

DOI: 10.5846/stxb201405080911

董桂春, 陈琛, 袁秋梅, 羊彬, 朱正康, 曹文雅, 仲军, 周娟, 罗刚, 王熠, 黄建晔, 王余龙. 氮肥处理对氮素高效吸收水稻根系性状及氮肥利用率的影响. 生态学报, 2016, 36(3): - .

Dong G C, Chen C, Yuan Q M, Yang B, Zhu Z K, Cao W Y, Zhong J, Zhou J, Lu G, Wang Y, Huang J Y, Wang Y L. The Effect of Nitrogen Fertilizer Treatments on Root traits and Nitrogen Use Efficiency in *Indica* Rice Varieties with High Nitrogen absorption Efficiency. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(3): - .

氮肥处理对氮素高效吸收水稻根系性状及氮肥利用率的影响

董桂春*, 陈琛, 袁秋梅, 羊彬, 朱正康, 曹文雅, 仲军, 周娟, 罗刚, 王熠, 黄建晔, 王余龙

扬州大学 江苏省作物遗传生理国家重点实验室培育点/粮食作物现代产业技术协同创新中心, 扬州 225009

摘要: 2011—2012 年在土培条件下, 以氮素吸收效率差异较大的 15 个常规籼稻为供试材料, 研究氮肥运筹对不同氮效率品种根系性状、成熟期吸氮量及氮肥利用率的影响, 分析影响氮高效水稻氮素吸收的主要根系性状。结果表明: (1) 各氮肥处理下, 成熟期吸氮量均表现为氮高效品种 > 氮中效品种 > 氮低效品种。适量增施氮肥及基肥+促花肥处理有利于氮高效品种吸氮量的增加, 氮素吸收受品种、氮肥处理的显著影响。(2) 在施氮量处理下, 氮高效品种单株不定根数、单株根干重、单株不定根总长或较大, 单株根活力在常氮(N₂)、高氮(N₃)处理下有一定的优势; 在施氮时期处理下, 氮高效品种单株不定根数、单株不定根总长、单株根干重、单株根系总吸收面积、单株根系活跃吸收面积、抽穗期冠根比多数处理有优势; 增施氮肥有利于促进氮高效品种单株不定根总长和单株根活力的提高, 适量施氮有利于单株不定根数、单株根干重增加, 前期施氮可促进不定根的发生和伸长, 后期施氮有利于不定根的充实和根系生理性状的提高。此外, 增施氮肥可提高各类品种冠根比; (3) 在常氮、高氮处理下, 氮高效品种氮肥利用率大于氮中效、氮低效品种。(4) 提高单株不定根数、单株不定根总长、单株根活力及抽穗期冠根比有利于各类品种吸氮量的提高, 增加根干重对氮高效品种吸氮量的提高也有显著的促进作用。结合相关分析与通径分析结果, 抽穗期冠根比及单株不定根数、单株根活力、单株不定根总长、单株根干重是影响氮高效品种吸氮能力的主要根系性状。

关键词: 氮素高效吸收水稻; 成熟期吸氮量; 氮肥处理; 根系性状; 氮肥利用率

The Effect of Nitrogen Fertilizer Treatments on Root traits and Nitrogen Use Efficiency in *Indica* Rice Varieties with High Nitrogen absorption Efficiency

DONG Guichun*, CHEN Chen, YUAN Qiumei, YANG Bin, Zhu Zhengkang, CAO Wenya, ZHONG Jun, ZHOU Juan, LU Gang, WANG Yi, HUANG Jianye, WANG Yulong

Jiangsu Key Laboratory of Crop Genetics and Physiology/Co-Innovation Center for Modern Production Technology of Grain Crops, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China

Abstract: To investigate the effect of nitrogen management practices on root traits, the amount of nitrogen absorption at grain maturity, nitrogen fertilizer use efficiency, and to analysis the main root traits of rice responsible for high nitrogen absorption efficiency, a total of 15 conventional *Indica* rice varieties with marked differences in nitrogen absorption efficiency were pot-cultured in 2011 and 2012. (1) The amount of nitrogen absorption (ANA) at grain maturity was differed significantly among rice varieties and nitrogen fertilizer treatments. Among varieties, nitrogen absorption efficiency was positively

基金项目: 国家自然科学基金项目(30971728); 江苏省高校自然科学重大基础研究项目(09KJA210001)

收稿日期: 2014-05-08; **网络出版日期:** 2015- -

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: gcdong@ yzu.edu.cn

correlated with ANA at grain maturity in all nitrogen treatments. In rice varieties with high nitrogen absorption efficiency ANA was greater than that in rice varieties with intermediate and low nitrogen absorption efficiency. In rice varieties with high nitrogen efficiency ANA was increased by increasing nitrogen fertilizer application rates or by using the base + promoting-spikelet fertilizer treatment. (2) Rice varieties with high nitrogen absorption efficiency showed higher adventitious root numbers, root dry weight, total adventitious root length, and also had relative higher root activity at conventional and high rates of nitrogen supply. Rice varieties with high nitrogen absorption efficiency had higher adventitious root numbers, total adventitious root length, root dry weight, root total absorption area and active absorption, as well as crown:root ratio. Increasing the nitrogen application rate increased total adventitious root length and root activity. The appropriate rate of nitrogen application increased adventitious root number and root dry weight. Nitrogen application at the early growth stage promoted the occurrence and extension of adventitious roots, while at the late growth stage nitrogen addition enriched adventitious roots and improved root physiological activity. In addition, increased nitrogen supply improved the crown:root ratio of rice varieties with different nitrogen absorption efficiencies. (3) Rice varieties with high nitrogen absorption efficiencies had higher nitrogen absorption and use efficiencies than those with middle and low nitrogen absorption efficiencies at the conventional and high rates of nitrogen supply. (4) Increasing adventitious root number, total adventitious root length, root activity and crown:root ratio at heading stage improved ANA in all rice varieties. Increasing root dry weight also had a significant and positive effect on ANA in all rice. Correlation analysis and path analysis indicated that crown:root ratio at heading stage, adventitious roots number, root activity, total adventitious root length and adventitious root dry weight were the main root traits that affected nitrogen absorption in the rice varieties with high nitrogen absorption efficiencies.

Key Words: *Indica* rice varieties with high nitrogen absorption efficiency; Amount of nitrogen absorption at grain maturity; Nitrogen fertilizer treatment; Root traits; Nitrogen fertilizer use efficiency

提高水稻氮肥(素)吸收利用率已成为目前稻作研究与生产中的一个重要方向。研究氮素高效吸收利用对减少氮肥施用量、提高氮肥利用率、改善稻田生态环境、提高水稻产量均具有重要的理论价值与实践意义。前人研究表明,水稻品种(基因型)间氮素吸收利用差异较大^[1-13],氮素吸收能力强,氮素积累量大是水稻产量形成重要的营养基础,在一定的范围内,水稻产量与氮素吸收量存在明显的伴随关系,氮素高效吸收型水稻具有产量亦高的特点^[14-15]。根系是水稻极其重要的营养器官,根系形态发达、活力强是水稻高效吸收的重要保证。近年来,一些报道表明了根系性状对水稻氮素高效吸收有重要的影响,从基因型来看,氮素高效吸收型水稻在单株根系形态/活性、冠根比等性状上较氮素低效吸收型水稻具有不同程度的优势,氮素吸收量与单株根系性状关系密切^[14-15]。从栽培角度讲,拔节期较高的根密度、根系总吸收面积^[16],根重、根长、根系表面积特别是拔节后到成熟期根系伤流强度大有利于水稻吸氮能力的提高^[17-18]。但这些研究在相同处理下品种数量较多^[14-15],在栽培处理下品种较少,多为1—2个^[16-18]。从氮素吸收角度水稻品种可分为氮高效吸收、氮中效吸收、氮低效吸收等类型,不同氮素吸收效率类型品种对氮肥处理反应如何,目前几无报道。为此,本研究以氮素吸收差异较大的15个水稻品种为供试材料,针对上述问题展开相应的研究工作,以期明确氮肥处理对不同氮素吸收类型水稻根系性状、氮肥吸收利用率的影响,明确水稻氮素高效吸收的主要根系性状,为水稻氮肥合理施用技术制定和氮高效水稻根系改良提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 供试品种

试验于2011—2012年在扬州大学农学院水稻网室内进行。利用本课题组先前研究的结果^[3,7-10],在100个左右的常规籼稻品种(系)中筛选出15个氮素吸收利用类型差异较大的品种(系)为供试材料,具体名称如

下:1826、6078、bluebell、cpslo17、IR74、Kentanangka、桂朝2号、台中粳、台中本地1号、扬稻2号、扬稻3号、扬稻5号、扬稻6号、窄叶青、珍珠矮。

1.2 材料培育

大田育秧,5月14—15日播种,6月7—8日移栽于盆钵中,每处理种植10盆,每盆3穴,每穴一本。盆钵直径25 cm、高30 cm,每盆装过筛砂壤土17.5 kg(有机质含量1.47%,全氮含量0.808 g/kg,速效氮54.41 mg/kg,速效磷43.95 mg/kg,速效钾94.6 mg/kg)。全生育期保持浅水层,及时防治病虫害,水稻生育正常。

1.3 试验设计

试验1:施氮量试验,2011年进行。设N₀,N₁,N₂,N₃四个氮肥处理,分别施0、2、4、6克纯N/盆,施肥处理中氮肥施用比例,基肥:分蘖肥:促花肥:保花肥为3:3:2:2。基肥、分蘖肥、促花肥、保花肥分别在移栽前、栽后5天、抽穗前25天、抽穗前15天施用。

试验2:施氮时期试验,2012年进行。设T₀:基肥(CK),T₁:基肥+基肥(以下简称全基肥),T₂:基肥+分蘖肥(以下简称基分肥),T₃:基肥+促花肥(以下简称基促肥),T₄:基肥+保花肥(以下简称基保肥)5个处理,基肥、分蘖肥、促花肥、保花肥每盆各施入1.5克纯N。各肥料施用时间同试验1。

1.4 测定内容与方法

1.4.1 根系形态性状的测定

抽穗期每品种取接近平均穗数的植株2盆,测定单株不定根数、不定根总长、众数根长、最长根长、不定根粗等。

1.4.2 根系活性的测定

抽穗期每品种取接近平均穗数的植株2盆,每盆测定1穴植株,测定单株根系 α -NA氧化力,并采用染色液蘸根法测定根系总吸收面积和活跃吸收面积。

1.4.3 各器官干物重和含氮率

抽穗期和成熟期每品种取接近于平均穗数的2盆植株,按根、茎鞘、绿叶、黄叶、穗器官分样,105℃杀青0.5小时,80℃烘干至恒重(一般为72h)后测定各器官的干物重及含氮率。

1.5 数据处理

氮肥吸收利用率=(施氮区吸氮量-空白区吸氮量)/施用的氮肥量。采用组内最小平方和的动态聚类的方法^[19]将常氮(N₂处理)条件下成熟期氮素吸收量从低到高依次分为氮低效吸收型、氮中效吸收型、氮高效吸收型3种,分别简称为氮低效、氮中效、氮高效品种。氮低效品种有bluebell、台中本地1号、窄叶青3个,氮中效品种有cpslo17、IR74、Kentanangka、桂朝2号、台中粳、珍珠矮6个,氮高效品种有1826、6078、扬稻2号、扬稻3号、扬稻5号、扬稻6号6个。氮低效、氮中效、氮高效品种常氮(N₂处理)条件下平均生育期分别为126天、132天、135.5天。施氮量其它3个处理及施氮时期各处理均按常氮(N₂处理)的分类结果进行数据处理。以Excel进行数据处理和图表绘制,SPSS进行统计分析。以合并的误差项对各主效与互作效应进行鉴别,采用最小显著差树(LSD)法,凡超过LSD_{0.05}(LSD_{0.01})水平的视为显著(或极显著)。

2 结果与分析

2.1 施氮处理对不同氮素吸收类型水稻成熟期吸氮量的影响

由图1-A可知,在N₀、N₂、N₃处理下,随着品种氮素吸收效率的提高,成熟期吸氮量均呈明显增加趋势,氮中效品种比氮低效品种吸氮量增加的幅度明显大于氮高效比氮中效增加的幅度,在N₁处理下吸氮量顺序为氮高效品种>氮低效品种>氮中效品种,氮中效品种比氮低效品种增加的幅度明显小于氮高效比氮中效增加的幅度。增加施氮量也对不同类型品种吸氮量产生明显影响,N₁处理与N₀处理相比,氮低效品种吸氮量增加幅度大于氮中效、氮高效,N₂处理比N₁处理,吸氮量增加幅度则为氮高效品种>氮中效品种>氮低效品种,而N₃处理与N₂处理相比,吸氮量增加幅度则为氮低效品种>氮中效品种>氮高效品种。方差分析表明,

品种类型间 ($F=6.738^*$)、处理间 ($F=180.487^{**}$) 的差异达显著或极显著水平,品种类型间与处理间无显著的互作效应 ($F=1.456$)。

由图 1-B 可知,在各种施氮时期处理下,随着品种氮素吸收效率的提高,成熟期吸氮量均呈明显增加趋势,基+分处理下中效比低效增加的幅度小于高效比中效增加的幅度,其它处理均表现为中效比低效增加的幅度大于高效比中效增加的幅度。各类品种吸氮量大小顺序均为全基肥、基+促、基+保、基+分、CK。方差分析表明,品种类型间 ($F=19.739^{**}$)、处理间 ($F=61.021^{**}$) 的差异均达极显著水平,类型间与处理间无显著的互作效应 ($F=0.375$)。

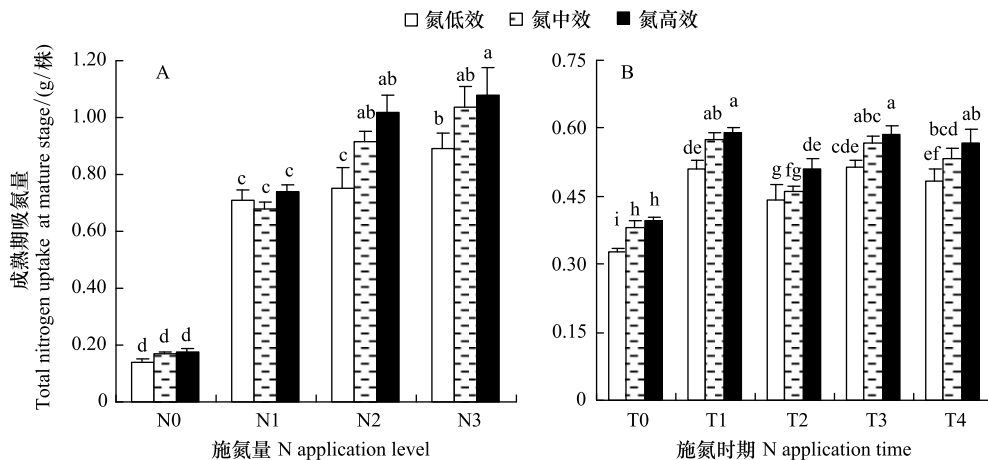


图 1 氮肥处理对不同氮效率水稻品种成熟期吸氮量的影响

Fig. 1 Effect of N treatments on Total nitrogen uptake at maturity stage in rice varieties with different nitrogen efficiency

字母不同者差异达 0.01(**)或 0.05(*)显著水平。下同

2.2 氮肥处理对不同氮效率类型水稻品种单株根系性状的影响

2.2.1 施氮量处理对单株根系性状的影响

由表 1 可知,在相同施氮量处理下,氮高效品种单株不定根数、单株根干重均大于其它类型品种,单株不定根总长多为最大或接近最大,单株根活力在 N2、N3 处理下较大,单株总/活跃吸收面积在 N1 处理下具有一定的优势,在 N0、N2、N3 处理下差或较差。与 N0 相比,增施氮肥到 N1 水平可显著促进氮高效吸收型水稻品种单株不定根数、单株不定根总长、单株根干重的增加,但继续增加至 N2、N3 水平时增幅较小或略有下降,增施氮肥能显著提高氮高效吸收型水稻品种单株根活力,施氮水平越高,根系活力越强,但氮肥用量的增加对单株总/活跃吸收面积影响较小。方差分析表明,单株不定根数、单株不定根总长、单株根干重在类型间、处理间,单株根活力在处理间差异显著,其它均不显著。所有根系性状类型与处理间均无显著的互作关系。

2.2.2 施氮时期处理对单株根系性状的影响

由表 2 可知,在相同施氮时期处理下,氮高效品种单株不定根数、单株不定根总长、单株根干重均大于氮中效、氮低效品种,单株根活力均多表现为中等以下水平,单株根系总吸收面积、单株根系活跃吸收面积在基肥+分+促+保花肥条件下优势明显,在基肥+基肥条件下处于中等水平。在前期施肥中,氮高效品种所有单株根系性状(包括不定根数、根干重、根总长,总吸收面积、活跃吸收面积、根活力)均为全基肥处理>基肥+分蘖肥处理,在后期施肥中,单株不定根数、单株不定根总长,单株根系总吸收面积、单株根系活跃吸收面积均为基肥+促花肥处理>基肥+保花肥处理,但单株根重、单株根活力正好相反,为基肥+保花肥处理>基肥+促花肥处理。方差分析表明,不同氮素吸收类型间单株不定根数、单株不定根总长、单株根干重差异显著,处理间所有性状差异不显著,品种类型与处理间互作关系均未达显著水平。

表 1 施氮量处理对不同氮效率水稻根系性状的影响

Table 1 Effects of nitrogen application rate on root traits in the rice varieties with different nitrogen efficiency

处理 Treatment	氮吸收类型 Nitrogen absorption type	单株不定根数 Adventitious root numbers per plant/ (number)	单株不定根总长 Total adventitious root length per plant/ (cm)	单株根干重 Root dry weight per plan/(g)	单株根系 总吸收面积 Total roots absorbing area per plant/ (m ²)	单株根系活跃 吸收面积 Root active absorbing area per plant/ (m ²)	单株根活力 Root activity per plant/ (ug g ⁻¹ hr ⁻¹)
0 克 N0(CK)	氮低效	178.83 b	3831.83 c	2.39 f	22.58	11.10	883.99
	氮中效	174.92 b	3168.83 c	2.87 def	20.83	10.34	1345.03
	氮高效	203.31 b	3738.75 c	3.31 def	20.48	10.17	1140.43
2 克 N1(Low-N)	氮低效	369.89 a	7052.50 ab	3.57 cde	21.63	10.73	2351.78
	氮中效	335.64 a	5703.25 b	4.11 abcd	15.18	7.59	2398.05
	氮高效	398.81 a	6789.17 ab	5.27 a	23.32	11.64	1944.08
4 克 N2(Middle-N)	氮低效	358.5 a	7069.17 ab	3.49 cdef	20.16	10.03	2232.45
	氮中效	361.28 a	6806.67 ab	3.66 bcde	19.56	9.78	2071.56
	氮高效	397.94 a	7419.75 a	5.01 ab	19.39	9.71	2472.80
6 克 N3(High-N)	氮低效	333.56 a	5919.08 ab	2.54 ef	17.96	8.90	1754.60
	氮中效	335.67 a	5955.17 ab	3.00 def	22.25	11.05	2162.68
	氮高效	385.19 a	7442.08 a	4.87 abc	21.25	10.6	2662.41
F 值	类型	3.421 *	3.756 *	14.267 **	0.987	1.046	0.477
F-value	处理	29.047 **	23.752 **	5.996 **	0.371	0.303	7.816 **
	类型×处理	0.147	0.585	0.665	2.272	2.256	0.916

字母不同者差异达 0.01(**)或 0.05(*)显著水平,下同。

表 2 施氮时期处理对不同氮效率水稻根系性状的影响

Table 2 Effect of nitrogen fertilizer application time on root traits in the rice varieties with different nitrogen efficiency

处理 Treatment	氮吸收类型 Nitrogen absorption type	单株不定根数 Adventitious root numbers per plant/(条)	单株不定根总长 Total adventitious root length per plant/ (cm)	单株根干重 Root dry weight per plan/(g)	单株根系 总吸收面积 Total roots absorbing area per plant/ (m ²)	单株根系活跃 吸收面积 Root active absorbing area per plant/ (m ²)	单株根活力 Root activity per plant/ (ug g ⁻¹ hr ⁻¹)
基肥 T0(CK)	氮低效	357.11 abc	6928.67 abc	3.3 bcde	20.7	10.27	1585.98
	氮中效	320.69 bc	6552.96 abc	4.21 abcd	25.15	12.5	1892.49
	氮高效	376.38 ab	7380.63 ab	4.69 a	24.72	12.28	1372.89
全基肥(T1) base-base fertilizer	氮低效	339.89 abc	6352.42 abc	3.05 de	26.12	12.9	1836.45
	氮中效	343.75 abc	5948.5c	3.23 cde	19.84	9.82	1766.04
	氮高效	401.32 a	7451.25 a	4.06 abcd	22.21	10.99	1931.91
基肥+分蘖肥(T2) base-tillering fertilizer	氮低效	320.67 bc	6213.42 bc	2.69 e	18.29	9.08	1276.15
	氮中效	303.44 c	5847.42c	3.28 bcde	20.68	10.23	1437.81
	氮高效	380.53 ab	6790.96 abc	3.47 abcde	21.24	10.52	1291.12
基肥+促花肥(T3) base-promote spikelet fertilizer	氮低效	333.44 abc	5970.75c	3.17 cde	22.32	11.05	1273.61
	氮中效	340.39 abc	6534.92 abc	3.71 abcde	22.99	11.42	1547.85
	氮高效	387.01 ab	6925.54 abc	4.32 abc	25.41	12.61	1328.47
基肥+保花肥(T4) base-preserving spikelet fertilizer	氮低效	324 bc	5972.92 c	3.02 de	18.88	9.35	1695.07
	氮中效	325.64 bc	6632.5 abc	3.74 abcd	20.26	10.06	2188.41
	氮高效	367.42 abc	6718.92 abc	4.51 ab	23.67	11.76	1856.96
F 值	类型	10.866 **	7.489 **	8.603 **	1.748	1.77	0.546
F-value	处理	0.69	1.241	2.043	1.854	1.878	1.645
	类型×处理	0.256	0.838	0.214	1.099	1.097	0.402

2.2.3 施氮处理对冠根比的影响

由图 2-A 可知,在 N0、N1、N2 处理下,抽穗期冠根比的大小顺序为氮中效品种>氮低效品种>氮高效品种,N3 处理则表现为氮低效品种>氮中效品种>氮高效品种;由图 2-B 可知,成熟期冠根比 N0 处理下表现为随氮素吸收效率的提高而提高,但 N1、N2、N3 表现为随氮素吸收效率提高而下降,且下降的幅度较大。方差分析表明,品种类型间($F_{抽}=5.443^{**}$, $F_{成}=13.261^{**}$)、处理间($F_{抽}=39.634^{**}$, $F_{成}=17.516^{**}$)抽穗期冠根比的差异均达极显著水平,类型与处理间成熟期($F_{成}=2.556^{*}$)有显著的互作效应,抽穗期无显著互作效应($F_{抽}=1.056$)。

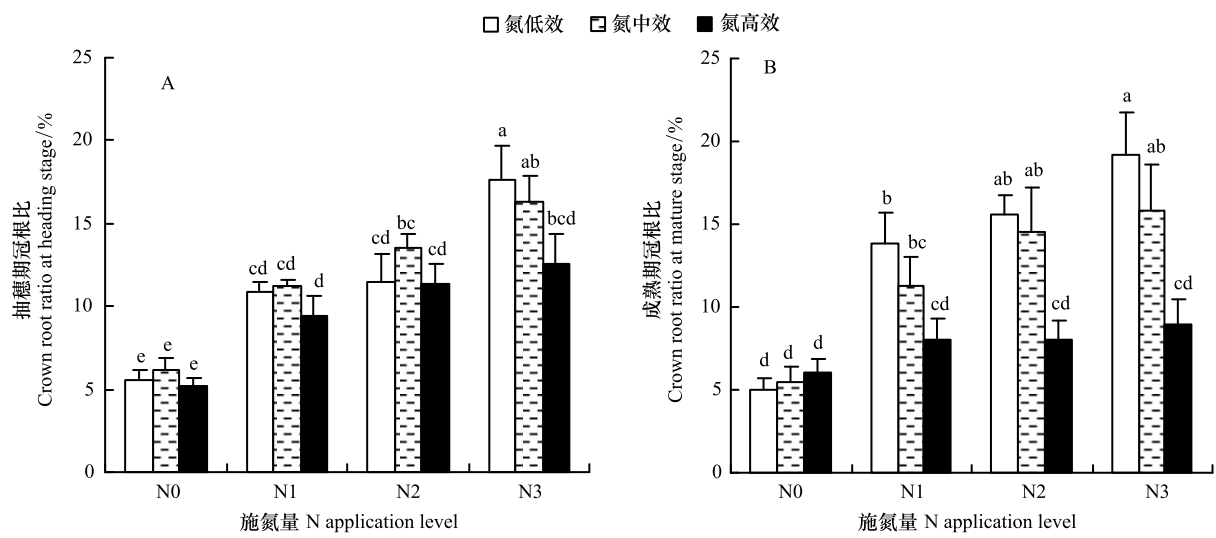


图 2 施氮量对不同氮效率水稻品种冠根比的影响
Fig. 2 Effect of N application level on crown root ratio in rice varieties with different nitrogen efficiency

施氮时期处理条件下,抽穗期冠根比,基肥+保花肥表现为随氮素吸收效率提高而下降,其它处理均以氮高效品种较大(图 3-A),成熟期冠根比除基肥+基肥仍与抽穗期冠根比表现一致外,其它处理氮高效品种均较小(图 3-B)。方差分析表明,处理间($F_{抽}=5.115^{**}$, $F_{成}=3.292^{**}$)冠根比的差异均达极显著水平,品种类型间($F_{抽}=0.417$, $F_{成}=1.101$),类型与处理间均无显著的互作效应($F_{抽}=0.383$, $F_{成}=0.472$)。

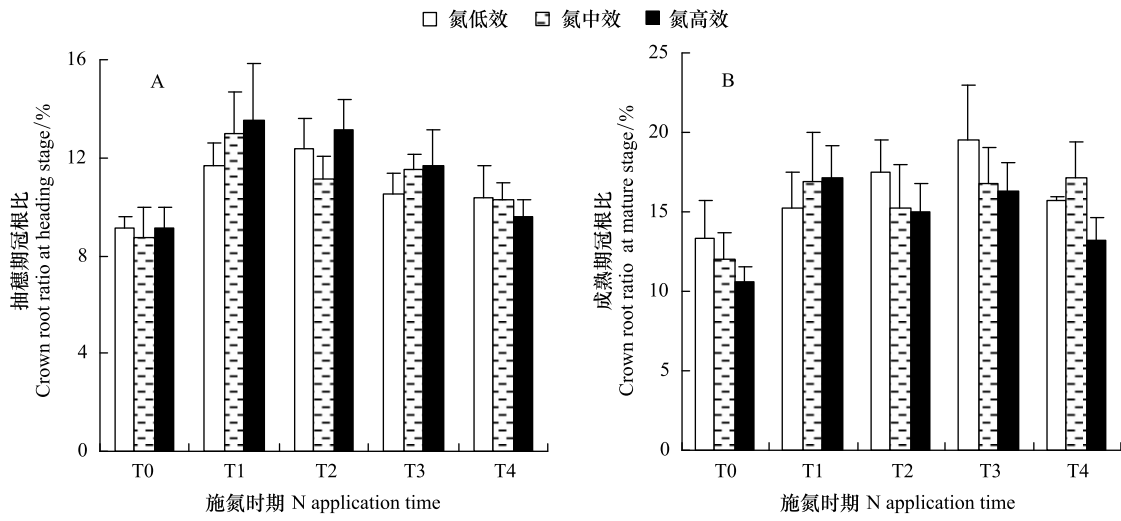


图 3 施氮时期对不同氮效率水稻品种冠根比的影响
Fig. 3 Effect of N application time on crown root ratio in rice varieties with different nitrogen efficiency

2.3 施氮量处理对氮肥吸收利用率的影响

氮肥吸收利用率=(施氮处理植株总吸氮量-对照处理植株总吸氮量)/施氮量。由图 4 可知,在中氮(N2)、高氮(N3)处理下,随着氮素吸收效率的提高,氮肥利用率呈增加趋势,氮高效品种比氮低效、氮中效品种氮肥吸收利用率分别高 37.70%、10.31%、19.87%、2.73%,在低氮(N1)下氮高效品种比氮中效品种高 10.87%,但比氮低效品种却低 1.30%。方差分析表明,品种类型间($F=3.371^*$)、处理间($F=85.583^{**}$)、的差异达显著或极显著水平,品种与处理间($F=2.093$)无显著的互作效应。相关分析表明,低氮、中氮、高氮处理下,水稻植株吸收量与氮肥吸收利用率呈线性正相关,相关系数分别为 0.769^{*}、0.940^{**}、0.939^{**}(图略),达显著或极显著水平。说明增加成熟期吸氮量有利于提高氮肥吸收利用率。

2.4 不同氮效率类型品种吸氮量与单株根系性状的关系

由表 3 可知,氮低效、氮中效品种吸氮量与单株不定根数、单株不定根总长、单株根活力、抽穗期冠根比、成熟期冠根比均呈显著或极显著线性正相关,说明这些根系性状与氮低效、氮中效品种的吸氮量关系密切。氮高效品种吸氮量与单株不定根数、单株不定根总长、单株根干重、单株根活力、抽穗期冠根比呈显著或极显著线性正相关,说明提高这些根系性状有利于氮高效品种吸氮量的增加。

表 3 成熟期吸氮量与单株根系性状的相关系数

Table 3 Correlation coefficient between the amount of nitrogen absorption at maturity stage and root traits per plant

根系性状 Root traits	品种类型 Types of Varieties		
	氮低效 (LNE)	氮中效 (MNE)	氮高效 (HNE)
单株不定根数 Adventitious root numbers per plant	0.457 ^{**}	0.522 ^{**}	0.531 ^{**}
单株不定根总长 Total adventitious root length per plant	0.426 [*]	0.402 ^{**}	0.396 ^{**}
单株根干重 Root dry weight per plant	0.106	0.051	0.372 ^{**}
单株根系总吸收面积 Total roots absorbing area per plant	-0.193	-0.121	-0.152
单株根系活跃吸收面积 Root active absorbing area per plant	-0.184	-0.118	-0.140
单株根活力 Root activity per plant	0.444 [*]	0.306 [*]	0.507 ^{**}
抽穗期冠根比 Crown root ratio at heading stage	0.778 ^{**}	0.735 ^{**}	0.389 ^{**}
成熟期冠根比 Crown root ratio at maturity stage	0.576 ^{**}	0.306 [*]	-0.124

LNE; Low nitrogen efficiency; MNE, Middle high nitrogen efficiency; HNE, high nitrogen efficiency. The same below.

3 结论与讨论

3.1 氮肥处理对不同氮效率水稻品种成熟期吸氮量及氮肥吸收利用率的影响

关于水稻的氮素利用效率目前尚无统一定义,有人用氮肥吸收利用率^[20-22]、氮素籽粒生产效率^[3,7-10,23-24]等作为评价的指标,也有人以产量作为衡量标准,如 Moll^[25]将其定义为籽粒产量/介质供氮水平,当介质供氮水平不同时,对相近生育期的水稻以相同供氮水平下的籽粒产量来评价,并把产量均高于(与其生育期相近水稻)平均产量的品种定义为氮高效品种^[26],简单地说,氮高效品种就是在任何供氮水平下产量均高的品种^[17-18,27-29]。但也有人认为吸氮能力强、吸氮量大的品种,能高效地吸收土壤中的氮素,降低土壤氮素残留、减少氮素损失、减轻对环境质量的影响并能提高水稻产量的品种也应该是氮高效品种^[30-31]。本文以成熟期

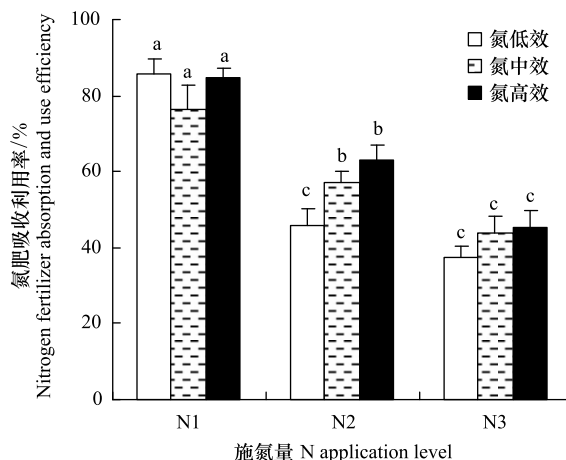


图 4 施氮量对不同氮效率水稻氮肥吸收利用率的影响

Fig. 4 Effect of N application level on Nitrogen fertilizer absorption and use efficiency in rice varieties with different nitrogen efficiency

吸氮量作为评价指标,研究表明,氮高效吸收品种比氮低效品种、氮中效品种成熟期吸氮量在各施氮水平、施氮时期处理下均表现出明显的优势,品种间、处理间的差异达显著或极显著水平。表明氮高效品种在氮素吸收效率上既显示出基因型的优势,也体现出对氮肥的积极响应。

水稻氮肥吸收利用率受肥料类型、施肥量及方法,土壤类型、耕作方式及质量等许多非植株因素的影响^[31-35],过去相当长的时间内从这个角度解析氮肥吸收利用率。从氮肥吸收利用率的定义来看,植株自身氮素吸收能力的差异特别是在氮肥相同处理下的差异可能是影响氮肥吸收利用率最重要的因素,但目前这方面研究不多^[34-35]。本研究表明,不施氮处理各类型水稻吸氮量虽有差异,但差异较小,而施氮各处理特别是常氮水平下不同类型水稻间吸氮量差异明显增大,植株的吸氮能力与氮肥吸收利用率关系非常密切,氮肥吸收利用率的大小主要取决于成熟期植株吸氮量的差异。因而,氮高效品种氮肥吸收利用率明显高于氮中效、氮低效品种。可见,从植株自身角度讲,植株吸氮能力强大为水稻氮肥吸收利用率提高奠定极其重要的遗传学基础。

3.2 氮肥处理对不同氮效率水稻品种根系性状的影响

根系是水稻吸收养分与水分主要的器官,根系发达、活力强大是水稻吸收能力增强的重要基础。氮肥处理对水稻根系性状影响已有一些报道,一般认为,适宜的施氮水平可以促进不定根的分化、伸长和增重,但氮肥用量过多后,根系反而呈现细、短、轻的特点^[36-37]。水稻前期施氮越多,越有利不定根数、根干重的增加^[38],施用越早对单株根系形态性状(根数、根总长和根重)促进作用越大^[39],而生育后期施氮对根重影响较小^[40]。在施用分蘖肥的基础上,施用促花肥能显著提高每株根干重,施用保花肥可促进不定根的伸长,增加每株不定根总长度^[40]。

但这些研究以 1 个或少数品种来分析氮肥处理对水稻根系形态性状的影响。不同氮素吸收效率类型品种特别是氮素高效吸收类型品种根系性状对氮肥反应如何,尚不清楚。本研究表明,在相同施氮量或施氮时期处理下,氮高效吸收型水稻品种根系形态上表现出数量多,重量大的特点,如根数、根重,根总长多具有明显优势,特别是在前期施肥较多的情况下更明显,这为水稻氮素高效吸收奠定了扎实的形态基础。在中、高施氮水平下氮高效吸收型水稻单株 α -萘胺根系氧化力明显增强,虽然单株总/活跃吸收面积无明显优势,但增施后期穗肥,可明显改善与提高单株总/活跃吸收面积和单株 α -萘胺根系氧化力。因此,施氮量适中、前后期施氮合理时,不仅根系形态发达,根系活性也旺盛,确保了氮素高效吸收水稻形态与生理上的优势,为水稻氮素高效吸收、干物质生产与积累提供重要的根系支撑。氮素吸收能力增强,也有利于水稻产量水平的提高,研究表明,在相同施氮水平处理下,随着品种氮素吸收能力的提高,产量均表现出氮高效品种>氮中效品种>氮低效品种,施氮时期处理下也有相同的趋势。从产量构成因素来看,氮素吸收能力的提高,表现出穗数变少、粒数增多、粒重有所增加、穗型和单穗重明显增大的趋势,但结实率无明显的变化趋势(数据略)。

3.3 影响水稻氮素高效吸收的主要根系性状

植株的吸氮能力主要与根系的发达程度、根系活性的强弱有密切的关系。近年来,一些报道显示根系性状对水稻氮素高效吸收有重要的影响,张岳芳^[14]、于小凤^[15]在群体水培条件下分别研究了 100 个左右的常规籼、粳品种(系),认为冠根比、根干重、根数、不定根总长是影响籼稻品种吸氮能力的主要根系性状^[14],而根干重、冠根比、单株不定根长、单条不定根重对粳稻品种吸氮能力的提高有较大的作用^[15]。从栽培角度来看,程建峰^[16]认为拔节期较高的根密度、根系总吸收面积是水稻氮素高效吸收品种的重要特征,樊剑波^[17]研究则表明在两个供氮水平下,氮高效水稻(南光)根重、根长、根系表面积特别是拔节后到成熟期根系伤流强度明显大于氮低效水稻(Elio)是其吸氮量大的重要因素。魏海燕^[22]认为肥料利用效率高的粳稻在主要生育时期良好的根系形态和较强的根系活力是其氮素高效吸收和利用重要的根系基础。

本研究表明,对不同氮效率水稻成熟期吸氮量有显著影响的根系性状既有共同点,也有差异(表 3)。共同的是各吸收效率水稻抽穗期、成熟期吸氮量均受到单株不定根数、单株不定根总长、单株根系活力及抽穗期冠根比的显著影响,说明这些性状是提高水稻吸氮能力的重要基础。不同的是成熟期冠根比对氮低效、氮中

效品种(抽穗期、成熟期)吸氮量有显著影响,对氮高效品种影响较小,而根干重极显著地影响氮高效水稻的(抽穗期、成熟期)吸氮量。为了明确单株根系性状对氮素吸收量影响力的大小,对此进行了多元回归及通径分析,结果表明,单株不定根数对氮低效品种、氮中效品种吸氮量影响较大,它们对吸氮量的直接通径系数分别为 0.456 和 0.522,单株不定根数、单株根活力对氮高效品种吸氮量影响较大,它们对吸氮量的直接通径系数分别为 0.413、0.401。但地下部与地上部生长协调是水稻健壮生长的基础,而反映两者之间的协调关系通常用冠根比(也有学者用冠根比来表示),结果表明,抽穗期冠根比对成熟期吸氮量的作用明显大于成熟期冠根比,抽穗期冠根比对吸氮量的直接通径系数,氮低效品种、氮中效品种、氮高效品种分别为 0.777、0.735、0.758。由此可见,在协调地上部、地下部生长、保持适宜冠根比的同时,提高单株不定根数、单株根活力有利于提高氮高效品种的氮素吸收能力。结合相关分析与通径分析结果,笔者认为抽穗期冠根比、单株不定根数、单株根活力、单株不定根总长和单株根干重是影响氮高效品种吸氮能力的主要根系性状。由此表明,氮高效品种根系具有数量多、长度大、充实度高、干物质积累量大、活性强的特征。

结论:氮高效吸收品种在各种氮肥处理下氮素吸收能力均具有不同程度的优势,品种、氮肥处理显著影响氮素吸收能力,在常氮、高氮条件下其氮肥吸收利用率也大于其它氮效率品种。抽穗期冠根比及单株不定根数、单株根活力、单株不定根总长、单株根干重是影响氮高效品种吸氮能力的主要根系性状。

致谢:本文还受到江苏高校优势学科建设工程资助项目资助。A Project Funded by the Priority Academic Program Development of Jiangsu Higher Education Institutions(PAPD)

参考文献(References):

- [1] Tirol-Padre A, Ladha J K, Singh U, Laureles E, Punzalan G, Akita S. Grain yield performance of rice genotypes at suboptimal levels of soil N as affected by N uptake and utilization efficiency. *Field Crops Research*, 1996, 46(1/3): 127-143.
- [2] De Datta S K, Broadbent F E. Nitrogen-use efficiency of 24 rice genotypes on an N-deficient soil. *Field Crops Research*, 1990, 23(2): 81-92.
- [3] Dong G C, Wang Y L, Zhou J, Zhang B, Zhang C S, Zhang Y F, Yang L X, Huang J Y. Characteristics of nitrogen distribution and translocation in conventional Indica rice varieties with different nitrogen use efficiency for grain output. *Acta Agronomica Sinica*, 2009, 35(1): 149-155.
- [4] Dong W, Cui K H, Pan J F, Ye G Y, Xiang J, Nie L X, Huang J L. Genetic dissection of grain nitrogen use efficiency and grain yield and their relationship in rice. *Field Crops Research*, 2011, 124(3): 340-346.
- [5] Inthapanya P, Sipaseuth, Sihavong P, Sihathap V, Chanhphengsay M, Fukai S, Basnayake J. Genotypic performance under fertilised and non-fertilised conditions in rainfed lowland rice. *Field Crops Research*, 2000, 65(1): 1-14.
- [6] Ju J, Yoshinori Yamamoto, Wang Y L, Shan Y H, Dong G C, Tetsushi Yoshida, Akira Miyazaki. Genotypic differences in grain yield, and nitrogen absorption and utilization in recombinant inbred lines of rice under hydroponic culture. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2006, 52(3): 321-330.
- [7] 董桂春,王余龙,张岳芳,陈培峰,杨连新,黄建晔.不同氮素籽粒生产效率类型籼稻品种产量及其构成的基本特点. *作物学报*, 2006, 32(10): 1511-1518.
- [8] 董桂春,王余龙,张岳芳,陈培峰,杨连新,黄建晔.影响常规籼稻品种氮素籽粒生产效率的主要源库指标. *作物学报*, 2007, 33(1): 43-49.
- [9] 董桂春,王余龙,张传胜,张岳芳,陈培峰,杨连新,黄建晔,龙银成.氮素籽粒生产效率不同的籼稻品种物质生产和分配的基本特点. *作物学报*, 2007, 33(1): 137-142.
- [10] 董桂春,李进前,张彪,周娟,张传胜,张岳芳,杨连新,黄建晔,王余龙.高氮素籽粒生产效率类型籼稻品种的一些相关性状. *中国水稻科学*, 2009, 23(3): 289-296.
- [11] 江立庚,戴廷波,韦善清,甘秀芹,徐建云,曹卫星.南方水稻氮素吸收与利用效率的基因型差异及评价. *植物生态学报*, 2003, 27(4): 466-471.
- [12] 单玉华,王余龙,山本由德,黄建晔,董桂春,杨连新,张传胜,居静.常规籼稻与杂交籼稻氮素利用效率的差异. *江苏农业研究*, 2001, 22(1): 12-15.
- [13] 单玉华,王余龙,山本由德,黄建晔,杨连新,张传胜.不同类型水稻在氮素吸收及利用上的差异. *扬州大学学报:自然科学版*, 2001, 4(3): 42-45, 50-50.

- [14] 张岳芳, 王余龙, 张传胜, 董桂春, 杨连新, 黄建晔, 龙银成. 籼稻品种的氮素累积量与根系性状的关系. 作物学报, 2006, 32(8): 1121-1129.
- [15] 于小凤, 李进前, 田昊, 彭斌, 张燕, 王熠, 袁秋梅, 黄建晔, 王余龙, 董桂春. 影响粳稻品种吸氮能力的根系性状. 中国农业科学, 2011, 44(21): 4358-4366.
- [16] 程建峰, 戴廷波, 荆奇, 姜东, 潘晓云, 曹卫星. 不同水稻基因型的根系形态生理特性与高效氮素吸收. 土壤学报, 2007, 44(2): 266-272.
- [17] 樊剑波, 沈其荣, 谭炯壮, 叶利庭, 宋文静, 张亚丽. 不同氮效率水稻品种根系生理生态指标的差异. 生态学报, 2009, 29(6): 3052-3058.
- [18] 戢林, 李廷轩, 张锡洲, 余海英. 氮高效利用基因型水稻根系形态和活力特征. 中国农业科学, 2012, 45(23): 4770-4781.
- [19] Gu S L. An algorithm to global optimization in non-hierarchical cluster analysis. Journal of Jiangsu Agricultural College, 1996, 17(1): 57-65.
- [20] 徐富贤, 熊洪, 谢戎, 张林, 朱永川, 郭晓艺, 杨大金, 周兴兵, 刘茂. 水稻氮素利用效率的研究进展及其动向. 植物营养与肥料学报, 2009, 15(5): 1215-1225.
- [21] 徐富贤, 熊洪, 张林, 郭晓艺, 朱永川, 周兴兵, 刘茂. 杂交中稻氮素利用效率的简易评价指标研究. 西南农业学报, 2010, 23(5): 1551-1558.
- [22] 魏海燕, 张洪程, 张胜飞, 杭杰, 戴其根, 霍中洋, 许轲, 马群, 张庆, 刘艳阳. 不同氮利用效率水稻基因型的根系形态与生理指标的研究. 作物学报, 2008, 34(3): 429-436.
- [23] 李敏, 张洪程, 杨雄, 葛梦婕, 马群, 魏海燕, 戴其根, 霍中洋, 许轲, 曹利强, 吴浩. 水稻高产氮高效型品种的根系形态生理特征. 作物学报, 2012, 38(4): 648-656.
- [24] 李敏, 张洪程, 杨雄, 葛梦婕, 马群, 魏海燕, 戴其根, 霍中洋, 许轲. 水稻高产氮高效型品种的物质积累与转运特性. 作物学报, 2013, 39(1): 101-109.
- [25] Moll R H, Kamprath E J, Jackson W A. Analysis and interpretation of factors which contribute to efficiency of nitrogen utilization. Agronomy Journal, 1982, 74(3): 526-564.
- [26] Ladha J K, Kirk G J D, Bennett J, Reddy C K, Reddy P M, Singh U. Opportunities for increased nitrogen-use efficiency from improved lowland rice germplasm. Field Crops Research, 1998, 56(1/2): 41-71.
- [27] Singh U, Ladha J K, Castillo E G, Punzalan G, Duqueza M. Genotypic variation in nitrogen use efficiency in medium- and long-duration rice. Field Crops Research, 1998, 58(1): 35-53.
- [28] 张亚丽, 樊剑波, 段英华, 王东升, 叶利庭, 沈其荣. 不同基因型水稻氮利用效率的差异及评价. 土壤学报, 2008, 45(2): 267-273.
- [29] 戢林, 李廷轩, 张锡洲, 余海英, 郑子成. 氮高效利用基因型水稻生育后期氮素分配与转运特性. 应用生态学报, 2014, 25(4): 1036-1042.
- [30] 童依平, 李继云, 李振声. 农作物 N 素利用效率基因型差异及其机理. 生态农业研究, 1999, 7(2): 23-27.
- [31] 叶全宝. 不同水稻基因型对氮肥反应的差异及氮素利用效率的研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2005.
- [32] 刘立军, 徐伟, 桑大志, 刘翠莲, 周家麟, 杨建昌. 实地氮肥管理提高水稻氮肥利用效率. 作物学报, 2006, 32(7): 987-994.
- [33] 彭少兵, 黄见良, 钟旭华, 杨建昌, 王光火, 邹应斌, 张福锁, 朱庆森, Buresh R, Witt C. 提高中国稻田氮肥利用率的研究策略. 中国农业科学, 2002, 35(9): 1095-1103.
- [34] 王绍华, 曹卫星, 丁艳锋, 田永超, 姜东. 水氮互作对水稻氮吸收与利用的影响. 中国农业科学, 2004, 37(4): 497-501.
- [35] 曾建敏, 崔克辉, 黄见良, 贺帆, 彭少兵. 水稻生理生化特性对氮肥的反应及与氮利用效率的关系. 作物学报, 2007, 33(7): 1168-1176.
- [36] 川田信一郎, 山崎耕宇, 石原邦ら. 水稻における根群の形態形成について, くにその生育阶段に着目した場合の一例, 日本作物学会紀事, 1963, 32: 163-180.
- [37] 川田信一郎, 副島増夫. 水稻根の生育, とくに“うわ根”の形成と堆肥施用との関係について, 日本作物学会紀事, 1976, 45: 99-116.
- [38] 石庆华, 黄英金, 李木英, 徐益群, 谭雪明, 张佩莲. 水稻根系性状与地上部的相关及根系性状的遗传研究. 中国农业科学, 1997, 30(4): 61-67.
- [39] 董桂春, 王余龙, 吴华, 周小冬, 单玉华, 王坚刚, 蔡惠荣, 蔡建中. 水稻主要根系性状对施氮时期反应的品种间差异. 作物学报, 2003, 29(6): 871-877.
- [40] 王余龙, 姚友礼, 刘宝玉, 吕贞龙, 黄建晔, 徐家宽, 蔡建中. 不同生育时期氮素供应水平对杂交水稻根系生长及其活力的影响, 作物学报, 1997, 23(6): 699-706.