

水氮互作对水稻籽粒充实及产量的影响

李俊周¹ 李磊¹ 孙传范² 赵全志^{1*} 杜彦修¹ 张静¹ 彭廷¹

(1. 河南农业大学 粮食作物生理生态与遗传改良国家重点实验室培育基地, 郑州 450002;
2. 中国农村技术开发中心, 北京 100045)

摘要 以大穗型粳稻品种豫粳6号为材料,在孕穗和结实期采用不同的灌溉处理和穗肥施用方式,研究水氮互作对籽粒灌浆速率、籽粒充实度及产量构成因素的影响。结果表明:水分和穗肥一定的条件下,随着穗肥施入时期的推迟及后期施肥量的增大,稻穗的千粒重和籽粒充实度出现逐渐变大的趋势。倒2叶期施肥在一定程度上增强了籽粒灌浆后期的灌浆速率,缩短了强势粒的灌浆时间。干湿交替的灌溉方式可以改善弱势粒灌浆的滞后性,显著提高弱势粒的灌浆速率。干湿交替和倒2叶期施肥的水氮组合显著提高了弱势粒二次枝梗的平均灌浆速率及最大灌浆速率,从而提高了水稻的千粒重、籽粒充实度及产量,为最佳的水氮运筹方式。

关键词 水稻; 灌溉方式; 穗肥施用; 产量; 灌浆速率

中图分类号 S 511 文章编号 1007-4333(2011)03-0042-06 文献标志码 A

Effects of water-nitrogen interaction on rice grain plumpness and yield

LI Jun-zhou¹, LI Lei¹, SUN Chuan-fan², ZHAO Quan-zhi^{1*}, DU Yan-xiu¹, ZHANG Jing¹, PENG Ting¹

(1. The Incubation Base of National Key Laboratory for Physiological Ecology and Genetic Improvement of Food Crops, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450002, China;
2. China Rural Technology Development Center, Beijing 100045, China)

Abstract A field experiment was conducted to investigate the effects of irrigation methods (irrigation at the 4th leaf-age from top, irrigation at the 2nd leaf-age from top, and wetting-drying alternation irrigation) and application of panicle fertilization (application at the 4th leaf-age from top, two equal application at the 4th and the 2nd leaf-age from top, and application at the 2nd leaf-age from top) and its combinations on rice grain filling, plumpness and yield related traits at booting and grain-filling stages using Japonica rice variety Yujing 6 (large spike). The results showed that 1000-grain weight and grain plumpness increased gradually with delaying fertilizer application and increasing panicle fertilization under the certain amount of water and nitrogen. Application of panicle fertilization at the 2nd leaf-age from top increased the grain filling rate at late grain filling stage and shortened the time of superior grain filling. Wetting-drying alternation irrigation greatly increased the filling rate and improved the hysteric nature of the grain filling of inferior grains. Wetting-drying alternation irrigation with the application of panicle fertilization at the 2nd leaf-age from top was the ideal management regime, which increased thousand kernel weight, grain plumpness and yield by greatly improving the mean grain filling rate and maximum grain filling rate of the secondary branch grain of inferior grains.

Key words rice; irrigation methods; application of panicle fertilization; yield; grain filling rate

总库容量是水稻高产群体重要的质量指标,籽粒充实度的高低是库容质量的重要体现。水稻总库容量主要取决于单位面积的穗数和穗粒数,库容质

量的高低主要取决于籽粒库容活性的高低及源、库、流的有机协调。生产实践中,常通过氮素穗肥施用促进穗分化,通过水分控制减少无效分蘖、促进籽粒

收稿日期: 2010-10-13

基金项目: 河南省科技创新人才支持计划项目(094200510003); 教育部新世纪优秀人才支持计划项目(NCET-08-0663); 河南省高校科技创新团队支持计划项目(2010IRTSTHN005)

第一作者: 李俊周, 讲师, 博士, 主要从事水、旱稻遗传育种研究, E-mail: lijunzhou199899@126.com

通讯作者: 赵全志, 教授, 博士, 主要从事水稻生态研究, E-mail: qzhaoh@126.com

灌浆充实。大量水肥对产量影响的研究主要局限在水分控制(搁田时期、搁田程度)、氮肥施用(前后期氮肥比例、氮肥数量)等单项处理方式及某个生育阶段^[1-4],而研究水稻穗分化时期水分与氮肥互作对水稻分蘖成穗、库容数量和质量影响的较少。强、弱势粒灌浆差异及源、库、流等方面的研究发现,灌浆速率和充实度对库容质量的影响较大^[5-9],但水氮互作对强、弱势粒的籽粒灌浆和充实度的影响未见报道。本研究拟在水稻孕穗期和结实期采用水分和氮素互作的处理方法,研究灌溉方式和氮肥施用时期及比例对水稻总库容、籽粒灌浆速率及充实度的影响,以期找到最优的水氮运筹方式,在增强稻田水氮利用效率的基础上提高稻米产量与品质。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验于2009年在河南农业大学科教园区水稻试验田进行。供试材料为粳稻品种豫粳6号。于05-05育秧,06-09移栽。总施氮量为225 kg/hm²,*m*(基肥):*m*(穗粒肥)=6:4,*m*(N):*m*(P₂O₅):*m*(K₂O)=2:1:3;栽插密度30 cm×13 cm。在11叶龄期(茎蘖数达最终适宜穗数的80%)开始搁田,进行水分和氮肥互作处理。试验采用裂区设计,主区为不同灌溉方式,副区为不同氮肥比例。主处理为3个水分处理:倒4叶期复水后保持水层至成熟(W1)、倒2叶期复水后保持水层至成熟(W2)、干湿交替灌溉(W3)(水势保持-8~0 kPa)。副处理为3个不同的氮肥处理:倒4叶期1次施肥(N1)、倒4叶期与倒2叶期2次等量施肥(N2)、倒2叶期1次施肥(N3)。其他时期按照常规水稻田管理。稻田土壤湿度用真空负压计(中国科学院南京土壤研究所生产)进行监控。

1.2 试验方法

抽穗期各处理选择同一天抽穗开花、生长整齐

的植株挂牌标记,齐穗时选择大小一致的同质穗,分别于花后9、16、23、30和37 d分5次取样。水稻穗分强势粒(上三枝一次枝梗和二次枝梗)和弱势粒(下三枝一次枝梗和二次枝梗),于105℃烘箱杀青30 min,于80℃烘干,称量。

1.3 测定内容及方法

1)充实度的测定。按照朱庆森的计算方法^[8]:谷粒充实度/%=(受精籽粒的平均籽粒质量/密度大于1的饱满籽粒的平均籽粒质量)×100。

2)灌浆速率的测定。花后不同的时期进行取样,分强势粒一次枝梗、强势粒二次枝梗、弱势粒一次枝梗、弱势粒二次枝梗,分别称量。灌浆速率*W*计算参照Richards方程进行拟合:

$$W = A(1 + B \exp(-kt))^{-\frac{1}{N}}$$

式中:*A*为最终籽粒质量;*t*为开花后的时间;*B*、*k*和*N*为方程参数。最大灌浆速率

$$F = \frac{AkB \exp(-kt)}{N(1 + B \exp(-kt))^{(N+1)/N}}$$

籽粒质量*A*为5%~95%时定义为活跃灌浆期;平均灌浆速率=籽粒增加的质量/灌浆时间^[10-11]。

3)考种。各小区取代表性水稻10株,室内自然风干。调查穗数、穗粒数、千粒重等性状,产量为1 m²小区实收质量。

1.4 数据分析

采用SPSS 13.0统计软件进行方差分析,LSD法进行显著性测验。

2 结果与分析

2.1 水氮处理对水稻产量及其构成因素的影响

水分处理对穗数、穗粒数、千粒重、充实度和产量影响显著,氮肥处理对千粒重和产量影响显著(表1)。穗数:W1>W2>W3,W1与W2的穗数未达到显著差异,与W3的穗数达到了显著差异;W2与W3

表1 不同水分和氮肥处理对水稻产量及构成因素的影响

Table 1 Effects of different water and nitrogen treatments on yield and its related traits

处理	穗数	穗粒数	千粒重/g	充实度/%	产量/(kg/hm ²)
W1	12.33 a	129.44 b	22.48 c	82.10 c	8 080.95 b
W2	11.11 a	149.82 a	23.80 b	86.93 b	7 664.55 c
W3	10.89 b	151.33 a	25.01 a	91.18 a	8 737.05 a
N1	11.22 a	148.10 a	22.79 c	86.09 a	7 651.20 c
N2	11.22 a	144.71 a	23.84 b	86.93 a	8 772.90 a
N3	11.89 a	137.78 a	24.66 a	87.19 a	8 058.60 b

注:W1,倒4叶期复水后保持水层至成熟;W2,倒2叶期复水后保持水层至成熟;W3,干湿交替灌溉(水势保持-8~0 kPa)。N1,倒4叶期1次施肥;N2,倒4叶期与倒2叶期2次等量施肥;N3,倒2叶期1次施肥。下同。小写字母表示5%水平差异显著。

的穗数也达到了显著差异。由此说明,穗分化时期,水分可以调节分蘖穗的形成。穗粒数: $W3 > W2 > W1$, $W3$ 与 $W2$ 的穗粒数未达到显著差异, $W3$ 、 $W2$ 与 $W1$ 的穗粒数都达到了显著差异。千粒重和充实度: $W3 > W2 > W1$ 。由此说明,搁田后不同灌溉方式对水稻库容数量和质量产生了显著影响,而穗肥在总量不变的情况下,不同穗肥比例及施用时间对水稻库容数量的影响不显著。

2.2 水氮互作对水稻千粒重、产量和充实度的影响

水氮互作对产量影响较大(图 1(a))。 $W1 \times N2$ 的产量比 $W1 \times N1$ 提高了 9.28%, 比 $W1 \times N3$ 提高了 19.51%; $W2 \times N2$ 的产量比 $W2 \times N1$ 提高了 18.46%, 比 $W2 \times N3$ 提高了 16.11%。但 $W3 \times N3$

的产量比 $W3 \times N2$ 提高了 9.52%, 比 $W3 \times N1$ 提高了 9.61%。 $W3 \times N3$ 为最佳组合, 即幼穗分化期进行干湿交替($W3$)和倒 2 叶施肥($N3$)的产量最高。

水分与穗肥处理间的千粒重及籽粒充实度显著差异, 不同穗肥施用期和比例对籽粒的千粒重及充实度的影响不同(图 1(b)和(c))。 $W1$ 、 $W2$ 和 $W3$ 处理条件下, $N1$ 的千粒重(21.4、22.8 和 24.1 g)及充实度(80.3%、85.6%和 89.3%)均最小; $N3$ 的千粒重(23.6、24.8 和 25.6 g)及充实度(82.3%、86.7%和 91.6%)最高; $N2$ 介于两者之间。水分和穗肥一定的情况下, 随着穗肥施入时期的推迟及比例的增大, 稻穗的千粒重及籽粒充实度呈现逐渐变大的趋势。

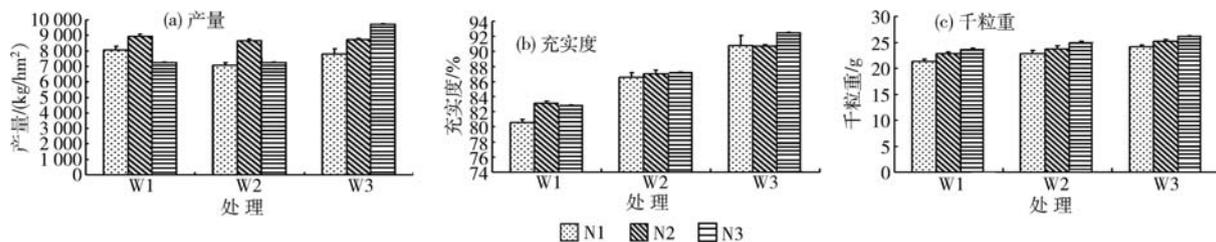


图 1 不同水分和氮肥处理对水稻产量、充实度和千粒重的影响

Fig. 1 Effects of different water and nitrogen treatments on yield, grain plumpness and 1000-grain weight

不同水分处理对籽粒的千粒重及充实度的影响不同。相同氮肥处理条件下, 千粒重和籽粒充实度为: $W3 > W2 > W1$ 。水稻幼穗分化期搁田后提早复水不如推迟复水, 最佳灌溉方式为干湿交替。水氮互作分析显示, $W3 \times N3$ 互作效应对千粒重和充实度影响最大, 这种水肥方式极显著提高水稻的千粒重和充实度。

2.3 水氮互作对水稻不同部位籽粒灌浆和充实度的影响

2.3.1 水氮互作对水稻强弱势粒籽粒灌浆的影响

不同水氮处理强势粒一次枝梗、强势粒二次枝梗、弱势粒一次枝梗的平均灌浆速率差别不大, 弱势粒二次枝梗的平均灌浆速率相比较小。水分处理对弱势粒二次枝梗的平均灌浆速率影响比较大, 表现为: $W1 < W2 < W3$; 对强势粒一次枝梗、强势粒二次枝梗、弱势粒一次枝梗影响相对较小。氮肥处理对弱势粒二次枝梗的平均灌浆速率影响也比较大, 表现为: $W2 < W1 < W3$ 。因此, 水氮处理对水稻籽粒的影响主要表现在弱势粒二次枝梗, 对强势粒和弱

势粒一次枝梗的影响相对较小(图 2(a))。

$W1$ 条件下, 3 个氮肥处理强弱势籽粒的平均灌浆速率为: $N1 > N3 > N2$; $W2$ 条件下, 3 个氮肥处理不同部位籽粒的平均灌浆速率之间基本没有变化; $W3$ 条件下, 4 个部位籽粒的平均灌浆速率为: $N1 < N2 < N3$ 。对于相同的穗肥施用, $N1$ 条件下, 不同水分处理基本没有变化; $N2$ 条件下, $W2$ 和 $W3$ 高于 $W1$ 的平均灌浆速率; $N3$ 条件下, 平均灌浆速率为 $W1 < W2 < W3$ 。 $W3 \times N3$ 相对于其他处理提高了结实期的平均灌浆速率, 尤其能够大幅度提高弱势粒的灌浆速率。

水氮互作对不同部位籽粒的最大灌浆速率影响较大(图 2(b))。所有处理不同部位籽粒的最大灌浆速率均为: 强势粒一次枝梗 $>$ 强势粒二次枝梗 $>$ 弱势粒一次枝梗 $>$ 弱势粒二次枝梗 ($W1 \times N3$ 和 $W3 \times N2$ 除外)。不同的水分处理条件下, 所有枝梗最大灌浆速率都是: $W3 > W2 > W1$ 。不同的氮肥处理条件下, 强势粒一次、二次枝梗的最大灌浆速率大小为: $N1 > N3 > N2$; 弱势粒一次枝梗的最大灌浆速

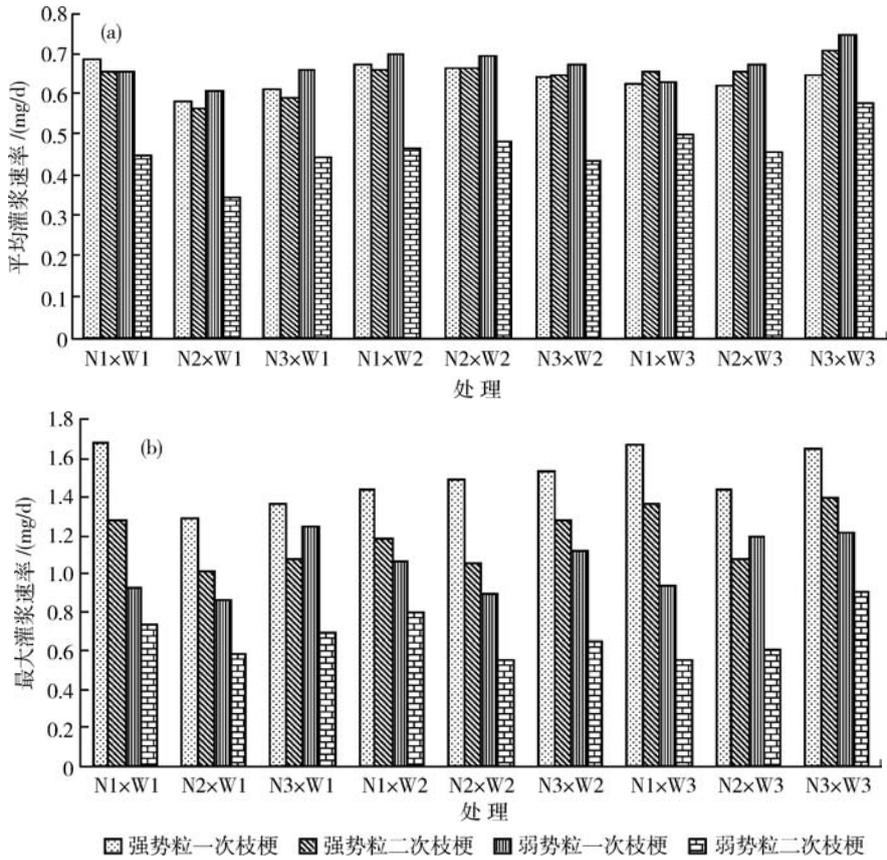


图 2 水分和氮肥处理对不同部位籽粒平均灌浆速率(a)和最大灌浆速率(b)的影响
 Fig. 2 Effects of different water and nitrogen treatments on the average grain filling rate and the mixture grain filling rate of different position

率大小为： $N3 > N2 > N1$ ；弱势粒二次枝梗的最大灌浆速率大小为： $N3 > N1 > N2$ 。 $W3 \times N3$ 处理强弱势粒一次、二次枝梗的最大灌浆速率都表现最大。

2.3.2 水氮互作对水稻强弱势粒充实度的影响

图 3 示出不同水氮处理各时期籽粒的充实度。灌浆开始时期，不同部位的籽粒充实度大小为：强势粒一次枝梗 > 强势粒二次枝梗 > 弱势粒一次枝梗 > 弱势粒二次枝梗。花后 30 d，强势粒一次枝梗的充实度基本达到最大值。开花到花后 30 d，强势粒二次枝梗和弱势粒一次枝梗籽粒灌浆充实较快，而花后 30~37 d 籽粒灌浆较慢。弱势粒二次枝梗的充实度在整个灌浆期是逐渐增大的。花后 37 d，不同部位的籽粒充实度为强势粒一次枝梗最大，弱势粒一次枝梗最小，强势粒二次枝梗和弱势粒一次枝梗的籽粒充实度相差不大。所以强势粒的灌浆开始早、速度快，充实度好，而弱势粒二次枝梗灌浆开始最晚、速度慢、持续时间长，籽粒灌浆的差异严重限制了弱势粒二次枝梗充实度的提高。

水分对籽粒充实度有较大的影响，对强势粒一次枝梗的影响主要表现灌浆中前期(开花至花后 23 d)，对强势粒的最终充实度基本没有影响。水分对强势粒二次枝梗和弱势粒的影响表现在全灌浆期， $W3$ 的籽粒充实度明显大于 $W1$ 和 $W2$ 。氮肥对强势粒充实度的影响相对较小，且主要差异表现在开花至花后 30 d 这一阶段。氮肥对弱势粒充实度存在较大的影响，差别主要表现在花后 16~30 d，前期的籽粒灌浆差别不大。水分与氮肥对籽粒充实的影响比较发现，水分对充实度的影响相对较大，特别是对弱势粒的影响。 $W3$ 处理的籽粒充实度较高，可以显著增强弱势粒的灌浆。

水氮互作对不同部位籽粒充实度的影响存在的差别，对强势粒一次枝梗影响最小，对强势粒二次枝梗的影响主要在花后 16 d，对弱势粒一次、二次枝梗的影响表现在整个生育期，其中对弱势粒二次枝梗最终充实度的影响最大，干湿交替($W3$)和倒 2 叶一次施肥($N3$)可以改善弱势粒的充实度。

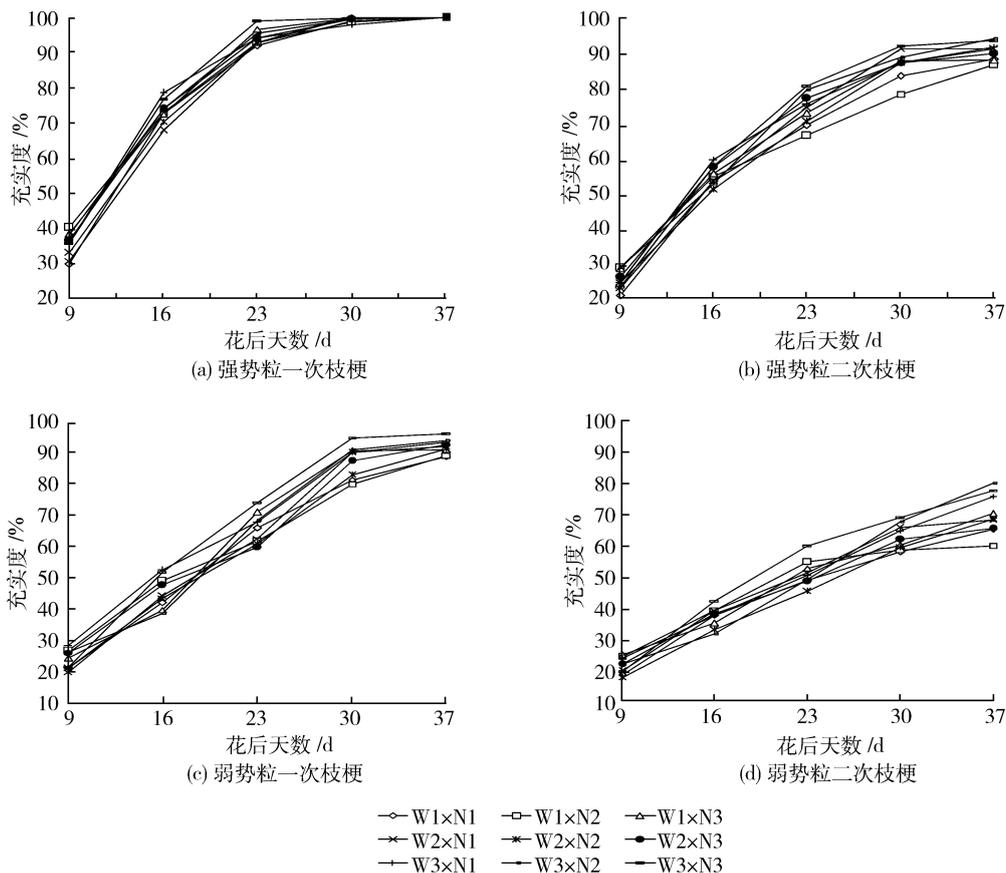


图3 不同水氮处理各时期籽粒的充实度

Fig. 3 Changes of grain plumpness at five developmental stages under water and nitrogen treatments

3 结论与讨论

1) 水、肥是供应植物生长的 2 个关键因子。氮肥一定的条件下, 干湿交替灌溉能提高水稻的水氮利用效率, 从而提高产量^[12]。凌启鸿^[13]等发现降低基肥比例, 增加穗肥施用, 搁田推迟, 可以促进分蘖成穗, 提高成穗率。本研究表明, 水分和氮肥对水稻库容质量和数量的影响较大。水氮总量一定的条件下, 穗肥施入时期的推迟及比例的增大会提高水稻的千粒重、籽粒充实度及产量, 倒 2 叶期 1 次施肥 (N3) 的千粒重、籽粒充实度和产量比例 4 叶期 1 次施肥 (N1) 分别提高 8.3%, 2.1% 和 5.3%。穗肥施用对千粒重作用最为明显, 对总穗数和穗粒数没有显著影响, 且不同水分条件表现一致趋势。氮肥的合理分配能增加功能叶面积, 延长功能期, 提高后期群体光能利用率, 提高千粒重, 促进有效分蘖, 控制无效分蘖, 获得高产。干湿交替的灌溉方式穗粒数、千粒重、籽粒充实度及产量优于搁田, 搁田时间相对延长也利于产量与品质的提高; 但是, 穗数却出现相

反的结果, 提前复水 (倒 4 叶期) 的穗数显著大于推迟复水和干湿交替。另外, 水分处理对水稻库容的作用大于氮肥。干湿交替和推迟复水灌溉通过提高中后期根系活力, 减少过量营养生长、延长绿叶面积光合持续期, 协调“源”的积累与“库”的形成, 显著提高产量和品质^[14]。

2) 水氮互作对水稻产量有显著的效应。干旱状况下, 施氮可促进作物对深层土壤水分的利用, 适宜的水分供应又可促进肥料转化及吸收, 提高肥料利用率^[15-16]。本研究在水稻孕穗期和结实期进行灌溉方式与穗肥施用互作发现, 干湿交替灌溉与倒 2 叶期一次施用穗肥为最佳的水氮组合方式。干湿交替灌溉与倒 2 叶期一次施用穗肥提高了水稻的穗粒数、千粒重、充实度和产量, 增强了水分和氮素的利用效率。进一步对籽粒不同部位籽粒的灌浆速率分析, 其产量的提高源于所有部位籽粒平均灌浆速率和最大灌浆速率的提高, 特别是显著增强了弱势粒的灌浆速率。

3) 不同部位籽粒灌浆和充实度差异显著。弱势

粒灌浆慢、结实率和充实度差,是限制水稻产量和品质的一个重要因素。本研究发现,弱势粒充实度差的原因是弱势粒灌浆起始晚,平均灌浆速率和最大灌浆速率都明显低于强势粒。干湿交替灌溉可以提高弱势粒二次枝梗的平均灌浆速率、所有枝梗籽粒的最大灌浆速率和强势粒二次枝梗、弱势粒的充实度;而倒2叶期施用穗肥可以增强弱势粒二次枝梗的平均灌浆速率和弱势粒一、二次枝梗的最大灌浆速率及充实度。干湿交替与倒2叶期一次施用穗肥互作提高了所有枝梗的平均灌浆速率与最大灌浆速率,对弱势粒二次枝梗充实度的作用时间长,显著改善弱势粒的充实度。所以,干湿交替与倒2叶期一次施用穗肥通过增强弱势粒灌浆提高了水稻的千粒重充实度、产量和水氮利用效率,是最好的水氮组合方式。这与孙永健等全生育期的水氮互作分析结果,“湿润灌溉(前期)+浅水灌溉(孕穗期)+干湿交替灌溉(抽穗至成熟期)处理和施氮量 180 kg/hm^2 ”的水氮运筹方式能发挥水氮耦合的优势^[17]一致。水稻孕穗期和结实期的干湿交替与倒2叶期一次施用穗肥的水氮运筹方式促进结实期营养物质的转运及产量的增加。深层次上的原因,可能是干湿交替灌溉和穗肥的施用造成剑叶中内肽酶活性、 H_2O_2 和MDA的增幅减慢,保持了较高的光合速率;维持了较高的硝酸还原酶、谷氨酰胺合成酶、谷氨酸合酶等氮代谢酶活性;促进可溶性蛋白等渗透调节物质的积累及根系活力的提高^[17-18]。但是,笔者只是从库容数量、质量方面进行了研究,而对于其具体的生理生化机理还不清楚,有待进一步从生理生化、分子生物学角度进行解析。

参 考 文 献

- [1] 凌启鸿,张洪程,戴其根,等. 水稻精确定量施氮研究[J]. 中国农业科学,2005,38(12):2457-2467
- [2] 邹桂花,梅捍卫,余新桥,等. 不同灌水量对水、旱稻营养生长和光合特性及其产量的影响[J]. 作物学报,2006,32(8):1179-1183
- [3] Zhang Hao, Chen Tin-tin, Wang Zhi-qin, et al. Involvement of cytokinins in the grain filling of rice under alternate wetting and drying irrigation[J]. J Exp Bot, 2010, 61(13): 3719-3733
- [4] Xue Chang-ying, Yang Xiao-guang, Bouman B A, et al. Effects of irrigation and nitrogen on the performance of aerobic rice in northern China[J]. J Integr Plant Biol, 2008, 50(12): 1589-600
- [5] 黄升谋, 邹应斌, 刘春林. 杂交水稻两优培九强、弱势粒结实生理研究[J]. 作物学报, 2005, 31(1): 102-107
- [6] 朱庆森, 张祖建, 杨建昌, 等. 亚种间杂交稻产量源库特征[J]. 中国农业科学, 1997, 30(3): 52-59
- [7] 杨建昌, 王志琴, 朱庆森, 等. ABA与GA对水稻籽粒灌浆的调控[J]. 作物学报, 1999, 25(3): 341-348
- [8] 朱庆森, 王志琴, 张祖建, 等. 水稻籽粒充实程度的指标研究[J]. 江苏农学院学报, 1995, 16(2): 1-4
- [9] Yang Jian-chang, Zhang Jian-hua. Grain-filling problem in 'super' rice[J]. J Exp Bot, 2010, 61(1): 1-52
- [10] 朱庆森, 曹显祖, 骆亦其. 水稻籽粒灌浆的生长分析[J]. 作物学报, 1988, 14(3): 182-193
- [11] 赵步洪, 张文杰, 常二华, 等. 水稻灌浆期籽粒中淀粉合成关键酶的活性变化及其与灌浆速率和蒸煮品质的关系[J]. 中国农业科学, 2004, 37(8): 1123-1129
- [12] 孙小淋, 杨立年, 杨建昌. 水稻高产节水灌溉技术及其生理生态效应[J]. 中国农学通报, 2010, 26(3): 253-257
- [13] 凌启鸿. 作物群体质量[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2000
- [14] Yang Jian-chang, Zhang Jian-hua. Crop management techniques to enhance harvest index in rice [J]. J Exp Bot, 2010, 61(12): 3177-3189
- [15] Sharma B D, Kar S, Cheema S S. Yield, water use and nitrogen uptake for different water and N levels in winter wheat [J]. Fert Res, 1990, 22: 119-127
- [16] 程建平, 曹涛贵, 蔡明历, 等. 不同土壤水势与氮素营养对杂交水稻生理特性和产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2008, 14(2): 199-206
- [17] 孙永健, 孙园园, 刘凯, 等. 水氮交互效应对杂交水稻结实期生理性状及产量的影响[J]. 浙江大学学报: 农业与生命科学版, 2009, 35(6): 645-654
- [18] 孙永健, 孙园园, 刘凯, 等. 水氮互作对结实期水稻衰老和物质转运及产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2009, 15(6): 1339-1349

(责任编辑: 刘迎春)