作物学报 ACTA AGRONOMICA SINICA 2014, 40(9): 1639–1649 http://zwxb.chinacrops.org/
ISSN 0496-3490; CODEN TSHPA9 E-mail: xbzw@chinajournal.net.cn

DOI: 10.3724/SP.J.1006.2014.01639

水氮管理模式对不同氮效率水稻氮素利用特性及产量的影响

孙永健[1] 孙园园[2] 徐 徽[1] 李 玥[1] 严奉君[1] 蒋明金[1] 马 均[1,*]

[1] 四川农业大学水稻研究所 / 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] 中国气象局成都高原气象研究所, 四川成都 610072

摘 要: 以高产氮高效品种(德香 4103)和中产氮低效品种(宜香 3724)为材料, 通过“淹水灌溉+氮肥优化运筹(W1N1)”、“控制性交替灌溉+氮肥优化运筹(W2N1)”、“旱种+氮肥优化运筹(W3N2)” 3 种水氮管理模式处理, 研究其对氮素利用及产量的影响及其生理特性, 并探讨氮素利用及产量与生理响应间的关系。结果表明, 氮效率品种间的差异与水氮管理模式对水稻氮素利用特征、灌溉水生产效率、生理特性及产量均存在显著影响; 不同氮效率品种间在氮肥利用效率方面的差异明显高于水氮管理模式的调控效应; 而水氮管理模式对灌溉水生产效率、总吸氮量、氮素干物质生产效率及稻谷生产效率的调控作用显著。W2N1 相对于 W1N1 及 W3N2 水氮管理模式能促进不同氮效率水稻拔节至抽穗期、抽穗至成熟期氮素的累积, 提高功能叶谷氨酰胺合成酶(GS)活性、光合速率(P_n)及根系活力, 进而提高稻谷产量及氮肥利用率, 且对中产氮低效品种的调控效应显著高于对高产氮高效品种, 为本试验最佳的水氮管理模式。高产氮高效品种的平均总颖花数、拔节至抽穗期稻株氮累积量、功能叶 GS 活性、P_n 及根系活力均显著高于氮低效品种, 尤其结实期高产氮高效品种更有利于维持叶片及根系的代谢同化能力, 利于氮素转运、再分配到籽粒中提高稻谷生产效率及氮肥利用效率, 是氮高效品种相对于氮低效品种高产、氮高效利用的重要原因。相关分析表明, 水氮管理模式下不同氮效率水稻主要生育时期功能叶 GS 活性、P_n 及根系活力与氮素利用及稻谷产量均存在显著或极显著的正相关; 尤其以水稻抽穗期剑叶 GS 活性及根系活力与氮素利用及稻谷产量的正相关性最高。

关键词: 水氮管理模式; 水稻; 氮效率; 氮素利用; 产量

Effects of Water-Nitrogen Management Patterns on Nitrogen Utilization Characteristics and Yield in Rice Cultivars with Different Nitrogen Use Efficiencies

SUN Yong-Jian[1], SUN Yuan-Yuan[2], XU Hui[1], LI Yue[1], YAN Feng-Jun[1], JIANG Ming-Jin[1], and MA Jun[1,*]

[1] Rice Research Institute of Sichuan Agricultural University / Key Laboratory of Crop Physiology, Ecology, and Cultivation in Southwest, Ministry of Agriculture, Wenjiang 611130, China; [2] Institute of Plateau Meteorology, China Meteorological Administration, Chengdu 610072, China

Abstract: The optimal water-nitrogen (N) managements and the selection of genotypes with high nitrogen utilization efficiency (NUE) play a vital note in rice production aiming at high yield, high NUE and water-saving irrigation. In order to elucidate effects of water-nitrogen management patterns on N utilization characteristics, grain yield and its physiological basis in rice cultivars with different NUEs. Two different NUE rice cultivars with high-yield and high N-efficiency (Dexiang 4103) as well as medium-yield and low N-efficiency (Yixiang 3724), were used with three water-nitrogen management patterns, including standing irrigation and optimized N application (W1N1), alternate irrigation and optimized N application (W2N1), and dry cultivation and optimized N application (W3N2). The relationship between yield or N utilization characteristics and glutamine synthetase (GS) activity, photosynthetic rate (P_n) and root activity was investigated. The results showed that rice cultivars with different NUEs and water-nitrogen management patterns significantly affected N utilization characteristics, irrigation water use efficiency, physiological characteristics and grain yield. The regulation effects of water-nitrogen management patterns on NUE indexes (physiological efficiency, agronomy efficiency, and N recovery efficiency) were lower than those of rice cultivars with different NUEs, while the

本研究由国家自然科学基金项目(31101117), 农业部作物生理生态与耕作重点实验室开放课题(201303), 国家“十二五”科技支撑计划项目(2011BAD16B05, 2012BAD04B13, 2013BAD07B13)和四川省育种攻关专项(2011NZ0098-15)资助。

* 通讯作者(Corresponding author): 马均, E-mail: majunp2002@163.com

第一作者联系方式: E-mail: yongjians1980@163.com

Received(收稿日期): 2014-01-27; Accepted(接受日期): 2014-06-16; Published online(网络出版日期): 2014-06-27.

URL: http://www.cnki.net/kcms/detail/11.1809.S.20140708.1146.002.htm

effects of water-nitrogen management on irrigation water use efficiency, total N accumulation, N dry matter production efficiency, and N production efficiency were significant. Compared with W1N1 and W3N2, W2N1 could promote the N uptake from elongation to maturing stages, enhance activity of GS, P_n, and root activity, and then improve grain yield and NUE of two different NUE rice cultivars, being the best model in this experiment. Moreover, the regulation effects of water-nitrogen management patterns on the cultivar with medium-yield and low N-efficiency were significantly higher than these with high-yield and high N-efficiency rice cultivars. The results also showed that average total spikelet number, N accumulation from elongation to heading stages, GS activity and P_n of leaves, and root activity of high N-efficiency rice cultivar were higher than those of low N-efficiency rice cultivar. Especially, during filling stage compared with medium-yielding and low N-efficiency cultivar, the high-yielding and high N-efficiency rice cultivar was more beneficial to higher metabolism and assimilation capacity of leaves and roots, which is the important reason for high-yielding and high N-efficiency rice cultivar further to increase yield and NUE. Correlation analysis indicated that there existed significantly positive correlations of GS activity and P_n of leaves, and root activity in the two N-efficiency rice cultivars with indices of N uptake and utilization and yield, furthermore, the maximum correlation coefficients of GS activity of leaves and root activity with yield or NUE were observed at heading stage.

Keywords: Water-nitrogen management patterns; Rice; N use efficiency; N utilization; Grain yield

稻谷是世界上单产最高、总产最多的粮食作物, 为约30亿人口提供了35%~60%的饮食热量[1]。随着人口增长和经济发展, 据估计, 到2030年世界水稻总产需较目前增加60%才能满足需求, 我国则须在现有水平上提高20%[2-3]。实际生产中, 灌溉用水、氮肥投入对提高水稻产量和稳定粮食生产起重要作用; 但农业水资源的日益紧缺和不合理施肥造成水源污染的扩大, 已成为水稻生产的另一突出问题[4]。因此, 如何同步提高水稻产量、氮肥利用率及灌溉水利用率是当前研究的一个热点和难点[3-5]。为此前人已进行了大量研究[6-13]。Broadbent等[6]和李敏等[7]研究表明, 水稻氮素利用效率存在显著的基因型差异, 且高产氮高效品种在生育后期能保持更高的群体生长率及干物质转运量与转运率, 利于产量及氮肥利用率的提高; 杨建昌等[8]和Yao等[9]研究表明, 节水灌溉的水稻产量及对氮素的利用与淹灌大体持平甚至更高; 丁艳锋等[10]和Cabangon等[11]研究表明, 合理施氮才能提高水稻产量及氮素利用率; 王绍华等[12]认为, 水氮对水稻氮吸收利用及产量的影响有显著的互作效应, 提出采用适度的水分胁迫, 以提高水稻氮素利用率, 减少稻田氮损失。上述研究表明高产氮高效品种的选用, 适宜的灌溉管理、施肥方式、水肥互作调控措施对提高水稻氮素吸收效率、促进增产均具显著作用。但目前在对氮高效水稻品种配套的栽培措施研究中, 多偏重于施氮量、氮肥运筹单因子效应[6-7], 在前人研究[8-12]的基础上, 我们通过试验[13-15]进一步研究证实了水、氮对水稻产量形成和氮素利用存在耦合效应, 并初步提出了3种水分管理条件下适宜的氮肥运筹方式, 但适宜的水氮管理措施能否进一步发挥高产氮高效水稻品种的优势, 高产氮高效品种与水氮管理模式间是否存在显著的耦合效应, 以及不同氮效率水稻对水氮耦合条件响应差异的生理机制及与氮高效利用关系的研究均鲜见报道。为此, 本研究在前期试验[13-15]的基础上, 进一步研究3种水氮运筹优化管理模式对不同氮效率水稻氮素利用及产量的影响及其生理特性, 并探讨水氮管理模式下不同氮效率水稻氮素利用及产量与生理响应间的关系, 为进一步丰富和完善水稻氮利用效率基因型差异的机制, 也为深化、完善水稻水肥调控机理及其生理调控机制提供理论和实践基础。

1 材料与方法

1.1 试验设计

2012—2013 年在成都温江四川农业大学水稻研究所试验农场(30°70′N, 103°83′E)进行试验, 耕层土壤质地为沙质壤土, 土壤理化性状见表 1。根据2010—2011 年对广泛应用且适宜在本地区种植的 30 个杂交稻品种间氮肥利用效率差异的筛选结果, 选用生育期基本一致、氮效率存在显著差异的 2 个中籼迟熟型杂交稻(主茎总叶片数均为 17)品种德香 4103 (高产氮高效品种, 生育期为 150.2 d)和宜香 3724 (中产氮低效品种, 生育期为 150 d); 2012 年试验 4 月 10 日播种, 5 月 5 日移栽, 2013 年试验 4 月 4 日播种, 4 月 29 日移栽; 均为旱育秧, 移栽叶龄为四叶一心, 行株距为 33.3 cm × 16.7 cm, 每穴单株, 进行不同氮效率品种×水氮管理模式二因素试验。两年试验均设 3 种水氮管理模式(表 2), 即本课题组前期研究提出的 3 种水分管理下适宜的氮肥运筹方式[13-15], 即“淹水灌溉+氮肥优化运筹(W1N1)”、“控制性交替灌溉+氮肥优化运筹(W2N1)”、“旱种+氮肥优化运筹(W3N2)”; 且相对 2012年水氮管理模式处理, 2013 年试验在不同水分管理下均增设一不施氮处理, 以比较不同水氮管理模式下的氮肥利用效率; 完全随

表 1　试验田耕层土壤(0~20 cm)理化性状
Table 1　Physicochemical characteristics of soil (0–20 cm) in the experiments

年份 Year	全氮 Total N (g kg^{-1})	有机质 Organic matter (g kg^{-1})	速效养分 Available nutrient (mg kg^{-1})			pH	容重 Bulk density (g cm^{-1})
			N	P	K		
2012	1.89	21.4	99.2	34.8	93.8	6.42	1.23
2013	1.97	22.1	104.4	32.4	101.4	6.47	1.29

表 2　不同水氮管理模式处理
Table 2　Treatment of different water-nitrogen management patterns

处理 Treatment	水氮管理模式 WNMP		各生育时期氮肥运筹量 NARMGS (kg N hm^{-2})						总施氮量 Total nitrogen (kg N hm^{-2})	灌溉水量 Irrigation water (m^3 hm^{-2})
	灌水方式 Irrigation method	氮肥运筹 Nitrogen application	基肥 Basal fertilizer	分蘖肥 Tilling fertilizer	穗肥追施叶龄余数 PFLARLPN					
					5.0	4.0	3.0	2.0		
W1N1	W1	N1	54	54	—	36	—	36	180	9790
W2N1	W2	N1	54	54	—	36	—	36	180	5660
W3N2	W3	N2	90	54	18	—	18	—	180	3040

W1: 淹水灌溉; W2: 控制性交替灌溉; W3: 旱种; N1: 施氮量 180 kg hm^{-2} 下, 氮肥运筹的基肥:分蘖肥:穗肥(倒四、二叶龄期分 2 次等量施入)比例为 3:3:4; N2: 施氮量 180 kg hm^{-2} 下, 氮肥运筹的基肥:分蘖肥:穗肥(倒五、三叶龄期分 2 次等量施入)比例为 5:3:2。

W1: submerged irrigation; W2: controlled alternate irrigation; W3: dry cultivation; N1: the total N fertilizer was 180 kg hm^{-2}, N application ratio was 30% for the basal, 30% for tillering, 40% for panicle (N fertilizer was split into two equal applications at the 4th and 2nd leaves emerged from the top); N2: the total N fertilizer was 180 kg hm^{-2}, N application ratio was 50% for the basal, 30% for tillering, 20% for panicle (N fertilizer was split into two equal applications at the 5th and 3rd leaves emerged from the top). WNMP: water-nitrogen management patterns; NARMGS: nitrogen application rate at main growth stages; PFLARLPN: panicle fertilizer at leaf ages with remaining leaf primordium number.

机设计, 3 次重复, 小区面积 15.0 m^2, 用水表准确记载每次灌水量, 确保相同水氮管理模式的小区灌水量一致; 基施 P_2O_5 90 kg hm^{-2} 和 K_2O 135 kg hm^{-2}。小区间筑埂(宽 40 cm, 高 30 cm)并用塑料薄膜包裹, 以防串水串肥, 其他田间管理按大面积生产田进行。

W1 为淹水灌溉(对照)。水稻移栽后田面一直保持 1~3 cm 水层, 收获前 1 周自然落干。

W2 为控制性交替灌溉。浅水(1 cm 左右)栽秧, 移栽后 5~7 d 田间保持 2 cm 水层确保秧苗返青成活, 之后至孕穗前田面不保持水层, 土壤含水量为饱和含水量的 70%~80% (用美国生产的 TDR300 土壤水分速测仪测定), 无效分蘖期晒田; 孕穗期土表保持 1~3 cm 水层; 抽穗至成熟期采用灌透水、自然落干至土壤水势为–25 kPa 时(用中国科学院南京土壤研究所生产的真空表式土壤负压计测定)再灌水的交替灌溉。

W3 为旱种。移栽前浇透底墒水, 移栽后 5~7 d 浇水确保秧苗返青成活, 以后全生育期旱管理, 土壤水势为–15 ~ –30 kPa, 仅在分蘖盛期、孕穗期、开花期和灌浆盛期各灌一次透水, 以田间不积水为准。

1.2　测定项目及方法

1.2.1　植株氮含量　　分别于水稻分蘖盛期(移栽后21 d)、拔节期、抽穗及成熟期, 按各小区的平均茎蘖数取代表性稻株5株, 测定地上部叶、茎鞘和穗等器官的干重, 用H_2SO_4-H_2O_2消煮, 用FOSS-8400凯氏定氮仪测定氮含量。

氮素积累总量=成熟期单位面积植株氮积累量

氮素干物质生产效率＝单位面积植株干物质积累量/单位面积植株氮积累量

氮素稻谷生产效率=单位面积稻谷产量/单位面积植株氮积累量

氮肥农艺利用率=(施氮区产量–氮空白区产量)/施氮量

氮肥回收利用率=(施氮区植株氮积累量–氮空白区植株氮积累量)/施氮量×100%

氮肥生理利用率=(施氮区产量–氮空白区产量)/(施氮区植株氮积累量–氮空白区植株氮积累量)

1.2.2　谷氨酰胺合成酶(GS)　　分别于水稻拔节期、抽穗及成熟期的晴天 9:00、光照强度在 1100~1200 mol m^{-2} s^{-1} 情况下, 取各处理 15 株具有代表性(每株茎蘖数为各小区的平均茎蘖数)的主茎完全展开的顶叶, 去叶脉, 剪碎混匀, 参照 Lea 等[16] 的方法测定, 用 Sigma 公司生产的 γ-谷氨酰基异羟肟酸作标准曲线, 以每小时生成的 γ-谷氨酰基异羟肟酸微摩尔数(μmol mg^{-1} Protein h^{-1})表示酶活力。

1.2.3　净光合速率及根系活力　　分别于水稻拔节

期、抽穗及成熟期的晴天 9:30 至 11:00、光照强度在 1200 mol m^{-2} s^{-1} 以上时, 用 Li-6400 光合仪(美国)测定各处理 5 片具有代表性的主茎完全展开的顶叶中部, 每叶重复测定 3 次。同时期选取具有代表性的稻株, 以稻株基部为中心, 挖取行距×株距×深度为 30 cm × 20 cm × 20 cm 的土块, 装于筛网袋中, 并将根仔细冲洗干净, 参照 Ramasamy 等[17]的方法测定根系活力, 以每小时每克根干重氧化 α-NA 微克数(μg α-NA g^{-1} DW h^{-1})表示。

1.2.4 考种与计产及灌溉水生产效率 成熟期从各小区随机取 10 株(每株茎蘖数为各小区的平均茎蘖数), 室内考种, 测定穗粒数、实粒数、千粒重, 计算结实率等性状。各小区按实收株数计产。灌溉水生产效率(kg Grain m^{-3})=产量/灌溉水量。

1.3 数据分析

用Microsoft Excel和SPSS 17.0处理系统分析数据, SigmaPlot 10.0软件作图。

2 结果与分析

2.1 水氮管理模式对不同氮效率水稻产量及构成因素的影响

由表 3 和表 4 可见, 氮效率品种间的差异与水氮管理模式对产量及其构成因素的影响均达极显著水平, 且水氮管理模式对有效穗、总颖花数、结实率及最终产量的调控均显著高于品种间的差异; 从水氮管理模式与品种间的交互作用来看, 水氮管理模式与品种对产量、每穗粒数及总颖花数的影响均存在显著互作效应, 且两年试验中相同水氮管理模式与品种间差异对产量及其构成因素影响的趋势一致。

各灌溉条件下, 不同氮效率品种施氮处理的产量均显著高于同一灌溉条件下不施氮处理(表3); 而3种水氮管理模式间, 各品种产量均表现为 W2N1>W1N1>W3N2, W2N1为最优水氮管理模式(表3和表4)。从不同氮效率品种对氮肥的响应来看(表3), 在同一灌溉不施氮处理下, 氮高效品种德香4103产量略高于氮低效品种宜香3724, 但差异均未达到显著水平, 而配合不同氮肥运筹后, 德香4103产量均显著高于宜香3724, 也间接表明氮高效品种在氮肥利用及增产方面显著高于氮低效品种。

从不同氮效率水稻产量构成因素来看, 各水氮管理模式相对于同一灌溉条件下不施氮处理均能显著提高有效穗、每穗粒数及总颖花数, 但对结实率的影响相反, 对千粒重影响不太一致, W1N1和W2N1相对于同一灌溉条件下不施氮处理均能不同程度提高千粒重, 但旱种下的水氮管理模式相对此灌溉不施氮处理千粒重显著下降(表3); 3种水氮管理模式间, 各品种产量构成因素均表现为 W2N1>W1N1>W3N2, 且除每穗粒数差异不显著外, W2N1和 W1N1处理均显著高于 W3N2处理(表3和表4)。从不同氮效率品种对水氮管理模式的响应来看(表3), 同一水氮管理模式下, 除千粒重外, 氮高效品种德香4103各产量构成因子均不同程度地高于氮低效品种宜香3724, 尤其在总颖花数的数量上优势明显且与最终产量相关性达极显著水平(相关系数为 0.944**), 并保持相对较高的结实率, 这可能是氮高效品种相对于氮低效品种的优势所在。

2.2 水氮管理模式对不同氮效率水稻水分及氮素利用的影响

由表 5 可见, 水氮管理模式与氮效率品种间的差异对灌溉水生产效率、氮素累积及利用的影响均达显著或极显著水平; 不同氮效率品种间在氮肥利用效率方面的差异明显高于水氮管理模式的调控效应; 而对灌溉水生产效率、水稻总吸氮量、氮素干物质生产效率及氮素稻谷生产效率的影响则相反; 水氮管理模式与品种除对氮素干物质及稻谷生产效率不显著外, 对灌溉水生产效率、水稻总吸氮量及氮肥利用效率均存在显著互作效应。

由表5还可看出, 各灌溉模式下, 不同氮效率品种施氮处理的灌溉水生产效率及氮累积总量均显著高于同一灌溉条件下不施氮处理, 但施氮处理的氮素干物质生产效率及氮素稻谷生产效率显著降低; 而3种水氮管理模式间, 各品种灌溉水生产效率、氮素干物质生产效率均值均表现为 W3N2>W2N1>W1N1, 氮累积总量、氮素稻谷生产效率、氮素利用效率各指标均值均表现为 W2N1>W1N1>W3N2, 说明合理的水氮管理模式并不会减少不同氮效率水稻的吸氮量, 甚至对氮素吸收及利用有一定的促进作用, 尤其 W2N1相对 W1N1处理能进一步显著提高氮低效品种宜香3724的氮肥生理利用率、农艺利用率及回收利用率, 表明水氮管理对氮低效品种的调控效应明显高于对氮高效品种。

从不同氮效率品种对水氮管理的响应来看, 同一水氮管理模式下, 氮高效品种德香 4103 灌溉水生产效率、氮累积总量、氮素稻谷生产效率及氮肥利用效率各指标均不同程度地高于氮低效品种宜香

表 3　水氮管理模式对不同氮效率水稻产量及构成因素的影响(2013 年)

Table 3　Effects of water-nitrogen management patterns on yield and its components in rice cultivars with different N use efficiencies in 2013

品种 Cultivar	处理 Treatment	有效穗 Effective panicles ($\times10^4$ hm^{-2})	每穗粒数 Spikelets (No. per panicle)	总颖花数 Total spikelets ($\times10^6$ hm^{-2})	结实率 Seed setting rate (%)	千粒重 1000-grain weight (g)	实际产量 Grain yield (kg hm^{-2})
德香 4103 Dexiang 4103	W1N0	191.98 cd	144.99 b	276.90 e	89.15 b	31.91 fg	7783.02 f
	W1N1	221.60 a	158.71 a	351.70 b	88.73 b	32.42 ef	10048.07 b
	W2N0	192.70 c	145.12 b	279.64 e	90.28 a	32.52 de	7992.41 ef
	W2N1	221.40 a	165.80 a	367.08 a	89.42 ab	32.69 de	10521.93 a
	W3N0	182.26 de	142.20 b	259.17 f	87.19 c	33.09 d	7310.05 g
	W3N2	211.36 b	157.27 a	332.42 c	84.64 e	31.80 g	8884.79 d
	平均 Average	203.55	152.35	311.15	88.24	32.41	8756.71
宜香 3724 Yixiang 3724	W1N0	186.60 cd	139.92 bc	261.09 f	86.08 cd	34.83 c	7765.59 f
	W1N1	214.60 ab	141.95 b	304.63 d	84.46 e	36.07 b	9298.89 c
	W2N0	182.20 de	141.30 bc	257.44 f	89.83 ab	34.81 c	7831.19 f
	W2N1	215.14 ab	146.25 b	314.64 d	86.51 cd	36.60 ab	9692.63 b
	W3N0	172.30 e	133.14 c	229.39 g	86.04 d	36.95 a	7277.77 g
	W3N2	194.70 c	144.64 b	281.62 e	83.92 e	35.35 c	8247.84 e
	平均 Average	194.26	141.20	274.80	86.14	35.77	8352.32
F 值 *F*-value	C	9.38**	42.22**	91.45**	5.77**	87.98**	39.23**
	WN	35.98**	10.42**	111.01**	8.18**	5.37**	106.99**
	C×WN	1.58	4.79*	5.26*	1.52	1.97	4.82*

同栏标以不同字母的数据在 0.05 水平上差异显著。*, **分别表示在 0.05 和 0.01 水平上差异显著。W1N0、W2N0 和 W3N0 分别表示淹水灌溉、控制性交替灌溉和旱种与不施氮肥处理各组合; W1N1: 淹水灌溉+氮肥优化运筹; W2N1: 控制性交替灌溉+氮肥优化运筹; W3N2:旱种+氮肥优化运筹; C: 品种; WN: 水氮管理模式; C×WN: 品种与水氮管理模式互作。

Values with a column followed by different letters are significantly different at $P<0.05$. * Significant at $P<0.05$; ** Significant at $P<0.01$. W1N0, W2N0, W3N0: standing irrigation, alternate irrigation, dry cultivation with blank N treatment, respectively; W1N1: standing irrigation and optimized N application; W2N1: alternate irrigation and optimized N application; W3N2: dry cultivation and optimized N application; C: cultivar; WN: water-nitrogen management patterns; C×WN: cultivar and water-nitrogen management patterns interaction.

表 4　水氮管理模式对不同氮效率水稻产量及构成因素的影响(2012 年)

Table 4　Effects of water-nitrogen management patterns on yield and its components in rice cultivars with different N use efficiencies in 2012

品种 Cultivar	处理 Treatment	有效穗 Effective panicles ($\times10^4$ hm^{-2})	穗粒数 Spikelets (No. per panicle)	总颖花数 Total spikelets ($\times10^6$ hm^{-2})	结实率 Seed-setting rate (%)	千粒重 1000-grain weight (g)	实际产量 Grain yield (kg hm^{-2})
德香 4103 Dexiang 4103	W1N0	189.00 e	146.50 cd	276.89 d	89.58 a	31.15 de	7634.98 e
	W1N1	227.04 ab	157.32 ab	357.18 a	88.51 b	31.76 cd	9811.60 b
	W2N1	228.10 a	161.29 a	367.90 a	89.36 ab	32.01 c	10174.09 a
	W3N2	215.00 cd	157.56 ab	338.75 b	85.31 d	30.95 e	8927.14 c
	平均 Average	214.79	155.67	335.18	88.19	31.47	9136.95
宜香 3724 Yixiang 3724	W1N0	185.07 e	140.40 d	259.84 e	87.01 c	33.60 b	7496.94 e
	W1N1	215.84 cd	142.97 cd	308.59 c	85.86 d	34.23 ab	9047.31 c
	W2N1	217.20 bc	149.80 bc	325.37 b	87.10 c	34.94 a	9532.87 b
	W3N2	206.97 d	145.98 cd	302.13 c	82.99 e	33.53 b	8369.03 d
	平均 Average	206.27	144.79	298.98	85.74	34.08	8611.54
F 值 *F*-value	C	7.97**	25.64**	56.27**	3.33*	94.92**	53.47**
	WN	29.99**	5.53**	63.06**	5.28*	4.58*	191.23**
	C×WN	0.90	3.47*	4.04*	0.50	1.04	3.71*

同栏标以不同字母的数据在 0.05 水平上差异显著。*, **分别表示在 0.05 和 0.01 水平上差异显著。缩写同表 3。

Values with a column followed by different letters are significantly different at $P<0.05$. * Significant at $P<0.05$; ** Significant at $P<0.01$. Abbreviations are the same as given in Table 3.

表 5 水氮管理模式对不同氮效率水稻水分及氮素利用的影响(2013 年)

Table 5 Effects of water-nitrogen management patterns on water and N use efficiencies in rice cultivars with different N use efficiencies in 2013

品种 Cultivar	处理 Treatment	灌溉水生产效率 IWUE (kg m^{-3})	氮素积累总量 TNA (kg hm^{-2})	氮素干物质生产效率 NMPE (kg kg^{-1})	氮素稻谷生产效率 NPE (kg kg^{-1})	氮肥生理利用率 PE (kg kg^{-1})	氮肥农艺利用率 NAE (kg kg^{-1})	氮肥回收利用率 NRE (%)
德香 4103 Dexiang 4103	W1N0	0.80 h	111.69 ef	123.26 c	69.68 a	—	—	—
	W1N1	1.03 g	191.71 ab	93.10 f	52.41 d	28.31 a	12.58 a	44.45 ab
	W2N0	1.41 f	113.10 ef	124.79 bc	70.66 a	—	—	—
	W2N1	1.86 d	200.21 a	93.29 f	52.55 d	29.04 a	14.05 a	48.39 a
	W3N0	2.40 c	106.07 f	129.54 ab	68.92 ab	—	—	—
	W3N2	2.92 a	176.02 c	96.48 ef	50.48 e	22.51 bc	8.75 c	38.86 cd
	平均 Average	1.74	149.80	110.08	60.78	26.62	11.80	43.90
宜香 3724 Yixiang 3724	W1N0	0.79 h	115.24 e	126.97 bc	67.39 bc	—	—	—
	W1N1	0.95 g	184.72 bc	97.65 ef	50.34 e	22.07 c	8.52 c	38.60 d
	W2N0	1.38 f	113.55 ef	127.60 bc	68.97 ab	—	—	—
	W2N1	1.71 e	190.15 b	98.85 e	50.97 de	24.30 b	10.34 b	42.56 bc
	W3N0	2.39 c	108.64 ef	133.99 a	66.99 c	—	—	—
	W3N2	2.75 b	161.75 d	105.95 d	50.99 de	18.27 d	5.39 d	29.50 e
	平均 Average	1.66	145.67	115.17	59.27	21.55	8.08	36.89
F 值 *F*-value	C	8.52**	5.39*	20.06**	8.90**	150.70**	59.20**	201.66**
	WN	216.02**	351.26**	80.21**	94.03**	84.04**	36.03**	179.43**
	C×WN	2.95*	2.86*	0.93	0.88	4.14*	6.22*	5.62*

同栏标以不同字母的数据在 0.05 水平上差异显著。*, **分别表示在 0.05 和 0.01 水平上差异显著。缩写同表 3。

Values with a column followed by different letters are significantly different at $P<0.05$. * Significant at $P<0.05$; ** Significant at $P<0.01$. IWUE: irrigation water use efficiency. TNA: total N accumulation; NMPE: N dry matter production efficiency; NPE: N production efficiency; PE: physiological efficiency. NAE: N agronomy efficiency; NRE: N recovery efficiency. Other abbreviations are the same as given in Table 3.

3724, 而氮素干物质生产效率氮低效品种宜香3724不同程度地高于氮高效品种德香4103; 说明氮高效品种更有利于将氮素转运、再分配到籽粒中提高稻谷生产效率及氮肥利用效率。

2.3 水氮管理模式对不同氮效率水稻氮素阶段累积的影响

由表 6 可见, 水氮管理模式与氮效率品种间的差异对水稻各阶段氮累积量的影响均达极显著水平, 且水氮管理模式的调控效应明显高于氮效率品种间的差异, 均以水氮管理模式对拔节至抽穗氮累积量影响最高; 从水氮管理模式与品种间的交互作用来看, 水氮管理模式与品种对拔节至抽穗期、抽穗至成熟期均存在显著互作效应, 且随生育进程互作效应加强, 均以抽穗至成熟期水氮管理模式与品种间的交互作用最高。

各灌溉条件下, 不同氮效率品种施氮处理的各阶段氮累积量均显著高于同一灌溉下不施氮处理(2013年); 3种水氮管理模式间, 拔节至抽穗期, 抽穗至成熟期各品种氮累积量均表现为 W2N1>W1N1>W3N2, W2N1均不同程度地高于同品种下的其他水氮管理模式(2012年和2013年)。从不同氮效率品种对水氮管理的响应来看, 同一水氮管理下, 分蘖盛期至拔节期氮低效品种宜香3724氮累积量不同程度地高于氮高效品种德香4103, 而在拔节至抽穗期、抽穗至成熟期氮高效品种德香4103氮累积量均显著高于氮低效品种宜香3724, 尤其以氮高效品种在拔节至抽穗期对土壤氮素的吸收相对较高。

2.4 水氮管理模式对不同氮效率水稻主要生育时期一些生理特性的影响

由图 1 可见, 水氮管理模式与氮效率品种间的差异均显著影响主要生育时期功能叶 GS (图 1-A)、光合速率(图 1-B)及根系活力(图 1-C); 随生育进程, 不同氮效率水稻各生理代谢指标总体呈低-高-低的趋势变化, 且均以抽穗期最高。各灌溉条件下, 不同氮效率品种施氮处理的各生育时期各生理指标均显著高于同一灌溉下不施氮处理; 3种水氮管理模式间,

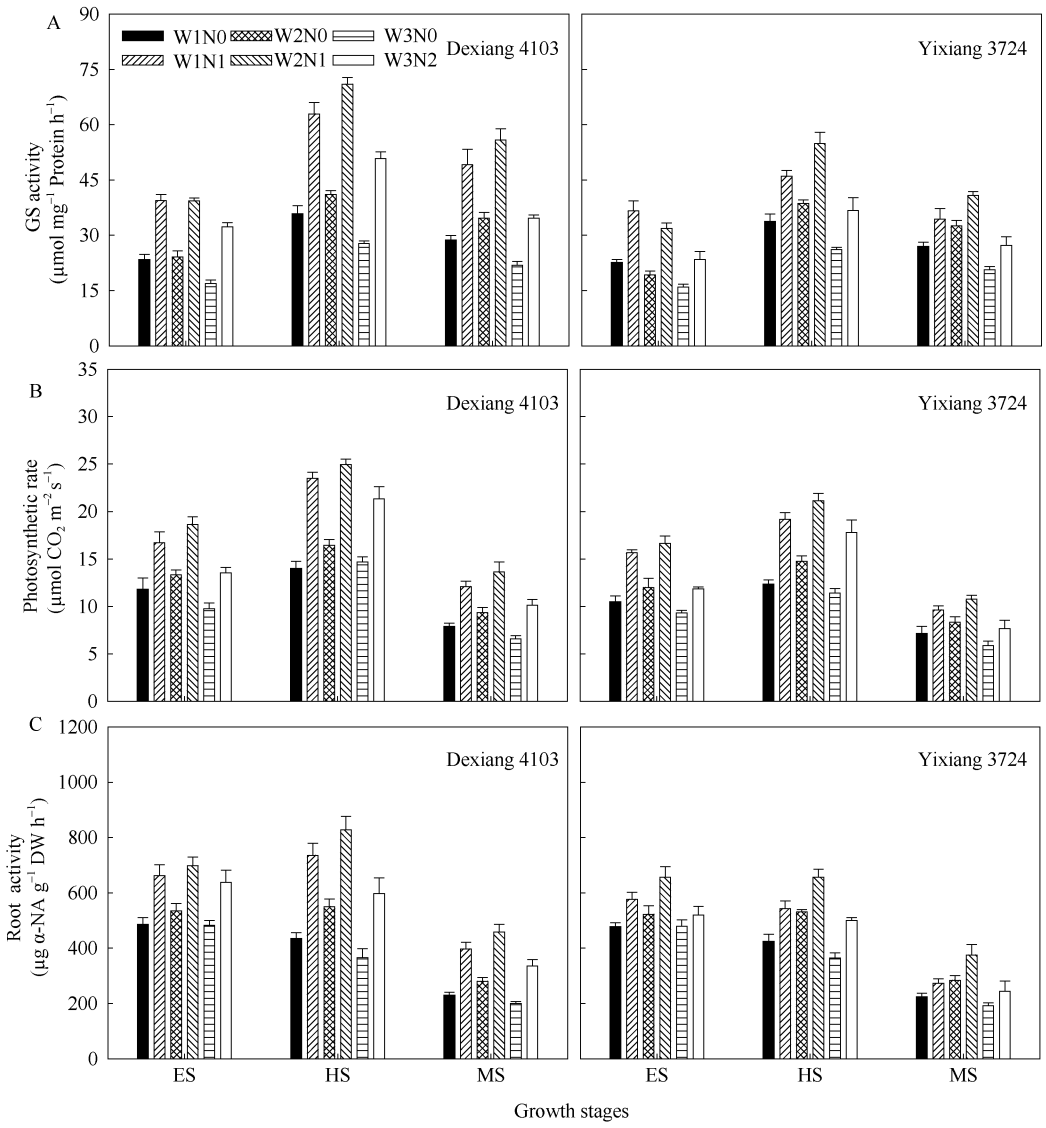


图 1　水氮管理模式对不同氮效率水稻各生育期功能叶 **GS** 活性**(A)**、光合速率**(B)**及根系活力**(C)**的影响**(2013** 年**)**

Fig. 1　Effects of water-nitrogen management patterns on glutamine synthetase (GS) activity (A), photosynthetic rate of leaves (B) and root activity (C) in rice cultivars with different N use efficiencies in 2013

ES: 拔节期; HS: 抽穗期; MS: 成熟期。ES: elongation stage; HS: heading stage; MS: maturing stage.

除拔节期氮低效品种宜香 3724 表现为 W1N1>W2N1> W3N2 外, 拔节期、抽穗期、成熟期各品种 GS、光合速率及根系活力均表现为 W2N1>W1N1> W3N2, W2N1 均不同程度地高于同品种下的其他水氮管理模式, 尤其以拔节至抽穗期差异最大。从不同氮效率品种对水氮管理的响应来看, 同一水氮管理下, 拔节期氮低效品种宜香 3724 各生理指标与氮高效品种德香 4103 差异较小, 氮高效品种优势并不明显; 而在拔节至抽穗期、抽穗至成熟期氮高效品种德香 4103 功能叶 GS、光合速率及根系活力均显著高于氮低效品种宜香3724, 间接表明氮高效品种的优势在于拔节至抽穗期以及结实期生理代谢活性相对较高。

2.5　水氮管理模式和不同氮效率水稻处理下氮素利用及产量与生理指标间的关系

由表 7 可见, 水氮管理模式和不同氮效率水稻品种处理下水稻主要生育时期功能叶 GS 活性、光合速率及根系活力与氮素利用及稻谷产量均存在显著或极显著的正相关, 但不同生育时期的相关系数不同; 从不同氮效率水稻各生育时期来看, 功能叶 GS 活性及根系活力与氮素利用及稻谷产量的正相关性均在水稻抽穗期相关性最高, 而增强拔节期功能叶光合速率对提高不同氮效率水稻氮肥利用效率相对于其他生育时期作用更明显。

表 6 水氮管理模式对不同氮效率水稻氮素阶段累积量的影响

Table 6 Effects of water-nitrogen management patterns on periodical N accumulation in rice cultivars with different N use efficiencies (kg hm^{-2})

品种 Cultivar	处理 Treatment	2013			2012		
		分蘖盛期–拔节 TS–ES	拔节–抽穗 ES–HS	抽穗–成熟 HS–MS	分蘖盛期–拔节 TS–ES	拔节–抽穗 ES–HS	抽穗–成熟 HS–MS
德香 4103 Dexiang 4103	W1N0	24.95 f	45.17 fg	17.75 e	22.60 f	42.12 e	17.86 f
	W1N1	41.21 ab	89.12 ab	27.75 b	40.84 b	85.27 b	25.79 c
	W2N0	23.62 f	48.28 f	20.28 d	—	—	—
	W2N1	39.83 b	93.44 a	33.30 a	44.52 a	90.86 a	31.93 a
	W3N0	24.45 f	45.17 fg	16.08 e	—	—	—
	W3N2	32.01 d	83.07 cd	24.63 c	31.44 d	78.71 c	20.89 e
	平均 Average	31.01	67.37	23.30	34.85	74.24	24.12
宜香 3724 Yixiang 3724	W1N0	30.28 de	41.39 g	17.22 e	25.51 e	43.00 e	16.59 f
	W1N1	43.12 a	79.56 d	23.98 c	45.84 a	80.84 c	23.37 d
	W2N0	29.37 e	42.02 g	19.92 d	—	—	—
	W2N1	40.65 b	86.00 bc	28.90 b	41.52 b	87.83 b	29.29 b
	W3N0	29.31 e	39.43 g	13.00 f	—	—	—
	W3N2	34.54 c	73.35 e	21.09 d	33.48 c	72.32 d	20.68 e
	平均 Average	34.54	60.29	20.69	36.59	71.00	22.48
F 值 *F*-value	C	52.84**	62.60**	74.43**	8.35**	8.89**	13.45**
	WN	164.42**	421.28**	258.84**	240.68**	290.58**	220.53**
	C×WN	3.05	4.32*	5.46**	2.91	3.58*	3.99*

同栏标以不同字母的数据在 0.05 水平上差异显著。*, ** 分别表示在 0.05 和 0.01 水平上差异显著。缩写同表 3。

Values with a column followed by different letters are significantly different at $P<0.05$. * Significant at $P<0.05$; ** Significant at $P<0.01$. TS: tillering stage; ES: elongation stage; HS: heading stage; MS: maturing stage. Abbreviations are the same as given in Table 3.

表 7 水氮管理模式和不同氮效率水稻品种下产量及氮利用特征与各生育时期功能叶生理特性及根系活力的相关性(2013 年)

Table 7 Coefficients of correlation of some physiological indexes of function of leaves with root with grain yield and N uptake and utilization at various growth stages under water-nitrogen management patterns in cultivars with different N use efficiencies in 2013

生理指标 Physiological index	生育时期 Growth stage	产量 Grain yield	氮素吸收利用 N uptake and utilization			
			氮素积累总量 TNA	氮肥生理利用率 PE	氮肥回收利用率 NRE	氮肥农艺利用率 NAE
GS 活性 Glutamine synthetase activity	拔节期 Elongation	0.910**	0.860**	0.816**	0.805**	0.812**
	抽穗期 Heading	0.927**	0.894**	0.926**	0.936**	0.936**
	成熟期 Maturity	0.889**	0.759*	0.895**	0.902**	0.889**
光合速率 Photosynthetic rate	拔节期 Elongation	0.850**	0.849**	0.851**	0.891**	0.869**
	抽穗期 Heading	0.864**	0.889**	0.751*	0.803**	0.762*
	成熟期 Maturity	0.852**	0.805**	0.806**	0.822**	0.841**
根系活力 Root activity	拔节期 Elongation	0.801**	0.741*	0.671*	0.629*	0.763*
	抽穗期 Heading	0.836**	0.786**	0.790**	0.836**	0.796**
	成熟期 Maturity	0.748*	0.701*	0.709*	0.777*	0.729*

生理指标与产量、氮素累积总量相关分析(样本数 n=36); 生理指标(空白除外)与氮肥生理利用率、回收利用率及农艺利用率相关分析(样本数 n=24)。*, **分别表示在 0.05 和 0.01 水平上差异显著。缩写同表 5。

Coefficients of correlation between some physiological indexes and grain yield and N uptake (number of samples is 36), as well as between some physiological indexes (except blank treatment) and N use efficiency (number of samples is 24). * Significant at $P<0.05$; ** Significant at $P<0.01$. Abbreviations are the same as given in Table 5.

3　讨论

水、肥在水稻生长发育过程中是相互影响和制约的两个因子, 如何减少水稻灌溉用水、高效利用肥料来实现水稻稳产高产的理论和技术已有较多报道[5-15,18-23]。陈星等[18]研究表明, 淹灌模式下减氮25% (157.5 kg hm^{-2})的处理为稳产高效水氮运筹模式; 杨建昌等[8]、王绍华等[12]及我们前期的研究[13-15]表明, 节水灌溉模式下适宜的氮肥运筹对提高水稻氮吸收利用及产量作用显著, 且水氮间存在显著的互作效应; 薛亚光等[19]研究提出在养分投入不增加或少增加条件下, “增穗增粒扩大产量库容”、“培育健壮根系提高结实率”、“增加和促进茎鞘中非结构性碳水化合物的积累与运转”是实现水稻高产高效的3种途径, 且提出实地养分管理技术和精确灌溉技术可作为中熟水稻高产高效栽培的2个关键技术。本研究表明控制性交替灌溉下的氮肥优化管理模式可实现水稻产量和氮肥利用率的同步提高, 且能进一步发挥高产氮高效水稻品种的优势(表3、表4和表5), 进一步证实、完善和补充了前人及我们前期的研究结果[7-15]。同时, 水稻品种自身的优势也是发挥水稻高产高效作用的另一途径, 前人已从不同基因型水稻[6]、超级稻[20]、氮高效水稻[7,21-22]等对比研究了品种间的差异, 尤其对高产氮高效水稻品种优越性进行了物质累积与转运[7]、根系生长[21]、茎秆特性[22]等一系列研究, 但不同氮效率水稻对水氮耦合条件响应的差异及其生理机制均鲜见报道。本研究表明水氮优化管理模式(W2N1)显著提高不同氮效率水稻的产量、灌溉水利用效率及氮肥利用效率, 但相对于对照(W1N1), 水氮优化管理模式(W2N1)可显著提高中产、氮低效品种的氮肥利用效率(表5), 且不同氮利用效率水稻品种间的差异对氮肥利用效率的影响明显高于水氮优化模式的调控效应(表5), 因此应进一步加强氮高效、高产水稻品种的筛选, 提出鉴定氮高效、高产品种的指标并集成高产氮高效水稻水氮耦合技术体系; 同时本研究还表明不同水氮管理模式下, 高产氮高效品种的平均总颖花数、拔节至抽穗期稻株氮累积量、功能叶GS活性、P_n及根系活力均显著高于氮低效品种, 尤其结实期高产氮高效品种有利于维持叶片及根系的代谢同化能力, 且氮高效品种更有利于将氮素转运、再分配到籽粒中提高稻谷生产效率及氮肥利用效率, 是氮高效品种相对于氮低效品种高产、氮高效利用的重要原因。

从不同水稻品种产量及氮素利用与生理响应间的关系研究来看, 付景等[20]研究了超级稻叶片光合特性和根系生理性状与产量的关系, 提出提高生育后期特别是结实后期根系生理活性是进一步提高超级稻产量的重要途径。李敏等[7,21-22]明确了不同氮效率水稻根系形态生理指标、干物质生产与产量、氮肥吸收利用率和氮肥生理利用率的共性关系[7,21]; 并明确了不同氮效率水稻茎秆性状指标与抗折力、产量、氮肥吸收利用率和生理利用率的共性关系[22], 但尚未区分氮高效与氮低效品种间与产量、氮肥吸收利用率和生理利用率相关关系的差异。本研究在水氮管理模式下, 进一步明确了水氮管理模式下不同氮效率水稻主要生育时期功能叶GS活性、光合速率及根系活力与氮素利用及稻谷产量均存在显著或极显著正相关的共性关系(表7); 但本研究还表明, 尤其以水稻抽穗期功能叶GS活性及根系活力与氮素利用及稻谷产量的正相关性最高; 据此可将抽穗期剑叶GS活性及根系活力作为综合评价水稻产量及氮效率的指标。

此外, 高产氮高效水稻各生长时期对氮素的吸收强度有所不同, 董桂春等[23]报道, 与氮低效品种比较, 氮高效类型籼稻品种结实期茎鞘叶中氮素转运量大, 转运率高。本研究也表明, 与中产氮低效品种比, 高产氮高效品种抽穗至成熟阶段稻株氮素累积量高, 且物质转运量大、转运率高, 但本研究还表明水氮管理模式对不同生育时期氮素的吸收累积及向籽粒的转运均存在显著调控效应, 高产氮高效品种的另一重要特征在于拔节至抽穗期稻株氮素吸收量最高(表6), 可为结实期稻株氮素向籽粒中的转运提供先决条件。所以在今后高产品种中进行氮高效资源筛选和配套的水氮管理技术研究时, 应该注重发挥节水灌溉和氮肥运筹对水稻群体结构的合理调控作用, 促进拔节至抽穗期稻株对养分的吸收与累积, 提高结实期叶片碳氮代谢能力, 注重延缓根系衰老消亡速度, 增加抽穗至成熟期氮素的吸收及氮素向籽粒的转运, 这对协同水稻品种高产与氮高效将具有非常重要的作用。

4　结论

氮效率品种间的差异和水氮管理模式对水稻氮素利用特征及产量均存在显著影响, 控制性交替灌溉下的氮肥优化管理模式为本试验高产氮高效品种最优的水氮运筹模式, 可实现产量和氮肥利用率的同步提高。高产氮高效品种氮素利用及产量与生理代谢指标间的相关明显高于氮低效品种; 尤其结实

期高产氮高效品种更有利于维持叶片及根系的代谢同化能力，利于氮素转运、再分配到籽粒中提高稻谷生产效率及氮肥利用效率，这是其较氮低效品种高产、氮高效利用的重要原因。

References

[1] Fageria N K. Plant tissue test for determination of optimum concentration and uptake of nitrogen at different growth stages in lowland rice. *Commun Soil Sci Plan*, 2003, 34: 259–270

[2] Peng S B, Tang Q Y, Zou Y B. Current status and challenges of rice production in China. *Plant Prod Sci*, 2009, 12: 3–8

[3] 剧成欣, 张耗, 王志琴, 杨建昌. 水稻高产和氮肥高效利用研究进展. 中国稻米, 2013, 19(1): 16–21
Ju C X, Zhang H, Wang Z Q, Yang J C. Research progress on high yield and high efficient nitrogen utilization in rice. *China Rice*, 2013, 19(1): 16–21 (in Chinese with English abstract)

[4] Peng S B, Huang J L, Zhong X H, Yang J C, Wang G H, Zou Y B, Zhang F S, Zhu Q S, Buresh R, Witt C. Challenge and opportunity in improving fertilizer-nitrogen use efficiency of irrigated rice in China. *Agric Sci China*, 2002, 1: 776–785

[5] Peng S B, Buresh R J, Huang J L, Yang J C, Zou Y B, Zhong X H, Wang G H, Zhang F S. Strategies for overcoming low agronomic nitrogen use efficiency in irrigated rice systems in China. *Field Crops Res*, 2006, 96: 37–47

[6] Broadbent F E, De Datta S K, Laureles E V. Measurement of nitrogen utilization efficiency in rice genotypes. *Agron J*, 1987, 79: 786–791

[7] 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: 101–109
Li M, Zhang H C, Yang X, Ge M J, Ma Q, Wei H Y, Dai Q G, Huo Z Y, Xu K. Characteristics of dry matter accumulation and translocation in rice cultivars with high yield and high nitrogen use efficiency. *Acta Agron Sin*, 2013, 39: 101–109 (in Chinese with English abstract)

[8] 杨建昌, 袁莉民, 常二华, 王志琴, 刘立军, 朱庆森. 结实期干湿交替灌溉对稻米品质及籽粒中一些酶活性的影响. 作物学报, 2005, 31: 1052–1057
Yang J C, Yuan L M, Chang E H, Wang Z Q, Liu L J, Zhu Q S. Effect of dry-wet alternate irrigation on rice quality and activities of some enzymes in grains during the filling. *Acta Agron Sin*, 2005, 31: 1052–1057 (in Chinese with English abstract)

[9] Yao F X, Huang J L, Cui K H, Nie L X, Xiang J, Liu X J, Wu W, Chen M X, Peng S B. Agronomic performance of high-yielding rice variety grown under alternate wetting and drying irrigation. *Field Crops Res*, 2012, 126: 16–22

[10] 丁艳锋, 刘胜环, 王绍华, 王强盛, 黄丕生, 凌启鸿. 氮素基、蘖肥用量对水稻氮素吸收与利用的影响. 作物学报, 2004, 30: 762–767
Ding Y F, Liu S H, Wang S H, Wang Q S, Huang P S, Ling Q H. Effects of the amount of basic and tillering nitrogen applied on absorption and utilization of nitrogen in rice. *Acta Agron Sin*, 2004, 30: 762–767 (in Chinese with English abstract)

[11] Cabangon R.J, Castillo E G, Tuong T P. Chlorophyll meter-based nitrogen management of rice grown under alternate wetting and drying irrigation. *Field Crops Res,* 2011, 121: 136–146

[12] 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: 497–501
Wang S H, Cao W X, Ding Y F, Tian Y C, Jiang D. Interactions of water management and nitrogen fertilizer on nitrogen absorption and utilization in rice. *Sci Agric Sin*, 2004, 37: 497–501 (in Chinese with English abstract)

[13] 孙永健, 孙园园, 李旭毅, 张荣萍, 郭翔, 马均. 水氮互作对水稻氮磷钾吸收、转运及分配的影响. 作物学报, 2010, 36: 655–664
Sun Y J, Sun Y Y, Li X Y, Zhang R P, Guo X, Ma J. Effects of water-nitrogen interaction on absorption, translocation and distribution of nitrogen, phosphorus, and potassium in rice. *Acta Agron Sin*, 2010, 36: 655–664 (in Chinese with English abstract)

[14] Sun Y J, Ma J, Sun Y Y, Xu H, Yang Z Y, Liu S J, Jia X W, Zheng H Z. The effects of different water and nitrogen managements on yield and nitrogen use efficiency in hybrid rice of China. *Field Crops Res*, 2012, 127: 85–98

[15] 孙永健, 孙园园, 刘树金, 杨志远, 程洪彪, 贾现文, 马均. 水分管理和氮肥运筹对水稻养分吸收、转运及分配的影响. 作物学报, 2011, 37: 2221–2232
Sun Y J, Sun Y Y, Liu S J, Yang Z Y, Cheng H B, Jia X W, Ma J. Effects of water management and nitrogen application strategies on nutrient absorption, transfer, and distribution in rice. *Acta Agron Sin*, 2011, 37: 2221–2232 (in Chinese with English abstract)

[16] Lea P J, Blackwell R D, Chen F L. Enzymes of primary metabolism. In: Harborne J B ed. Methods in Plant Biochemistry. Vol. 3. New York: Academic Press, 1990. pp 260–273

[17] Ramasamy S, Ten Berge H F M, Purushothaman S. Yield formation in rice in response to drainage and nitrogen application. *Field Crops Res*, 1997, 51: 65–82.

[18] 陈星, 李亚娟, 刘丽, 方素萍, 方萍, 林咸永. 灌溉模式和供氮水平对水稻氮素利用效率的影响. 植物营养与肥料学报, 2012, 18: 283–290
Chen X, Li Y J, Liu L, Fang S P, Fang P, Lin X Y. Effects of water management patterns and nitrogen fertilizer levels on nitrogen use efficiency of rice. *J Plant Nutr Fert*, 2012, 18: 283–290 (in Chinese with English abstract)

[19] 薛亚光, 陈婷婷, 杨成, 王志琴, 刘立军, 杨建昌. 中粳稻不同栽培模式对产量及其生理特性的影响. 作物学报, 2010, 36: 466–476
Xue Y G, Chen T T, Yang C, Wang Z Q, Liu L J, Yang J C. Effects of different cultivation patterns on the yield and physiological characteristics in mid-season *japonica* rice. *Acta Agron Sin*, 2010, 36: 466–476 (in Chinese with English abstract)

[20] 付景, 陈露, 黄钻华, 王志琴, 杨建昌. 超级稻叶片光合特性和根系生理性状与产量的关系. 作物学报, 2012, 38: 1264–1276
Fu J, Chen L, Huang Z H, Wang Z Q, Yang J C. Relationship of leaf photosynthetic characteristics and root physiological traits with grain yield in super rice. *Acta Agron Sin*, 2012, 38: 1264–1276 (in Chinese with English abstract)

[21] 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: 648–656

Li M, Zhang H C, Yang X, Ge M J, Ma Q, Wei H Y, Dai Q G, Huo Z Y, Xu K, Cao L Q, Wu H. Root morphological and physiological characteristics of rice cultivars with high yield and high nitrogen use efficiency. *Acta Agron Sin*, 2012, 38: 648–656 (in Chinese with English abstract)

[22] 李敏, 张洪程, 杨雄, 葛梦婕, 马群, 魏海燕, 戴其根, 霍中洋, 许轲. 不同氮利用效率基因型水稻茎秆特性比较. 作物学报, 2012, 38: 1277–1285
Li M, Zhang H C, Yang X, Ge M J, Ma Q, Wei H Y, Dai Q G, Huo Z Y, Xu K. Comparison of culm characteristics with different nitrogen use efficiencies for rice cultivars. *Acta Agron Sin,* 2012, 38: 1277–1285 (in Chinese with English abstract)

[23] 董桂春, 王余龙, 周娟, 张彪, 张传胜, 张岳芳, 杨连新, 黄建晔. 不同氮素籽粒生产效率类型籼稻品种氮素分配与运转的差异. 作物学报, 2009, 35: 149–155
Dong G C, Wang Y L, Zhou J, Zhang B, Zhang C S, Zhang Y F, Yang L X, Huang J Y. Difference of nitrogen accumulation and translocation in conventional *indica* rice cultivars with different nitrogen use efficiency for grain output. *Acta Agron Sin*, 2009, 35: 149–155 (in Chinese with English abstract)

欢迎订阅 2015 年《中国农业科技导报》

《中国农业科技导报》是由科学技术部主管, 中国农村技术开发中心主办, 中国农业科学院生物技术研究所承办的全国性、综合性农业学术刊物。

本刊是中文核心期刊、中国科技核心期刊、中国科学引文数据库收录期刊, 以发展现代农业为导向, 主要报道农业高科技领域的最新科研进展、创新成果、转化应用、农业产业化发展态势, 以及政策导向和项目指南(863 计划、支撑计划等)信息, 是农业高新技术创新成果重要的宣传阵地。栏目设置依据当前重要的农业发展方向和领域, 如生物技术、数字农业、环境资源、海洋农业等。读者对象为国内外农业科研机构的研究和管理人员; 相关领域的各级管理部门的管理人员; 农业高技术企业的管理和研发人员; 相关专业的大专院校师生。

诚邀业内人士积极订阅《中国农业科技导报》, 并欢迎咨询洽谈广告业务。

《中国农业科技导报》于 1999 年 6 月创刊, 彩色封面, 大 16 开本, 200 页, 双月刊, 铜版纸 4 色印刷, 逢双月中旬出版, 国内外公开发行。刊号: CN 11-3900/S; ISSN 1008-0864。广告经营许可证号: 京西工商广字 0058 号。2014 年每册定价 30.00 元, 全年定价 180.00 元。全国各地邮局均可订阅, 邮发代号: 82-245; 亦可直接汇款至编辑部订阅, 免费邮寄。

地址: 北京市海淀区中关村南大街 12 号中国农业科学院生物技术研究所《中国农业科技导报》编辑部

邮编: 100081　　电话: 010-82109848　　E-mail: nykjdb@163.com; nkdb@caas.net.cn

网址: http://www.nkdb.net/