文章编号:1672 - 3317(2017)12 - 0001 - 07

灌溉方式和施氮量对水稻产量和品质的影响

宁慧峰，崔嘉欣，刘 浩，孙景生

（中国农业科学院 农田灌溉研究所 农业部作物需水与调控重点开放实验室，河南 新乡 453002）

摘 要:以沿黄稻区主栽粳稻品种新稻22号和新稻10号为材料，设置常规灌溉(W)和控制灌溉(D)2种灌溉方式，不施氮(CK，0 kg/hm²纯N)、低氮(LN，90 kg/hm²纯N)、中氮(MN，180 kg/hm²纯N)和高氮(HN，270 kg/hm²纯N)4个氮素水平，研究不同灌溉方式和施氮量对水稻产量和品质的影响。结果表明，产量随施氮量增加而增加，2015年产量MN处理最高；与常规灌溉相比，控制灌溉下新稻22号和新稻10号产量(氮素处理均值)分别下降10.5%和12.6%(2015年)、2.1%和0.8%(2016年)，差异不显著。灌溉方式与氮素水平对稻米的碾磨及外观品质无显著影响；籽粒淀粉量随施氮量增加呈先增后降的趋势，粗蛋白量与施氮水平正相关；控制灌溉的粗蛋白量较常规灌溉高，而淀粉量2个品种表现不一致，各处理间无显著差异。籽粒氮代谢相关酶GOT和GPT活性与施氮量正相关；碳代谢相关酶SS、SSS、ADPGase和Q酶活性随施氮量增加先增后降，各处理间差异显著；控制灌溉下Q酶和GOT活性显著提高。综上可知，控制灌溉下施氮量在180 kg/hm²时2品种产量较高，稻米加工品质有所改善，外观品质因品种而异。

关 键 词:水稻；灌溉方式；产量；品质；碳氮代谢

中图分类号:S274 **文献标志码**:A doi:10.13522/j.cnki.ggps.2017.12.001

宁慧峰，崔嘉欣，刘浩，等. 灌溉方式和施氮量对水稻产量和品质的影响[J]. 灌溉排水学报，2017, 36(12)：1-7.

0 引 言

水分和氮素是调控作物产量和品质的二大重要因素，也是人为调控最频繁、影响最大的作物生长环境因子[1-3]。随着人口增长和经济的发展，需要加大水肥资源的投入以保证产量，但又面临着水资源匮乏和环境污染加重的问题，这是生产上亟待解决的矛盾，也是国内外水稻栽培领域的研究热点[2,4-5]。已有研究表明，在一定范围内氮素和水分有明显的协同作用，适度增施氮肥可以提高产量和改善稻米品质；结实期重度干湿交替灌溉会降低产量和稻米品质，但轻度干湿交替灌溉既能保证产量又可以改善稻米品质[6-9]。籽粒碳氮代谢终产物淀粉和蛋白质分别占稻米干质量的90%和8%左右，其含量、分布、空间结构及理化特性共同决定了水稻籽粒的品质。水稻籽粒中蔗糖合酶(SS)是催化蔗糖降解的关键酶，ADP焦磷酸化酶(ADPGase)、可溶性淀粉合酶(SSS)和淀粉分支酶(Q酶)活性是碳代谢过程中淀粉合成的3个关键酶，结实期灌溉方式对籽粒中蔗糖合酶、ADP葡萄糖焦磷酸化酶、可溶性淀粉合酶和Q酶活性有明显影响，轻度干-湿交替处理明显提高了上述4种酶的活性，而重度干-湿交替处理则显著降低了上述酶的活性[10]。谷草转氨酶(GOT)和谷丙转氨酶(GPT)是籽粒中氮代谢的关键酶[11]，与籽粒中蛋白质和氨基酸量密切相关。关于水氮互作对水稻籽粒氮代谢酶活性的影响，以及淀粉、蛋白质量等品质指标与氮代谢酶活性关系的研究均较少。

控制灌溉作为国家重点推广的水稻节水灌溉技术之一，其特点是在发挥水稻适应能力和自我调节机能的基础上，根据不同生育期对水分敏感程度调节水稻耗水过程[12-13]。然而，灌溉方式和施氮量对水稻产量与品质的交互影响作用研究相对较少，且大多在盆栽条件下进行，水分处理设置在结实期以后，研究结论也不尽一致[10, 14-15]。水稻产量及品质对控制灌溉和氮素交互作用的响应仍需进一步阐明。为此，观察了灌溉方式和施氮量交互作用下水稻产量和品质变化，分析了结实期籽粒碳氮代谢关键酶活性变化与稻米加工、外观品质以及籽粒淀粉、蛋白质等理化组分的关系，以期为水稻的优质高产高效栽培提供依据。

收稿日期:2017-07-23

基金项目:国家自然科学基金项目(51409249)；中央级科研院所基本科研业务费专项(中国农业科学院农田灌溉研究所)

作者简介:宁慧峰(1981-)，男，河南三门峡人。博士，主要从事作物需水过程与调控研究。E-mail: ninghuifeng@126.com

通信作者:孙景生(1963-)，男。研究员，博士生导师。E-mail: jshsun623@163.com

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验于2015—2016年在中国农业科学院新乡综合试验基地进行。土质为沙壤土，耕层有效氮质量分数为24.38 mg/kg，速效磷质量分数为53.68 mg/kg，速效钾质量分数为158.62 mg/kg。年平均气温为14.1 ℃，年平均降水量为600 mm左右，其中7—9月降水较多，占全年降水量的70%以上。多年平均蒸发量为2 000 mm左右。供试品种为沿黄稻区主栽常规粳稻品种新稻22和新稻10号，其生育期基本一致，5月12—13日播种，6月13—14日移栽，8月25日抽穗，10月15日收获。移栽株行距13 cm×30 cm。

试验采用二因素裂区设计，灌溉方式为主区，氮素水平为裂区。设置2种灌溉模式：1）常规灌溉（W），返青期保持5～20 mm的水层，分蘖后期晒田，黄熟期自然落干，其他各生育期建立0～40 mm水层，当田面无水层时进行灌溉；2）控制灌溉（D），除移栽后保持5～20 mm水层返青活棵外，其余生育期均不再建立水层，根层土壤水分控制上限为土壤饱和含水率，下限根据不同生育期分别取土壤饱和含水率的60%～80%，即分蘖期为土壤饱和含水率的60%～70%（前期高，后期低），拔节孕穗期为土壤饱和含水率的70%～75%，抽穗开花期为土壤饱和含水率的75%～80%，乳熟期为土壤饱和含水率的65%～70%。每小区埋设HOBO土壤水分监测探头，埋设深度分别为10、20、30、40、60 cm，当土壤含水率达到控制下限时灌水至饱和（土壤水分控制下限依据前期试验）。氮肥使用尿素（含氮量46%），氮素水平设低肥（LN，90 kg/hm^{2}纯氮）、中肥（MN，180 kg/hm^{2}纯氮）和高肥（HN，270 kg/hm^{2}纯氮）3个处理，以不施肥为对照（CK）。基肥∶蘖肥∶穗肥=1∶1∶2，其中穗肥分别于倒四叶和倒二叶叶龄期等量施入；P、K肥同常规栽培，基施P_2O_5 150 kg/hm^2，K_2O 150 kg/hm^2。小区面积13 m×25 m，3次重复，小区间挖1 m深沟并铺塑料薄膜隔开，然后筑埂以防串水串肥，每小区铺设PVC管进行灌溉，灌水量用水表单独计量。其余管理措施按常规栽培要求实施。控制灌溉返青期、分蘖期、拔节孕穗期、抽穗开花期和乳熟期分别灌水76.7、217.2、226.4、111.0、和254.0 mm，全生育期灌溉885.4 mm；淹水灌溉分别为76.7、339.1、303.3、153.9和378.1 mm，全生育期灌溉1 251.2 mm。

1.2 测定项目与方法

于抽穗期（50%穗抽出剑叶叶鞘）各小区选择穗型大小基本一致的穗子100个并挂牌，分别于抽穗后的10、20、30 d各小区取标记穗15~20个，摘下所有籽粒并剔除空粒和病虫粒，在液氮中冷冻30 s，然后置-70 ℃冰箱中保存，剥去颖壳后用于酶活性测定。籽粒中蔗糖合酶（SS）、ADPG焦磷酸化酶（ADPGase）、可溶性淀粉合酶（SSS）和淀粉分支酶（Q酶）等碳代谢相关酶活性的测定参照程方民等[16]和赵步洪等[17]的方法。谷草转氨酶（GOT）和谷丙转氨酶（GPT）等氮代谢相关酶的取样方法同上，粗酶液提取后参照吴良欢等[18]的方法测定酶活性。

成熟期去除边行后每小区实收计产。每小区取样30穴用于考种，考察穗数、穗粒数、结实率和千粒质量。稻谷风干3个月后进行米质测定，主要测定项目有：粒长、粒宽、糙米率、精米率、整精米率、垩白粒率、垩白度、淀粉量（直链淀粉，支链淀粉）和（粗）蛋白质量等。测定方法参照中华人民共和国国家标准《GB/T17891—1999 优质稻谷》执行，其中蛋白质量以精米为测试样测定其含氮量，然后乘以换算系数5.95。

1.3 数据处理

利用DPS（Data Processing System，浙江大学昆虫科学研究所）软件对试验数据进行统计分析。产量结果采用2 a数据，其余结果在年度间无显著差异且规律基本一致，仅采用2015年数据进一步分析。

2 结果与分析

2.1 灌溉方式和施氮量对水稻产量及其构成因素的影响

方差分析表明，产量及其构成因素主要受施氮水平的影响（表1、表2），灌溉方式及其与氮肥的互作则主要影响穗数（新稻10号）和千粒质量（表1）。随施氮量的增加，2015年产量表现为MN处理＞HN处理＞LN处理＞CK，各处理间差异未达显著水平；2016年表现为HN处理＞MN处理＞LN处理＞CK，高氮和中氮处理间差异不显著，但显著高于低氮和CK。2015年，增施氮肥虽然增加了穗数，但处理间差异并不显著，且HN处理结实率显著下降，最终产量以MN处理最高；2016年，结实率和千粒质量随施氮量增加而下降，但穗数显著增加，产量提高，处理间差异显著。由此可见，增施氮肥主要影响穗数进而影响产量[21]。与常规灌溉相比，控制灌溉下新稻22号和新稻10号的产量（氮素处理均值）分别下降10.5%和12.6%（2015年）、2.1%和

0.8%(2016年)。2015年控制灌溉产量下降较多(未达显著水平),可能与分蘖期土壤水分控制下限偏低有关,加之7月底降雨较多(未能充分晒田控制无效分蘖),导致分蘖成穗率显著下降。因此,在水稻幼穗分化期可适当加大对稻田水分的供应,以降低对水稻有效穗数形成的限制。

表1 2015年灌溉方式和施氮量对水稻产量及其构成因素的影响

品种	灌溉方式	氮素水平	穗数/(×10⁴/hm⁻²)	穗粒数/个	结实率/%	千粒质量/g	产量/(kg·hm⁻²)
新稻22号	W	CK	204.0bc	126.8b	87.7a	28.6b	6 486.4b
		LN	216.2abc	132.8ab	88.3a	28.4b	7 194.5ab
		MN	262.6ab	141.4a	86.8a	27.3cd	8 778.0a
		HN	277.4a	134.4ab	80.0b	26.9d	8 023.8ab
		Mean	240.1a	133.8a	85.7a	27.8b	7 620.7a
	D	CK	186.9c	130.6ab	87.9a	28.1bc	6 014.9b
		LN	192.3bc	139.1a	87.6a	27.0d	6 305.2b
		MN	208.7abc	141.5a	88.0a	30.0a	7 795.7ab
		HN	227.7abc	139.6a	81.0b	28.0bc	7 153.5ab
		Mean	203.9a	137.7a	86.1a	28.3a	6 817.4a
	方差分析	I	6.442	17.05	0.89	33.242*	3.87
		N	6.918**	3.975*	99.235**	7.347**	8.55**
		I×N	0.82	0.26	1.36	19.518**	0.14
新稻10号	W	CK	211.3c	134.8b	87.1ab	26.0abc	6 450.1ab
		LN	247.5abc	135.5b	84.5bc	25.3bc	7 144.5ab
		MN	280.6a	135.7b	87.4a	24.9c	8 327.9a
		HN	268.5ab	131.2b	83.2c	26.1abc	7 657.5ab
		Mean	252.0a	134.3a	85.6a	25.6a	7 395.0a
	D	CK	191.7c	134.9b	86.0ab	25.8abc	5 745.8b
		LN	198.1c	136.1b	85.7abc	26.7ab	6 160.1ab
		MN	219.4bc	138.5ab	86.6ab	27.6a	7 238.4ab
		HN	203.0c	144.2a	85.9ab	26.6abc	6 697.0ab
		Mean	203.1b	138.4a	86.0a	26.7a	6 460.3a
	方差分析	I	31.041*	16.452	7.791	9.871	5.849
		N	3.785*	0.559	3.330	0.634	3.928*
		I×N	0.956	3.113	2.001	5.453*	0.051

注 同栏内同列不同字母表示在P=0.05水平上差异显著。W为常规灌溉;D为控制灌溉;I为灌溉方式;N为氮素水平;I×N为灌溉方式与氮素互作。*、**表示方差分析显著、极显著。下同。

表2 2016年灌溉方式和施氮量对水稻产量及其构成因素的影响

品种	灌溉方式	氮素水平	穗数/(×10⁴/hm⁻²)	穗粒数/个	结实率/%	千粒质量/g	产量/(kg·hm⁻²)
新稻22号	W	CK	165.3e	163.5a	85.9a	24.9a	5 762.9cd
		LN	197.5d	173.2a	86.4a	24.1ab	7 118.8b
		MN	234.2bc	175.2a	85.5a	25.1a	8 799.9a
		HN	283.7a	164.9a	82.5b	23.5bc	9 065.9a
		Mean	220.2a	169.2a	85.1a	24.4a	7 686.9a
	D	CK	142.4f	185.1a	85.1a	25.1a	5 645.6d
		LN	212.2cd	162.3a	85.7a	23.9ab	7 030.5bc
		MN	238.0b	176.3a	86.2a	23.8ab	8 599.0a
		HN	294.9a	158.8a	84.7a	22.4c	8 838.8a
		Mean	221.9a	170.6a	85.4a	23.8a	7 528.5a
	方差分析	I	4.28	0.04	2.49	10.105	0.38
		N	92.767**	2.48	6.922**	11.029**	48.249**
		I×N	2.089	3.08	2.82	1.925	0.02
新稻10号	W	CK	148.2d	167.0a	81.5bc	27.0abc	5 422.8c
		LN	203.4c	167.1a	84.0ab	27.0abc	7 686.4b
		MN	242.7b	160.7a	85.4a	27.1ab	9 017.2a
		HN	288.8a	165.7a	79.3c	24.7c	9 385.8a
		Mean	220.8a	165.1a	82.5a	26.5a	7 878.0a
	D	CK	145.4d	174.3a	82.5abc	27.8a	5 802.7c
		LN	200.8c	165.1a	83.0ab	27.4a	7 518.1b
		MN	238.4b	164.2a	84.8ab	26.5abc	8 760.6a
		HN	295.4a	156.5a	79.5c	24.9bc	9 164.3a
		Mean	220.0a	165.0a	82.5a	26.6a	7 811.4a
	方差分析	I	0.74	0.001	0.013	0.142	0.477
		N	127.292**	0.958	20.974**	13.607**	70.856**
		I×N	0.209	0.672	0.744	0.92	0.585

2.2 灌溉方式和施氮量对稻米品质的影响

2.2.1 灌溉方式和施氮量对稻米加工和外观品质的影响

灌溉方式对稻米的加工及外观品质无显著影响，施氮量对2个品种的加工及外观品质影响略有不同，对新稻22号的糙米率、精米率和垩白粒率有极显著的影响，对新稻10号的糙米率和精米率有极显著的影响；施氮量与灌溉方式的互作主要影响稻米的垩白粒率（表3）。随施氮量增加，稻米加工品质和外观品质各指标无显著变化，但在控制灌溉下HN处理整精米率下降，垩白粒率增大，因此，施氮量应以180 kg/hm^{2}纯氮为宜。灌溉方式和施氮量对籽粒长宽比无显著影响。

表3 灌溉方式和施氮量对稻米加工和外观品质的影响

品种	灌溉方式	氮素水平	糙米率/%	精米率/%	整精米率/%	垩白粒率/%	垩白度/%	长宽比
新稻22号	W	CK	81.4bc	69.9bc	59.0ab	7.4bc	3.4ab	1.6a
		LN	82.8ab	70.8ab	63.4ab	8.1bc	3.8ab	1.6a
		MN	83.4ab	71.0ab	63.5ab	7.3bc	4.6a	1.6a
		HN	83.9a	69.5bc	65.2ab	7.4bc	3.7ab	1.6a
		Mean	82.9a	70.3a	62.8a	7.6a	3.9a	1.6a
	D	CK	80.2c	67.8c	57.4b	9.1ab	3.5ab	1.6a
		LN	84.7a	70.4ab	58.3b	4.4d	3.1b	1.6a
		MN	83.3ab	72.2a	67.8a	6.4cd	3.7ab	1.6a
		HN	82.9ab	70.5ab	58.2b	11.1a	3.3ab	1.6a
		Mean	82.8a	70.2a	60.4a	7.8a	3.4a	1.6a
	方差分析	I	0.190	0.064	6.761	0.231	9.143	7.367
		N	9.898**	7.246**	2.36	7.035**	1.582	0.039
		I×N	2.764	2.938	1.532	9.431**	0.541	0.341
新稻10号	W	CK	81.3b	70.9a	64.0ab	23.6b	10.8a	1.7a
		LN	82.5ab	72.4a	64.0ab	39.5a	10.7a	1.7a
		MN	83.2a	73.0a	60.7b	33.8ab	10.7a	1.7a
		HN	83.3a	72.2a	67.6a	33.4ab	10.7a	1.7a
		Mean	82.6a	72.1a	64.1a	32.6a	10.7a	1.7a
	D	CK	81.3b	71.2a	65.7ab	45.9a	9.7a	1.7a
		LN	82.9a	73.9a	64.9ab	35.3ab	10.6a	1.7a
		MN	82.1ab	72.3a	67.0a	36.0ab	10.6a	1.7a
		HN	83.0a	72.5a	62.6ab	41.1a	10.5a	1.7a
		Mean	82.3a	72.5a	65.1a	39.6a	10.3a	1.7a
	方差分析	I	1.192	0.354	0.800	7.740	1.514	0.875
		N	17.346**	4.083*	0.377	0.446	0.775	0.930
		I×N	2.809	1.034	7.514**	6.619**	1.438	0.994

2.2.2 灌溉方式和施氮量对籽粒淀粉和蛋白质量的影响

由表4可知，施氮量对2个品种粗蛋白量有极显著的影响，而灌溉方式及其与施氮量的互作对2个品种的淀粉组分影响不同。对于米质较优的新稻22号，灌溉方式与施氮量的互作影响其直链淀粉、粗蛋白量以及直支比，新稻10号则主要影响其总淀粉和支链淀粉量。灌溉方式对新稻22号的淀粉组分和粗蛋白量无显著影响，而对新稻10号的总淀粉、支链淀粉和直支比有显著影响。粗蛋白量随施氮量的增加而增加，且控制灌溉略高于常规灌溉，未达显著水平。总淀粉、直链淀粉和支链淀粉量随施氮量增加呈先增后降的趋势，各处理间差异不显著。与常规灌溉相比，控制灌溉下新稻10号总淀粉和支链淀粉量显著下降，直支比显著增加；新稻22号各淀粉组分无显著变化。

2.3 灌溉方式和施氮量对籽粒碳氮代谢相关酶活性的影响

表5为不同灌溉方式和施氮量下籽粒碳氮代谢相关酶活性方差分析。籽粒碳代谢相关的ADP葡萄糖焦磷酸化酶（ADPGase）、蔗糖合酶（SuSase）、可溶性淀粉合酶（SSSase）和淀粉分支酶（Q酶）活性随施氮量的增加呈先增后降的趋势，MN处理下活性最高，籽粒氮代谢相关的谷氨酸草酰乙酸转氨酶（GOT）活性随施氮量的增加而增加，谷氨酸丙酮酸转氨酶（GPT）活性则在HN处理下下降，处理间差异显著。与常规灌溉相比，控制灌溉显著提高了Q酶和GOT活性，ADPGase、SS、SSS和GPT活性则显著降低。新稻22号Q酶和GOT活性提高5.5%和2.9%，ADPGase、SS、SSS和GPT活性分别下降9.1%、1.8%、4.4%和11.6%；新稻10号Q酶和GOT活性提高1.7%和5.0%，ADPGase、SS、SSS和GPT活性分别下降8.5%、15.2%、3.1%和1.6%。；以往研究表明[9-10]，结实期中度干-湿交替处理下籽粒ADPGase、SS、SSS和Q酶活性明显提高，而重度干-湿交替

处理下上述4种酶活性显著降低，而本研究中控制灌溉下籽粒ADPGase、SS、和SSS酶活性显著下降，这可能与灌溉方式的不同及氮肥的施用有关。

表4 灌溉方式和施氮量对籽粒淀粉和蛋白质量的影响

品种	灌溉方式	氮素水平	直链淀粉/%	总淀粉/%	支链淀粉/%	直支比/%	粗蛋白/%
新稻22号	W	CK	14.6bc	74.5a	59.9a	24.7ab	6.4d
		LN	14.4bc	75.3a	60.8a	23.8ab	6.5d
		MN	16.3abc	77.3a	61.1a	26.6ab	6.8cd
		HN	17.2ab	73.6a	56.3a	30.7a	8.1a
		Mean	15.6a	75.2a	59.5a	26.4a	7.0a
	D	CK	19.1a	78.9a	59.8a	32.2a	6.5d
		LN	17.9ab	74.9a	57.0a	31.8a	7.3bc
		MN	18.5a	76.2a	57.7a	32.0a	7.6ab
		HN	13.6c	78.7a	65.1a	20.9b	7.8ab
		Mean	17.3a	77.2a	59.9a	29.2a	7.3a
	方差分析	I	5.47	2.565	0.049	2.11	10.707
		N	2.426	0.209	0.219	1.201	25.494**
		I×N	10.965**	0.911	3.157	9.674**	5.445*
新稻10号	W	CK	14.2a	73.0cd	58.9bc	24.1a	5.9c
		LN	16.1a	79.9ab	63.9ab	25.3a	6.3bc
		MN	15.3a	82.3a	67.1a	22.9a	7.0abc
		HN	17.1a	78.6abc	61.5abc	28.0a	8.0a
		Mean	15.7a	78.5a	62.8a	25.1b	6.8a
	D	CK	14.4a	79.0abc	64.6ab	22.5a	6.4bc
		LN	14.6a	71.7d	57.1c	26.0a	7.2ab
		MN	17.2a	73.8bcd	56.6c	30.3a	7.3ab
		HN	16.6a	73.6bcd	57.0c	29.1a	7.4ab
		Mean	15.7a	74.5b	58.8b	27.0a	7.1a
	方差分析	I	0.004	27.525*	65.585*	250.711**	1.32
		N	1.501	0.5	0.665	1.36	10.035**
		I×N	0.645	5.26*	5.356*	1.044	2.466

表5 灌溉方式和施氮量对籽粒碳氮代谢相关酶活性的影响

品种	灌溉方式	氮素水平	ADPGase/（$OD\cdot g^{-1}$）	Q酶/（$OD\cdot g^{-1}\cdot min^{-1}$）	SS/（$mg\cdot g^{-1}\cdot min^{-1}$）	SSS/（$OD\cdot g^{-1}$）	GOT/（$\mu mol\cdot g^{-1}\cdot 30min$）	GPT/（$\mu mol\cdot g^{-1}\cdot 30min$）
新稻22号	W	CK	39.8c	2.6g	16.4g	15.5e	16.0f	30.4c
		LN	41.0b	7.7b	21.8d	24.2b	18.1d	32.4b
		MN	45.6a	10.1a	25.5a	26.2a	19.9c	35.0a
		HN	37.2e	4.6e	18.7e	20.3d	21.1b	32.5b
		Mean	40.9a	6.3b	20.6a	21.5a	18.7b	32.5a
	D	CK	35.3f	3.6f	15.7h	13.6f	16.3e	26.2f
		LN	38.2d	7.4c	22.3c	23.0c	17.8d	28.9e
		MN	40.9b	10.1a	24.6b	26.2a	21.3b	30.5c
		HN	34.3g	5.3d	18.3f	19.5d	21.8a	29.6d
		Mean	37.2b	6.6a	20.2b	20.6b	19.3a	28.8b
新稻10号	W	CK	29.7e	3.6f	16.1f	14.9d	15.3h	27.3e
		LN	40.4b	8.4c	19.1c	20.5b	18.3f	30.4c
		MN	43.1a	11.9b	22.4a	23.5a	19.6d	31.8a
		HN	33.3d	6.2d	17.8d	17.4c	20.6b	26.8f
		Mean	36.6a	7.5b	18.9a	19.1a	18.5b	29.1a
	D	CK	24.3f	3.7f	12.9h	13.8e	16.5g	27.2e
		LN	36.8c	8.4c	16.8e	19.8b	19.0e	29.3d
		MN	42.3a	12.6a	20.1b	23.1a	20.2c	31.5b
		HN	30.6e	5.9e	14.1g	17.1c	21.8a	26.5g
		Mean	33.5b	7.7a	16.0b	18.5b	19.4a	28.6b

注 表中数据为花后10、20和30 d的3次测定的平均值。

将籽粒碳氮代谢相关酶的平均活性与稻米的品质指标进行相关分析。由表6可知，Q酶活性与稻米、糙米率、精米率、整精米率和支链淀粉量显著正相关，与直链淀粉量显著负相关；SS、SSS和GOT活性与糙米率显著或极显著正相关；SSS活性与籽粒垩白度极显著负相关，与总淀粉量极显著正相关；GOT活性与籽粒粗蛋白量糙米率极显著正相关。

表6 籽粒碳氮代谢相关酶与稻米品质相关性

品质性状	ADPGase	Q酶	SS	SSS	GOT	GPT
糙米率	0.368	0.542*	0.593*	0.689**	0.648**	0.418
精米率	0.098	0.612*	0.128	0.343	0.389	0.079
整精米率	-0.050	0.534*	0.094	0.232	0.307	0.122
垩白粒率	-0.413	0.159	-0.495	-0.308	0.045	-0.370
垩白度	-0.302	0.240	-0.363	-0.623**	0.003	-0.308
直链淀粉	0.236	-0.509*	0.269	0.187	0.219	-0.100
支链淀粉	-0.042	0.503*	0.005	-0.072	-0.089	0.065
总淀粉	0.085	0.151	0.155	0.724**	0.022	0.017
粗蛋白	0.093	0.226	0.208	0.316	0.850**	0.077

3 结论与讨论

控制灌溉下土壤处于频繁的干湿交替状态，理化性状得到改善，同时植株蒸腾耗水有效减少，促进了水稻的根系生长和叶片的光合作用，有利于产量和品质的提升[12]。本研究中，施氮量为180 kg/hm^{2}纯N时2个品种产量较高，而高施氮量导致水稻植株贪青晚熟，籽粒中碳代谢相关酶活性降低，淀粉积累速率和积累量下降，产量降低；与常规灌溉相比，控制灌溉灌水量减少29.2%，产量有所下降，但差异并不显著。

稻米品质的形成主要由遗传因素控制，但同时又受到栽培措施的影响。在本研究所采用的控制灌溉下，MN处理2个品种的整精米率提高，新稻22号的垩白粒率和垩白度下降，新稻10号的垩白粒率增大，但都未达显著水平，由此可见，灌溉方式和施氮量对稻米的加工及外观品质有一定影响，其对品质的增益或恶化效应与品种密切相关。已有研究[19-21]表明，结实期干湿交替灌溉下稻米的加工品质和外观品质均以土壤轻度落干的处理较高或较优，本研究结果也表现出相近趋势，但由于所采用的灌溉方式、处理时期以及水稻品种不同，结论不尽一致，仍需进一步试验研究。

碳代谢和氮代谢是水稻籽粒灌浆期最主要的2种代谢过程，其终产物淀粉和蛋白质分别占稻米干质量的90%和8%左右，是影响稻米品质形成的主要生化基础。Prakash等[22]的研究结果表明，籽粒中蛋白质积累和淀粉积累存在相互消长的关系。增施氮肥促进籽粒蛋白质积累，抑制籽粒中淀粉量的组成，主要是降低了支链淀粉的积累。本研究中，控制灌溉和增施氮肥提高了籽粒中蛋白质量，总淀粉量和支链淀粉量呈先增后降的趋势，直链淀粉量各施氮处理间差异不显著，这可能与籽粒灌浆过程中碳代谢和氮代谢过程存在相互促进同时又相互制约的互作效应有关。已有研究表明[23-25]，籽粒中SS是催化蔗糖降解的关键酶，其活性的大小与库端同化物的卸载能力密切相关，进而决定着籽粒的库强；而ADPGase为淀粉生物合成的限速酶，该酶活性的大小直接影响淀粉合成的速率和最终合成量；GOT和GPT是GS/GOGAT途径中氨同化和利用（氨基酸合成）的关键酶。本研究中，控制灌溉下Q酶和GOT活性提高，而ADPGase、SS和SSS活性下降；碳氮代谢关键酶活性与籽粒品质性状的相关分析也表明，Q酶、SSS和GOT与籽粒直链淀粉、支链淀粉、总淀粉和蛋白质量存在显著或极显著的相关性。然而，籽粒灌浆过程中的一系列酶促反应是非常复杂的过程，其对稻米品质形成的影响机理仍需深入探索。

参考文献：

[1] HAEFELE Stephan M, JABBAR S M A, SIOPONGCO Joel D L C, et al. Nitrogen use efficiency in selected rice (*Oryza sativa L.*) genotypes under different water regimes and nitrogen levels[J]. Field Crops Research, 2008, 107(2): 137-146.

[2] PAN Sheng Gang, CAO Cou Gui, CAI Ming Li, et al. Effects of irrigation regime and nitrogen management on grain yield, quality and water productivi ty in rice[J]. Journal of Food, Agriculture and Environment, 2009, 7(2): 559-564.

[3] 孙永健，孙园园，李旭毅，等. 水氮互作对水稻氮磷钾吸收、转运及分配的影响[J]. 作物学报，2010，36(4): 655-664.

[4] 褚光，展明飞，朱宽宇，等. 干湿交替灌溉对水稻产量与水分利用效率的影响[J]. 作物学报，2016，42(7): 1 026-1 036.

[5] LIU Lijun, CHEN Tingting, WANG Zhiqin, et al. Combination of site-specific nitrogen management and alternate wetting and drying irrigation increases grain yield and nitrogen and water use efficiency in super rice[J]. Field Crops Research, 2013, 154: 226-235.

[6] 刘立军，王康君，卞金龙，等. 结实期干湿交替灌溉对籽粒蛋白质含量不同的转基因水稻的生理特性及产量的影响[J]. 中国水稻科学，2014，28(4): 384-390.

[7] 孙爱华，朱士江，郭亚芬，等. 控灌条件下稻田田面水含氮量、土壤肥力及水氮互作效应试验研究[J]. 土壤通报，2012，43(2): 362-368.

[8] 李俊峰，杨建昌. 水分与氮素及其互作对水稻产量和水肥利用效率的影响研究进展[J]. 中国水稻科学，2017，31(3): 327-334.

[9] 刘立军，李鸿伟，赵步洪，等. 结实期干湿交替处理对稻米品质的影响及其生理机制[J]. 中国水稻科学，2012，26(1): 77-84.
[10] 杨建昌，袁莉民，唐成，等. 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[J]. 作物学报，2005，31(8):1 052-1 057.
[11] 孙永健，孙园园，李旭毅，等. 水氮互作下水稻氮代谢关键酶活性与氮素利用的关系[J]. 作物学报，2009，35(11): 2 055-2 063.
[12] 彭世彰，朱成立. 节水灌溉的作物需水量试验研究[J]. 灌溉排水学报，2003，22(2):21-25.
[13] 崔远来，李远华，吕国安，等. 不同水肥条件下水稻氮素运移与转化规律研究[J]. 水科学进展，2004，15(3):280-285.
[14] 刘奇华，蔡建，李天. 水稻籽粒中的淀粉合成关键酶及其与籽粒灌浆和稻米品质的关系[J]. 植物生理学通讯，2006，42(6):1 211-1 216.
[15] 李国生，王志琴，袁莉民，等. 结实期土壤水分和氮素营养对水稻产量与品质的交互影响[J]. 中国水稻科学，2008，22(2):161-166.
[16] 程方民，蒋德安，吴平，等. 早籼稻籽粒灌浆过程中淀粉合成酶的变化及温度效应特征[J]. 作物学报，2001，27(2):201-206.
[17] 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): 1 123-1 129.
[18] 吴良欢，蒋式洪，陶勤南. 植物转氨酶（GOT和GPT）活度比色测定方法及其应用[J]. 土壤通报，1998，29(3): 136-138.
[19] 魏永霞，何双红，魏永华. 控制灌溉条件下水肥耦合对水稻产量及其构成因子的影响[J]. 灌溉排水学报，2010，29(5): 98-102.
[20] 郭相平，杨骕，王振昌，等. 旱涝交替胁迫对水稻产量和品质的影响[J]. 灌溉排水学报，2015，34(1):13-16.
[21] 尤小涛，荆奇，姜东，等. 节水灌溉条件下氮肥对粳稻稻米产量和品质及氮素利用的影响[J]. 中国水稻科学，2006，20(2):199-204.
[22] PRAKASH Y S, BHADORIA P BS, RAKSHIT A. Relative efficacy of organic manure in improving milling and cooking quality of rice[J]. International Rice Research Notes, 2002, 27:43-44.
[23] 陈婷婷，许更文，钱希旸，等. 花后轻干-湿交替灌溉提高水稻籽粒淀粉合成相关基因的表达[J]. 中国农业科学，2015，48(7):1 288-1 299.
[24] 王维，蔡一霞，蔡昆争，等. 水分胁迫对贪青水稻籽粒充实及其淀粉合成关键酶活性的影响[J]. 作物学报，2006，32(7):972-979.
[25] 彭辉辉，刘强，荣湘民，等. 不同栽培法对水稻谷草转氨酶与天冬氨酸激酶活性的影响[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版)，2005，31(3):233-237.

The Effects of Irrigation and Nitrogen Application on Grain Yield and Quality of Rice

NING Huifeng, CUI Jiaxin, LIU Hao, SUN Jingsheng
(Farmland Irrigation Research Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences/
Key Laboratory of Crop Water use and Regulation, Ministry of Agriculture, Xinxiang 453002, China)

Abstract: Taking two japonica rice varieties, Xindao22 and Xindao10, cultivated in the Yellow River as the model plants, this paper investigated the impact of irrigation and nitrogen application on their yield and grain quality. We examined two irrigation methods-conventional irrigation (W) and controlled irrigation (D) and four nitrogen levels, 0 kg/hm^2 (CK) 90 kg/hm^2 (LN), 180 kg/hm^2 (MN), and 270 kg/hm^2 (HN). The results showed that the yield increased with nitrogen application and the yield under MN treatment maximized in 2015. In comparison with the CK, the yield of Xindao22 and Xindao10 (mean of all N treatments) decreased by 10.5% and 12.6% in 2015, and 2.1% and 0.8% in 2016, respectively, while there was no significant difference among the two irrigation methods. Irrigation and nitrogen application did not have noticeable impact on rice processing quality and appearance quality. The starch content in the grains increased first and then decreased as nitrogen application increased; the concentration of crude protein was positively correlated with the nitrogen application, and was higher under control irrigation than under conventional irrigation; The content of starch and its components showed inconsistency between the two varieties and there was no significant difference between the two irrigation treatments. The activity of key enzymes GOT and GPT involved in nitrogen metabolism was positively correlated with nitrogen application, and the activity of SS, SSS, ADPGase and Q enzymes involved in carbon metabolism decreased under HN treatment and the difference was significant among the treatments. The Q enzymes and GOT activity increased significantly under control irrigation compared with conventional irrigation. Higher yield was achieved with 180 kg/hm² pure N application under control irrigation and processing quality improved, while the appearance quality varied with the two varieties.

Key words: rice; irrigation method; yield; quality; carbon and nitrogen metabolism

责任编辑：白芳芳