植物营养与肥料学报 2012,18(3):551-561
Plant Nutrition and Fertilizer Science

灌溉方式和有机无机氮比例对水稻产量与水分利用的影响

刘宇锋[1,2],梁燕菲[1],邓少虹[1],李伏生[1*]
(1 广西大学农学院,广西南宁 530005;2 广西农业科学院水稻研究所,广西南宁 530007)

摘要:通过盆栽试验,研究了3种有机无机氮比例,即60%无机氮+40%有机氮(F1)、80%无机氮+20%有机氮(F2)、100%无机氮(F3),和3种灌溉方式,即常规灌溉(FIR)、控制灌溉(CIR)和间歇灌溉(IIR),对水稻生长、产量构成、产量和水分利用的影响。结果表明,与FIR处理相比,CIR和IIR处理水稻全生育期灌水量分别下降31.3%和15.9%,但是理论产量平均分别降低31.9%和15.9%,因此水分利用效率(WUE)提高不明显。与F3相比,F1和F2的理论产量平均增加20.1%和14.2%,FIR条件下WUE分别提高37.3%和25.5%。通径分析表明,在不同灌溉方式与有机无机氮比例条件下,有效穗数、每穗粒数、千粒重仍是影响水稻产量的主要因素。主成分分析表明,在间歇灌溉条件下,在总施氮量不变时,配施40%有机氮肥可降低水稻灌水量,并适当提高水稻产量。

关键词:灌溉方式;有机无机氮比例;生长因子;产量构成;水分利用效率;水稻
中图分类号:S147.3;S154.3　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1008-505X(2012)03-0551-11

Effects of irrigation method and ratio of organic to inorganic nitrogen on yield and water use of rice

LIU Yu-feng[1,2], LIANG Yan-fei[1], DENG Shao-hong[1], LI Fu-sheng[1*]
(*1 College of Agronomy, Guangxi University, Nanning 530005, China;*
2 Rice Research Institute, Guangxi Academy of Agricultural Sciences, Nanning 530007, China)

Abstract: A pot experiment was carried out to study the effects of irrigation method and ratio of organic to inorganic nitrogen (N) on rice growth, yield components and water use of rice. There were three irrigation methods, controlled irrigation (CIR), intermittent irrigation (IIR) and flooding irrigation (FIR), and three ratios of organic to inorganic N, 60% inorganic N + 40% organic N (F1), 80% inorganic N + 20% organic N (F2), 100% inorganic N (F3). The results show that compared to FIR treatment, the irrigation amount are reduced by 31.3% and 15.9% during the whole growth stages of rice under the CIR and IIR treatments, respectively, and the rice yields are reduced by 31.9% and 15.9%. Therefore, water use efficiencies (WUE) of rice are not enhanced. Compared to F3, rice yields of F1 and F2 are increased by 20.1% and 14.2%, and under the FIR treatment, WUEs of F1 and F2 are enhanced by 37.3% and 25.5%, respectively. Path analysis shows that number of productive ear, grains per ear and thousand kernel weights are the main components of rice yield in different irrigation methods and ratios of organic to inorganic N treatments. The principal component analysis shows that under the same total N application, 40% inorganic N could decrease irrigation water and increase rice yield in the IIR treatment appropriately.

Key words: irrigation method; ratio of organic to inorganic N; growth factor; yield component; water use efficiency; rice

收稿日期:2011-11-08　　**接受日期**:2012-01-12
基金项目:国家自然科学基金(50869001);广西自然科学基金项目(2011GXNSFB01830);广西研究生教育创新计划(2009105930901D011)项目资助。
作者简介:刘宇锋(1980—),男,湖南湘阴人,博士研究生,助理研究员,从事植物营养生理与水肥利用理论与技术研究。Tel:0771-3235314-814, E-mail:liuyufeng@gxu.edu.cn。　*通讯作者 E-mail:zhenz@gxu.edu.cn

我国农业用水量占全部水资源消耗量的70%以上,而水稻用水量又占农业总用水量的65%[1],而我国目前水稻灌溉水有效利用率仅为40%～50%[2],因此水稻生产推广节水灌溉技术具有重要意义。当前我国水稻生产已推广多种节水灌溉技术如"薄、浅、湿、晒"模式、控制灌溉和间歇灌溉等。控制灌溉技术是在水稻本田移栽后,除返青期保持0～30 mm薄水层外,根据水稻各生育期对水分的敏感程度和需水规律,土壤水分控制的下限为土壤饱和含水量的60%～80%,上限为饱和含水率[3-4]。目前该技术在我国黑龙江、苏北、海南等水稻种植中推广应用[5-7]。间歇灌溉是在返青期保持20～60 mm水层,分蘖后期晒田,黄熟落干,其余时间采取浅水层、干露(无水层)相间的灌溉方式,已在我国东北以及江南稻区获得应用[8-9]。

有机无机肥配施是我国农业生产的重要施肥制度。孟琳等[10]研究认为,有机无机氮肥配施不仅能提高水稻稻谷产量和品质,而且也能提高氮肥利用率和培肥土壤,在总氮量N 240 kg/hm^{2}以内时,有机氮替代10%～20%的无机氮为最适比例。周卫军等[11]也认为,有机无机肥配施可以改善土壤供氮能力,提高水稻对氮素的利用率和生产力。

通径分析(path analysis),即通径系数分析法,能够反映因素对结果的效应,同时通径系数还能区分原因对结果的直接作用和间接作用[12-13]。程建平等[14]通过通径分析研究在相同栽插密度下水稻产量构成对产量的作用,认为单株有效穗数和每穗实粒数对水稻产量影响较大,千粒重对产量也有一定影响。邢文刚等[15]通过通径分析研究控制排水条件下水稻产量构成对产量的影响,认为在考虑控制排水下水稻产量最优目标时,应考虑穗粒数、有效穗数、结实率和千粒重的变化。

主成分分析(principal components analysis)是利用降维的思想,在损失较少信息的前提下把多个指标转化为几个综合指标的多元统计方法[16-17]。主成分分析在水稻品种比较[18]、品质鉴定[19]、需水量预测[20]等方面的研究中均得到应用。

为进一步揭示在不同有机无机氮比例下不同灌溉方式的效应,本文以常规灌溉为对照,研究控制灌溉与间歇灌溉对水稻生长、产量构成、产量和水分利用的影响。利用通径分析方法,分析不同灌溉方式与有机无机氮比例下水稻产量构成对产量的影响,利用主成分分析方法评价试验中不同处理的综合效果,以探讨水稻合理的灌溉方式和施肥制度,为水稻可持续栽培技术提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

盆栽试验在广西大学农学院温室内进行。试验土壤为第四纪红色粘土发育的水稻土,风干后,粉碎过10 mm筛,称取9.0 kg于盆钵中。盆钵规格为上部直径30 cm,下部直径20 cm,高21 cm。供试土壤pH值为6.01,有机质含量6.17 g/kg,碱解氮(N)81.2 mg/kg(碱解扩散法),速效磷(P)42.8 mg/kg($NaHCO_3$法),速效钾(K)60.9 mg/kg(NH_4OAc法)。供试水稻品种为三系籼型杂交水稻组合特优63(审定编号GS01005-1994)。

1.2 试验设计

试验设3种灌溉方式与3种有机无机氮比例,完全方案设计,共9个处理,每个处理重复12次,共108盆,随机区组排列。

3种灌水方式分别为:1)常规灌溉(flooding irrigation,FIR),除分蘖末期晒田和黄熟期自然落干以外,其它各生育期盆内土壤均保持浅水层(40～60 mm);2)控制灌溉(controlled irrigation,CIR),各生育期灌水后实行无水层灌溉模式,分蘖前期、中期、后期、拔节孕穗前期、后期、抽穗开花期和乳熟期土壤含水率下限分别为土壤饱和含水率的70%、75%、70%、70%、75%、80%和70%,上限为土壤饱和含水率,分蘖末期晒田,黄熟期自然落干;3)间歇灌溉(intermittent irrigation,IIR),返青期保持20～60 mm水层,分蘖末期晒田,水稻黄熟期自然落干,其余时期采用薄水层(5～10 mm)与无水层相间的灌水方式。试验期间按上述不同灌水处理要求进行控水,用量筒量取各处理灌水量,其中CIR、IIR处理利用ML2x型土壤水分快速测定仪测定0—10 cm土层土壤相对含水率,确定灌水时间和灌水量。

3种有机无机氮比例分别为,F1:60%无机氮+40%有机氮;F2:80%无机氮+20%有机氮;F3:100%无机氮。氮肥施用量以总氮用量计算,总氮量按N 0.15 g/kg土施入,N、P_2O_5和K_2O用量按1.5∶1∶1.5比例配施。氮肥由尿素(N 46.6%)与生物有机肥按比例提供;磷肥由$Ca(H_2PO_4)_2 \cdot H_2O$(P_2O_5 56.3%)提供;钾肥由KCl(K_2O 63.1%)提

供。化学肥料均为分析纯试剂,生物有机肥为山东省寿光市沃野化工有限公司生产的豆粕有机肥[登记证号:鲁农肥(2006)临字 0920],该有机肥主要原料为动植物残体、豆粕、骨粉、鱼粉、HR568-2 菌种等有效成分,按农业部颁布的有机肥料测定国家标准(NY525 - 2002)测定其组分,其水分含量 21.45%,pH 值 6.0,有机质 218.31 g/kg,全氮(N)17.97 g/kg,全磷(P)66.17 g/kg,全钾(K)5.50 g/kg。磷、钾肥与有机肥全部作基肥施用,其中 60% 无机氮作基肥施用,其余 40% 无机氮分别在分蘖期和孕穗期各按 20% 量追施。

水稻于 2011 年 4 月 2 日播种,水稻催芽露白后,培育至 3 叶 1 心期,选取长势基本一致的幼苗进行移栽,4 月 26 日移栽至盆钵。水稻苗每盆 2 穴,1 穴 1 株,移栽深度在 2 ~ 3 cm。水稻秧苗移栽前所有盆内土壤均保持浅水层(20 ~ 30 mm)。不同灌水处理从 5 月 7 日水稻秧苗返青后进行,7 月 22 日水稻开始黄熟后结束,7 月 28 日全部收获完毕,全生育期 117 d。此外,试验期间其他田间管理措施一致。

1.3　测定项目与方法

1.3.1 水稻生长、产量构成和产量　各试验处理水稻成熟后,随机收割每处理 3 盆,每盆 2 穴。60℃烘干至恒重后,测定水稻株高(X_1,cm)、穗长(X_2,cm)、有效穗数(X_3)、每穗粒数(X_4)、千粒重(X_5,g)、结实率(X_6,%)、谷草比(X_7)、单株粒重(X_8,g)、单株干质量(X_9,g)。按如下公式计算理论产量(t/hm^2):

$$\text{理论产量}(t/hm^2) = \frac{\text{有效穗数}/hm^2 \times \text{每穗粒数} \times \text{结实率} \times \text{千粒重}(g)}{1000}$$

1.3.2 灌水量的测定　试验各处理分别记录日灌水量,分别统计各处理返青期~孕穗期(5 月 7 日~6 月 23 日),孕穗~抽穗期(6 月 24 日~7 月 9 日)和抽穗~乳熟期(7 月 10 日~7 月 18 日)和全生育期累计灌水量。

1.3.3 水分利用效率　本文以干子粒产量为基础,按如下公式计算水分利用效率(WUE):

$$\text{WUE}\ (kg/m^3) = \frac{\text{干子粒产量}}{\text{总耗水量}}$$

1.4　数据统计分析

方差分析用 SPSS15.0 统计分析软件中一般线性模型的多因素分析方法,包括灌溉方式、有机无机氮比例以及两因素之间的交互作用。多重比较用 SPSS15.0 中 Duncan 法进行,字母不同者表示差异显著($P < 0.05$),字母相同者表示不显著($P > 0.05$)。

对水稻生长、产量构成数据进行通径分析[21],得到不同灌溉方式与有机无机氮比例条件下影响水稻产量的主要构成因素。对影响水稻产量的主要构成因素、灌水量、WUE 等数据进行主成分分析[22],从相关数据的相关矩阵出发,对原始数据进行标准化处理后,计算各因子的特征值和方差贡献率,根据因子特征值累积方差贡献率达到 85% 以上确定主成分的个数;然后根据各因子的特征向量值与其方差贡献率的乘积计算各处理主成分值,对试验各处理综合效果进行比较评价。

2　结果与分析

2.1　灌溉方式与有机无机氮比例对水稻生长的影响

表 1 表明,灌溉方式对水稻株高、穗长、单株粒重和单株干质量的影响极显著($P < 0.01$)。与常规灌溉(FIR)处理相比,控制灌溉(CIR)和(间歇灌溉(IIR)处理水稻株高、穗长、单株粒重和单株干质量均下降,其中株高下降 18.2% 和 10.4%,穗长 10.4% 和 5.8%,单株粒重 36.8% 和 14.7%,单株干质量 28.6% 和 5.8%。

表 1 还表明,有机无机氮比例对水稻株高,穗长,单株粒重和单株干质量的影响均不显著($P > 0.05$),这表明有机无机氮肥配施对水稻生长没有明显的促进作用。

2.2　灌溉方式与有机无机氮比例对水稻产量构成和理论产量的影响

表 2 表明,除灌溉方式对每穗粒数、谷草比有显著性影响($P < 0.05$)外,灌溉方式对有效穗数、千粒重、结实率等其它水稻产量构成因素均无显著影响。就有效穗数而言,与 FIR 处理相比,CIR 和 IIR 处理分别降低 22.5% 和 11.3%。与 FIR 处理相比,CIR 和 IIR 处理谷草比分别下降 22.6% 和 16.9%。

表 2 还表明,有机无机氮比例、灌溉方式和有机无机氮比例的交互作用对水稻产量构成因素均无显著影响。

图 1 表明,灌溉方式、有机无机氮比例和灌溉方

表1 灌溉方式与有机无机氮比例对水稻生长的影响

Table 1 Effects of irrigation method and ratio of organic to inorganic N on rice growth

灌溉方式 Irrigation method	有机无机氮比例 Ratio of organic to inorganic N	株高 Plant height (cm)	穗长 Ear length (cm)	单株粒重 (g) Grain weight per plant	单株干质量 Dry mass per plant (g)
FIR	F1	92.7 ±0.4 a	24.8 ±0.2 a	38.2 ±2.2 a	66.9 ±3.6 a
	F2	88.2 ±1.3 ab	23.7 ±0.9 ab	34.5 ±0.1 ab	57.7 ±0.6 ab
	F3	89.1 ±0.1 ab	23.5 ±0.7 abc	27.5 ±0.4 bc	50.4 ±1.6 bcde
CIR	F1	73.4 ±3.7 e	21.2 ±0.3 e	21.1 ±3.3 c	42.5 ±2.2 cde
	F2	75.3 ±6.6 de	21.3 ±0.1 e	21.2 ±1.4 c	42.3 ±1.4 de
	F3	72.0 ±0.7 e	21.9 ±0.1 de	21.0 ±1.1 c	40.2 ±0.3 e
IIR	F1	84.1 ±3.6 bc	22.8 ±0.8 bcd	26.9 ±7.3 bc	52.9 ±3.1 bcd
	F2	80.9 ±0.2 cd	22.1 ±1.0 cde	29.3 ±2.9 abc	53.2 ±1.0 bc
	F3	76.8 ±0.8 de	22.8 ±0.1 bcd	29.4 ±6.7 abc	58.8 ±2.0 ab
		显著性检验(P值)Significance test (P value)			
灌溉方式 Irrigation method (IM)		<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
有机无机氮比例 Ratio of organic to inorganic N (N)		0.09	0.28	0.42	0.28
灌溉方式×有机无机氮比例 IM ×N		0.40	0.25	0.21	0.06

注(Note): FIR—常规灌溉 Flooding irrigation; CIR—控制灌溉 Controlled irrigation; IIR—间歇灌溉 Intermittent irrigation. F1—60%无机氮+40%有机氮 60% inorganic N + 40% organic N; F2—80%无机氮+20%有机氮 80% inorganic N + 20% organic N; F3—100%无机氮 100% inorganic N. 表中数值为平均值±标准差(n=3) The data is mean ± standard deviation (n=3);同列数值后不同字母表示差异显著(P<0.05) Values followed by different letters in the same column are significant at P< 0.05 level.

表2 灌溉方式与有机无机氮比例对水稻产量构成的影响

Table 2 Effects of irrigation method and ratio of organic to inorganic N on yield components of rice

灌溉方式 Irrigation method	有机无机氮比例 Ratio of organic to inorganic N	有效穗数 No. of productive ear (No./pot)	每穗粒数 Grains per ear (No./ear)	千粒重 1000-grain weight (g)	结实率 Ripening rate (%)	谷草比 Ratio of grain to straw
FIR	F1	10.3 ±1.1 a	172.3 ±14.1 a	26.1 ±0.0 abc	71.96 ±2.40 a	1.33 ±0.01 ab
	F2	9.8 ±0.4 a	143.0 ±3.0 bc	27.1 ±1.9 a	85.15 ±0.93 a	1.49 ±0.04 a
	F3	8.5 ±0.0 a	169.6 ±1.0 a	25.2 ±0.9 abc	65.27 ±4.76 a	1.19 ±0.04 ab
CIR	F1	9.5 ±0.7 a	122.6 ±15.6 c	24.8 ±0.8 bc	62.44 ±4.61 a	1.00 ±0.19 b
	F2	9.0 ±1.4 a	117.8 ±15.5 c	25.9 ±0.5abc	60.05 ±4.19 a	1.01 ±0.06 b
	F3	11.8 ±1.6 a	135.4 ±16.1 bc	24.5 ±0.9 bc	62.29 ±5.12 a	1.10 ±0.14 ab
IIR	F1	10.0 ±0.0 a	153.3 ±4.9 ab	24.2 ±0.2 c	61.09 ±5.49 a	1.11 ±0.36 ab
	F2	9.3 ±0.4 a	144.3 ±0.1 bc	24.6 ±0.1 bc	72.91 ±1.80 a	1.23 ±0.21 ab
	F3	10.5 ±2.1 a	132.6 ±7.8 bc	26.6 ±0.7 ab	72.72 ±1.36 a	1.00 ±0.05 b
		显著性检验(P值)Significance test (P value)				
灌溉方式 Irrigation method (IM)		0.85	<0.01	0.12	0.16	0.03
有机无机氮比例 Ratio of organic to inorganic N (N)		0.69	0.11	0.27	0.44	0.33
灌溉方式×有机无机氮比例 IM×N		0.54	0.12	0.07	0.48	0.52

注(Note): FIR—常规灌溉 Flooding irrigation; CIR—控制灌溉 Controlled irrigation; IIR—间歇灌溉 Intermittent irrigation. F1—60%无机氮+40%有机氮 60% inorganic N + 40% organic N; F2—80%无机氮+20%有机氮 80% inorganic N + 20% organic N; F3—100%无机氮 100% inorganic N. 表中数值为平均值±标准差(n=3) The data is mean ± standard deviation (n=3);同列数值后不同字母表示差异显著(P<0.05) Values followed by different letters in the same column are significant at P< 0.05 level.

式×有机无机氮比例均对水稻理论产量有显著影响($P<0.05$ 或 0.01)。不同有机无机氮比例下,与 FIR 相比,CIR 和 IIR 处理的理论产量平均分别降低 31.9%和 15.9%。不同灌溉方式下,与 F3 相比,F1 和 F2 处理的理论产量平均分别增加 20.1%和 14.2%。

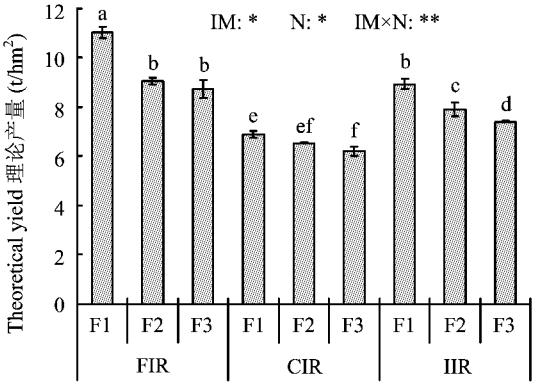

图 1　灌溉方式与有机无机氮比例对水稻理论产量的影响

Fig. 1　Effects of irrigation method and ratio of organic to inorganic N on theoretical yield of rice

[注(Note): 图中 * 与 ** 分别表示差异显著($P<0.05$)和极显著($P<0.01$) In the figure, * and ** represent significant difference ($P<0.05$) and markedly significant difference ($P<0.01$), respectively. FIR—常规灌溉 Flooding irrigation; CIR—控制灌溉 Controlled irrigation; IIR—间歇灌溉 Intermittent irrigation. F1—60%无机氮+40%有机氮 60% inorganic N+40% organic N; F2—80%无机氮+20%有机氮 80% inorganic N+20% organic N; F3—100%无机氮 100% inorganic N.]

2.3　灌溉方式与有机无机氮比例对水稻水分利用的影响

表 3 表明,灌溉方式对水稻返青~孕穗期、孕穗~抽穗期、抽穗~乳熟期和全生育期灌水量的影响显著,有机无机氮比例仅对孕穗~抽穗期灌水量的影响极显著,灌溉方式×有机无机氮比例对水稻返青~孕穗期、孕穗~抽穗期、全生育期对灌水量有显著性影响。

返青~孕穗期,CIR 和 IIR 处理的灌水量分别为 2330 和 2850 m^3/hm^2,较 FIR(3370 m^3/hm^2)分别降低 30.1%和 15.4%,且 CIR 的灌水量较 IIR 处理降低 18.2%。孕穗~抽穗期,CIR 和 IIR 处理的灌水量分别为 1310 和 1860 m^3/hm^2,较 FIR(2110 m^3/hm^2)分别降低 37.9%和 11.8%,且 CIR 的灌水量较 IIR 降低 29.6%。抽穗~乳熟期 FIR、CIR 与 IIR 处理的灌水量分别为 1030、610 和 890 m^3/hm^2,CIR 和 IIR 灌水量较 FIR 降低 40.8%和 13.6%,且 CIR 的灌水量较 IIR 下降 31.5%。就全生育期灌水量而言,CIR 和 IIR 的灌水量分别为 4920 和 6540 m^3/hm^2,较 FIR 处理(7580 m^3/hm^2)分别下降 31.3%和 15.9%,且 CIR 的灌水量较 IIR 降低 32.9%。

水稻水分利用效率(WUE)是指单位灌水量所产生的水稻有效产量[23]。图 2 表明,灌溉方式和灌溉方式×有机无机氮比例对 WUE 的影响显著($P<0.05$),而有机无机氮比例对 WUE 的影响不显著。不同有机无机氮比例下,与 FIR 相比,CIR 处理的 WUE 略有下降,而 IIR 处理的 WUE 略有增加。相同灌溉方式下,有机无机氮比例对水稻 WUE 的影响有所不同。FIR 时,F1 和 F2 处理的 WUE 分别较 F3 提高 37.3%和 25.5%;CIR 和 IIR 时,F1、F2 与 F3 之间 WUE 的差异均不明显。因此,在 FIR 条件下,适当配施有机氮肥可提高水稻的 WUE。

2.4　水稻生长指标、产量构成因子与产量的多元回归和通径分析

对水稻生长指标和产量构成因子与理论产量之间进行多元回归分析后,得到如下方程:

$$Y = -16.05 + 0.01X_1 + 0.05X_2 + 0.91X_3 + 0.05X_4 + 0.27X_5 + 0.44X_6 - 0.92X_7 + 0.06X_8 - 0.03X_9 \quad (R^2 = 0.997) \quad (1)$$

式中,Y 为理论产量,X_1 为株高(cm),X_2 为穗长(cm),X_3 为有效穗数,X_4 为每穗粒数,X_5 为千粒重(g),X_6 为结实率(%),X_7 为谷草比,X_8 为单株粒重(g),X_9 为单株干质量(g)。

从式(1)可以看出,9 个水稻生长和产量构成因子可覆盖产量 99.7%的变化,其中 X_1、X_2、X_3、X_4、X_5、X_6 和 X_8 等 7 个生长、产量构成因子对产量的贡献均为正效应,依其系数大小对各因子正效应排序为 $X_3 > X_6 > X_5 > X_8 > X_4 > X_2 > X_1$。而 X_7 和 X_9 等生长和产量构成因子对产量的贡献为负效应,因子负效应排序为 $X_7 > X_9$。

从表 4 中通径系数可知,X_3 对 Y 直接正效应最大,通径系数为 0.77;X_4、X_8 和 X_5 次之,通径系数分别为 0.57、0.20、0.17,说明这 4 个性状主要对产量起正效应。X_7 和 X_9 对产量有直接负效应,通径系数为 -0.10、-0.16,说明在水肥管理中,应协调好 X_7(谷草比)和 X_9(单株干质量)的关系,降低其对产量的影响。

表3 灌溉方式与有机无机氮比例对水稻不同生育阶段灌水量的影响($\times 10^3$ m^3/hm^2)

Table 3 Effects of irrigation method and ratio of organic to inorganic N on irrigation water amount at different growth stages

灌溉方式 Irrigation method	有机无机氮比例 Ratio of organic to inorganic N	返青~孕穗期 Reviving-booting stage	孕穗~抽穗期 Booting-heading stage	抽穗~乳熟期 Heading-milky stage	全生育期 Total growth stage
FIR	F1	3.36 ±0.01 ab	2.07 ±0.01 b	1.08 ±0.04 a	7.67 ±0.03 a
	F2	3.42 ±0.01 a	2.09 ±0.02 b	1.02 ±0.04 b	7.67 ±0.01 a
	F3	3.32 ±0.01 b	2.18 ±0.00 a	1.00 ±0.01 b	7.39 ±0.01 a
CIR	F1	2.26 ±0.01 g	1.35 ±0.02 e	0.60 ±0.00 d	4.90 ±0.03 d
	F2	2.34 ±0.04 f	1.28 ±0.02 f	0.64 ±0.01 d	4.90 ±0.01 d
	F3	2.41 ±0.01 e	1.30 ±0.01 ef	0.61 ±0.05 d	4.97 ±0.01 c
IIR	F1	2.92 ±0.02 c	1.80 ±0.01 d	0.89 ±0.00 c	6.54 ±0.01 b
	F2	2.83 ±0.06 d	1.87 ±0.05 c	0.91 ±0.01 c	6.54 ±0.03 b
	F3	2.80 ±0.02 d	1.90 ±0.04 c	0.88 ±0.01 c	6.54 ±0.01 b
			显著性检验(P值)Significance test (P value)		
灌溉方式 Irrigation method (IM)		<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
有机无机氮比例 Ratio of organic to inorganic N (N)		0.32	<0.01	0.14	0.94
灌溉方式×有机无机氮比例 IM×N		<0.01	<0.01	0.10	0.03

注(Note): FIR—常规灌溉 Flooding irrigation; CIR—控制灌溉 Controlled irrigation; IIR—间歇灌溉 Intermittent irrigation. F1—60%无机氮+40%有机氮 60% inorganic N + 40% organic N; F2—80%无机氮+20%有机氮 80% inorganic N + 20% organic N; F3—100%无机氮 100% inorganic N. 表中数值为平均值±标准差(n=3) The data is mean ± standard deviation (n=3); 同列不同字母表示差异显著(P<0.05) Different letters in the same column are significant at P< 0.05 level.

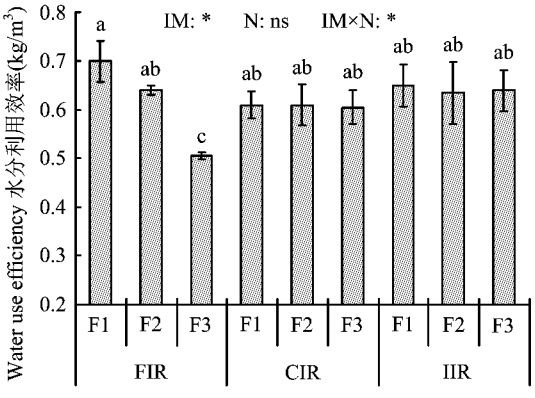

图2 灌溉方式与有机无机氮比例对水稻水分利用效率的影响

Fig. 2 Effects of irrigation method and ratio of organic to inorganic N on water use efficiency of rice

[注(Note): ns 表示差不显著 ns indicates no significant difference (P > 0.05); * 表示差异显著(P < 0.05) Represents significant difference (P<0.05). FIR—常规灌溉 Flooding irrigation; CIR—控制灌溉 Controlled irrigation; IIR—间歇灌溉 Intermittent irrigation. F1—60%无机氮+40%有机氮 60% inorganic N + 40% organic N; F2—80%无机氮+20%有机氮 80% inorganic N + 20% organic N; F3—100%无机氮 100% inorganic N.]

2.5 水稻产量构成因子、灌水量、水分利用效率与产量的主成分分析

依据通径分析结果,影响水稻产量的主要构成因素为有效穗数(X_3),每穗粒数(X_4),千粒重(X_5)和结实率(X_6),同时结合理论产量(X_{10}),灌水量(X_{11}),水分利用效率(X_{12})等7个因素进行主成分分析。

从主成分矩阵值(表5)可知,主成分因子1代表X_4、X_6、X_{10}与X_{11}的作用,因子2体现X_{12}的作用,因子3反映X_3的作用,因子4体现X_5的作用。

主成分值如表6所示,4个主因子反映了7个试验指标90.57%的变化,其中因子1、因子2、因子3和因子4分别承担42.60%、20.63%、17.31%和10.03%的试验指标变化。

根据水稻生长指标、产量构成因子与灌水量主成分贡献系数矩阵(表7),可分别得到下列各因子主成分系数方程:

表 4　水稻生长指标、产量构成因子与产量通径分析

Table 4　Path analysis among rice growth indexes, yield traits and theoretical yield

项目 Items	株高 Plant height	穗长 Ear length	有效穗数 No. of productive ear	每穗粒数 Grains per ear	千粒重 1000-grain weight	结实率 Ripening rate	谷草比 Ratio of grain to straw	单株粒重 Grain weight per plant	单株干质量 Dry mass per plant
综合作用 Comprehensive effect	0.01	0.05	0.91	0.05	0.27	0.44	-0.92	0.06	-0.03
通径系数 Path coefficient	0.04	0.03	0.77	0.57	0.17	0.03	-0.10	0.20	-0.16

注(Note): * 和 ** 分别表示相关性达显著($P<0.05$)和极显著($P<0.01$)水平 Indicate significant correlation at $P<0.05$ and $P<0.01$ levels, respectively.

表 5　水稻产量构成、产量、灌水量与水分利用效率主成分矩阵

Table 5　Principal component matrix of yield components, yield, water consumption and water use efficiency of rice

参数 Parameter	主成分 Principal component			
	因子 1 Factor 1	因子 2 Factor 2	因子 3 Factor 3	因子 4 Factor 4
有效穗数 Number of productive ear(X_3)	-0.06	0.67	0.57	0.33
每穗粒数 Grains per ear(X_4)	0.78	-0.33	0.45	0.05
千粒重 1000-grain weight(X_5)	0.42	0.38	-0.58	0.56
结实率 Ripening rate(X_6)	0.59	0.28	-0.52	-0.37
理论产量 Theoretical yield(X_{10})	0.93	-0.09	0.21	-0.01
灌水量 Irrigation water amount(X_{11})	0.94	-0.23	-0.03	0.12
水分利用效率 WUE (X_{12})	0.35	0.77	0.18	-0.37

表 6　水稻产量构成、产量、灌水量与水分利用效率主成分贡献系数矩阵

Table 6　Principal component score coefficient matrix of yield components, yield, water consumption and water use efficiency of rice

主成分 Principal component	方差贡献率 Variance percentage (%)	方差累积贡献率 Cumulative percentage (%)
因子 1 Factor 1	42.60	42.60
因子 2 Factor 2	20.63	63.23
因子 3 Factor 3	17.31	80.54
因子 4 Factor 4	10.03	90.57

因子 1 = $0.04X_3 + 0.44X_4 - 0.06X_5 - 0.09X_6 + 0.35X_{10} + 0.33X_{11} - 0.07X_{12}$　(2)

因子 2 = $-0.14X_3 - 0.17X_4 - 0.22X_5 + 0.63X_6 + 0.05X_{10} - 0.08X_{11} + 0.69X_{12}$　(3)

因子 3 = $0.79X3 + 0.10X_4 + 0.14X_5 - 0.35X_6 + 0.05X_{10} - 0.08X_{11} + 0.26X_{12}$　(4)

因子 4 = $0.14X_3 - 0.18X_4 + 0.94X_5 + 0.05X_6 - 0.05X_{10} + 0.17X_{11} - 0.24X_{12}$　(5)

各处理综合主成分值排名依次为 FIR - F1、FIR - F3、IIR - F1、FIR - F2、IIR - F2、CIR - F3、IIR - F3、CIR - F1 和 CIR - F2(表 8)。FIR 和 IIR 时,F1 综合主成分值高于 F2 和 F3,而 CIR 时,F3 综合主成分值高于 F1 和 F2。不同有机无机氮比例下,FIR 和 IIR 综合主成分值高于 CIR,这表明,在间歇灌溉条件下,在总施氮量不变时,配施 40% 有机氮肥可降低水稻灌水量,并适当提高水稻产量。

3　讨论与结论

水分与肥料对作物生长的作用不是孤立的,而是相互作用、相互影响[24-27]。对不同灌溉条件下,不同有机、无机氮比例配施对水稻生长、产量构成与耗水量的影响,报道尚不多见。

表7 水稻产量构成、产量、灌水量与水分利用效率主成分值

Table 7 Principal component values of yield components, yield, water consumption and water use efficiency of rice

参数 Parameter	主成分贡献系数 Principal component score coefficient			
	因子1 Factor 1	因子2 Factor 2	因子3 Factor 3	因子4 Factor 4
有效穗数 Number of productive ear (X_3)	0.04	-0.14	0.79	0.14
每穗粒数 Grains per ear (X_4)	0.44	-0.17	0.10	-0.18
千粒重 1000-grain weight (X_5)	-0.06	-0.22	0.14	0.94
结实率 Ripening rate (X_6)	-0.09	0.63	-0.35	0.05
产量 Theoretical yield (X_{10})	0.35	0.05	0.05	-0.05
灌水量 Irrigation water amount (X_{11})	0.33	-0.08	-0.08	0.17
水分利用效率 WUE (X_{12})	-0.07	0.69	0.26	-0.24

表8 不同处理效果综合排序

Table 8 Comprehensive order for different treatments

灌溉方式 Irrigation method	有机无机氮比例 Ratio of organic to inorganic N	因子1 Factor 1	因子2 Factor 2	因子3 Factor 3	因子4 Factor 4	主因子 Factor*	
		成分值 Value	成分值 Value	成分值 Value	成分值 Value	成分值 Value	排名 Order
FIR	F1	80.61	-34.52	28.82	-5.27	31.68	1
	F2	63.90	-28.56	24.76	-0.67	25.55	4
	F3	78.63	-33.95	26.93	-5.68	30.58	2
CIR	F1	56.52	-26.05	23.06	2.29	22.92	8
	F2	54.22	-25.48	22.34	4.22	22.13	9
	F3	62.04	-28.48	26.06	0.06	25.07	6
IIR	F1	71.29	-31.08	26.47	-3.64	28.18	3
	F2	66.91	-29.56	24.93	-1.61	26.56	5
	F3	61.55	-28.25	24.97	2.53	24.97	7

注(Note): FIR—常规灌溉 Flooding irrigation; CIR—控制灌溉 Controlled irrigation; IIR—间歇灌溉 Intermittent irrigation. F1—60%无机氮+40%有机氮 60% inorganic N + 40% organic N; F2—80%无机氮+20%有机氮 80% inorganic N + 20% organic N; F3—100%无机氮 100% inorganic N;表中数值为平均值±标准差($n=3$) The data is mean ± standard deviation ($n=3$). 同列不同字母表示差异显著($P<0.05$) Different letters in the same column mean significance at $P<0.05$ level. * 因子1 Factor 1 = 42.60%, 因子2 Factor 2 = 20.63% 因子3 Factor 3 = 17.31% 因子4 Factor 4 = 10.03% (表6中方差贡献率 Variance percentage in Table 6).

本试验研究发现,灌溉处理与有机无机氮比例处理对水稻耗水量影响中,灌溉处理在水稻3个主要生育期对耗水量影响显著,CI、II较FI处理节水效果显著,与FIR相比,CIR和IIR处理全生育期灌水量分别减少31.3%、15.9%,尤其灌溉处理与有机无机氮比例互作效果在抽穗期对耗水量影响显著,这说明抽穗期是水稻产量形成的临界期,抽穗期也是水稻水分、肥料临界期,在这个时期适当控水、控肥对水稻产量最终形成起关键性作用。水稻产量主要来源于抽穗前茎鞘中储存营养物质的运转和抽穗后的光合产物,前者和后者对产量的贡献分别约为20%~40%和60%~80%,两者所占比例的大小取决于品种特性、栽培措施和气候条件等[28-29]。本研究与前人研究结果一致。而单纯的有机、无机氮比例对各关键生育期水稻耗水量与总耗水量影响并不明显,这也说明施肥是通过水稻的生长来调节水

分的需求，与耗水量直接关系不明显。

在本试验中，与常规灌溉处理相比，控制灌溉、间歇灌溉处理下水稻株高、穗长、单株粒重、单株干物重等生长因子均出现有一定程度降低；而在不同有机无机氮比例处理中，60%无机氮+40%有机氮、80%无机氮+20%有机氮处理对水稻生长的影响均好于100%无机氮处理，这说明有机无机氮配施较单纯化学肥料对水稻生长有利。相较于常规灌溉处理，控制灌溉、间歇灌溉处理对水稻有效穗数、每穗粒数、千粒重、结实率、谷草比产量构成因素的影响不明显，对理论产量的影响有一定波动，但并不明显。60%无机氮+40%有机氮、80%无机氮+20%有机氮处理均高于100%无机氮处理的产量构成。这说明适当提高有机氮比例能提高水稻产量构成与产量，比单纯施用化学肥料效果明显。以上可说明，纯粹的灌溉方式对水稻生长、产量影响有限，结合一定的有机无机氮配施措施能有效改善水稻生长与产量构成，提高产量，这与本研究的前期工作一致[30]。

在水资源有限的条件下，水分利用效率高的作物品种可以获得更高的生物学产量和经济产量[31]。以往研究表明，在水稻结实期受到水分亏缺处理，会降低水稻叶片的光合速率，但同时也会促进茎鞘储存的同化物向籽粒运转，有利于提高水稻的结实率和粒重[32]。水分亏缺处理对产量的影响取决于结实率和粒重增加之和是否能超过光合作用下降之失。如果超过，产量则提高，否则产量下降。本试验中在不同灌溉处理条件下，水稻水分利用效率较为接近，这说明水稻水分利用效率明显受到水分亏缺程度的同时，也受到不同无机有机氮比例的调节，这与前人研究相一致[33-34]。在本试验中，与单施无机氮肥的F3处理相比，有机无机氮配施处理的理论产量平均增加14.2%～20.1%，常规灌溉条件下，水分利用效率提高了25.5%～37.3%，这说明，有机氮比例越高，水稻水分利用效率越高，在生产实践中适当增加有机氮肥的使用可以提高水稻水分利用效率，也可以进一步提高产量。

在本试验中，综合考虑耗水量、水稻生长与产量构成等因素进行通径分析，认为在不同灌溉方式和有机无机氮比例条件下，有效穗数、每穗粒数与千粒重作为影响水稻产量构成没有发生改变，同时在水肥调控中应着重注意对水稻有效穗数、每穗粒数与千粒重的影响，并需要进一步深入研究。同时，通过主成分分析，发现节水灌溉措施配合较高的有机氮比例等综合栽培措施能有效改善水稻生长与产量构成，提高产量。

本试验是在盆栽条件下研究灌溉处理与有机无机氮比例对水稻生长、产量与水分利用的影响，还需结合田间试验进行深入研究并进一步完善。

参 考 文 献：

[1] 李玉敏，王金霞. 农村水资源短缺：现状、趋势及其对作物种植结构的影响—基于全国10个省调查数据的实证分析[J]. 自然资源学报，2009，24(2)：200-208.
Li Y M，Wang J X. Situation，trend and its impacts on cropping pattern of water shortage in the rural areas：empirical analysis based on ten provinces' field survey in China[J]. J. Nat. Recour.，2009，24(2)：200-208.

[2] Belder P，Bouman B A M，Cabangon R *et al*. Effect of water-saving irrigation on rice yield and water use in typical lowland conditions in Asia[J]. Agric. Water Manag.，2004，65：193-210.

[3] 彭世彰，徐俊增. 农业高效节水灌溉理论与模式[M]. 北京：科学出版社，2009. 346-352.
Peng S Z，Xu J Z. Theory and pattern of agriculture efficient water saving-irrigation[M]. Beijing：Science Press，2009. 346-352.

[4] 俞双恩，缪子梅，邢文刚，等. 以农田水位作为水稻灌排指标的研究进展[J]. 灌溉排水学报，2010，29(2)：134-136.
Yu S E，Miao Z M，Xing W G *et al*. Research advance on irrigation-drainage for rice by using field water level as regulation index[J]. J. Irrig. Drain.，2010，29(2)：134-136.

[5] 何静，谭继忠，牟江鹏. 水稻控制灌溉在鸡东灌区的推广应用[J]. 黑龙江水利科技，2008，3(36)：186.
He J，Tan J Z，Mou J P. Popularization and application of rice controlled irrigation in Jidong irrigation area[J]. Heilongjiang Sci. Tech. Water Conserv.，2008，3(36)：186.

[6] 倪同坤，戴柏元，王卫军，陈晓婷. 水稻控制灌溉技术在苏北沿海垦区的应用[J]. 江苏农业科学，2008，(3)：52-54.
Ni T K，Dai B Y，Wang W J，Chen X T. Application of rice controlled irrigation technology in reclamation area of northern Jiangsu province[J]. Jiangsu. Agric. Sci.，2008，(3)：52-54.

[7] 陈艳玲，葛瑞发. 海南灌溉试验站田间节水控制灌溉成果分析[J]. 水利天地，2010，(7)：34-35.
Chen Y L，Ge R F. Results analysis of field water saving and controlled irrigation at Hainan irrigation experiment station[J]. Water World，2010，(7)：34-35.

[8] 杨丽敏. 间歇灌溉对水稻生长发育及产量性状的影响[J]. 北方水稻，2008，38(3)：68-69.
Yang L M. Effect of intermittent irrigation on growth and development and yield traits in rice[J]. North. Rice，2008，38(3)：68-69.

[9] 朱安繁，曾晓春，石庆华，姚锋先. 间歇灌溉对水稻抗旱性的影响及其生理机制[J]. 灌溉排水学报，2007，26(1)：63-65.
Zhu A F，Zeng X C，Shi Q H，Yao F X. Effect of intermittent irrigation on the drought resistance in rice and the physiological

mechanism[J]. J. Irrig. Drain., 2007, 26(1): 63-65.

[10] 孟琳, 张小莉, 蒋小芳, 等. 有机肥料氮替代部分无机氮对水稻产量的影响及替代率研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2009, 15(2): 290-296.
Meng L, Zhang X L, Jiang X F *et al*. Effects of partial mineral nitrogen substitution by organic fertilizer nitrogen on the yields of rice grains and its proper substitution rate[J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2009, 15(2): 290-296.

[11] 周卫军, 王凯荣, 张光远. 有机无机结合施肥对红壤稻田土壤氮素供应和水稻生产的影响[J]. 生态学报, 2003, 23(5): 914-921.
Zhou W J, Wang K R, Zhang G Y. Some effects of inorganic fertilizer and recycled crop nutrients on soil nitrogen supply and paddy rice production in the red earth region of China[J]. Acta Ecol. Sin., 2003, 23(5): 914-921.

[12] 袁志发, 周静芋, 郭满才, 等. 决策系数-通径分析中的决策指标[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2001, 29(5): 133-135.
Yuan Z F, Zhou J Y, Guo M C *et al*. Decision coefficient the decision index of path analysis[J]. J. Northwest Sci-Tech Univ. Agric. For. (Nat. Sci. Ed.), 2001, 29(5): 133-135.

[13] 南娟, 汪有科, 李晓彬, 马婧. 基于通径分析的枣树发芽率影响因子研究[J]. 北方园艺, 2010, (20): 10-13.
Nan J, Wang Y K, Li X B, Ma J. Study on factors of jujube germination rate based on path analysis[J]. Northern Hortic., 2010, (20): 10-13.

[14] 程建平, 曹凑贵, 潘圣刚, 等. 不同灌溉方式下水稻产量性状相关性及通径分析[J]. 灌溉排水学报, 2008, 27(1): 96-99.
Cheng J P, Cao C G, Pan S G *et al*. Correlation and path analysis on the yield characters of paddy rice under different irrigation modes[J]. J. Irrig. Drain., 2008, 27(1): 96-99.

[15] 邢文刚, 陈立娜, 邵光成, 俞双恩. 控制排水条件下水稻产量影响指标敏感性的通径分析[J]. 灌溉排水学报, 2010, 29(3): 41-45.
Xing W G, Chen L N, Shao G C, Yu S E. Path analysis on sensibility of rice yield impact indicators under controlled drainage[J]. J. Irrig. Drain., 2010, 29(3): 41-45.

[16] 李小胜, 陈珍珍. 如何正确应用SPSS软件做主成分分析[J]. 统计研究, 2010, 27(8): 105-108.
Li X S, Chen Z Z. How correctly use SPSS software to principal components analysis[J]. Stat. Res., 2010, 27(8): 105-108.

[17] 何亮. 主成分分析在SPSS中的应用[J]. 山西农业大学学报(社会科学版), 2007, 6(5): 20-22.
He L. Principal components analysis in SPSS[J]. J. Shanxi Agric. Univ. (Soc. Sci. Ed.), 2007, 6(5): 20-22.

[18] 孔德伟, 陈德全, 周良强, 等. 杂交水稻几个重要农艺及产量性状的主成分分析[J]. 中国农学通报, 2005, 21(8): 117-119.
Kong D W, Chen D Q, Zhou L Q *et al*. The principle components analysis of several agronomic and yield traits of rice [J]. Chin. Agric. Sci. Bull., 2005, 21(8): 117-119.

[19] 邹小云, 盛国清, 傅军如, 等. 籼型杂交水稻主要品质性状与产量性状的关系研究[J]. 江西农业大学学报(自然科学版), 2006, 28(1): 7-11.
Zou X Y, Sheng G Q, Fu J R *et al*. The studies on the relation between the main grain quality traits and the yield traits in indica hybrid rice [J]. Acta Agric. Univ. Jiangxinesis (Nat. Sci. Ed.), 2006, 28(1): 7-11.

[20] 乔国庆, 胡清华, 莫军. 主成分回归在水稻需水量预测中的应用[J]. 塔里木大学学报, 2005, 17(2): 6-9.
Qiao G Q, Hu Q H, Mo J. The application of the principal component regression in forecasting paddy water requirements [J]. J. Tarim Univ., 2006, 28(1): 7-11.

[21] 杜家菊, 陈志伟. 使用SPSS线性回归实现通径分析的方法[J]. 生物学通报, 2010, 45(2): 4-6.
Du J J, Chen Z W. The method of SPSS linear regression to achieve path analysis[J]. Bull. Biol., 2010, 45(2): 4-6.

[22] 刘润幸. 利用SPSS进行主成分回归分析[J]. 中国公共卫生, 2001, 17(8): 746.
Liu R X. Principal component regression analysis with SPSS[J]. China Publ. Health, 2001, 17(8): 746.

[23] 周广生, 刘芳, 曹金华, 等. 水稻水分利用效率性状的QTL分析[J]. 科学通报, 2011, 56(11): 832-838.
Zhou G S, Liu F, Cao J H *et al*. Detecting quantitative trait loci for water use efficiency in rice using a recombinant inbred line population[J]. Chin. Sci. Bull., 2011, 56(11): 832-838.

[24] 李世清, 李生秀. 水肥配合对玉米产量和肥料效果的影响. 干旱地区农业研究, 1994, 12(1): 47-53.
Li S Q, Li S X. The effects of applying fertilizers and water on maize production and fertilizer-use-efficiency[J]. Agric. Res. Arid Areas, 1994, 12(1): 47-53.

[25] 金轲, 汪德水, 蔡典雄, 等. 水肥耦合效应研究Ⅰ. 不同降雨年型对N、P水配合效应的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 1999, 5(1): 1-7.
Jin K, Wang D S, Cai D X *et al*. Response and interaction for water and fertilizer Ⅰ. Interaction of N, P and water in the year of different precipations[J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 1999, 5(1): 1-7.

[26] 金轲, 汪德水, 蔡典雄, 等. 水肥耦合效应研究Ⅱ. 不同N、P水配合对旱地冬小麦产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 1999, 5(1): 8-13.
Jin K, Wang D S, Cai D X *et al*. Response and interaction for water and fertilizer Ⅱ. The effect of different compositions of N, P and water on the field of winter wheat[J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 1999, 5(1): 8-13.

[27] 凌启鸿. 作物群体质量[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2000. 44-58.
Lin Q H. The quality of crop population [M]. Shanghai: Shanghai Scientific and Technical Publishers, 2000. 44-58.

[28] 刘立军, 薛亚光, 孙小淋, 等. 水分管理方式对水稻产量和氮肥利用率的影响[J]. 中国水稻科学, 2009, 23(3): 282-288.
Liu L J, Xue Y G, Sun X L *et al*. Effects of water management

methods on grain yield and fertilizer-nitrogen use efficiency in rice [J]. Chin. J. Rice Sci., 2009, 23(3): 282-288.

[29] 刘宇锋, 李伏生, 曾祥伟, 黄海桥. 不同控水方式下不同水稻品种的生理响应与产量构成因子研究[J]. 华南农业大学学报(自然科学版), 2011, 32(2): 6-11.
Liu Y F, Li F S, Zen X W, Huang H Q. Study on physiological and yield component of different rice cultivars under different irrigation methods [J]. J. South China Agric. Univ. (Nat. Sci.), 2011, 32(2): 6-11.

[30] Impa S M, Nadaradjan S, Boominathan P *et al*. Carbon isotope discrimination accurately reflects variability in WUE measured at a whole plant level in rice [J]. Crop Sci., 2005, 45: 2517-2522.

[31] Yang J C, Zhang J H, Liu L J *et al*. Carbon remobilization and grain filling in japonica/indica hybrid rice subjected to postanthesis water deficits [J]. Agron. J., 2002, 94: 102-109.

[32] 王维, 蔡一霞, 蔡昆争, 等. 土壤水分亏缺对水稻茎秆贮藏碳水化合物向籽粒运转的调节[J]. 植物生态学报, 2005, 29 (5): 819-828.
Wang W, Cai Y X, Cai K Z *et al*. Regulation of soil water deficits on stem-stored carbohydrate remobilization to grains of rice [J]. Acta Phytoecol. Sin., 2005, 29(5): 819-828.

[33] Yang J C, Zhang J H, Wang Z Q *et al*. Activities of enzymes involved in sucrose to starch metabolism in rice grains subjected to water stress during filling [J]. Field Crops Res., 2003, 81: 69-81.

[34] Yang J C, Zhang J H, Wang Z Q *et al*. Postanthesis water deficits enhance grain filling in two-line hybrid rice [J]. Crop Sci., 2003, 43(6): 2099-2108.