植物营养与肥料学报 2012,18(2):283-290
Plant Nutrition and Fertilizer Science

灌溉模式和供氮水平对水稻氮素利用效率的影响

陈 星[1],李亚娟[2],刘 丽[2],方素萍[2],方 萍[1*],林咸永[2]
(1 浙江大学环境资源学院,教育部环境修复与生态健康重点实验室,浙江杭州 310029
2 浙江省亚热带土壤与植物营养重点实验室,浙江杭州 310029)

摘要:以Ⅱ优838为材料,湖北潮土为供试土壤,通过2年稻麦轮作柱栽试验研究了2种灌溉模式(FW:土表淹水3 cm;CW:保持土壤湿润但土表不积水)和4个供氮水平(N 0、126.0、157.5、210.0 kg/hm^2)对水稻地上部干物重、氮素积累量、氮素利用效率的影响。结果表明,灌溉模式和供氮水平对水稻产量、地上部氮素积累量和氮素利用效率均有显著($P<0.05$)或极显著影响($P<0.01$)。其中,淹水处理下水稻产量、地上部氮素积累量、水稻氮素农学利用率、氮肥吸收利用率、氮肥偏生产力和氮素生理利用率显著高于控水处理;地上部生物量及氮素积累量随供氮水平的提高而增加趋势明显;氮肥农学利用率、氮肥偏生产力和氮素生理学利用率均表现为随施氮量提高而下降的趋势,但减氮25%处理(N 157.5 kg/hm^2)与常规施氮量处理(N 210.0 kg/hm^2)间的差异并不显著。综合分析水稻产量与氮素吸收利用效率的各项指标,在8个供试处理中,淹水灌溉模式并减氮25%的处理为值得推荐的稳产高效水氮运筹模式。

关键词:灌溉模式;供氮水平;铵态氮;硝态氮;氮肥农学利用率;氮肥吸收利用率
中图分类号:S511.071.01　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1008-505X(2012)02-0283-08

Effects of water management patterns and nitrogen fertilizer levels on nitrogen use efficiency of rice

CHEN Xing[1], LI Ya-juan[2], LIU Li[2], FANG Su-ping[2], FANG Ping[1*], LIN Xian-yong[2]
(*1 College of Environment and Resources Sciences, Zhejiang University/Ministry of Education Key Lab of Environment Remediation and Ecological Health, Hangzhou 310029, China;*
2 Zhejiang Key Laboratory of Subtropical Soil Science and Plant Nutrition, Hangzhou 310029, China)

Abstract: A two-year pot-culture experiment of rice cultivar, II You 838, with alluvial soil from Hubei was conducted to investigate the effects of two water management patterns and four nitrogen (N) fertilizer levels (N 0, 126.0, 157.5, 210.0 kg/ha) on the aerial part biomass, N accumulation, N use efficiency. The results show that the aerial part biomass, N accumulation and N use efficiency of rice are obviously affected by the water management patterns, and the rice grain yield, N accumulation, N agronomic efficiency, N recovery efficiency, partial factor productivity and nitrogen physiological efficiency under the water-logging irrigation pattern are higher than those of the water-controlled irrigation pattern. The biomass and N accumulation of rice aerial parts are increased with the increase of nitrogen level, while the nitrogen agronomic efficiency, partial factor productivity of the applied N and N physiological efficiency are reduced. However, there are no significant differences between the 25% N saving from conventional nitrogen application rate (N 157.5 kg/ha) and the conventional nitrogen application rate (N 210.0 kg/ha). In general, the water-logging irrigation pattern combined with the 25% N saving from conventional nitrogen application rate is recommended as a better water and nitrogen application patterns due to its higher grain

收稿日期:2011-06-27　　**接受日期**:2011-12-06
基金项目:国家重点基础研究发展计划(2007CB109305)项目资助。
作者简介:陈星(1987—),女,湖南岳阳人,硕士研究生,主要从事养分与环境要素协同效应及其机制方面的研究。
E-mail:20914096@zju.edu.cn。　*通讯作者 Tel:0571-88982480, E-mail:pfang@zju.edu.cn

yield and nitrogen utilization.

Key words: water management pattern; nitrogen fertilizer level; ammonium nitrogen; nitrate nitrogen; nitrogen agronomic efficiency; nitrogen recovery efficiency

在影响水稻产量、品质和氮素利用率的诸多因素中,水和氮起着十分关键的作用。水分与氮素是水稻生产的主要胁迫因子,尤其是在干旱和半干旱地区[1]。氮素供应不足不仅不会充分发挥水分的增产作用,水分供应不协调也会造成氮素资源浪费;水分管理不当还会引起硝态氮的淋失,并可能污染地下水[2]。水分、氮素及其互作对农作物氮素的吸收、利用以及品质和生理性状有十分显著的影响。20世纪末期,国外一些学者研究了地下灌溉模式下水分和氮素对花椰菜、土豆和芹菜等蔬菜作物产量的影响[3];而在21世纪初期,集中研究了水分、氮素对于水稻、小麦等粮食作物生产的影响[4-5],都证实了水分和氮素在农作物的生长过程中起着非常重要的作用。国内一些学者的研究结果也指出,水分、氮素及其互作对杂交水稻结实期生理性状及产量存在显著的影响[6],对水稻各生育期氮代谢酶活性和氮素吸收利用也存在显著或极显著的互作效应[7],对水稻主要生育期氮的累积、转运、分配及产量均存在显著的互作效应,且抽穗前期氮的累积与产量呈极显著正相关[8]。另外,张学军等[9]也证实了水氮合理配比有利于提高水稻产量和氮素利用率。然而,关于水分、氮素及其互作对水稻氮素积累量,土壤铵态氮和硝态氮含量及其相关性还鲜见报道。本试验进一步研究了水分、氮素及其互作对水稻生长中后期生物量、氮积累量、氮素利用效率和土壤无机氮及其相关性的影响,旨在探讨水肥调控对水稻中后期生长的影响,探究最佳施氮量和灌溉模式,以期对水稻的高产高效管理提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计

供试土壤为潮土,取自湖北省潜江市浩口镇柳州村(N 30°22′54.5″、E 112°37′21.5″,海拔高度27.5 m)的水稻土,质地砂壤,其表土(0—15 cm)和底土(15—40 cm)的基本理化性状见表1。

表1 供试土壤基本理化性状

Table 1 Soil physical and chemical properties

土壤 Soil	全氮 Total N (g/kg)	全磷 Total P (g/kg)	全钾 Total K (g/kg)	有机质 OM (g/kg)	NH_4^+-N (mg/kg)	NO_3^--N (mg/kg)	速效磷 Avail. P (mg/kg)	速效钾 Avail. K (mg/kg)
表土 Surface soil	1.25	0.735	5.86	21.7	12.1	30.2	5.86	72.2
底土 Subsoil	0.41	0.433	1.26	6.83	5.17	2.42	1.26	53.7

供试水稻品种为Ⅱ优838。试验设淹水(FW)和控水(CW)两种水分管理模式,其中FW为除分蘖末期和成熟期不灌水外,土表保持3 cm水层;CW为除水稻移栽后返青前保持3 cm水层外,其余生育阶段保持土壤湿润但表土无水层。各水分模式下分设4个供氮水平:不施氮肥(N0);60%常规施氮量(N1,施N 126.0 kg/hm^2);75%常规施氮量(N2,施N 157.5 kg/hm^2);当地农民习惯施氮量(N3,施N 210.0 kg/hm^2)。氮肥70%作基肥,30%作分蘖肥;各处理均施磷肥P_2O_5 75.0 kg/hm^2、钾肥K_2O 120.0 kg/hm^2,磷、钾肥作为基肥。氮肥为尿素,磷肥为过磷酸钙,钾肥为氯化钾。

土柱为内径16 cm高50 cm的PVC管,底部可装卸,接缝处用硅橡胶密封。装土时在底部垫一层石英砂,装入3kg底土,高度约为15 cm;在底土之上再铺一层石英砂,装入约4 kg表土,装表土前将基肥与土壤充分混合均匀,表土高度约为20 cm。移栽前灌水浸泡1周,使土壤沉实。

试验始于2009年6月,采用稻麦轮作的方式,在浙江大学华家池校区温室内进行。轮作制中的小麦供试品种为郑麦9023,在前作的淹水(FW)和控水(CW)模式下也分设4个供氮水平:不施氮肥(N0);60%常规施氮量(N1,施N 126.0 kg/hm^2);75%常规施氮量(N2,施N 157.5 kg/hm^2);当地农民习惯施氮量(N3,施N 210.0 kg/hm^2)。氮肥40%作基肥,30%作分蘖肥,30%作拔节肥。第一、二季

水稻分别于2009年7月3日和2010年7月7日移栽,移栽时每个柱子种水稻1丛,每丛2株,各处理重复6次,完全随机设计。

1.2　测定项目和方法

1.2.1 测定项目　在每季水稻成熟期将植株地上部分茎叶和子粒分别烘干称干重,并测其全氮含量,以估算各项氮肥利用效率指标; 在第二季水稻生育过程中,分别于2010年8月20日(抽穗期)、9月20日(灌浆期)、10月4日(蜡熟期)和10月25日(完熟期)取植株样和鲜土样。将植株样的茎叶和子粒杀青后称干重,粉碎后测总氮含量; 将鲜土样冻干磨细过0.25 mm筛后测定铵态氮和硝态氮含量。每次取样测定重复3次。

1.2.2 测定方法　用2mol/L氯化钾提取土壤无机氮,分别采用靛酚蓝比色法和紫外分光光度计法测定铵态氮和硝态氮[10]; 采用 $H_2SO_4-H_2O_2$ 消解—靛酚蓝比色法测定植株总氮[10]。

各项氮素利用效率指标定义如下:

氮素农学利用率(NAE, Nitrogen agronomic efficiency)(grain kg/kg, N)为施氮肥区与不施氮肥区稻谷产量之差与施氮水平的比值,即单位施氮量的产量增加量;

氮肥吸收利用率(NRE, Nitrogen recovery efficiency)(%)用施氮肥区与不施氮肥区地上部氮素积累量之差与施氮量的比值表示;

氮素收获指数NHI(N harvest index)为子粒氮素积累量与氮素累积总量的比值;

氮肥偏生产力(PFP, Partial factor productivity of applied N)(grain kg/kg, N)为施氮区产量与施氮量的比值;

氮素生理利用率(PE, N physiological efficiency)(grain kg/kg, N)用施氮肥区与不施氮肥区稻谷产量之差与施氮肥区与不施氮肥区地上部氮素积累量之差的比值表示。

1.3　数据处理

采用DPS软件系统进行统计分析。

2　结果与分析

2.1　水稻地上部生物量和氮素积累量

由图1可见,2009年和2010年各处理水稻地上部生物量变化趋势基本一致,在相同灌溉模式下,2轮试验水稻各施氮处理的茎叶、稻谷干重均显著高于N0处理; 3个施氮处理间的差异并不十分明显,只在2009年淹水模式下茎叶干重N3处理显著高于N1和N2处理,子粒干重N2与N3处理均显著高于N1处理; 2010年淹水模式下茎叶干重N3处理显著高于N1处理。说明施用氮肥能提高水稻生物量,但是在常规施氮水平下减氮25%左右对水稻子粒干重无显著影响。另外,方差分析结果表明,2轮试验中,供氮水平对成熟期水稻茎叶和稻谷干重均有极显著影响($P<0.0001$),2009年灌溉模式对成熟期水稻茎叶和稻谷干重均有极显著影响($P<0.01$),表现为淹水处理高于控水处理(表2)。

对水稻成熟期地上部氮素累积量的方差分析结果表明,2轮试验中供氮水平对成熟期水稻茎叶和稻谷干重均有极显著影响($P<0.0001$),而在2009年灌溉模式对稻谷氮素积累量的影响显著($P<0.01$)(表2)。由图2可以看出,在2种灌溉模式下,2轮试验水稻不同部位的氮累积量均表现出随施氮量增加而增加的趋势,说明过量施氮使水稻吸

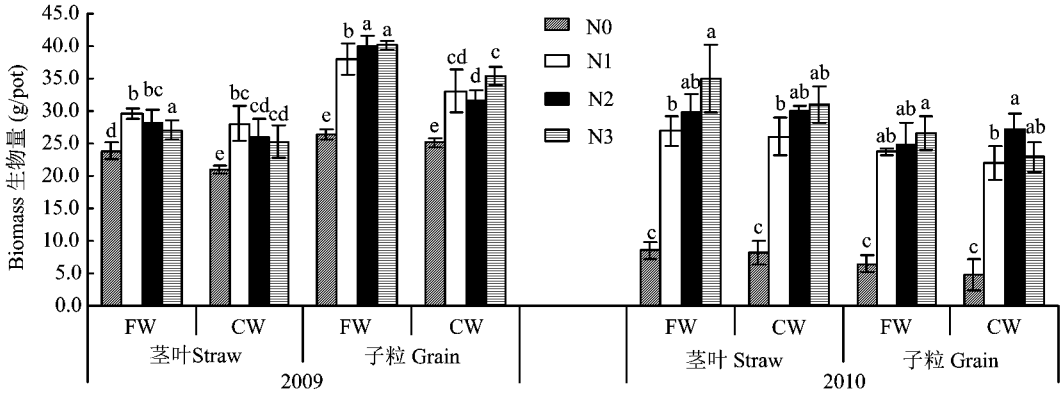

图1　灌溉模式和供氮水平对水稻地上部生物量的影响

Fig. 1　Effects of water management patterns and nitrogen fertilizer levels on aboveground biomass of rice

[注(Note): FW—淹水模式 Water-logging irrigation pattern; CW—控水 Water-controlled irrigation pattern.
柱上不同字母表示差异达5%显著水平 Different letters above the bars mean significantly different at the 5% level.]

表2 试验因子及互作对地上部干物重及氮素积累量影响效应的显著性水平(P)

Table 2 The significant effects of experimental factors on dry mater weight and the accumulation of nitrogen in rice aerial parts

年份 Year	试验因子 Experimental factor	干物重 Dry matter weight		氮素积累量 N accumulation	
		茎叶 Straw	稻谷 Grain	茎叶 Straw	稻谷 Grain
2009	W	0.0008	<0.0001	<0.0001	<0.0001
	N	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001
	W×N	0.8833	0.0003	0.0814	0.0002
2010	W	0.2765	0.2223	0.5530	0.1961
	N	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001
	W×N	0.5692	0.1906	0.6790	0.1603

注(Note): W—灌溉模式 Irrigation method; N—氮肥水平 Nitrogen level; W×N—水氮互作 Interaction of water and nitrogen.

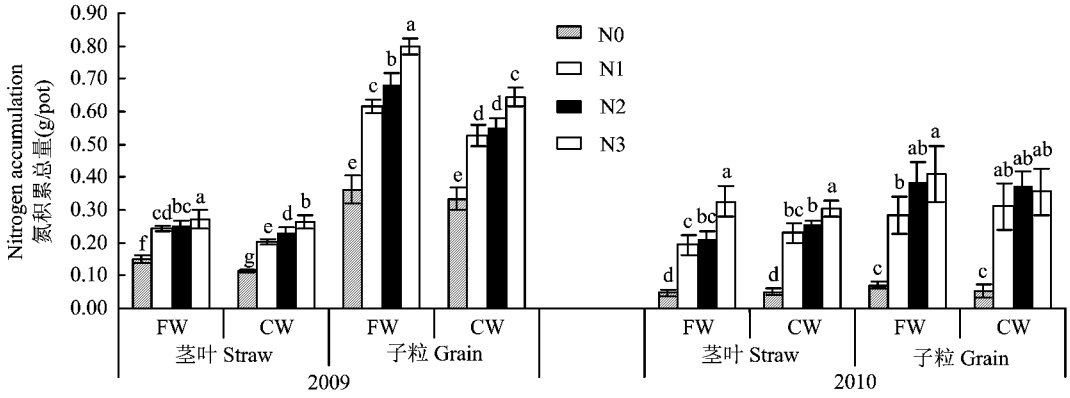

图2 灌溉模式和供氮水平对水稻氮积累总量的影响

Fig. 2 Effects of water management patterns and nitrogen fertilizer levels on nitrogen accumulation of rice

[注(Note): FW—淹水模式 Water-logging irrigation pattern; CW—控水 Water-controlled irrigation pattern.
柱上不同字母表示差异达5%显著水平 Different letters above the bars mean significantly difference at the 5% level.]

收的氮素在茎叶中积累而成为奢侈吸收;而在不同灌溉模式间又表现为淹水处理又高于控水处理,说明相比控水模式,淹水模式更有利于水稻氮素的吸收积累。

2.2 水稻氮素利用效率

由表3可见,在2种灌溉模式下,2轮试验中水稻各氮素利用率指标在不同施氮处理间差异不尽相同。除2009年和2010年水稻的氮收获指数和氮肥吸收利用率外,各氮素利用率指标在不同施氮处理间差异极显著(P<0.01),在相同的灌溉模式下,各指标基本都随着施氮量的增加而减小。2009年灌溉模式对水稻氮素农学利用率、氮肥吸收利用率、氮肥偏生产力和氮素生理利用率的影响极显著(P<0.01),表现为淹水处理高于控水处理,进一步说明淹水条件更有利于水稻对氮素养分的吸收利用。另外,在淹水模式下,N2处理的水稻氮素农学利用率、氮肥偏生产力和氮素生理利用率显著高于N3处理,而与N1之间差异基本不明显。

此外,值得指出的是,本试验中各施氮处理的水稻氮肥吸收利用率普遍较高,2009年和2010年的氮肥吸收利用率分别在52%~69%和65%~86%之间,2010年各处理高于2009年。这可能一方面是由于柱栽试验中施氮处理的土壤氮素的流失较少;另一方面可能是因为2009年稻麦轮作试验中N0处理土壤中的氮素消耗过多,使得采用差减法求得的氮肥吸收利用率高于2010年试验中求得的当季氮肥吸收利用率。

2.3 土壤铵态氮和硝态氮含量

方差分析结果表明,土壤中的铵态氮和硝态氮含量在不同施氮处理间的差异极显著(P<0.0001),而在不同灌溉模式间的差异并不显著(P>0.05),两者的交互作用明显(P<0.01)。而在水

表 3　灌溉模式和供氮水平对水稻氮素利用效率的影响

Table 3　Effects of water management patterns and nitrogen fertilizer levels on N use efficiency of rice

处理 Treatment		氮收获指数 NHI		氮素农学利用率 NAE (grain kg/kg, N)		氮吸收利用率 NRE (%)		氮肥偏生产力 PFP (grain kg/kg, N)		氮素生理利用率 PE (grain kg/kg, N)	
		2009	2010	2009	2010	2009	2010	2009	2010	2009	2010
FW	N0	0.71 cdB	0.60 abA								
	N1	0.72 cdAB	0.59 abA	22.9 aA	34.0 aAB	68.9 aA	70.8 aA	75.0 aA	46.8 aA	33.6 aA	49.7 aA
	N2	0.73 abcAB	0.64 aA	21.5 aAB	29.0 abABC	66.6 aA	75.8 aA	69.2 bB	38.2 bAB	32.3 aAB	38.1 bAB
	N3	0.75 aA	0.56 abA	16.3 bBC	23.9 bcBC	66.1 aA	73.1 aA	47.6 cCD	31.6 cBC	24.9 bcABC	32.7 bB
平均 Average		0.72 aA	0.6 aA	19.1 aA	29.0 aA	67.2 aA	73.2 aA	61.9 aA	39.2 aA	30.3 aA	40.2aA
CW	N0	0.74 abA	0.51 bA								
	N1	0.72 bcdAB	0.57 abA	15.8 cdCD	34.0 aAB	55.6 bB	86.0 aA	65.3 bB	43.5 abA	28.0 abABC	39.8 abAB
	N2	0.7 dB	0.60 abA	10.3 eD	35.3 aA	52.9 bB	82.7 aA	50.0 cC	42.9 abA	19.5 cC	42.7 abAB
	N3	0.71 cdB	0.54 bA	12.2 deD	21.5 cC	54.5 bB	65.5 aA	42.0 dD	27.1 cC	22.4b cBC	32.8 bB
平均 Average		0.72 aA	0.55 aA	12.8 bB	30.3 aA	54.3 bB	78.1 aA	52.4 bB	37.8 aA	23.3 bB	38.4 aA
						P 值 *P* value					
W		0.3367	0.0592	<0.0001	0.4856	<0.0001	0.3604	<0.0001	0.4576	0.0012	0.518
N		0.3169	0.1339	0.0081	0.0005	0.5427	0.2463	<0.0001	<0.0001	0.0163	0.0093
W×N		0.0001	0.6458	0.0814	0.1634	0.8899	0.2168	0.0591	0.1793	0.1036	0.1083

注(Note)：FW—淹水模式 Water-logging irrigation pattern；CW—控水 Water-controlled irrigation pattern. NHI—Nitrogen harvest index；NAE—Nitrogen agronomic efficiency；NRE—Nitrogen recovery efficiency；PFP—Partial factor productivity of applied N；PE—N physiological efficiency. W—灌溉模式 Irrigation method；N—氮肥水平 Nitrogen level；W×N—水氮互作 Interaction of water and nitrogen. 同列数据后不同大、小写字母表示处理间差异达 1% 和 5% 显著水平 Values followed by different capital and small letters in a column are significant at the 1% and 5% levels, respectively.

稻各个生育期，灌溉模式、供氮水平及其交互作用对土壤中的铵态氮和硝态氮含量的影响不尽相同(表 4)。在抽穗期，灌溉模式、供氮水平及其交互作用对土壤中铵态氮和硝态氮含量的影响显著，其中，淹水条件下施氮处理土壤中硝态氮和铵态氮含量高于控水，这是由于在淹水条件下土壤处于厌氧条件，不利于产生硝化作用。另外，在同一灌溉模式下，抽穗期土壤中硝态氮含量随着施氮量的增加而升高，而硝态氮又是稻田氮素流失的主要形态，因此过量施氮会增加生殖生长期水稻田氮素流失的风险。

2.4　植株氮积累量与土壤无机氮含量的相关性

相关性分析结果表明(表 5)，在水稻抽穗期地上部氮积累量与土壤铵态氮、硝态氮均呈现显著或极显著的正相关关系；灌浆期和蜡熟期地上部氮积累总量、茎叶氮积累量都与土壤铵态氮含量存在显著或极显著的正相关关系；完熟期水稻地上部氮积累总量、茎叶和子粒氮积累量都分别与土壤硝态氮存在显著或极显著的正相关关系；各个时期水稻地上部氮积累量与土壤碱解氮含量却无明显相关性($P>0.05$)。说明水稻在不同时期地上部氮的积累与土壤中的有效氮形态有关：抽穗期的氮积累与铵态氮和硝态氮的相关性均较强，灌浆期和蜡熟期与铵态氮的相关性较强，而完熟期与硝态氮含量的相关性较强。

3　讨论

随着农田水资源的日益紧缺和不合理施肥造成的面源污染形势日趋严峻，我国的众多学者已开展了“节水减肥”的相关研究。以往的研究大都集中在水、肥单因子效应试验[11-19]，也有少数学者对水肥的交互效应进行了研究。大多数研究认为[2-5]，水肥互作对水稻子粒产量、氮积累量、氮素利用效率、生理性状等具有显著或极显著的影响。本试验结果也证实：水稻的茎叶和子粒产量和氮素积累量

表4 灌溉模式与供氮水平对水稻不同时期土壤铵态氮和硝态氮含量的影响

Table 4 Effects of water management patterns and nitrogen fertilizer levels on soil ammonium nitrogen and nitrate nitrigen at different growth stages of rice

处理 Treatment		铵态氮 Ammonium nitrogen(mg/kg)				硝态氮 Nitrate nitrogen(mg/kg)			
		抽穗期 Heading	灌浆期 Filling	蜡熟期 Dough	完熟期 Full ripe	抽穗期 Heading	灌浆期 Filling	蜡熟期 Dough	完熟期 Full ripe
FW	N0	1.81 dC	1.67 cB	5.87 bC	6.53 abA	3.55 de	4.81 bcAB	1.08 fC	0.52 dE
	N1	7.96 aA	2.15 bcB	6.18 bABC	6.05 bA	4.54 cCD	5.60 aA	1.63 deBC	2.58 bC
	N2	7.17 bA	2.09 bcB	6.00 bBC	6.43 abA	4.96 bcBC	5.11 abAB	3.02 aA	2.65 bBC
	N3	7.58 abA	2.09 bcB	7.16 aA	6.86 abA	6.66 aA	3.68dC	1.94cdB	3.47aA
CW	N0	1.79 dC	1.66 cB	5.99 bBC	6.51 abA	3.69 dE	4.80 bcAB	2.78 abA	1.63 cD
	N1	6.01 cB	2.33 bAB	6.16 bABC	6.49 abA	3.93 dDE	4.26 cdBC	2.87 aA	1.59 cD
	N2	7.02 bA	2.96 aA	6.28 bABC	6.93 aA	3.75 dE	4.67 bcB	1.16 efC	3.21 aAB
	N3	5.90 cB	2.36 bAB	7.11 aAB	6.68 abA	5.33 bB	4.49 bcBC	2.34 bcAB	3.39 aA
					P 值 *P* value				
	W	<0.0001	0.0115	0.6454	0.3104	<0.0001	0.0984	0.0059	0.1458
	N	<0.0001	0.0004	0.0008	0.2404	<0.0001	0.0015	0.3014	<0.0001
	W×N	0.0009	0.0902	0.9091	0.4507	0.0026	0.0005	<0.0001	<0.0001

注(Note)：FW—淹水模式 Water-logging irrigation pattern；CW—控水 Water-controlled irrigation pattern. W—灌溉模式 Irrigation method；N—氮肥水平 Nitrogen level；W×N—水氮互作 Interaction of water and nitrogen. 同列数据后不同大、小写字母表示处理间差异达1%和5%显著水平 Values followed by different capital letters and small letters in the column are significant at the 1% and 5% levels, respectively.

表5 不同生长期水稻地上部氮积累量与土壤无机氮含量的相关性分析(*r*)

Table 5 Correlations of nitrogen accumulation with soil inorganic nitrogen contents at different growth stages of rice

氮积累量 Nitrogen accumulation	铵态氮 Ammonium nitrogen	硝态氮 Nitrate nitrogen	无机氮 Inorganic nitrogen
	抽穗期 Heading stage		
地上部 Shoot	0.75*	0.87**	0.87**
茎叶 Straw			
子粒 Grain			
	灌浆期 Filling stage		
地上部 Shoot	0.78*	−0.025	0.47
茎叶 Straw	0.75*	−0.13	0.36
子粒 Grain	0.55	0.34	0.64
	蜡熟期 Dough stage		
地上部 Shoot	0.79*	0.022	0.46
茎叶 Straw	0.85**	0.056	0.51
子粒 Grain	0.69	−0.014	0.37
	完熟期 Full ripe stage		
地上部 Shoot	0.38	0.86**	0.85**
茎叶 Straw	0.42	0.86**	0.86**
子粒 Grain	0.34	0.85**	0.83*

注(Note)：*，**分别表示在0.05和0.01水平上差异显著 Indicated significant difference at the 0.05 and 0.01 levels, respectively.

在不同施氮处理和灌溉模式间差异显著，两者的交互作用明显。这与Belder等[20]和Cabangon等[21]的研究结果不一。笔者认为各学者的研究结果不太一致可能是由于试验条件存在差异，如灌溉方式、灌溉时间、氮肥水平不同、试验作物品种、土壤类型、气候条件各异等。因此，为深入研究水氮互作对水稻生长和生理性状的影响，对水氮互作的具体机理等还有待进一步的探讨。

氮肥利用率受施氮量和灌溉模式的影响深刻。一般来说，随着施氮量的增加，作物产量增加，氮肥利用率降低[2]。为协调产量和氮肥利用率之间的矛盾，从我国目前的情况来看，需要在保持作物高产稳产的前提下适当减少施肥量，提高氮素利用率。本试验结果显示，氮素积累总量随着施氮量增加而增大，相反，氮素农学利用率、氮肥偏生产力及氮素生理利用率均表现为随施氮量增加而减少的趋势。同时，相对于常规施氮量(N3处理)，减少25%的施氮量(N2处理)在增加氮素利用率的同时并未降低水稻子粒干重及其氮素的积累。另外本试验也证实，相比控水模式，淹水模式更有利于水稻干物质的积累和氮素的吸收利用，因此在本试验条件下，可以适量减氮(减少常规施氮量的25%)，并采用淹水灌

溉模式，以保证水稻产量，同时避免水稻对氮素养分的奢侈吸收，从而提高氮素吸收利用效率。

在水稻各生长时期，其对不同形态氮素的吸收行为的表现有所不同。张亚丽等[22]的研究表明，水稻对氮素的吸收利用能力应该表现为对铵态氮和硝态氮综合吸收利用能力而不仅仅是其中的一种。国内外学者[23-26]的研究也证实了在不同生长时期水稻对不同形态氮素表现出不同的吸收能力。其中，何文寿等[23]研究表明，水稻在营养生长期以吸收铵态氮为主，在生殖生长期对硝态氮的吸收增加。Lon 等[25]研究表明在生殖生长期，水稻转移至稻穗中的氮素形态以铵态氮为主，而在本试验中，通过分析不同生长期水稻地上部氮积累量与土壤无机氮含量的相关性发现，在水稻的生殖生长期，土壤中的硝态氮和铵态氮含量均与茎叶、子粒氮积累量或地上部总氮积累量显著相关。其中，铵态氮与抽穗期、灌浆期和蜡熟期地上部氮积累量相关，硝态氮与抽穗期和完熟期地上部氮积累量相关。说明在不同时期，水稻对不同形态氮素的需求不一致，可以根据需要补充合适的氮源，但应注意氮素流失。

参 考 文 献：

[1] Dugo V G, Durand J L, Gastal F. Water deficit and nitrogen nutrition of crops. A review[J]. Sustain. Agric. 2011, 2: 557-575.

[2] 巨晓棠，张福锁. 氮肥利用率的要义及其提高的技术措施[J]. 科技导报，2003，(4)：51-54.
Ju X T, Zhang F S. Correct understanding of nitrogen recovery rate[J]. Sci. Tech. Rev., 2003, (4): 51-54.

[3] Thompson T L, Doerge T A, Godin R E. Nitrogen and water interactions in subsurface drip-irrigated cauliflower: II. Agronomic, economic, and environmental outcomes[J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 2000, 64(3): 412-418.

[4] Belder P, Spiertz J H J, Bouman B A M *et al*. Nitrogen economy and water productivity of lowland rice under water-saving irrigation[J]. Field Crops Res., 2005, 93(2-3): 169-185.

[5] Cossani C M, Slafer G A, Savin R. Co-limitation of nitrogen and water, and yield and resource-use efficiencies of wheat and barley [J]. Crop Past. Sci., 2010, 61(10): 844-851.

[6] 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，(6)：645-654.
Sun Y J, Sun Y Y, Liu K *et al*. Effect of water-nitrogen interaction on some physiological characteristics and grain yield in hybrid rice during grain filling[J]. J. Zhejiang Univ. (Agric. Life Sci.), 2009, (6): 645-654.

[7] 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)：2055-2063.
Sun Y J, Sun Y Y, Li X Y *et al*. Relationship of activities of key enzymes involved in nitrogen metabolism with nitrogen utilization in rice under water-nitrogen interaction[J]. Acta Agron. Sin., 2009, 35(11): 2055-2063.

[8] 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.
Sun Y J, Sun Y Y, Li X Y *et al*. Effects of water-nitrogen interaction on absorption, translocation and distribution of nitrogen, phosphorus, and potassium in rice[J]. Acta Agron. Sin., 2010, 36(4): 655-664.

[9] 张学军，赵营，陈晓群，等. 不同水氮供应对水稻产量、吸氮量及水氮利用效率的影响[J]. 中国农学通报，2010，26(4)：126-131.
Zhang X J, Zhao Y, Chen X Q *et al*. Effect of different water and N supply on the yield, N uptake and water/N use efficiency of rice [J]. Chin. Agric. Sci. Bull., 2010, 26(4): 126-131.

[10] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京：中国农业科技出版社，2000.
Lu R K. Agriculture chemical analysis methods of soil[M]. Beijing: China Agricultural Scientech Press, 2000.

[11] 王维，蔡一霞，杨建昌，等. 结实期土壤水分亏缺影响水稻籽粒灌浆的生理原因[J]. 植物生态学报，2011，35(2)：195-202.
Wang W, Cai Y X, Yang J C *et al*. Effects of soil water deficit on physiological causes of rice grain-filling[J]. Chin. J. Plant Ecol., 2011, 35(2): 195-202.

[12] 刚爽，赵宏伟，王敬国，等. 不同氮肥水平下寒地粳稻器官不同形态氮含量变化特征研究[J]. 植物营养与肥料学报，2011，17(2)：276-282.
Gang S, Zhao H W, Wang J G *et al*. Effect of nitrogen fertilization rates on the variation characteristic of different nitrogen forms contents in *japonica* rice under the cold region[J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2011, 17(2): 276-282.

[13] 张荣萍，马均，王贺正，等. 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]. 作物学报，2008，34(3)：486-495.
Zhang R P, Ma J, Wang H Z *et al*. Effects of different irrigation regimes on some physiology characteristics and grain yield in paddy rice during grain filling[J]. Acta Agron. Sin., 2008, 34(3): 486-495.

[14] Roderick M R, Florencia G P, Divina G P R *et al*. Impact of the alternate wetting and drying (AWD) water-saving irrigation technique: Evidence from rice producers in the Philippine[J]. Food Pol., 2011, 36(2): 280-288.

[15] 陈爱忠，潘晓华，吴建富，等. 氮肥运筹对不同生育期晚稻品种产量及氮素吸收利用的影响[J]. 作物研究，2011，25(1)：4-6，10.
Chen A Z, Pan X H, Wu J F *et al*. Effects of nitrogen fertilizer planning on yield and nitrogen absorption and utilization of late rice varieties with different growth duration[J]. Crop Res., 2011, 25(1): 4-6, 10.

[16] 徐春梅，周昌南，郑根深，等. 施氮量和栽培密度对超级早稻不同器官氮素积累与转运及其吸收利用率的影响[J]. 中国土壤与肥料，2011，(1)：15-20.
Xu C M, Zhou C N, Zheng G S *et al*. Effects of nitrogen accumulation and translocation in different organs and their absorption and utilization of nitrogen under different nitrogen fertilizer rates and densities of super early rice[J]. Soil Fert. Sci. China, 2011, (1): 15-20.

[17] 汪军，王德建，张刚. 太湖地区稻麦轮作体系下秸秆还田配施氮肥对水稻产量及经济效益的影响[J]. 中国生态农业学报，2011，19(2)：265-270.
Wang J, Wang D J, Zhang G. Effects of different N-fertilizer rates with straw incorporation on rice yield and economic benefit of rice-wheat rotation system in Taihu Lake region[J]. Chin. J. Eco-Agric., 2011, 19(2): 265-270.

[18] 曾勇军，石庆华；潘晓华，等. 施氮量对高产早稻氮素利用特征及产量形成的影响[J]. 作物学报，2008，34(8)：1409-1416.
Zeng Y J, Shi Q H, Pan X H *et al*. Effects of nitrogen application amount on characteristics of nitrogen utilization and yield formation in high yielding early hybrid rice[J]. Acta Agron. Sin., 2008, 34(8): 1409-1416.

[19] Singh N, Pal N, Mahajan G *et al*. Rice grain and starch properties: Effects of nitrogen fertilizer application[J]. Carbohydr. Polym., 2011, 86: 219-225.

[20] 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.

[21] Cabangon R J, Tuong T P, Castillo E G *et al*. Effect of irrigation method and N-fertilizer management on rice yield, water productivity and nutrient-use efficiencies in typical lowland rice conditions in China[J]. Paddy Water Environ., 2004, 2: 195-206.

[22] 张亚丽，段英华，沈其荣. 水稻对硝态氮响应的生理指标筛选[J]. 土壤学报，2004，41(4)：571-576.
Zhang Y L, Duan Y H, Sheng Q R. Screening of physiological indices for response of rice to nitrate[J]. Acta Pedol. Sin., 2004, 41(4): 571-576.

[23] 何文寿，李生秀，李辉桃. 水稻对铵态氮和硝态氮吸收特性的研究[J]. 中国水稻科学，1998，12(4)：249-252.
He W S, Li S X, Li H T. Characteristics of ammonium and nitrate uptake in rice[J]. Chin. J. Rice Sci., 1998, 12(4): 249-252.

[24] 杨肖娥，孙羲. 杂交稻和常规稻生育后期追施 NO_3^--N 和 NH_4^+-N 的生理效应[J]. 作物学报，1991，17(4)：283-291.
Yang X E, Sun X. Physiological effect of nitrate or ammonia top-dressing on hybrid and conventional rice varieties at the late growth stage[J]. Acta Agron. Sin., 1991, 17(4): 283-291.

[25] Lon S, Chen N C, Chishaki N, Inanaga S. Behavior of N within rice plants, comparing between *Japonica* and *Indica* varieties[J]. Ecol. Environ., 2004, 13(4): 646-650.

[26] Lon S, Chen N C, Chishaki N, Inanaga S. Behavior of nitrogen absorbed at different growth stages of rice plants[J]. Ecol. Environ., 2005, 14(4): 567-573.