稻基因型的 SPAD 值 - 不施氮处理下水稻基因型的 SPAD 值) / 不施氮处理下水稻基因型的 SPAD 值 × 100。下同

D-value = leaf SPAD-value in the treatment with high nitrogen supply - leaf SPAD-value in the treatment without nitrogen supply ,Ratio = (leaf SPAD-value in the treatment with high nitrogen supply - leaf SPAD-value in the treatment without nitrogen supply) / leaf SPAD-value in the treatment without nitrogen supply × 100. The same as below

比值平均值的前 20 个基因型。在不施氮肥条件下, 所列出的 20 个基因型 SPAD 值变化范围为 30.17 ~ 36.78; 施高氮肥处理中, 20 个基因型 SPAD 值变化范围为 40.63 ~ 44.79; 20 个基因型高氮处理与不施氮处理叶片 SPAD 值差值变化范围为 7.66 ~ 12.76, 比值变化范围为 20.71% ~ 42.30%。因此, 在不施氮和施氮条件下这 20 个基因型叶色均较浅且受氮素处理水平影响较大, 是叶色较浅且对氮素敏感的基因型。

表 4 叶色较深且对氮素反应迟钝基因型水稻叶色对氮素的响应

Table 4 Response of leaf color of rice genotypes with high SPAD-value and low nitrogen sensitivity to two nitrogen treatments

基因型 Genotype	SPAD 值 SPAD-value		差值 D-value	比值(%) Ratio
	不施氮处理	施高氮肥处理		
	Non-nitrogen treatment	High nitrogen treatment		
农香稻	43.79	46.09	2.30	5.25
9002-1-1	44.97	47.60	2.63	5.85
武运粳 7 号	42.22	45.48	3.26	7.72
金稻 1008	41.72	45.18	3.46	8.29
82-1	44.14	47.61	3.47	7.85
长粳 1 号	42.22	45.72	3.49	8.27
黑稻	43.50	47.10	3.59	8.26
豫粳 6 号	41.63	45.38	3.74	8.99
农香粳 4 号	42.63	46.76	4.13	9.69
新稻 05-1799	41.85	46.02	4.17	9.97
淮稻 6 号	43.09	47.28	4.19	9.73
9910-2	42.99	47.19	4.21	9.78
农博 5 号	41.52	45.79	4.27	10.29
3114	41.49	46.07	4.58	11.03
宁粳一号	41.00	45.65	4.65	11.33
H301	41.49	46.18	4.69	11.31
郑粳 107	41.63	46.41	4.78	11.48
Mudgo	40.63	45.58	4.96	12.20
9804	41.69	46.69	5.00	11.99
3 优 32	42.17	47.18	5.01	11.88

2.3.2 叶色较深水稻基因型鉴定 表 6 为在不施氮和高氮处理下叶片 SPAD 平均值高于其所在处理的所有品种的 SPAD 平均值, 并且 SPAD 值差值及比值较大且高于差值及比值平均值的 11 个基因型。不施氮肥条件下, 所列出的 11 个基因型 SPAD 值变化范围为 38.44 ~ 40.39; 施高氮肥处理中, 11 个基因型 SPAD 值变化范围为 45.24 ~ 47.65; 11 个基因型高氮处理与不施氮处理叶片 SPAD 值差值变化范围为 6.74 ~ 9.02, 比值变化范围为 17.92% ~ 23.34%。因此, 在不施氮和施氮条件下这 11 个基因型叶色均较深, 即其较深的叶色受氮素处理水平影响较大, 是叶色较深且对氮素敏感的基因型。

表 5 叶色较浅且对氮素反应敏感的基因型水稻叶色对氮素的响应

Table 5 Response of leaf color of rice genotypes with low SPAD-value high nitrogen sensitivity to two nitrogen treatments

基因型 Genotype	SPAD 值 SPAD-value		差值 D-value	比值(%) Ratio
	不施氮处理 Non-nitrogen	施高氮肥处理 High nitrogen		
	treatment	treatment		
魔王谷	30.17	42.93	12.76	42.30
阳光香稻	31.69	43.31	11.62	36.66
黄金晴	33.75	44.58	10.83	32.09
两优培粳	32.00	42.17	10.18	31.80
新粳 03-34	34.78	44.79	10.01	28.78
偃 9003	34.88	44.74	9.86	28.27
信粳 06j1	32.87	42.07	9.20	28.01
糯稻 626	35.63	44.58	8.95	25.13
9103	34.59	43.50	8.92	25.78
TN1	31.92	40.63	8.71	27.28
ASD-1 早熟	35.60	44.25	8.65	24.30
临粳 8 选系	34.70	43.30	8.60	24.78
一目惚	35.94	44.46	8.52	23.69
297	35.78	44.17	8.39	23.46
杜粳 3 号	36.52	44.74	8.22	22.51
西安大穗	36.31	44.45	8.14	22.41
辽粳 454	36.57	44.38	7.82	21.37
金优 702	36.78	44.53	7.75	21.07
新粳糯 1 号	37.09	44.83	7.74	20.86
津原 D1	36.98	44.64	7.66	20.71

表 6 叶色较深且对氮素反应敏感基因型水稻叶色对氮素的响应

Table 6 Response of leaf color of rice genotypes with high SPAD-value and high nitrogen sensitivity to two nitrogen treatments

基因型 Genotype	SPAD 值 SPAD-value		差值 D-value	比值(%) Ratio
	不施氮处理 Non-nitrogen	施高氮肥处理 High nitrogen		
	treatment	treatment		
卷叶粳	38.63	47.65	9.02	23.34
新引香粳	38.69	47.12	8.43	21.79
武香糯 8333	38.80	46.81	8.01	20.65
杜粳 5 号	38.82	46.71	7.89	20.31
优糯	38.65	46.51	7.86	20.33
徐 52837	38.44	46.24	7.80	20.28
988	38.78	46.47	7.69	19.82
西晴北	39.91	47.44	7.52	18.84
武育粳 4 号	38.50	45.89	7.39	19.21
6329	40.11	47.30	7.19	17.92
三维稻	39.31	46.35	7.05	17.93

2.4 水稻基因型 SPAD 值与氮素反应的关系

为进一步阐明水稻叶色 SPAD 值大小与氮素反应的关系,本研究将不施氮处理水稻叶片 SPAD 值、施高氮肥处理 SPAD 值及其差值、比值进行了相关性分析(表 7)。发现不施氮处理 SPAD 值与施高氮肥处理 SPAD 值呈极显著正相关,差值、比值均与不施氮处理 SPAD 值呈极显著负相关,差值与比值间呈极显著正相关。因此,SPAD 值差值、比值均可作为水稻叶色氮素反应的筛选与评价指标。

表 7 不施氮处理 SPAD 值、施高氮肥处理 SPAD 值及其差值、比值的相关性

Table 7 Correlations between leaf SPAD-value in the treatment with high nitrogen supply, leaf SPAD-value in the treatment without nitrogen supply, D-value and ratio

项目 Index	SPAD 值 SPAD-value		差值 D-value
	不施氮处理 Non-nitrogen	施高氮肥处理 High nitrogen	
	treatment	treatment	
施高氮肥处理 SPAD 值	0.596 **		
差值	-0.846 **	0.034	
比值	-0.782 **	-0.084	0.988 **

** 表示在 0.01 水平下相关性显著

** Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed)

3 讨论

魏海燕^[21]从产量性状、根系及后期剑叶的生理功能方面进行水稻氮高效基因型的筛选及机理研究;黄农荣等^[2]和程建峰等^[3]也从水稻吸收、利用氮素的产量差异角度对氮效率不同的基因型提出了鉴定和筛选氮高效品种的方法;阮新民等^[5]从苗期植株形态与氮吸收利用效率的关系筛选氮高效基因型。许振华等^[22]曾利用叶片 SPAD 值在不同氮水平下的差值与正常供氮条件下叶片 SPAD 值的比值来表征苗期玉米对氮素敏感程度。尽管叶色已是广为采用的评价作物生长状况的指标,但将其真正运用到利用水稻生长关键阶段—营养生长期的氮素营养状况来筛选氮高效基因型的研究报道较少。徐福荣等^[23]曾利用生育后期叶片 SPAD 值的测定,对生长在氮素缺乏条件下的 151 份水稻品种进行了不同耐低氮基因型种质的筛选。魏海燕等^[4,21]研究也证实氮高效基因型水稻的叶片 SPAD 值高于氮低效品种。因此,水稻叶片 SPAD 值作为评价氮素利用指标,可用于品种或基因型的筛选工作。本试验通过对两个氮素处理中 146

个基因型水稻分蘖至抽穗期叶片 SPAD 值测定,发现水稻叶色深浅变化不仅与氮肥施用量有关,而且不同基因型叶色变化对氮素的敏感程度也存在差异。

赵全志等^[24]研究发现,水稻叶色变化与其体内氮素同化过程中关键酶的活性密切相关,通过改变外界环境可调节叶色的深浅。因此,利用 SPAD 值的差值、增加比率(即比值)来表征叶色变化不失为一个更为快速精确的反映作物生长、代谢及营养状况的评价指标。本研究将不同氮水平下叶片 SPAD 值的差值及比值指标应用到水稻营养生长阶段氮素营养状况诊断与评价中,并利用这些相关指标从 146 个供试基因型中鉴定出叶色较浅且对氮素不敏感的基因型(9618、沈农 265、信粳 1 号、丰糯、标粳 321 等 19 个)、叶色较深且对氮素不敏感的基因型(农香稻、9002-4-1、武运粳 7 号、金稻 1008、82-1 等 20 个)和叶色较浅且对氮素敏感基因型(魔王谷、阳光香稻、黄金晴、两优培粳、新粳 03-34 等 20 个)、叶色较深且对氮素敏感基因型(卷叶粳、新引香粳、武香粳 8333、杜粳 5 号、优糯等 11 个)。通过水稻叶色及对氮肥响应在基因型间的差异,不仅可以快速、无损伤地指导不同基因型前期氮肥的施用,而且也为氮肥利用效率高即氮素敏感基因型的筛选提供了新的方法,并为目前广泛开展地关于提高水稻氮利用效率来降低生产成本、减轻环境压力等研究筛选了新的可选择的栽培品种。关于叶色对氮素反应的基因型差异机理尚有待于进一步深入研究。

参考文献

- [1] 罗志祥,苏泽胜,施伏芝,等. 氮肥高效利用水稻育种的现状与展望[J]. 中国农学通报,2003,19(1): 66-68
- [2] 黄农荣,钟旭华,郑海波. 水稻氮高效基因型及其评价指标的筛选[J]. 中国农学通报,2006,22(6): 29-34
- [3] 程建峰,蒋海燕,刘宜柏,等. 氮高效水稻基因型鉴定与筛选方法的研究[J]. 中国水稻科学,2010,24(2): 175-182
- [4] 魏海燕,张洪程,马群,等. 不同氮肥利用效率水稻基因型剑叶光合特性[J]. 作物学报,2009,35(12): 2243-2251
- [5] 阮新民,施伏芝,罗志祥,等. 水稻苗期氮高效品种评价与筛选的初步研究[J]. 中国稻米,2010,16(2): 22-25
- [6] 杨立炯,王嘉训,黄祥熙,等. 陈永康晚稻“三黑三黄”高产栽培技术的初步分析[A]//中国农业科学院江苏分院. 陈永康水稻高产经验研究(第一集)[C]. 上海:上海科学技术出版社,1964: 9-29
- [7] 陶勤南,方萍,吴良欢,等. 水稻氮素营养的叶色诊断研究[J]. 土壤,1990,22(4): 190-193
- [8] 王绍华,曹卫星,王强盛,等. 水稻叶色分布特点与氮素营养诊断[J]. 中国农业科学,2002,35(12): 1461-1466
- [9] 李刚华,丁艳峰,薛利红,等. 利用叶绿素计(SPAD-502)诊断水稻氮素营养和推荐追肥的研究进展[J]. 植物营养与肥料学报,2005,11(3): 412-416
- [10] 张洪程,杨连群,张士永,等. 依叶龄运筹氮肥对优质水稻产量与品质的影响[J]. 中国农业大学学报,2002,7(3): 46-50
- [11] 李志宏,刘宏斌,张福锁,等. 应用叶绿素仪诊断冬小麦氮营养状况的研究[J]. 植物营养与肥料学报,2003,9(4): 401-405
- [12] Kulig B, Lepiarczyk A, Oleksy A, et al. The effect of tillage system and forecrop on the yield and values of LAI and SPAD indices of spring wheat[J]. Eur J Agron, 2010, 33: 43-51
- [13] Varinderpal-Singh, Yadvinder-Singh, Bijay-Singh, et al. Calibrating the leaf colour chart for need based fertilizer nitrogen management in different maize (*Zea mays* L.) genotypes[J]. Field Crop Res, 2011, 120: 276-282
- [14] 屈卫群,王绍华,陈兵林,等. 棉花主茎叶 SPAD 值与氮素营养诊断研究[J]. 作物学报,2007,33(6): 1010-1017
- [15] 陈宝燕,马兴旺,杨涛,等. 不同施 N 策略对膜下滴灌棉花 SPAD 值和产量的影响[J]. 中国农学通报,2011,27(3): 124-129
- [16] Perry E M, Davenport J R. Spectral and spatial differences in response of vegetation indices to nitrogen treatments on apple[J]. Comput Electron Agr, 2007, 59: 56-65
- [17] 王绍华,刘胜环,王强盛,等. 水稻产量形成与叶片含氮量及叶色的关系[J]. 南京农业大学学报,2002,25(4): 1-5
- [18] 王绍华. 水稻氮素营养的生理指标及诊断技术[D]. 南京:南京农业大学,2003
- [19] 吴平,罗安程. 应用分子标记研究氮素胁迫条件下水稻叶片叶绿素含量差异的遗传背景[J]. 遗传学报,1996,23(6): 431-438
- [20] 凌启鸿,张洪程,丁艳峰,等. 水稻高产精确定量栽培[J]. 北方水稻,2007,2: 1-9
- [21] 魏海燕. 水稻氮素利用的基因型差异与生理机理研究[D]. 扬州:扬州大学,2008
- [22] 许振华,谢传晓,吴永升,等. 玉米自交系苗期氮敏感基因型差异分析[J]. 玉米科学,2010,18(1): 34-41
- [23] 徐福荣,汤翠凤,余藤琼,等. 利用叶绿素仪 SPAD 值筛选耐低氮水稻种质[J]. 分子植物育种,2005,3(5): 695-700
- [24] 赵全志,丁艳峰,王强盛,等. 水稻叶色变化与氮素吸收的关系[J]. 中国农业科学,2006,39(5): 916-921