

不同水管理下优质稻花后植株碳氮 流转与籽粒生长及品质的相关性

胡钧铭^{1,2}, 江立庚², 徐世宏³, 韦善清², 梁和², 董登峰²

(1. 广西农业科学院 农业科技信息研究所, 南宁 530007; 2. 广西大学 作物栽培与耕作学
重点开放实验室, 南宁 530005; 3. 广西壮族自治区农业技术推广总站, 南宁 530022)

摘要: 以桂华占、八桂香为材料, 在干湿交替灌溉、亏缺灌溉、淹水灌溉 3 种水分条件下, 研究优质稻花后植株碳氮流转与籽粒生长及品质的相关性。结果表明: 不同水管理下, 桂华占和八桂香花后碳氮流转与籽粒的生长间存在密切相关。主要表现在: (1) 茎鞘和叶片干物质转运对籽粒干物质积累的贡献率为 16.86%~25.68%, 花后茎叶干物质运转速度和运转率与籽粒起始灌浆势呈显著甚至极显著正相关; 籽粒最大灌浆速率、活跃灌浆期、持续灌浆时间与叶片干物质运转速度和运转率呈极显著正相关, 与茎鞘干物质运转速度和运转率呈极显著负相关; (2) 茎鞘碳同化物转运对籽粒的产量和淀粉产量的贡献率则为干湿交替灌溉 > 亏缺灌溉 > 淹水灌溉; 但叶片碳同化物转运对籽粒的产量和淀粉产量的贡献率则为淹水灌溉 > 亏缺灌溉 > 干湿交替灌溉; 茎叶可溶性糖积累量的减少和籽粒直链淀粉含量和积累量增加是同步的, 且茎叶可溶性糖积累量快速递减期(花后 3~12 d)与直链淀粉含量和积累量快速递增期(花后 6~12 d)同步; (3) 茎鞘和叶片氮素转运对籽粒氮素积累的贡献率为 44.05%~117.66%, 叶片总氮转运对籽粒氮素积累的贡献率大于茎鞘, 茎鞘和叶片氮同化物对籽粒氮素的贡献率以淹水灌溉处理的最大, 亏缺灌溉处理的次之, 干湿交替灌溉处理的最小。

关键词: 优质稻; 水分胁迫; 碳氮同化物; 流转; 籽粒生长; 品质; 相关性; 同步性

中图分类号: S511.01 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3142(2012)04-0507-09

Relationship between post-anthesis carbon and nitrogen remobilization and grain growth of high quality rice under different water management

HU Jun-Ming^{1,2}, JIANG Li-Geng², XU Shi-Hong³,
WEI Shan-Qing², LIANG He², DONG Deng-Feng²

(1. *Agricultural Science and Technology Information Research Institute, Guangxi Academy of Agricultural Sciences, Nanning 530007, China*; 2. *Key Laboratory of Crop Cultivation and Farming System, Guangxi University, Nanning 530005, China*; 3. *General Station of Agricultural Technology Service of Guangxi, Nanning 530022, China*)

Abstract: Field experiments were conducted in a randomized complete block design with two factors with three water management, wetting-drying irrigation of water(WIW), deficit irrigation of water(DIW), submerged irrigation of water(SIW) and two indica high quality rice genotypes (Baguixiang and Guihuazhan) to investigate the relationship between post-anthesis carbon and nitrogen remobilization and grain growth of high quality indica rice under different wa-

* 收稿日期: 2012-03-11 修回日期: 2012-05-17

基金项目: 国家自然科学基金(30560066); 广西自然科学基金(0832008Z); 广西农业科学院科技发展基金(2012YZ21); 广西研究生教育创新计划项目(2009105930901D010)[Supported by the National Natural Science Foundation of China(30560066); Natural Science Foundation of Guangxi(0832008Z); Scientific Research and Technology Development of Guangxi Academy of Agricultural Sciences (2012YZ21); Guangxi Graduate Education Innovation Program (2009105930901D010)]

作者简介: 胡钧铭(1974-), 男, 江苏宿迁人, 博士, 副研究员, 研究领域为高值农业与信息技术研究, (E-mail)jmhu06@126.com。

ter management in 2007 and 2009. Results indicated that grain growth was closely correlated with carbon and nitrogen remobilization under three different water management conditions. (1) dry matter contribution rate of culm and sheath and leaf blade to grain were from 16.86% to 25.68%. Initial grain filling potential was significant positive correlated with dry matter remobilization rate and efficiency of culm and sheath; maximum grain filling rate, active filling period and active grain filling duration were significant positive correlated with leaf dry matter remobilization rate and efficiency after flowering and significant negative correlated with culm and sheath; (2) the contribution rate of the remobilization of carbon assimilation of culm and sheath to grain yield and starch yield was $WIW > DIW > SIW$, however, the contribution rate of the remobilization of carbon assimilation in leaves to grain yield and starch yield was $SIW > DIW > WIW$. The soluble sugars accumulation of stem and leaf reduced along with the increase in grain amylose content and accumulation increased. The rapid decline period (after flowering 3–12 d) of soluble sugar accumulation in leaves was synchronized with the rapid increase amylose content and accumulation period (after flowering 6–12 d); (3) nitrogen contribution rate of culm and sheath and leaf blade to grain were 44.05% to 117.66%. The contribution rate of leaf total nitrogen remobilization to grain nitrogen accumulation was greater than those of culm and sheath; the contribution rate of nitrogen assimilation of stem and sheath, and leaf to grain nitrogen assimilation was $SIW > DIW > WIW$.

Key words: high quality rice; water management; carbon and nitrogen assimilation; remobilization; grain growth; quality; relationship; synchronization

水分是水稻生长发育、产量与品质形成的重要影响因子之一。土壤水分过多或过少都会影响水稻籽粒产量的提高,不利于水稻品质的改善。水稻传统栽培采用淹水灌溉,常因沟渠渗漏、棵间蒸发和稻田下渗而造成巨大浪费,水分生产利用效率较低。水稻淹水灌溉每年耗水量占全国用水总量的40%以上,占农作物总用水65%以上(程旺大等,2000;张荣萍,2008)。此外,土壤干旱已成为世界范围内限制作物优质高产的主要逆境之一(Tardieu等,1993;Bouman等,2005)。土壤水分逆境会对作物的水分状况、光合作用、生理生化能量代谢及物质转运等产生不良影响(盛海君,2003;陈晓远等,2009)。但事实上,野生稻起源于东南亚低洼沼泽地带,受原生沼泽地带内长期干湿交替环境的影响,使水稻在演化形成过程中具有对适度土壤水分亏缺的适应性,对淹水和旱地表现出明显的两栖性。水资源短缺使水稻节水栽培受到广泛关注(梁永超等,1999;杨建昌等,2000;刘小军等,2010;秦华东等,2011)。

水稻花后植株发育进程中,营养器官与生殖器官由于其自身的生长发育特点和生理功能,各器官的生长发育存在一定相关性,水稻产量物质流转特性成为高产优质生理研究中的热点问题之一,产量与品质形成过程实质上就是物质流转过程。水稻花后是水稻需水的敏感期,土壤水分如何影响花后物质流转关系及其机理,目前尚不明确。在不同水分管理下,基于光能转化和物质流转角度,对水稻花后

籽粒灌浆过程碳氮物质运转影响优质稻产量与品质定量化研究较少。因此,本试验通过设计3种不同土壤水分管理,研究优质水稻桂华占、八桂香在不同水分条件下,其籽粒生长与花后碳氮积累、转运的物质流动的变化及其相互关系,有利于阐明水稻花后关键期水分对优质稻产量和品质调控的生理机制及优质水稻生产的水分管理提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地点与材料

试验于2007~2009年在广西大学农学院水稻标本园水泥池内进行。试验水稻品种为优质水稻桂华占、八桂香,八桂香株高100~110 cm,株型适中,叶片稍长微披,穗粒数100~110粒,结实率75%~80%,千粒重20~26 g,产量5.8~6.5 t·hm⁻²,生育期115~125 d。桂华占株高95~105 cm,株形适中,叶片细直,穗粒数180~191粒,结实率80%~85%,千粒重18~20 g,产量6.0~6.7 t·hm⁻²,生育期110~120 d。田间土壤水分采用中国科学院南京土壤研究所生产的负压式土壤湿度计测定。稻田土壤主要理化特性:2007年,pH 6.65、全氮1.46 g/kg、碱解氮124.29 mg/kg、速效磷30.90 mg/kg、速效钾23.97 mg/kg、有机质21.8 g/kg;2009年,pH 6.58、全氮1.45 g/kg、碱解氮109.78 mg/kg、速效磷29.32 mg/kg、速效钾33.64 mg/kg、有机质

24.6 g/kg。

1.2 试验设计

水稻抽穗前的田间管理保持一致,抽穗后田间设置 3 种水分灌溉调控方式: 亏缺灌溉 (Deficit irrigation of water, DIW) 田间含水量为土壤饱和含水量的 70%~80%, 田间不见水, 土壤水势为 -15~-20 kPa)、干湿灌溉 (Wetting-drying irrigation of water, WIW) 田间含水量为土壤饱和含水量的 85%~95%, 采用灌透水、自然落干的干湿交替进行, 土壤水势为 -5~-10 kPa)、淹水灌溉 (Submerged irrigation of water, SIW) 稻田土表保持 3~5 cm 水层淹水的土壤水势为 0 kPa (隋家明等, 2006)。试验共 6 个处理, 随机区组试验设计, 小区长 4.5 m×宽 1.5 m, 3 次重复。小区间做双田埂, 埂间沟宽 20 cm。湿润育秧, 4 叶期人工双本移栽, 株行距为 30 cm×12 cm。

1.3 测定指标及方法

抽穗期 (50% 稻穗顶小穗露出剑叶叶鞘) 标记同期抽穗长势一致的单茎 300~350 个, 自标记当天开始, 每 3 d 取 1 次样, 总计 11 次。每次取 25 个单茎, 分成穗、叶片、茎鞘 3 部分, 105 °C 杀青 0.5 h 后, 80 °C 下烘干至恒重后称重。选择代表性的 5 穗, 每穗取中部籽粒 20 粒, 前 6 期采取人工徒手剥除颖壳, 第 7 期起用脱糙机脱糙, 将糙米称重, 用于分析籽粒灌浆动态。叶片、茎鞘、籽粒粉碎过 100 目筛, 叶片、茎鞘干样测定总氮、蛋白氮、可溶性总糖、蔗糖、淀粉和非结构性碳水化合物 (NSC) 等的含量。籽粒干样测定总氮、蛋白氮、可溶性总糖、蔗糖、淀粉和非结构性碳水化合物 (NSC)、蛋白质、直链淀粉等的含量。种子收获按国标 GB1350-1999 执行测定品质指标, 其中总氮和蛋白氮采用 PE Spectrum One 近红外分析仪扫描测定; 用热乙醇法提取可溶性总糖、蔗糖, 用蒽酮比色法测定 (高俊凤, 2006)。用高氯酸提取淀粉, 蒽酮比色法测定 (李合生, 2000; 邹琦, 2004; 高俊凤, 2006)。非结构性碳水化合物 (NSC) 采用酶解法测定 (Tadashi 等, 1996)。

1.4 数据处理

花后同化物转运率 (Post-anthesis assimilation remobilization rate, Post-ARR): 单株同化物表观转运量占花前积累量的百分比。花后同化物最大转运率 (Post-anthesis assimilation maximum remobilization rate, Post-AMRR): 单株花后同化物积累量的最大值与最小值差占最大积累量的百分比。花后

同化物日流动速度 (Daily remobilization rate of post-anthesis assimilation, DRRA) 为花后单株 (茎鞘、叶) 物质积累量日变化量。花后同化物转运贡献率 (Post-anthesis assimilation contribution to grain, Post-ACG); 单株 (茎鞘、叶) 花后同化物转移量 (20% 干物质积累用于植株自身呼吸消耗 (吉田昌一, 1983)) 占籽粒干物质积累量的百分比。氮素收获指数 (Nitrogen harvest index, NHI): 单株籽粒成熟期氮素与地上总氮素积累量的百分比。籽粒灌浆动态采用 Richards 方程模拟 (顾世梁等, 1994; 朱庆森等, 1998)。试验数据处理采用 Microsoft Excel 2003, 统计分析通过 DPS7.55 (Data Processing System)、制图采用 CurvrExpert1.3, 采用 SSR (Duncan) 法测验显著性。

2 结果与分析

2.1 不同水分条件下优质稻花后植株碳流转与籽粒生长及品质的相关性

2.1.1 花后叶茎干物质运转对籽粒干物质积累的贡献率 由表 1 看出, 花后茎叶总干物质的再运转约占籽粒干物质积累量的 17%~25%。2007 年, 淹水灌溉处理茎叶干物质对籽粒的贡献率最高, 且与亏缺灌溉和干湿交替灌溉两处理的差异达显著水平。从花后茎鞘干物质运转对籽粒生长的贡献率来看, 以亏缺灌溉处理的贡献率最大。而从叶片干物质运转对籽粒生长的贡献率来看, 则是淹水灌溉处理的贡献率最大。无论是叶片, 还是茎鞘或叶片和鞘的总干物质, 其运转对籽粒生长贡献率的处理间差异均达到显著水平。

由表 2 看出, 各处理收获指数的差异较小, 但地上干物质质量和籽粒干物质质量的处理间差异都达到显著水平, 并表现出干湿交替灌溉 > 亏缺灌溉 > 淹水灌溉。

2.1.2 花后茎叶干物质转运速度及运转率与籽粒灌浆参数的相关性 表 3 结果表明, 花后茎叶干物质运转速度和运转率与籽粒起始灌浆势呈显著甚至极显著正相关, 表明优质稻茎叶干物质转运与其籽粒灌浆启动的迟早关系密切。籽粒最大灌浆速率、活跃灌浆期、持续灌浆时间与叶片干物质运转速度和运转率呈极显著正相关, 与茎鞘干物质运转速度和运转率呈极显著负相关。说明不同水分条件下优质稻叶片干物质流转与籽粒灌浆特性密切相关。

表 1 不同水分条件下优质稻花后叶茎干物质运转对籽粒干物质积累的贡献率

Table 1 Contribution of dry matter redistribution of leaf and culm to grain of quality under different water conditions

品种 Cultivars	处理 Treatment	花后干物质运转对籽粒生长的贡献率 Post-DMCG (%)					
		叶片 Leaf blade		茎鞘 Culm and sheath		合计 Total	
		2007	2009	2007	2009	2007	2009
八桂香 Baguixiang	WIW	12.02b	9.92b	5.69c	8.07b	17.70b	17.99c
	DIW	9.93c	11.06b	9.78a	11.08a	19.71b	22.14b
	SIW	16.09a	17.68a	8.00b	8.00b	24.09a	25.68a
桂华占 Guahuazhan	WIW	7.39b	6.63b	10.68b	10.22b	18.07b	16.86b
	DIW	5.45c	6.62b	13.68a	13.45a	19.14ab	20.07a
	SIW	9.98a	8.43a	10.87b	7.83c	20.85a	16.25b

注：同一列内同一氮肥处理数据后大小写字母表示 1% 和 5% 显著水平。下同。

Note: SDM, shoot dry matter; GDM, grain dry matter; HI, harvest index. Data followed by different uppercase and lowercase letters within a column mean significant at 1% and 5% levels, respectively. The same below.

表 2 不同水分条件对优质稻籽粒干物质收获指数的影响

Table 2 Effect of N harvest index of quality of rice under different water conditions

品种 Cultivars	处理 Treatment	地上干质量 SDM (g)		籽粒干质量 GDM (g)		收获指数 HI (%)	
		2007	2009	2007	2009	2007	2009
		八桂香 Baguixiang	WIW	5.41aA	5.61aA	3.37aA	3.54aA
DIW	4.55bB		4.73bB	2.90bB	3.05bB	63.83a	64.52a
SIW	3.99cB		4.20cB	2.44cC	2.57cC	61.07a	61.17a
桂华占 Guahuazhan	WIW	5.54aA	5.77aA	3.59aA	3.70aA	64.84a	64.13a
	DIW	4.82bAB	5.02bAB	3.10bB	3.20bB	64.35a	63.73a
	SIW	4.10cB	4.28cB	2.31cC	2.38cC	56.40b	55.75b

表 3 不同水分条件下花后物质运转与灌浆特征参数的相关系数

Table 3 Correlation coefficients of the filling parameters with dry matter transformation after anthesis under different water conditions

参数 Parameters		起始灌浆势 GR0		最大灌浆速率 GRmax		活跃灌浆期 D		持续灌浆时间 T99	
		叶片 Leaf blade	茎鞘 Culm & sheath						
		2007	运转速度 DMDR	0.495*	0.500*	0.534*	-0.667**	0.795**	-0.575*
	运转速率 Post-DMTE	0.180	0.420	0.608**	-0.693**	0.678**	-0.412	0.686**	-0.580*
2009	运转速度 DMDR	0.695**	0.650**	0.742**	-0.667**	0.495*	-0.775**	0.706**	-0.965**
	运转速率 Post-DMTE	0.780**	0.542*	0.621**	-0.693**	0.608**	-0.612**	0.696**	-0.880**

Note: DMDR, dry matter daily rate; Post-DMTE, dry matter translocation efficiency; GR0, Initial grain filling potential; GRmax, Maximum grain filling rate; D, Active filling period; T99, Active grain-filling duration. * and ** indicate significant difference at 5% and 1% probability level, respectively.

2.1.3 茎叶干物质运转与穗粒生长过程的同步性

图 1 结果表明,随着茎叶干重积累量的逐渐减少,伴随着穗粒干重逐渐增加是同步的。例如,在干湿交替灌溉条件下,八桂香的茎叶干重积累和籽粒的灌浆速率都是最大,淹水灌溉处理的最小。在籽粒快速增长期(花后 3~15 d),地上茎叶干物质快速输出,为籽粒灌浆充实提供营养物质,至花后 15 d 后籽粒干重积累进入缓慢期时,地上干物质输出也变缓慢。

2.1.4 花后叶、茎鞘可溶性糖积累量与籽粒直链淀

粉含量与积累量过程的同步性 图 2 结果表明,茎叶可溶性糖积累量的减少和籽粒直链淀粉含量和积累量增加是同步的。同时发现,茎叶可溶性糖积累量快速递减期(花后 3~12 d)与直链淀粉含量和积累量快速递增期(花后 6~12 d)基本同步。

2.1.5 花后叶、茎鞘碳同化物流转积累对籽粒灌浆及淀粉积累的贡献 由表 4 和表 5 看出,茎叶花后碳同化物转运对籽粒生长及淀粉积累的贡献率依次为非结构性碳水化合物>淀粉>可溶性糖>蔗糖,且茎鞘碳同化物转运对籽粒产量及淀粉积累的贡献

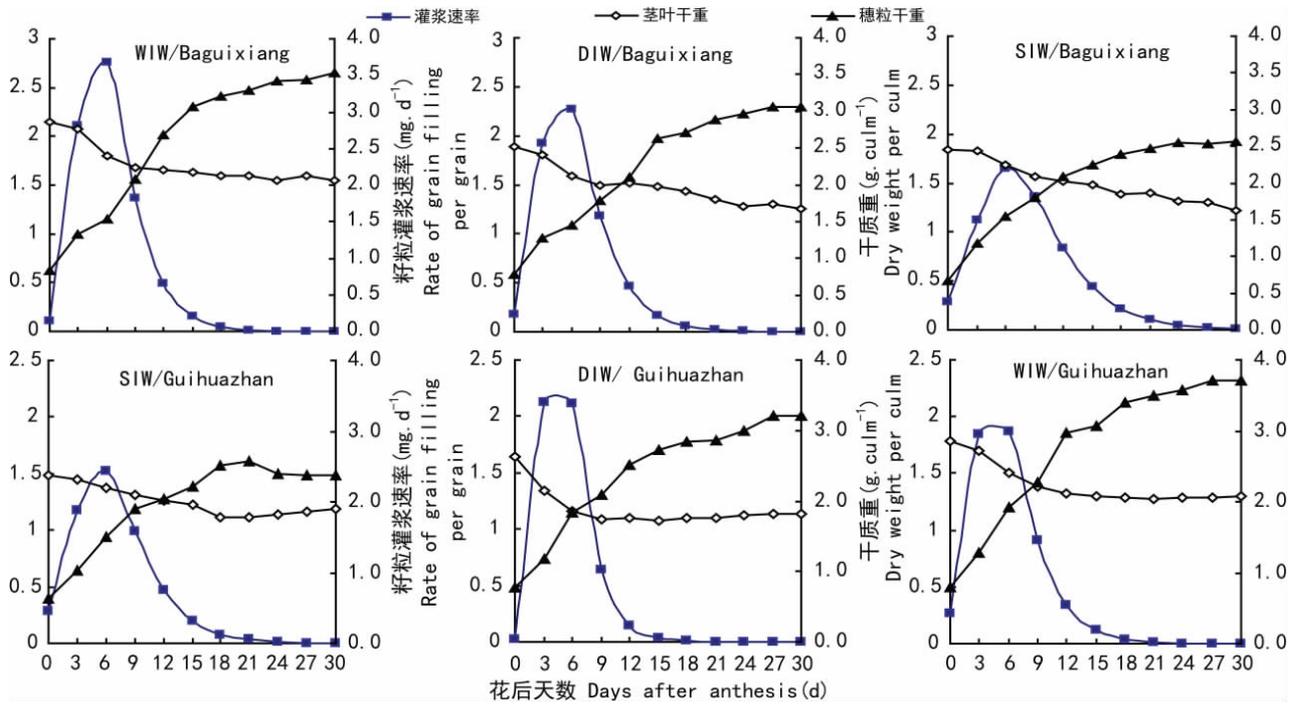


图 1 茎叶干质量与籽粒灌浆及穗粒干重增长的同步性

Fig. 1 Synchronization between dry matter accumulation and grain filling & growth for different rice cultivars

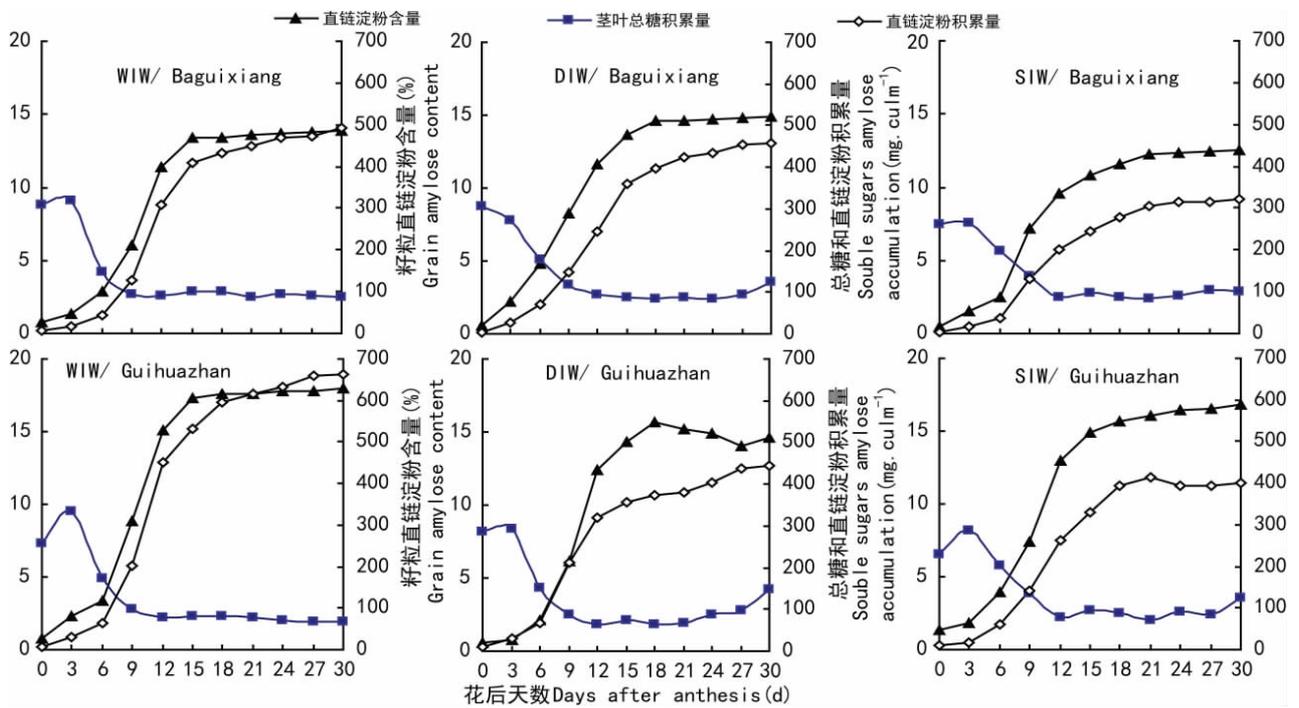


图 2 茎叶可溶性糖积累量与籽粒直链淀粉含量与积累量增长的同步性

Fig. 2 Synchronization between soluble sugars accumulation in culm, sheath, leaf blade and grain amylose content and accumulation of panicle for different rice cultivars

率远大于叶片。花后水分管理影响茎叶碳同化物转运对籽粒生长和淀粉积累的贡献率。其中,不同水分条件下,茎鞘碳同化物转运对籽粒的产量和淀粉

产量的贡献率表现为干湿交替灌溉>亏缺灌溉>淹水灌溉。但叶片碳同化物转运对籽粒的产量和淀粉产量的贡献率则表现为淹水灌溉>亏缺灌溉>干湿

交替灌溉。茎叶碳同化物转运对籽粒生长的贡献率以淹水灌溉处理的最高,对籽粒淀粉积累的贡献则以淹水灌溉处理的最高。

2.2 不同水分处理下优质稻花后植株氮流转与籽粒生长及品质的相关性

2.2.1 茎叶氮物质流转与籽粒蛋白质含量与积累增长的同步性

图 3 结果表明,茎叶氮素积累量的逐渐减少和籽粒氮素积累量的增加和籽粒蛋白质含量的逐渐增加是同步的,茎叶氮素的减少转移到穗部供应籽粒蛋白质的合成,使蛋白质含量逐步增加。

2.2.2 花后叶、茎鞘氮同化物转运对籽粒氮素收获指数的影响

从表 6 看出,地上总氮积累量及籽粒

氮的积累量都是干湿交替灌溉>亏缺灌溉>淹水灌溉,处理间差异显著。氮收获指数则表现为干湿交替灌溉>亏缺灌溉>淹水灌溉,但处理间差异不显著。

2.2.3 花后不同氮同化物流转对单株籽粒氮素及蛋白质产量的贡献率

从表 7 和表 8 看出,花后氮同化物转运对单株籽粒氮素及蛋白质产量的贡献率总氮大于蛋白氮。不同水分条件下,茎鞘和叶片氮同化物对籽粒氮素的贡献率为淹水灌溉>亏缺灌溉>干湿交替灌溉。叶片总氮转运对籽粒氮素积累的贡献率大于茎鞘,但茎鞘与叶片总氮转运对籽粒蛋白质产量的贡献率

表 4 花后叶、茎鞘碳同化物流转对单株籽粒产量的贡献率

Table 4 Contribution rate of max remobilization of carbon assimilation to grain yield

碳形态 C form	品种 Cultivars	水分处理 Water treatment	对单株籽粒产量的贡献率 Rate contribution to grain yield per plant (%)					
			茎鞘 Culm and sheath		叶片 Leaf blade		合计 Total	
			2007	2009	2007	2009	2007	2009
可溶性糖 Sugars	八桂香 Baguixiang	WIW	4.15	4.41	1.63	1.75	5.78	6.16
		DIW	3.65	4.89	1.76	2.27	5.41	7.16
		SIW	3.65	4.63	2.43	2.93	6.08	7.56
	桂华占 Guahuazhan	WIW	5.29	5.21	0.81	0.96	6.10	6.17
		DIW	5.25	5.39	0.90	1.23	6.15	6.62
		SIW	4.95	5.68	2.35	2.64	7.30	8.31
蔗糖 Sucrose	八桂香 Baguixiang	WIW	2.67	3.43	1.58	1.92	4.26	5.34
		DIW	3.99	3.69	1.49	1.88	5.48	5.57
		SIW	3.14	3.16	1.72	2.12	4.86	5.29
	桂华占 Guahuazhan	WIW	4.06	4.60	0.95	1.10	5.01	5.70
		DIW	4.14	4.17	0.94	1.01	5.09	5.19
		SIW	4.65	3.86	1.36	1.26	6.01	5.12
淀粉 Starch	八桂香 Baguixiang	WIW	7.80	7.52	3.81	3.33	11.61	10.85
		DIW	7.47	8.16	3.83	3.25	11.29	11.40
		SIW	7.03	6.83	3.01	3.31	10.04	10.13
	桂华占 Guahuazhan	WIW	7.58	8.86	2.25	2.31	9.83	11.18
		DIW	7.28	8.34	2.14	2.22	9.43	10.56
		SIW	8.86	8.86	3.79	3.73	12.65	12.59
非结构性 碳水化合物 NSC	八桂香 Baguixiang	WIW	11.46	11.00	2.31	1.83	13.77	12.83
		DIW	10.53	9.74	1.75	2.72	12.28	12.46
		SIW	9.12	8.16	3.10	3.70	12.22	11.86
	桂华占 Guahuazhan	WIW	13.18	10.78	1.54	2.23	14.72	13.02
		DIW	11.36	12.06	1.37	1.55	12.72	13.62
		SIW	13.65	12.03	1.94	2.47	15.60	14.50

差异较小,且均在 8% 以下。

2.3 不同水分条件下花后转运物质碳氮比对籽粒及淀粉及蛋白质积累的影响

从表 9 看出,优质稻花后转运同化物碳氮比表现为淹水灌溉>亏缺灌溉>干湿交替灌溉,其碳氮比与籽粒蛋白质产量、籽粒直链淀粉产量呈正相关。八桂香茎鞘花后转运同化物碳氮比以淹水灌溉处理

最高,干湿交替灌溉处理最低,桂华占茎鞘花后转运同化物碳氮比以干湿交替灌溉的最低。叶片中花后转运同化物碳氮比与籽粒蛋白质、直链淀粉含量和淀粉与蛋白质比值无相关性。但叶片中总氮转运率与籽粒蛋白质产量相关,这意味着优质稻的蛋白质和淀粉含量及积累量与茎鞘叶片中碳氮转运关系极为密切。

表 5 花后叶、茎鞘碳同化物流转对单株籽淀粉产量的贡献率

Table 5 Contribution rate of max remobilization of carbon assimilation to grain starch yield per plant

碳形态 C form	品种 Cultivars	水分处理 Water treatment	对单株籽粒淀粉的贡献率 Rate contribution to grain starch yield per plant (%)					
			茎鞘 Culm and sheath		叶片 Leaf blade		合计 Total	
			2007	2009	2007	2009	2007	2009
可溶性糖 Sugars	八桂香 Baguixiang	WIW	9.65	10.00	3.80	3.96	13.46	13.96
		DIW	9.50	11.84	4.58	5.50	14.08	17.34
		SIW	10.18	12.64	6.79	8.01	16.97	20.65
	桂华占 Guahuazhan	WIW	10.64	10.17	1.62	1.87	12.26	12.05
		DIW	12.32	11.77	2.10	2.68	14.42	14.45
		SIW	13.32	14.93	6.34	6.94	19.66	21.87
蔗糖 Sucrose	八桂香 Baguixiang	WIW	6.22	7.77	3.68	4.35	9.90	12.11
		DIW	10.39	8.93	3.89	4.55	14.27	13.48
		SIW	8.75	8.64	4.80	5.80	13.55	14.43
	桂华占 Guahuazhan	WIW	8.16	8.98	1.91	2.14	10.07	11.12
		DIW	9.71	9.11	2.21	2.21	11.92	11.33
		SIW	12.51	10.15	3.67	3.33	16.18	13.47
淀粉 Starch	八桂香 Baguixiang	WIW	18.14	17.03	8.87	7.56	27.02	24.59
		DIW	19.45	19.74	9.96	7.86	29.42	27.59
		SIW	19.61	18.64	8.39	9.02	28.01	27.66
	桂华占 Guahuazhan	WIW	15.23	17.29	4.52	4.52	19.75	21.81
		DIW	17.07	18.22	5.03	4.85	22.10	23.07
		SIW	23.85	23.32	10.20	9.82	34.05	33.14
非结构性碳水 化合物 NSC	八桂香 Baguixiang	WIW	26.66	24.94	5.38	4.14	32.04	29.08
		DIW	27.43	23.59	4.56	6.58	31.99	30.17
		SIW	25.44	22.28	8.64	10.10	34.08	32.38
	桂华占 Guahuazhan	WIW	26.49	21.05	3.09	4.36	29.58	25.41
		DIW	26.63	26.35	3.21	3.40	29.83	29.75
		SIW	36.75	31.67	5.23	6.50	41.98	38.16

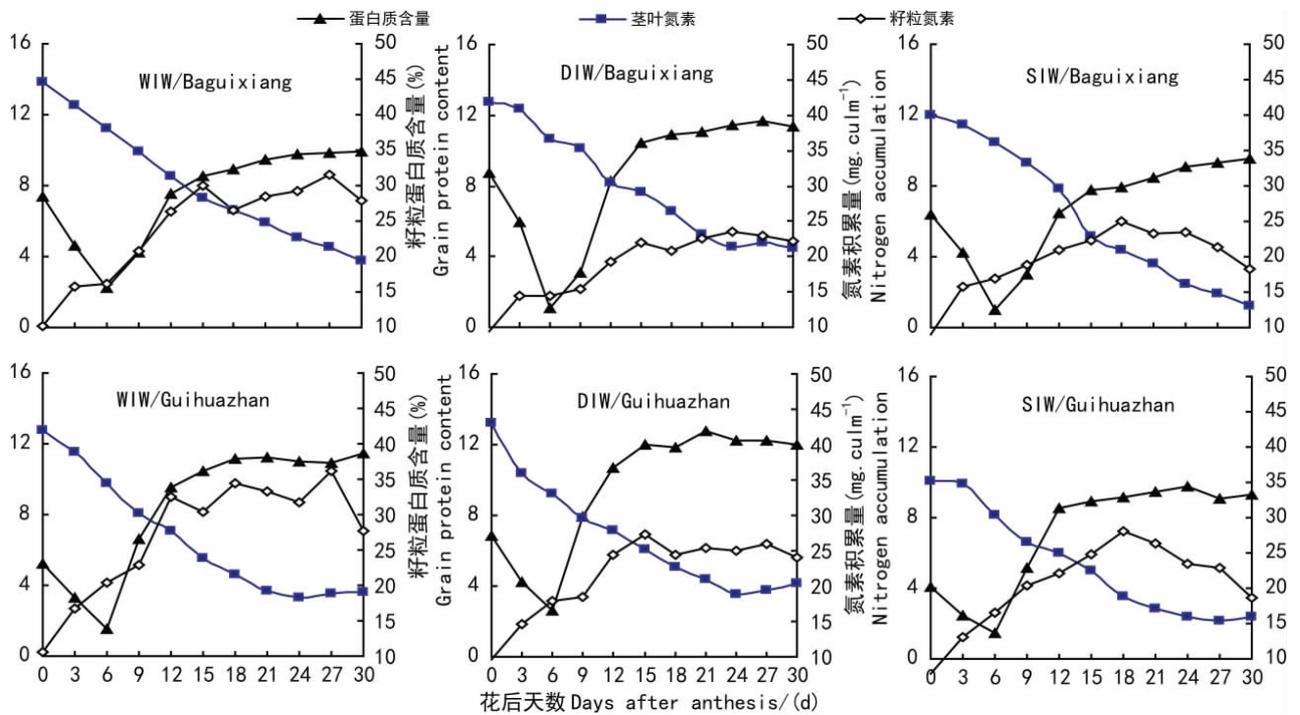


图 3 茎叶氮素积累量与籽粒蛋白质含量与积累量增长的同步性

Fig. 3 Synchronization between nitrogen remobilization from culm, sheath, leaf blade and grain protein content and accumulation of panicle under different water conditions

表 6 水分调控对优质稻籽粒氮收获指数的影响
Table 6 Effects of water treatment on N harvest index of quality of rice

品种 Cultivars	水分处理 Water treatment	地上总氮 Shoot N (mg)		籽粒氮 Grain N (mg)		氮收获指数 NHI (%)	
		2007	2009	2007	2009	2007	2009
八桂香 Baguixiang	WIW	54.79aA	47.37aA	38.46aA	27.88aA	70.20a	58.85aA
	DIW	44.15bB	43.29aA	29.46bB	22.12bB	66.73a	51.09aA
	SIW	37.30cB	31.35bB	27.45bB	18.21cC	73.59a	58.10bA
桂华占 Guahuazhan	WIW	61.54aA	46.73aA	46.26aA	27.62aA	75.18a	59.11a
	DIW	53.78bA	44.35aA	38.35bB	24.03bB	71.30a	54.18a
	SIW	39.53cB	34.56bB	26.93cC	18.63cC	68.13a	53.91a

Note: NHI, nitrogen harvest index

表 7 花后叶、茎鞘氮同化物同化物最大流转积累量对籽粒氮素贡献率
Table 7 Contribution rate of max remobilization of nitrogen assimilation to grain nitrogen yield per plant after anthesis

氮形态 Nitrogen form	品种 Cultivars	水分处理 Water treatment	对单株籽粒氮素的贡献率 Rate contribution to grain nitrogen per plant (%)					
			茎鞘 Culm and sheath		叶片 Leaf blade		合计 Total	
			2007	2009	2007	2009	2007	2009
总氮 Total nitrogen	八桂香 Baguixiang	WIW	25.46	21.54	32.74	50.60	58.21	72.14
		DIW	37.79	29.75	30.81	45.33	68.61	75.08
		SIW	26.89	41.85	44.10	75.81	71.00	117.66
	桂华占 Guahuazhan	WIW	18.26	24.49	26.29	41.34	44.55	65.83
		DIW	26.55	34.74	20.26	41.26	46.81	76.00
		SIW	25.95	34.36	38.73	48.15	64.68	82.52
蛋白氮 Protein nitrogen	八桂香 Baguixiang	WIW	11.29	11.10	30.78	35.96	42.08	47.06
		DIW	15.48	15.71	26.55	37.08	42.03	52.80
		SIW	11.44	15.08	37.85	60.99	49.28	76.08
	桂华占 Guahuazhan	WIW	13.34	17.72	24.96	33.65	38.30	51.36
		DIW	17.89	20.85	16.87	34.05	34.76	54.90
		SIW	17.93	25.52	37.72	40.02	55.65	65.54

3 结论与讨论

水分是水稻生长发育、产量与品质形成的重要影响因子之一,土壤水分过多或过少不仅影响水稻籽粒产量的提高,而且还影响水稻品质的改善(陈晓远等,1998;崔运来等,2001)。本试验条件下,土壤水分含量与水稻产量和品质性状关系密切相关,在水分管理调控下,干物质转运效率 56.40%~64.84%,氮素转运效率 51.09%~75.18%,茎鞘和叶片干物质对籽粒的贡献率在 16.86%~25.68%,茎鞘和叶片氮素对籽粒氮素贡献率 44.05%~117.66%。

碳氮同化物的供应量与籽粒库中淀粉、蛋白质合成能力影响水稻籽粒物质充实(陈新红等,2003;钟连进等,2003;Hu 等,2011)。本研究结果表明,亏缺灌溉和淹水灌溉增加了茎鞘、叶片干物质运转对籽粒生长的贡献率,促进籽粒合成淀粉和蛋白质。这可能是花后亏缺灌溉和淹水灌溉抑制了水稻生长,叶片光合

功能受损,光合功能下降。同时,长时间的淹水灌溉使根系生长和活力也受到抑制,加快了叶片衰老,在籽粒生长合成需要营养物质的敏感期,只能从茎鞘积累部分来拟补由于光合不足造成的差异。

3 种水分条件下优质稻籽粒的灌浆特性存在差异,淹水灌溉严重降低籽粒的最大灌浆速率和米粒最终重量。地上干物质质量和籽粒干物质质量积累表现为干湿灌溉 > 亏缺灌溉 > 淹水灌溉,水分胁迫条件下不仅降低地上干物质和籽粒干物质质量的增加,还降低总氮积累量及籽粒氮的积累,不利于蛋白质和直链淀粉的提高,其中淹水胁迫影响超过亏缺影响。主要是因为土壤水分胁迫影响到叶片光合作用,抑制了水稻生长,造成地上干物质积累减少。水稻花后是水稻籽粒生长的敏感期,水稻对水分适度亏缺具有较强的自我调节能力,虽然水分胁迫下水稻的生理生化受到一定的影响,但在本试验条件下,单株籽粒的产量和品质并没有受到很大影响,说明在干旱环境下进行节水栽培具有积极而重要的意义。

表 8 花后叶、茎鞘氮同化物同化物最大流转积累量对籽粒蛋白质贡献率

Table 8 Rate contribution of max remobilization of nitrogen assimilation to grain protein yield per plant after anthesis

氮形态 Nitrogen form	品种 Cultivars	水分处理 Water treatment	对单株籽粒蛋白质的贡献率 Rate contribution to grain protein per plant (%)					
			茎鞘 Culm and sheath		叶片 Leaf blade		合计 Total	
			2007	2009	2007	2009	2007	2009
总氮 Total nitrogen	八桂香 Baguixiang	WIW	2.80	1.71	3.60	4.02	6.39	5.73
		DIW	3.22	1.90	2.62	2.89	5.84	4.78
		SIW	3.02	3.11	4.95	5.63	7.97	8.74
	桂华占 Guahuazhan	WIW	1.96	1.60	2.82	2.70	4.78	4.30
		DIW	2.60	2.17	1.99	2.58	4.59	4.75
		SIW	3.10	2.89	4.62	4.05	7.72	6.94
蛋白氮 Protein nitrogen	八桂香 Baguixiang	WIW	1.24	0.88	3.38	2.86	4.62	3.74
		DIW	1.32	1.00	2.26	2.36	3.58	3.36
		SIW	1.28	1.12	4.25	4.53	5.53	5.65
	桂华占 Guahuazhan	WIW	1.43	1.16	2.68	2.20	4.11	3.35
		DIW	1.75	1.30	1.65	2.13	3.41	3.43
		SIW	2.14	2.15	4.50	3.36	6.64	5.51

表 9 花后叶、茎鞘氮同化物转运对籽粒淀粉及蛋白质积累的影响

Table 9 Effect of the C/N assimilation after anthesis on grain starch and protein accumulation

年份 Year	品种 Cultivars	水分处理 Water treatment	C/N		直链淀粉 Amlose		蛋白质 Protein		AY/PY
			茎鞘 CS	叶片 LB	含量(%) Content	产量(mg) Yield	含量(%) Content	产量(mg) Yield	
2007	八桂香 Baguixiang	WIW	5.43	2.28	12.20	410.63	10.41	350.30	1.17
		DIW	10.86	5.48	13.90	403.33	11.93	346.28	1.16
		SIW	15.14	4.99	10.82	263.84	10.03	244.63	1.08
	桂华占 Guahuazhan	WIW	4.41	2.58	15.32	550.24	12.00	431.07	1.28
		DIW	11.20	3.00	16.80	521.46	12.61	391.34	1.33
		SIW	11.32	5.40	12.66	292.85	9.76	225.68	1.30
2009	八桂香 Baguixiang	WIW	6.19	2.78	13.88	491.66	9.91	351.18	1.40
		DIW	5.91	5.89	14.94	456.47	11.37	347.15	1.31
		SIW	10.91	4.52	12.52	321.25	9.55	245.24	1.31
	桂华占 Guahuazhan	WIW	4.08	2.88	17.94	664.26	11.43	423.24	1.57
		DIW	9.31	3.91	13.94	445.81	12.01	384.23	1.16
		SIW	8.85	6.62	16.86	402.01	9.29	221.58	1.81

注: SY 籽粒淀粉产量(mg/茎); PY 籽粒蛋白质产量(mg/茎); CS, 茎鞘, LB, 叶片。

Note: C/N, ratio of soluble sugar and total nitrogen; AY, grain amylose yield; PY, grain protein yield; CS, culm and sheath; LB, leaf blade.

综上所述,不同水管理下,优质稻花后植株茎叶碳氮物质流转与籽粒充实、淀粉、蛋白质积累增长存在密切的相关性与同步性,说明不同的水管理影响茎叶碳氮物质流转与籽粒生长,干湿灌溉有利于物质转运,适度水分亏缺对产量和品质影响不大,这为水稻精确灌溉提供一定的理论依据。

参考文献:

- 李合生. 2000. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京:高等教育出版社:194—202
- 吉田昌一. 1983. 稻作科学原理[M]. 厉葆初译. 杭州:浙江科学技术出版社:59—75
- 高俊凤. 2006. 植物生理学实验指导[M]. 北京:高等教育出版社:114—148
- 隋家明, 李晓, 官永波, 等. 2006. 农业综合节水技术[M]. 郑

- 州:黄河水利出版社,1:327—341
- 邹琦. 2004. 植物生理学实验指导[M]. 北京:中国农业出版社:110—115
- Bouman BAM, Peng S, Castaneda AR, et al. 2005. Yield and water use of irrigated tropical aerobic rice systems[J]. *Agric Water Manag*, **74**:87—105
- Chen WD(程旺大), Zhao GP(赵国平), Wang QJ(王岳均), et al. 2000. Rice cultivation for water saving and high efficiency in Zhejiang Province(浙江省发展水稻节水高效栽培技术的探讨)[J]. *Res Agric Mod*(农业现代化研究), **21**(3):197—200
- Chen XH(陈新红), Xu GH(徐国伟), Sun HS(孙华山), et al. 2003. Effects of soil moisture and nitrogen nutrition during grain filling of the grain yield and quality of rice(结实期土壤水分与氮素营养对水稻产量与米质的影响)[J]. *J Yanzhou Univ: Agric & Life Sci Edit*(扬州大学学报·农业与生命科学版), **24**(3):37—41
- (下转第 570 页 Continue on page 570)

参考文献:

- 邓汝铭,黄瑞松,苏青,等. 1999. 少花龙葵的生药研究[J]. 广西中医药,5(22):44-47
- Duan ZF(段志芳),Huang LH(黄丽华). 2008. Research on the chemical components and their inhibition on nitrosation of the extracts from *Solanum photeinocarpum* Nakamura et Odashima(少花龙葵化学成分预试及抑制亚硝化反应研究)[J]. *Lishizhen Med & Mat Med Res* (时珍国医国药),19(8):1992-1994
- Huang XX(黄兴贤),Zou R(邹蓉),Hu XH(胡兴华), et al. 2011. Comparison of total flavonoids content in 14 species of *Camellia* sect. *Chrysantha*(十四种金花茶组植物叶总黄酮含量比较)[J]. *Guihaia*(广西植物),31(2):281-284
- Huang SY(黄锁义),Li HN(黎海妮),Yu ML(余美料), et al. 2005. Extraction and distinguishing of the total flavone from *Leonurus*(益母草总黄酮的提取及鉴别)[J]. *Lishizhen Med & Mat Med Res* (时珍国医国药),16(5):398-399
- Jiang GF(姜国芳),Xie ZB(谢宗波),Le CG(乐长高). 2004. Advanced research on flavonoids in *Ginkgo biloba* leaves(银杏叶黄酮类化合物的研究进展)[J]. *Lishizhen Med & Mat Med Res* (时珍国医国药),15(5):306-308
- Li SH(李胜华),Wu XJ(伍贤进),Yu JP(郁建平), et al. 2008. Study on extraction technics and content variety trends of total flavonoids in *Lithocarpus polystachyus* Rehd(多穗柯总黄酮提取工艺及其含量动态变化研究)[J]. *Food Sci*(食品科学),29(6):139-141
- Lin DY(林丹英),You TT(尤婷婷),Huang SY(黄锁义). 2007. Extracting of total flavanone from *Chrysanthemi coronarii* Herba and its effects on scavenging of hydroxyl radicals(茼蒿总黄酮提取及对羟自由基清除作用)[J]. *Chin Wild Plant Res*(中国野生资源),26(5):57-59
- Wang ZJ(王自军),Deng H(邓红). 2004. Extraction and determination of total flavonoids in herbal *Lophatheri*(淡竹叶中总黄酮的提取与含量测定)[J]. *Gansu J Trad Chin Med*(甘肃中医),17(7):35-36
- Wang M(王敏),Gao JM(高锦明),Wang J(王军), et al. 2006. Extracting technology of total flavones in powder of *Fagopyrum tataricum* stem and leaf by enzymatic treatment(苦荞茎叶粉中总黄酮酶法提取工艺研究)[J]. *Chin Herbal Med*(中草药),37(11):1645-1648
- Wu DQ(吴冬青),An HG(安红钢),Qi Y(齐亚), et al. 2008. Study on extract method of flavonoids from flowers of nine medicinal plants and their ability on scavenging hydroxyl radicals(九种药用植物花黄酮类物质提取及对羟自由基清除能力的研究)[J]. *Nat Prod Res Dev*(天然产物研究与开发),20:514-517
- (上接第 515 页 Continue from page 515)
- Chen XY(陈晓远),Gao ZH(高志红),Liu ZH(刘振华). 2009. Effects of nitrogen forms and water stress on growth and nitrogen accumulation and distribution of rice plants(供氮形态和水分胁迫对水稻生长及氮素积累和分配的影响)[J]. *Acta Agric Boreal Sin*(华北农学报),24(6):116-122
- Chen XY(陈晓远),Luo YP(罗远培),Shi YC(石元春). 1998. The response of crops to water stress(作物对水分胁迫的反应)[J]. *Ecol Agric Res*(生态农业研究),6(4):12-15
- Cui YL(崔运来),Li YH(李远华),Yu F(余峰). 2001. High efficiency water and nitrogen management in paddy rice(水稻高效利用水肥试验研究)[J]. *Irrig & Drain*(灌溉排水),20(1):20-24
- Gu SL(顾世梁),Zhu QS(朱庆森),Yang JC(杨建昌), et al. 2001. Analysis on grain filling characteristics for different rice types(不同水稻材料籽粒灌浆特性的分析)[J]. *Acta Agron Sin*(作物学报),27(1):7-14
- Hu JM, Jiang LG, Xu SH, et al. 2011. Post-anthesis translocation, accumulation and remobilization of dry matter and grain growth characteristics in high quality indica rice[J]. *J Southern Agric*,42(1):16-21
- Liang YC(梁永超),Hu F(胡锋),Yang MC(杨茂成). 1999. Mechanisms of high yield and irrigation water use efficiency of rice in plastic film mulched dryland(水稻覆膜旱作高产节水机理研究)[J]. *Sci Agric Sin*(中国农业科学),32(1):26-32
- Liu XJ(刘小军),Cao J(曹静),Li YD(李艳大), et al. 2010. A knowledge model for precision water management in rice(水稻水分精确管理的知识模型研究)[J]. *Sci Agric Sin*(中国农业科学),43(8):1571-1576
- Qin HD(秦华东),Xiao QZ(肖巧珍),Liang TH(梁天锋), et al. 2011. Effect of different moisture management modes on root growth characteristics of cast transplanting rice in seedling standing period under no-tillage(不同水分管理模式下免耕抛秧水稻立苗期根系生长特性)[J]. *Guihaia*(广西植物),31(5):636-640
- Sheng HJ(盛海君),Shen QR(沈其荣),Zhou CL(周春霖). 2003. Yield and quality of rice cultivated in upland soil(旱作水稻产量和品质的研究)[J]. *J Nanjing Agric Univ*(南京农业大学学报),26(4):13-16
- Tadashi T, Takeshi H, Masao O. 1996. Filling percentage of rice spikelets as affected by availability of non-structural carbohydrates at the initial phase of grain filling[J]. *Jpn J Crop Sci*,65(3):445-452
- Tardieu F, Davies WJ. 1993. Integration of hydraulic and chemical signalling in the control of stomatal conductance and water status of droughted plants[J]. *Plant Cell & Environ*,16:341-349
- Yang JC(杨建昌),Wang W(王维),Wang ZQ(王志琴), et al. 2000. The characteristics of water requirement and water-saving irrigation indices of dry-raised rice seedlings in paddy field(水稻旱秧大田期需水特性与节水灌溉指标研究)[J]. *Sci Agric Sin*(中国农业科学),33(2):34-42
- Zhang RP(张荣萍),Ma J(马均),Wang HZ(王贺正), et al. 2008. Effects of different irrigation regimes on some physiology characteristics and grain yield in paddy rice during grain filling(不同灌水方式对水稻结实期一些生理性状和产量的影响)[J]. *Acta Agron Sin*(作物学报),34(3):486-4
- Zhong LJ(钟连进),Cheng FM(程方民). 2003. Varietal differences in amylose accumulation and activities of major enzymes associated with starch synthesis during grain filling in rice(水稻籽粒灌浆过程直链淀粉的积累及其相关酶的品种类型间差异)[J]. *Acta Agron Sin*(作物学报),29(3):452-456
- Zhu QS(朱庆森),Cao XZ(曹显祖),Luo YQ(骆亦其). 1988. Growth analysis in the process of grain filling in rice(水稻籽粒灌浆的生长分析)[J]. *Acta Agron Sin*(作物学报),14(3):182-192