

# 水肥耦合对水稻生长、产量及氮素利用效率的影响

吴宗钊,原保忠

(华中农业大学,湖北武汉430070)

**摘要:** 为了探讨水稻生产中适宜的灌溉方式以及与其匹配的施氮量,以C两优华占水稻品种为试验材料,使用大田试验的方法,进行了水肥耦合试验。试验设灌水量和氮肥水平两个因素。以淹水灌溉的灌水量为基准,设置4个水分处理,即W1(淹水灌溉100%)、W2(轻度干湿交替灌溉66.7%)、W3(中度干湿交替灌溉33.3%)和W4(雨养,灌溉0),不同水分处理灌溉频次相同,当W1水层消失时同时灌溉。设置6个氮肥梯度,0、90、135、180、225、270 kg/hm<sup>2</sup>。对水稻生长性状、产量以及水氮利用效率进行了研究,结果表明:在不同灌溉处理下,增加氮肥施用量,均能够显著增加水稻株高和叶片SPAD值;中度干湿交替灌溉,显著降低了低施氮量处理的株高,高施氮量一定程度上弥补了灌水量减少对株高的影响。轻度与中度干湿交替灌溉处理下,高氮处理成熟期水稻叶片SPAD值显著降低,从而改善其贪青晚熟现象。在不同灌溉处理下,随着氮肥施用量的增加,水稻有效穗数呈现逐渐增加的趋势。雨养处理会导致水稻实粒数与结实率显著降低;不同灌溉方式下,氮肥施用量与水稻产量均呈现二次方的关系,不同水分处理下的水稻产量峰值出现时的施氮量不同,当施氮量达到135 kg/hm<sup>2</sup>之后,继续增加施氮量,不同水分处理对水稻产量影响显著,在水分亏缺条件下继续增施氮肥会导致产量明显下降。综上所述,施氮量的多少应该与灌水量相匹配,轻度干湿交替灌溉条件下,施用180 kg/hm<sup>2</sup>氮肥会达到较好的水肥耦合模式,可以在减少灌水量的条件下,获得了较高的产量,并且保持较高的氮肥农学利用效率和氮肥偏生产力。

**关键词:** 水稻;水肥耦合;灌溉方式;水稻产量;氮素利用效率

中图分类号:S511

文献标识码:A

文章编号:1672-643X(2020)04-0199-09

## Effect of water and fertilizer coupling on growth, yield and nitrogen use efficiency of rice

WU Zongzhao, YUAN Baozhong

(Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China)

**Abstract:** In order to explore the suitable irrigation method and the matching nitrogen application rate in rice production, a water and fertilizer coupling field experiment was carried out using a rice cultivar named "C Liangyou Huazhan" as the experimental material. The experiment set up two factors, irrigation water volume and nitrogen fertilizer level. Based on the amount of water used for flood irrigation, four water treatments were set as follows, W1 (flood irrigation, 100%), W2 (mild alternate wetting and drying irrigation, 66.7%), W3 (moderate alternate wetting and drying irrigation, 33.3%) and W4 (rain-fed, 0%). Irrigation frequency of different water treatments were the same, and the treatments were carried out at the same time when the W1 water layer disappeared. Six nitrogen fertilizer gradients were set as 0, 90, 135, 180, 225, and 270 kg/hm<sup>2</sup> respectively. Then the rice growth traits, yield, water and nitrogen use efficiency were studied. The results showed that increasing the amount of nitrogen fertilizer significantly increased the rice plant height and leaf SPAD value under different irrigation treatments. The moderate dry and wet alternate irrigation significantly reduced the height of the plants under low nitrogen application rate, and the high nitrogen application rate compensated to a certain extent for the effect of the reduced irrigation amount on the plant height. Under mild and moderate dry and wet alternate irriga-

收稿日期:2020-06-01; 修回日期:2020-07-29

基金项目:国家重点研发计划专项(2017YFD0301400)

作者简介:吴宗钊(1995-),男,山东淄博人,硕士研究生,研究方向为作物水分高效利用。

通讯作者:原保忠(1968-),男,河南汤阴人,博士,副教授,硕士生导师,研究方向为作物水分高效利用。

tion treatment, the SPAD value of rice leaves in the mature stage under high nitrogen treatment significantly reduced, thereby improving the phenomenon of green and late maturity. Under different irrigation treatments, with the increase of nitrogen fertilizer application, the effective panicle number of rice showed a gradually increasing trend. Rain-fed treatment resulted in a significant reduction in the number of rice grains and seed setting rate. Under different irrigation methods, there was a quadratic relationship between the amount of nitrogen fertilizer application and rice yield. Different water treatments had different nitrogen application rates when the rice yield peak occurred. When the nitrogen application rate reached 135 kg/hm<sup>2</sup>, continuing to increase the nitrogen application rate caused a significant impact on rice yield under different water treatments. Continued application of nitrogen fertilizer under water deficit conditions resulted in a significant decrease in yield. In summary, the amount of nitrogen applied should match the amount of irrigation water. Under mild dry and wet alternate irrigation conditions, the application of 180 kg/hm<sup>2</sup> nitrogen fertilizer will achieve a better water and fertilizer coupling mode, which suggest that higher yield can be obtained with reduced irrigation, and higher agronomic utilization efficiency of nitrogen fertilizer as well as nitrogen partial productivity can be maintained at the same time.

**Key words:** rice; coupling of water and fertilizer; irrigation method; rice yield; nitrogen use efficiency

## 1 研究背景

水稻是全球近 50% 人口的主粮,并且由于人口的迅速增加,对水稻的需求也正在逐渐增加<sup>[1]</sup>。我国 60% 以上的人口以水稻为主食,水稻是中国主要的粮食作物之一,其产量高低举足轻重<sup>[2]</sup>。随着我国人口的增加,对稻米生产的需求也迅速提升,据估计,到 2030 年中国稻米产量需增加 30% 以上<sup>[3]</sup>。传统的水稻种植是水分、劳动力和能源密集型的产业,由于这些资源变得逐渐枯竭,导致水稻生产成本的上升,而且由于气候的变化,导致这些问题进一步加剧<sup>[4]</sup>。

氮肥在水稻生产与高产形成上的作用最为显著,增加氮肥投入是增加水稻单位面积产量最有效举措之一<sup>[5]</sup>。中国当前水稻平均氮肥施用量达到 180 kg/hm<sup>2</sup>,超过全球水平的 75%<sup>[6-7]</sup>。超过农作物需求的氮肥施用量会导致生产成本的增加,水分和空气污染,并对生态系统和生物多样性造成不利影响<sup>[6,8]</sup>。在水稻栽培中,探究不同栽培方式对产量、水分和肥料利用效率的影响,在不增加环境负担的情况下增加水稻产量对中国未来的粮食安全和农业可持续发展具有重要意义<sup>[9]</sup>。

有数据显示,中国超过 95% 的水稻是淹水灌溉条件下种植的<sup>[10]</sup>。与淹水灌溉相比,干湿交替灌溉是一种广泛推广的节水灌溉方法,干湿交替灌溉可以减少稻田灌水量并提高水分生产力<sup>[11-15]</sup>。在干湿交替灌溉系统中,灌溉水将土壤淹没至 2~5 cm 的深度,在下次灌水之前,允许地下水位下降至土壤表层以下一定深度<sup>[11]</sup>。前人研究表明,使用干湿交

替灌溉技术灌溉节水量高达 44%<sup>[16-18]</sup>。但干湿交替灌溉条件下氮肥利用效率上升或下降的机理还不明确。以往对水-氮互作效应的研究,大多为盆栽实验,研究结果难以反映大田生产的实际情况。作物对水分和养分的吸收是相对独立的生理过程,但是水分和养分对作物的影响是复杂且密切相关的。在农田生态系统中,水和养分之间、每种养分之间以及作物与水和肥料之间在动态平衡中的互相促进与削弱,以及作物成长发育和形成产量过程与其存在的相互作用,这些作用称为水肥耦合效应<sup>[19]</sup>。只要供水量和氮肥的用量适当匹配,就会起到互相促进的作用,并达到增加产量以及提高水分和肥料利用效率的目标<sup>[12,20]</sup>。因此,只有找到科学的水肥耦合方式,才能实现肥和水两因素的互相促进,提升水肥利用率的目的,确保稻米高产优质的生产。

针对当下水稻水肥研究中许多方面亟待研究的状况,利用大田试验的方法探寻科学的水肥耦合模式,从而达到减少灌水量、降低氮肥施用量、提高产量及水分和氮肥利用效率的目的。

## 2 材料与方法

### 2.1 试验区概况与试验设计

试验于 2019 年 5-10 月在湖北省枣阳市吴店镇(东经 112°40',北纬 32°10')进行,试验区海拔 150 m,为亚热带大陆性季风气候,年平均气温 15.5℃,年降雨量 500~1 000 mm,年平均无霜期 232 d。试验地耕作层(0~20 cm)土壤基本理化性质见表 1。当地种植模式为水稻-小麦轮作,水稻种植方式为移栽,小麦种植方式为直播。试验水稻品种选用 C 两优华占。

表1 试验地耕作层(0~20 cm)土壤基本理化性质

pH 值	有机质含量/ (g · kg <sup>-1</sup> )	总氮含量/ (mg · kg <sup>-1</sup> )	速效磷含量/ (mg · kg <sup>-1</sup> )	速效钾含量/ (mg · kg <sup>-1</sup> )	容重/ (g · cm <sup>-3</sup> )
6.03	39.84	1.32	8.25	90	1.12

试验设灌水量和氮肥水平两个因素。以灌水量为主区,施氮量为副区,3次重复。试验小区面积30 m<sup>2</sup>。每小区之间筑埂并用塑料薄膜包埂,两边设有保护行。试验设4个水分处理(W1、W2、W3、W4),以淹水灌溉的灌水量为基准:W1(淹水灌溉100%)、W2(轻度干湿交替灌溉66.7%)、W3(中度干湿交替灌溉33.3%)和W4(雨养,灌溉0),不同水分处理灌溉频次相同,当W1水层消失时同时灌溉。设置6个施加氮肥处理分别为0、90、135、180、225、270 kg/hm<sup>2</sup>,分别标记为N0、N90、N135、N180、N225、N270。每个小区均施用磷肥(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)120 kg/hm<sup>2</sup>,钾肥(K<sub>2</sub>O)180 kg/hm<sup>2</sup>,水肥双因素试验4×6=24个处理。氮肥分4次施用,比例为基肥:分蘖肥:穗肥:粒肥为3:3:3:1。钾肥分两次施入,比例为基肥:穗肥为6:4。磷肥随基肥一次性施入。雨养处理所有肥料作基肥一次施入。

## 2.2 调查测定项目

(1)株高。在水稻各生育期,每小区测量10株株高(测量时从植株的基部发根处至最上部叶片的顶端)。

(2)叶片SPAD值。在水稻各生育期,使用SPAD-502 Plus型叶绿素仪,每小区选取10株健康主茎。分别测定其剑叶上部1/3处、中部和下部1/3处的SPAD值,取平均值作为每张叶片的SPAD值。

(3)考种与测产。实际产量:收获时每小区去除边行后在小区中央选取典型植株96株,实测各小区产量,根据株距和行距换算成单位面积产量。考种:根据各个小区的平均有效穗选取从5 m<sup>2</sup>的测产小区由对角线取12苳样带到室内考种,调查穗总粒数、穗实粒数、结实率、千粒重,并计算单位面积理论产量。

(4)灌水量与灌溉水利用效率。使用田间管道灌溉,利用水表统计灌水量。灌溉水利用效率(WUE)计算公式如下:

$$WUE = GY/WU \quad (1)$$

式中:WUE为灌溉水利用效率,kg/m<sup>3</sup>;GY为作物产量,kg/hm<sup>2</sup>;WU为灌水量,m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>。

(5)氮肥偏生产力与氮肥农学利用效率。氮肥偏生产力(NPFP)是指作物产量与养分施用量的比值;氮肥农学利用效率(ANUE)是指施肥增加的作

物产量与养分施用量的比值。计算公式如下:

$$NPFP = GY_N / FN \quad (2)$$

$$ANUE = (GY_N - GY_0) / FN \quad (3)$$

式中:NPFP、ANUE分别为氮肥偏生产力、氮肥农学利用效率,kg/kg;GY<sub>N</sub>、GY<sub>0</sub>分别为施氮区、不施氮区的产量,kg/hm<sup>2</sup>;FN为氮肥施用量,kg/hm<sup>2</sup>。

## 3 结果与分析

### 3.1 水肥耦合对水稻生长发育的影响

图1、2分别为不同水分和施氮处理下水肥耦合对水稻各生育期株高、SPAD值的影响,表2为水肥耦合对水稻各生育期株高及SPAD值影响的方差分析。

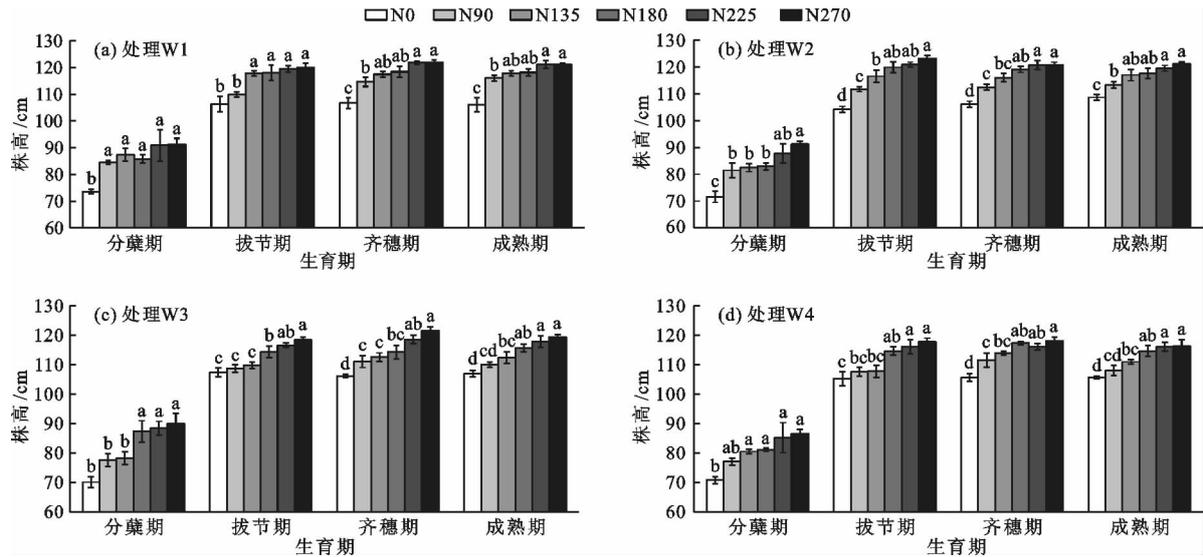
表2 水肥耦合对水稻各生育期株高及SPAD值影响的方差分析

指标	水肥耦合	分蘖期	拔节期	齐穗期	成熟期
株高	N	* *	* *	* *	* *
	W	*	* *	* *	* *
	W × N	ns	ns	ns	ns
SPAD 值	N	* *	* *	* *	* *
	W	ns	* *	*	* *
	W × N	ns	ns	ns	ns

注:ns表示差异不显著;\*表示0.05水平上差异显著;\*\*表示0.01水平上差异显著。

图1与表2表明,各处理水稻株高在整个生育期内均呈现随施氮量的增加而逐渐增加的趋势。从分蘖期至拔节期水稻株高迅速增加,拔节期内水稻株高增长量最大。在整个生育期内,施氮量对水稻株高有极显著的影响,各个灌溉处理均表现为随着施氮量的增加,水稻株高显著增加。不同灌溉处理在整个生育期内对水稻株高有显著影响,在分蘖期表现为W1显著大于其他处理,在拔节期、齐穗期与成熟期表现为W1与W2处理显著大于W3与W4处理,表明不同灌溉处理下,随着施氮量的增加,水稻株高显著增加。与淹水灌溉相比,轻度干湿交替灌溉对水稻株高影响不显著,中度干湿交替灌溉显著降低了低施氮量处理的株高,高施氮量在一定程度上弥补了灌水量减少对株高的影响。雨养处理使

水稻株高显著降低,水分胁迫会降低氮肥对水稻株高增长的促进作用。



注:图中不同小写字母是指在0.05水平上差异显著。下同。

图1 不同水分和施氮处理下水肥耦合对水稻各生育期株高的影响

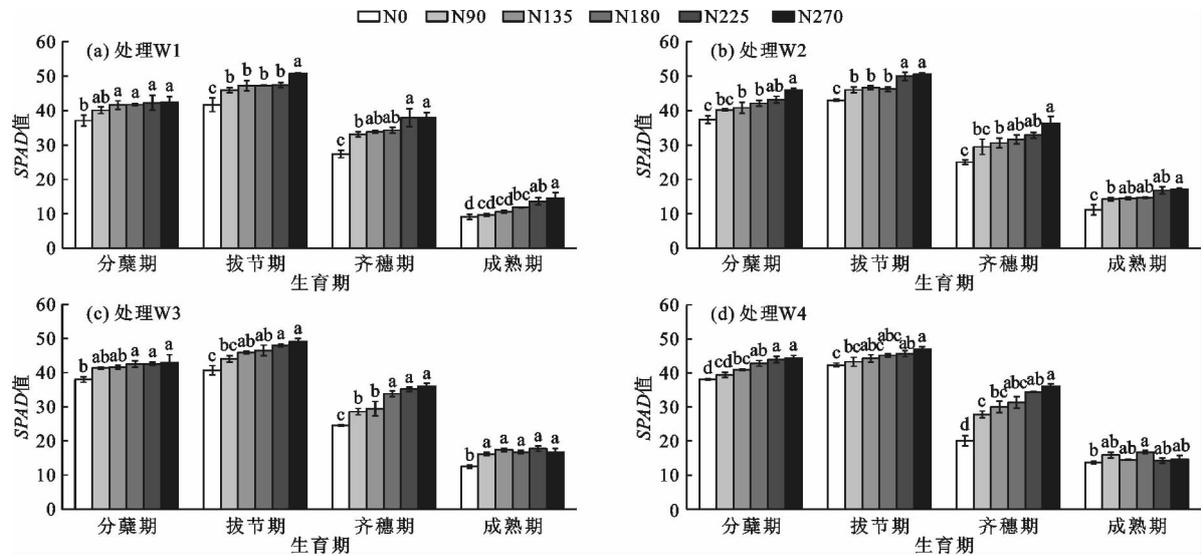


图2 不同水分和施氮处理下水肥耦合对水稻各生育期 SPAD 值的影响

图2与表2表明,各处理水稻叶片 SPAD 值在整个生育期内均呈现先增加后降低的趋势,SPAD 值在拔节期达到最大,成熟期水稻叶片 SPAD 值迅速降低。氮肥施用量对水稻叶片 SPAD 值在整个生育期有着极显著的影响,不同灌溉处理下,随着氮肥施用量的增加,水稻叶片 SPAD 值显著提高,不施氮处理水稻叶片 SPAD 值明显低于施氮处理。不同灌溉处理在拔节期、成熟期对水稻叶片 SPAD 值有着极显著的影响,在齐穗期对水稻叶片 SPAD 值有着显著影响。在拔节期表现为 W1 > W2 > W4, W3 与 W1、W2 差异不显著。在齐穗期表现为 W1 显著大于 W4, W2 与 W3 与其他处理差异不显著。在成熟

期表现为 W1 显著大于其他处理。表明淹水灌溉处理下,高氮处理水稻叶片 SPAD 值在成熟期显著高于低氮处理,水稻贪青晚熟情况严重。与淹水灌溉处理相比,干湿交替灌溉水分处理下,成熟期高氮处理水稻叶片 SPAD 值显著降低,干湿交替灌溉可以改善成熟期高氮处理的贪青晚熟现象。

### 3.2 水肥耦合对水稻产量及产量构成因素的影响

表3为不同水分和施氮处理下水肥耦合对水稻产量构成因素的影响;图3为不同水分和施氮处理下水肥耦合对水稻实际产量的影响。

由表3可见,氮肥施用量对水稻有效穗数有极显著的影响,随着氮肥施用量的增加,水稻有效穗数

呈逐渐增加的趋势。不同灌溉处理对水稻有效穗数影响不显著,雨养处理水稻实粒数显著低于其他灌

溉处理。不同灌溉处理对水稻结实率均有着显著影响,雨养处理水稻结实率显著低于其他灌溉处理。

表3 不同水分和施氮处理下水肥耦合对水稻产量构成因素的影响

水分处理	施氮处理	单株有效穗数	单穗总粒数	单穗实粒数	结实率/%	千粒重/g	理论产量/(t·hm <sup>-2</sup> )
W1	N0	11.50 ± 0.25def	147.90 ± 9.05a	131.00 ± 8.33a	88.55 ± 0.26ab	24.93 ± 0.87a	9.55 ± 0.16e
	N90	12.67 ± 0.51cded	157.43 ± 12.28a	141.61 ± 12.54a	89.63 ± 1.45ab	25.31 ± 0.84a	11.33 ± 0.46bcde
	N135	12.75 ± 0.43cdef	149.82 ± 14.05a	139.38 ± 12.55a	89.58 ± 2.31ab	24.28 ± 0.31a	12.4 ± 0.37abcde
	N180	13.42 ± 0.22abcde	169.17 ± 15.19a	149.26 ± 14.64a	90.03 ± 0.69a	26.06 ± 2.32a	12.73 ± 1.84abcd
	N225	14.92 ± 0.08abc	157.47 ± 3.58a	143.17 ± 9.35a	89.84 ± 1.23ab	22.81 ± 1.03a	13.38 ± 0.15ab
	N270	15.63 ± 0.63a	153.25 ± 1.68a	126.33 ± 5.79a	90.2 ± 1.80a	25.62 ± 1.31a	14.62 ± 1.24a
W2	N0	11.17 ± 0.17ef	173.51 ± 4.64a	151.34 ± 3.69a	87.46 ± 0.60ab	24.79 ± 0.27a	10.15 ± 0.56cde
	N90	13.00 ± 0.1bcdef	155.49 ± 8.21a	139.70 ± 8.58a	88.87 ± 0.30ab	24.95 ± 0.42a	12.35 ± 0.64abcde
	N135	13.08 ± 0.33bcdef	157.57 ± 14.77a	140.57 ± 13.27a	90.39 ± 0.10a	26.37 ± 1.81a	12.25 ± 0.57abcde
	N180	13.75 ± 0.75abcd	167.24 ± 2.78a	152.76 ± 0.55a	90.91 ± 1.39a	25.80 ± 1.41a	12.48 ± 0.96abcde
	N225	15.25 ± 1.75ab	158.82 ± 6.17a	139.03 ± 2.09a	89.48 ± 2.80ab	25.27 ± 1.26a	13.66 ± 1.96ab
	N270	15.42 ± 0.22ab	168.67 ± 13.15a	151.45 ± 9.03a	90.70 ± 1.19a	25.17 ± 1.78a	14.09 ± 0.29ab
W3	N0	11.38 ± 0.38def	172.11 ± 20.71a	151.72 ± 17.77a	87.83 ± 0.16ab	24.91 ± 1.17a	10.12 ± 0.21cde
	N90	12.00 ± 0.14def	173.65 ± 6.02a	157.34 ± 5.75a	89.34 ± 0.92ab	24.77 ± 0.62a	12.14 ± 0.50abcde
	N135	12.25 ± 1.25def	161.51 ± 19.22a	142.07 ± 17.95a	89.81 ± 0.28ab	25.84 ± 0.43a	13.04 ± 0.25abcd
	N180	13.50 ± 1.00abcde	157.90 ± 6.20a	144.87 ± 4.53a	90.45 ± 0.11a	25.64 ± 0.55a	13.94 ± 1.03ab
	N225	15.13 ± 1.38abc	150.20 ± 3.10a	135.12 ± 3.60a	90.28 ± 0.15a	26.13 ± 1.23a	12.73 ± 0.93abcd
	N270	14.83 ± 0.17abc	158.57 ± 12.65a	142.03 ± 10.78a	90.68 ± 0.36a	23.78 ± 0.91a	12.40 ± 2.02abcde
W4	N0	10.92 ± 0.46f	175.56 ± 10.32a	160.56 ± 4.12a	84.76 ± 0.99b	23.82 ± 0.87a	10.03 ± 0.33de
	N90	11.50 ± 0.80def	162.18 ± 6.63a	141.94 ± 5.19a	87.61 ± 0.48ab	25.43 ± 0.64a	12.79 ± 0.63abcd
	N135	11.67 ± 0.96def	161.50 ± 3.50a	140.00 ± 5.00a	87.50 ± 2.50ab	26.35 ± 0.12a	13.16 ± 0.26abc
	N180	13.50 ± 0.10abcde	158.26 ± 6.4a	135.56 ± 8.95a	88.14 ± 0.48ab	25.28 ± 0.52a	12.77 ± 0.32abcd
	N225	13.75 ± 1.75abcd	156.76 ± 1.18a	137.43 ± 1.28a	87.49 ± 2.94ab	25.69 ± 0.83a	12.17 ± 0.47abcde
	N270	14.92 ± 0.58abc	156.7 ± 10.71a	140.81 ± 7.58a	88.21 ± 2.41ab	24.00 ± 0.59a	11.78 ± 0.65abcde
N		* *	ns	ns	ns	ns	* *
F W		ns	ns	ns	*	ns	ns
N × W		ns	ns	ns	ns	ns	ns

注:表中不同小写字母是指在0.05水平上差异显著。ns表示差异不显著;\*表示0.05水平上差异显著;\* \*表示0.01水平上差异显著。下同。

图3表明,不同灌溉方式下,氮肥施用量与水稻产量均呈现二次方的关系。随着施氮量的增加,不同水分处理下的水稻产量峰值出现时的施氮量不同。在淹水灌溉处理W1下,施氮量达到225 kg/hm<sup>2</sup>时水稻产量最高,在轻度干湿交替灌溉处理W2下,施氮量达到180 kg/hm<sup>2</sup>时水稻产量最高。在中度干湿交替灌溉处理W3与雨养处理W4下,

施氮量达到135 kg/hm<sup>2</sup>时水稻产量最高。雨养处理水稻产量明显降低。当施氮量达到135 kg/hm<sup>2</sup>之后,继续增加施氮量,不同水分处理对水稻产量影响明显,在水分亏缺条件下增施氮肥则产量明显下降。N270的产量与N135相比,W1灌溉处理增加了8.30%,W2灌溉处理增加了8.70%,W3灌溉处理降低了9.17%,W4灌溉处理降低了12.44%。

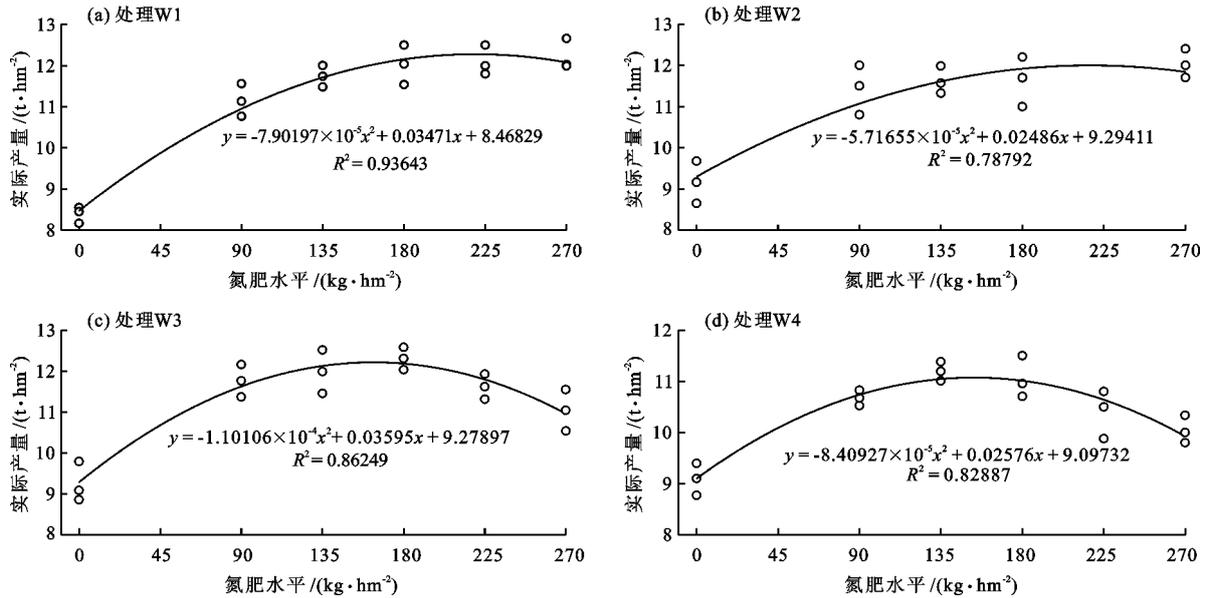


图3 不同水分和施氮处理下水肥耦合对水稻实际产量的影响

图3表明,不施氮处理水稻产量在不同水分梯度下一直处于较低水平。在水分充足时,水稻产量随着氮肥施用量的增加而增加;在水分亏缺时,随着灌水量的减少,高施氮量处理 N225、N270 的产量逐渐减少。表明当水分充足时,高施氮量可以获得较高产量,当水分不足时,高施氮量会降低水稻产量,降低施氮量才可以获得理想的产量。

### 3.3 水肥耦合对水稻氮肥农学利用效率及氮肥偏生产力的影响

表4为不同水分和施氮处理下水肥耦合对水稻氮肥农学利用效率及氮肥偏生产力的影响。

由表4可知,氮肥施用量和水分处理对水稻氮肥农学利用效率均有显著影响,随着施氮量的增加和灌水量的减少,氮肥农学利用效率显著降低。与淹水灌溉处理 W1 相比,轻度干湿交替灌溉处理 W2 的平均氮肥农学利用效率减少了约 14.06%,中度干湿交替灌溉处理 W3 平均氮肥农学利用效率减少了约 27.97%,雨养处理 W4 的平均氮肥农学利用效率减少了约 27.04%。氮肥施用量和水分处理对水稻氮肥偏生产力均有显著影响,随着施氮量的增加氮肥偏生产力显著降低。雨养处理水稻氮肥偏生产力明显低于其他处理,比淹水灌溉降低了约 7.6%。淹水灌溉与轻度干湿交替灌溉、中度干湿交替灌溉相比差异不显著。

### 3.4 水肥耦合对水稻灌溉水利用效率的影响

表5为不同水分和施氮处理下水肥耦合对水稻灌溉水利用效率的影响。

表4 不同水分和施氮处理下水肥耦合对水稻氮肥农学利用效率及氮肥偏生产力的影响

水分处理	施氮处理	氮肥农学利用效率 ANUE / (kg · kg <sup>-1</sup> )	氮肥偏生产力 NFPF / (kg · kg <sup>-1</sup> )
W1	N90	30.75 ± 2.55a	123.96 ± 2.55b
	N135	24.86 ± 1.12bc	87.00 ± 1.12de
	N180	20.22 ± 1.54cd	66.82 ± 1.54f
	N225	16.49 ± 0.93def	53.78 ± 0.93h
	N270	14.22 ± 0.80efg	45.29 ± 0.80ij
W2	N90	25.22 ± 3.87bc	127.04 ± 3.87ab
	N135	18.25 ± 1.43de	86.13 ± 1.43de
	N180	13.72 ± 1.93efg	64.63 ± 1.93fg
	N225	11.87 ± 1.07fg	52.59 ± 1.07h
	N270	10.63 ± 0.75gh	44.57 ± 0.75ij
W3	N90	27.99 ± 2.54ab	130.69 ± 2.54a
	N135	20.32 ± 2.28cd	88.78 ± 2.28d
	N180	17.03 ± 0.88def	68.38 ± 0.88f
	N225	10.56 ± 0.79gh	51.64 ± 0.79h
	N270	6.66 ± 1.08hi	40.90 ± 1.08jk
W4	N90	17.64 ± 0.97de	118.61 ± 0.97c
	N135	15.60 ± 0.80defg	82.92 ± 0.8e
	N180	10.92 ± 1.31gh	61.41 ± 1.31g
	N225	5.80 ± 1.21hi	46.19 ± 1.21i
	N270	3.54 ± 0.57i	37.20 ± 0.57k
	N	**	**
F	W	**	**
	N × W	ns	ns

表5 不同水分和施氮处理下水肥耦合对水稻灌溉水利用效率的影响

水分处理	施氮处理	灌水量/ ( $\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ )	灌溉水利用效率/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	
			WUE	平均值
W1	N0	2759.5	3.04 ± 0.04g	4.09
	N90		4.04 ± 0.08f	
	N135		4.26 ± 0.05f	
	N180		4.36 ± 0.1f	
	N225		4.38 ± 0.08f	
	N270		4.43 ± 0.08f	
W2	N0	2110.5	4.34 ± 0.14f	5.35
	N90		5.42 ± 0.16e	
	N135		5.51 ± 0.09e	
	N180		5.51 ± 0.16e	
	N225		5.61 ± 0.11e	
	N270		5.70 ± 0.10e	
W3	N0	1387.5	6.66 ± 0.20d	8.16
	N90		8.48 ± 0.16ab	
	N135		8.64 ± 0.22ab	
	N180		8.87 ± 0.11a	
	N225		8.37 ± 0.13b	
	N270		7.96 ± 0.21c	
	N		* *	
F	W		* *	
	W × N		*	

由表5可得,灌溉处理对水稻灌溉水利用效率有着极显著的影响,随着灌水量的减少,水稻灌溉水利用效率显著增加。随着氮肥施用量的增加,在淹水灌溉W1与轻度干湿交替灌溉W2处理下,水稻灌溉水利用效率显著增加;在中度干湿交替灌溉W3处理下,呈现先增加后降低的趋势,当施氮量达到180 kg/hm<sup>2</sup>时,灌溉水利用效率达到最大。

## 4 讨论

有研究表明,氮肥水平对水稻株高的影响较大,株高随着施氮量的增大而增大,灌水量对水稻株高影响不显著。高氮处理下低土壤水势会对水稻造成严重的水分胁迫,造成水稻株高的降低<sup>[21]</sup>。有学者认为,随着灌水量的减少,水稻株高会显著降低,水分胁迫对水稻株高影响明显,但是各氮素处理之间差异不显著<sup>[22]</sup>。Li等<sup>[23]</sup>研究发现,与常规灌溉相比,控制灌溉会降低水稻株高。冉文星<sup>[24]</sup>与陈

慧<sup>[25]</sup>的研究认为,小麦株高对氮素的增加产生了积极的响应,但是各氮素处理之间差异并不显著。本试验研究表明,氮肥施用量对水稻株高影响显著,随着氮肥施用量的增加,水稻株高逐渐增高;与淹水灌溉相比,轻度干湿交替灌溉对水稻株高影响不显著。中度干湿交替灌溉显著降低了低施氮量处理的株高,高施氮量一定程度上弥补了灌水量减少对株高的影响;雨养处理显著降低了水稻株高。

有研究表明,在水稻抽穗期后,淹水灌溉模式下叶片SPAD值明显高于间歇灌溉模式下的SPAD值;施氮量对叶片SPAD值的影响体现在水稻的整个生育期。不施氮处理下水稻的叶片SPAD值明显小于施氮处理<sup>[26]</sup>。蒋天琦<sup>[27]</sup>研究表明水稻叶片SPAD值随着生育期先增加后减小,乳熟期叶片开始黄化,SPAD值显著降低;同一时期相同灌水处理水稻叶片的SPAD值随着施氮量的增加而增加;同一时期相同施氮量不同灌水处理水稻叶片的SPAD值在分蘖期和乳熟期没有明显差异,在拔节期和开花期控水处理水稻叶片SPAD值高于常规处理<sup>[27]</sup>。翟晶<sup>[21]</sup>研究表明全生育期叶片SPAD值呈先升后降的趋势,但是高氮肥会使水稻生育后期SPAD值下降缓慢,贪青严重。本试验研究表明,增加氮肥施用量可以提高水稻叶片SPAD值;淹水灌溉处理使高氮处理水稻成熟期贪青晚熟严重,干湿交替灌溉处理可显著改善高氮处理水稻成熟期的贪青晚熟现象。

有学者研究发现,适度的干湿交替灌溉可以促进水稻生长,有利于水稻生理过程,从而获得较高的水稻产量和水分利用效率<sup>[28]</sup>。有学者研究了当15 cm深度土壤落干至10、20、50和80 kPa土壤水势时的干湿交替灌溉对水稻产量的影响,发现在10 kPa时AWD对水稻的产量的影响与淹水灌溉相似,其他AWD处理的产量显著低于淹水灌溉,因而采用10 kPa的AWD和180 kg/hm<sup>2</sup>的氮肥施用量将保持较高的水稻产量,但是当水和氮肥成本昂贵时,也可以采用20 kPa的AWD<sup>[29]</sup>。干湿交替灌溉制度要与田间管理、氮肥施用量和气候相互配合才能获得最佳的水稻产量<sup>[30]</sup>。Liu等<sup>[12]</sup>研究发现,使用干湿交替灌溉时,水稻产量随着灌水量的增加而减少。有学者则认为水稻达到最高产量的最佳氮素施用量为151 kg/hm<sup>2</sup><sup>[31]</sup>。Djaman等<sup>[32]</sup>在同一地点对4个水稻品种研究发现,水稻产量与氮肥施用量的关系呈现出二次函数关系,其R<sup>2</sup>最高达到0.99。Harrell等<sup>[33]</sup>报道了水稻产量对氮素施用量低于150 kg/hm<sup>2</sup>时呈现线性关系,以及当氮素施用量大于

150 kg/hm<sup>2</sup> 时水稻产量趋于平稳。本试验研究表明,施氮量的增加显著增加了有效穗数,雨养处理与不施氮处理水稻结实率明显降低。不同水分处理下的水稻产量峰值出现时的施氮量不同,当施氮量达到 135 kg/hm<sup>2</sup> 之后,继续增加施氮量,不同水分处理对水稻产量影响显著,在水分亏缺条件下增施氮肥则产量明显下降。当水分充足时,高施氮量可以获得较高产量,当水分不足时,高施氮量会降低水稻产量,降低施氮量才可以获得理想的产量。

对于干湿交替灌溉对水稻氮肥利用效率影响的研究不多,且成果有一定争议。一些学者指出,干湿交替灌溉能够促进土壤硝化和反硝化作用,提高 N<sub>2</sub>O 的排放量,从而减少植株中氮的积累,进而减少氮肥的利用效率<sup>[34]</sup>。有学者研究发现,干湿交替灌溉条件下,水稻氮肥农学利用效率在 2.0 ~ 17.9 kg/kg 之间变化;在淹水灌溉条件下,氮肥农学利用效率为 13.1 kg/kg<sup>[35]</sup>。农民在水稻生产中施用高达 180 ~ 240 kg/hm<sup>2</sup> 的氮肥是导致氮肥农学利用效率过低的原因<sup>[36]</sup>。有学者认为,干湿交替灌溉制度是改善水稻氮肥利用效率的有效途径,干湿交替灌溉中的干燥和补水循环会通过改变土壤水分与空气的平衡而影响土壤中的硝化、反硝化、矿化、渗滤和淋溶的生化 and 物理过程,进而影响水稻对氮素营养的利用。有学者认为,在轻度干湿交替灌溉模式下,水稻植株对氮的吸收量、单位吸氮的生产力(产量/氮吸收量)和氮肥偏生产力(产量/施氮量)均明显高于淹水灌溉<sup>[12,15]</sup>。Jiang 等<sup>[37]</sup> 研究发现杂交水稻的平均氮肥偏生产力比常规水稻高约 9%。有学者指出,不同品种水稻氮肥偏生产力变化范围为 65.7 ~ 414.0 kg/kg<sup>[38]</sup>。Liu 等<sup>[12]</sup> 研究发现,与淹水灌溉相比,由于穗粒数、实粒数和结实率的增加,干湿交替灌溉可提高水稻氮肥偏生产力。本试验研究表明,随着施氮量的增加,水稻氮肥农学利用效率与氮肥偏生产力显著降低。雨养处理水稻氮肥农学利用效率与氮肥偏生产力显著低于其他处理。与淹水灌溉相比,干湿交替灌溉处理没有降低氮肥偏生产力,但显著降低了氮肥农学利用效率。

## 5 结 论

(1) 在不同灌溉处理下,增加氮肥施用量,均能够显著增加水稻株高和叶片 SPAD 值;中度干湿交替灌溉显著降低了低施氮量处理的株高,高施氮量在一定程度上弥补了灌水量减少对株高的影响。轻度与中度干湿交替灌溉处理下,高施氮量处理成熟

期水稻叶片的 SPAD 值显著降低,从而改善了其贪青晚熟现象。

(2) 在不同灌溉处理下,随着氮肥施用量的增加,水稻有效穗数呈现逐渐增加的趋势。雨养处理会导致水稻实粒数与结实率显著降低。不同灌溉处理下,氮肥施用量与水稻产量均呈现二次方的关系,不同水分处理下的水稻产量峰值出现时的施氮量不同,当施氮量达到 135 kg/hm<sup>2</sup> 之后,继续增加施氮量,不同水分处理对水稻产量影响显著,在水分亏缺条件下继续增施氮肥会导致产量明显下降。

(3) 施氮量的多少应该与灌水量相匹配,轻度干湿交替灌溉条件下,施用 180 kg/hm<sup>2</sup> 氮肥会达到较好的水肥耦合模式,可以在减少灌水量的条件下,获得了较高的产量,并且保持较高的氮肥农学利用效率和氮肥偏生产力。

## 参考文献:

- [1] ULLAH H, DATTA A, SHRESTHA S, et al. The effects of cultivation methods and water regimes on root systems of drought-tolerant (RD6) and drought-sensitive (RD10) rice varieties of Thailand [J]. Archives of Agronomy and Soil Science, 2017, 63(9):1198-1209.
- [2] 周晚来, 王朝云, 易永健, 等. 我国水稻机插秧发展现状[J]. 中国稻米, 2018, 24(5):11-15.
- [3] SHEN Jianbo, CUI Zhenling, MIAO Yuxin, et al. Transforming agriculture in China: From solely high yield to both high yield and high resource use efficiency [J]. Global Food Security, 2013, 2(1):1-8.
- [4] CHAUHAN B S, MAHAJAN G, SARDANA V, et al. Productivity and sustainability of the rice-wheat cropping system in the Indo-Gangetic Plains of the Indian subcontinent: Problems, opportunities, and strategies [J]. Advances in Agronomy, 2012, 117:315-369.
- [5] 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.
- [6] PENG Shaobing, BURESH R J, HUANG Jianliang, et al. Improving nitrogen fertilization in rice by sitespecific N management: A review [J]. Agronomy for Sustainable Development, 2010, 30(3):649-656.
- [7] ZHANG Fusuo, CHEN Xinping, PETER V. Chinese agriculture: An experiment for the world [J]. Nature, 2013, 497:33-35.
- [8] ULLAH H, SANTIAGO - ARENAS R, FERDOUS Z, et al. Improving water use efficiency, nitrogen use efficiency, and radiation use efficiency in field crops under drought stress: A review [J]. Advances in Agronomy, 2019, 156:

- 109 – 157.
- [9] CHEN Xinping, CUI Zhenling, FAN Mingsheng, et al. Producing more grain with lower environmental costs [J]. *Nature*, 2014, 514:486 – 489.
- [10] MACLEAN J, HARDY B, HETTEL G. Rice Almanac: Source book for one of the most important economic activities on earth [M]. Philippines:IRRI, 2013.
- [11] LAMPAYAN R M, SAMOY – PASCUAL K C, SIBAYAN E B, et al. Effects of alternate wetting and drying (AWD) threshold level and plant seedling age on crop performance, water input, and water productivity of transplanted rice in Central Luzon, Philippines [J]. *Paddy and Water Environment*, 2015, 13:215 – 227.
- [12] 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.
- [13] MANEPIITAK S, ULLAH H, PAOTHONG K, et al. Effect of water and rice straw management practices on yield and water productivity of irrigated lowland rice in the Central Plain of Thailand [J]. *Agricultural Water Management*, 2019, 211:89 – 97.
- [14] ULLAH H, DATTA A. Root system response of selected lowland Thai rice varieties as affected by cultivation method and potassium rate under alternate wetting and drying irrigation [J]. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 2018, 64(14):2045 – 2059.
- [15] WANG Zhiqin, ZHANG Weiyang, BEEBOUT S S, et al. Grain yield, water and nitrogen use efficiencies of rice as influenced by irrigation regimes and their interaction with nitrogen rates [J]. *Field Crops Research*, 2016, 193:54 – 69.
- [16] LAMPAYAN R M, REJESUS R M, SINGLETON G R, et al. Adoption and economics of alternate wetting and drying water management for irrigated lowland rice [J]. *Field Crops Research*, 2015, 170:95 – 108.
- [17] DE VRIES M E, RODENBURG J, BADO B V, et al. Rice production with less irrigation water is possible in a Sahelian environment [J]. *Field Crops Research*, 2010, 116(1 – 2):154 – 164.
- [18] REJESUS R M, PALIS F G, RODRIGUEZ D G P, et al. Impact of the alternate wetting and drying (AWD) water-saving irrigation technique: evidence from rice producers in the Philippines [J]. *Food Policy*, 2011, 36(2):280 – 288.
- [19] DASS A, CHANDRA S, CHOUDHARY A K, et al. Influence of field re-ponding pattern and plant spacing on rice root – shoot characteristics, yield, and water productivity of two modern cultivars under SRI management in Indian Mollisols [J]. *Paddy and Water Environment*, 2016, 14(1):45 – 59.
- [20] SUN Yongjian, SUN Yunayuan, LI Xuyi, et al. Effects of water – nitrogen interaction on absorption, translocation and distribution of nitrogen, phosphorus, and potassium in rice [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2010, 36(4):655 – 664.
- [21] 翟晶. 水肥互作对水稻生长, 产量及品质的影响 [D]. 武汉:华中农业大学, 2009.
- [22] 冯延江. 水氮互作对寒地粳稻生长及养分吸收影响的研究 [D]. 沈阳:沈阳农业大学, 2017.
- [23] LI Yuanyuan, SHAO Xiaohou, LI Daoxi, et al. Effects of water and nitrogen coupling on growth, physiology and yield of rice [J]. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 2019, 12(3):60 – 66.
- [24] 冉文星. 滴灌小麦水氮耦合的生理调控效应研究 [D]. 阿拉尔:塔里木大学, 2016.
- [25] 陈慧. 南疆滴灌冬小麦高产高效水氮耦合效应的研究 [D]. 阿拉尔:塔里木大学, 2018.
- [26] 朱寒, 时元智, 洪大林, 等. 水肥调控对水稻叶片 SPAD 值与产量的影响 [J]. *中国农村水利水电*, 2019(11):50 – 51 + 65.
- [27] 蒋天琦. 不同灌水方法与施氮量对水稻养分吸收及产量的影响 [D]. 大庆:黑龙江八一农垦大学, 2016.
- [28] ZHANG Hao, XUE Yaguang, WANG Zhiqin, et al. An alternate wetting and moderate soil drying regime improves root and shoot growth in rice [J]. *Crop Science*, 2009, 49(6):2246 – 2260.
- [29] CABANGON R J, CASTILLO E G, TUONG T P. Chlorophyll meter-based nitrogen management of rice grown under alternate wetting and drying irrigation [J]. *Field Crops Research*, 2011, 121(1):136 – 146.
- [30] BUENO C S, BUCOURT M, KOBAYASHI N, et al. Water productivity of contrasting rice genotypes grown under water-saving conditions in the tropics and investigation of morphological traits for adaptation [J]. *Agricultural Water Management*, 2010, 98(2):241 – 250.
- [31] SAICHUK J, HARREL D, FONTENOT K, et al. Rice varieties and management tips [M]. Louisiana State University Agricultural Center:2011.
- [32] DJAMAN K, BADO B V, MEL V C. Effect of nitrogen fertilizer on yield and nitrogen use efficiency of four aromatic rice varieties [J]. *Emirates Journal of Food & Agriculture (EJFA)*, 2016, 28(2):126 – 135.

- [12] SEZEN S M, YAZAR A, CANBOLAT M, et al. Effect of drip irrigation management on yield and quality of field grown green beans [J]. *Agricultural Water Management*, 2005, 71(3):243–255.
- [13] SENSOY S, ERTEK A, GEDIK I, et al. Irrigation frequency and amount affect yield and quality of field-grown melon (*Cucumis melo L.*) [J]. *Agricultural Water Management*, 2007, 88(1–3):269–274.
- [14] EL-HENDAWY S E, EL-LATTIEF E A A, AHMED M S, et al. Irrigation rate and plant density effects on yield and water use efficiency of drip-irrigated corn [J]. *Agricultural Water Management*, 2008, 95(7):836–844.
- [15] WANG Fengxin, KANG Yaohu, LIU Shiping. Effects of drip irrigation frequency on soil wetting pattern and potato growth in North China Plain [J]. *Agricultural Water Management*, 2006, 79(3):248–264.
- [16] 马丽娟,李明思,李东伟,等.小滴头流量下灌水频率对膜下土壤湿润区的影响[J].*灌溉排水学报*,2011,30(6):100–102+114.
- [17] 窦超银,孟维忠,延玮辰,等.大棚膜下滴灌黄瓜结果期适宜灌溉频率试验研究[J].*节水灌溉*,2017(5):52–54.
- [18] 王英,张富仓,王海东,等.滴灌频率和灌水量对榆林沙土马铃薯产量、品质和水分利用效率的影响[J].*应用生态学报*,2019,30(12):4159–4168.
- [19] 董玉云,王宝成,贾丽华,等.膜孔灌夏玉米耗水特性和水分生产效率试验研究[J].*干旱地区农业研究*,2014,32(5):7–11+66.
- [20] 张乐,尹娟,王怀博,等.不同灌水处理对玉米生长特性及水分利用效率的影响[J].*灌溉排水学报*,2018,37(2):24–29.
- [21] 田建柯,张富仓,强生才,等.灌水量及灌水频率对玉米生长和水分利用的影响[J].*排灌机械工程学报*,2016,34(9):815–822.
- [22] 朱文新,孙继颖,高聚林,等.深松和灌水次数对春玉米耗水特性及产量的影响[J].*玉米科学*,2016,24(5):75–82.
- [23] 黄兴法,张洲笔,黄泽军.西北地区玉米膜下滴灌技术参数优化——灌水频率及滴灌带间距[J].*农业工程*,2019,9(8):72–78.
- [24] 孔德杰,张源沛,郑国保,等.不同灌水次数对日光温室辣椒土壤水分动态变化规律的影响[J].*节水灌溉*,2011(6):14–15+19.
- [25] 窦超银,孟维忠,佟威,等.风沙土玉米膜下滴灌适宜灌溉频率试验研究[J].*灌溉排水学报*,2016,35(2):13–17+49.
- [26] 徐小波,周和平,王忠,等.干旱灌区有效降雨量利用率研究[J].*节水灌溉*,2010(12):44–46+50.
- [27] 程晓娜.灌水频率和滴头流量对西北旱区制种玉米生长及耗水特性的影响[D].北京:中国农业大学,2018.

(上接第207页)

- [33] HARRELL D L, TUBAÑA B S, LOFTON J, et al. Rice response to nitrogen fertilization under stale seedbed and conventional tillage systems [J]. *Agronomy Journal*, 2011, 103(2):494–500.
- [34] WANG Jinyang, JIA Junxiang, XIONG Zhengqin, et al. Water regime – nitrogen fertilizer – straw incorporation interaction: Field study on nitrous oxide emissions from a rice agroecosystem in Nanjing, China [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2011, 141(3–4):437–446.
- [35] ZHAO Limei, WU Lianghuan, LI Yongshan, et al. Influence of the system of rice intensification on rice yield and nitrogen and water use efficiency with different N application rates [J]. *Experimental Agriculture*, 2009, 45(3):275–286.
- [36] YE Mao, SONG Yuanyuan, LONG Jun, et al. Priming of jasmonate – mediated antiherbivore defense responses in rice by silicon [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2013, 110(38):E3631–E3639.
- [37] JIANG Peng, XIE Xiaobing, HUANG Min, et al. Characterizing N uptake and use efficiency in rice as influenced by environments [J]. *Plant Production Science*, 2016, 19(1):96–104.
- [38] ESPIRITU A E, JAVIER E F. Nitrogen use efficiency of different organic fertilizers applied in paddy rice [J]. *Philippine Journal of Crop Science (Philippines)*, 2014, 38(S1):81–82.