

# 寒地黑土区水稻植株干物质积累对耗水过程的响应

刘慧<sup>1,2</sup> 魏永霞<sup>2,3</sup> 汝晨<sup>3</sup>

(1. 东北农业大学理学院, 哈尔滨 150030; 2. 农业部农业水资源高效利用重点实验室, 哈尔滨 150030;

3. 东北农业大学水利与土木工程学院, 哈尔滨 150030)

**摘要:** 为了探究寒地黑土区水稻植株干物质积累对耗水过程的响应规律,于2017年在黑龙江省水稻灌溉试验站的蒸渗仪内进行了水稻耗水试验。采用 $U_7(7^6)$ 均匀试验设计,深入解析了各生育阶段耗水量对水稻干物质质量及干物质积累过程的影响。结果表明,各生育阶段耗水量对水稻干物质积累的影响决定系数由大到小依次为:抽穗开花期、拔节孕穗期与抽穗开花期的耦合效应、拔节孕穗期、抽穗开花期与乳熟期的耦合效应、分蘖中期与抽穗开花期的耦合效应、分蘖中期与拔节孕穗期的耦合效应、分蘖中期。在水稻营养生长阶段,各阶段耗水量通过影响干物质积累进入快速增长的时间和最快增长速率,进而间接影响干物质积累量,分蘖中期耗水量每增加1 mm,将提前0.459 d进入干物质积累快速增长阶段;拔节孕穗期耗水量每增加1 mm,干物质积累的最快增长速率提高0.0113 g/d。进入生殖生长阶段,各阶段耗水量对干物质积累量的直接影响大于间接影响。各生育阶段耗水量对水稻产量和干物质质量的影响排序相同,由大到小依次为:抽穗开花期、拔节孕穗期、分蘖中期、乳熟期、分蘖前期、分蘖后期,拔节孕穗期、抽穗开花期耗水量与水稻经济系数呈显著负相关。研究结果可为寒地黑土区水稻合理制定灌溉制度提供理论依据。

**关键词:** 水稻; 寒地黑土区; 耗水量; 干物质积累; 通径分析; Logistic 生长方程

**中图分类号:** S365 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2018)07-0195-10

## Response of Rice Dry Matter Accumulation to Water Consumption Process in Cold Black Soil Region

LIU Hui<sup>1,2</sup> WEI Yongxia<sup>2,3</sup> RU Chen<sup>3</sup>

(1. School of Science, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China

2. Key Laboratory of High Efficiency Use of Agricultural Water Resources, Ministry of Agriculture, Harbin 150030, China

3. School of Water Conservancy and Civil Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

**Abstract:** In order to explore the response of rice dry matter accumulation to the water consumption process in the cold black soil region, the rice water consumption test was performed by evapotranspiration in the rice irrigation test station in Heilongjiang Province in 2017. The  $U_7(7^6)$  uniform test was conducted to analyze the influence of water consumption in each growth stage on rice dry matter quality and dry matter accumulation process deeply. The results showed that the order (from large to small) of the determinant coefficient of water consumption in each stage on rice dry matter quality was bloom, coupling effect of jointing and booting with bloom, jointing and booting, coupling effect of bloom with milk-ripe, coupling effect of filled tillering with bloom, coupling effect of filled tillering with jointing and booting, and filled tillering. During the rice vegetative growth stages, through the time the dry matter accumulation entered into the rapid growth stage and the maximum of growth rate, the water consumption affected the dry matter accumulation quality indirectly. Each additional millimeter of water consumption in filled tillering would shorten the time the dry matter accumulation entered into the rapid growth stage by 0.459 d; while each additional millimeter of water consumption in jointing and booting would speed up

收稿日期: 2018-01-16 修回日期: 2018-03-21

**基金项目:** 国家重点研发计划项目(2016YFC0400101)、黑龙江省博士后科学基金项目(LBH-Z17017)和农业部农业水资源高效利用重点实验室开放项目(2017009)

**作者简介:** 刘慧(1981—),女,副教授,博士,主要从事水土保持理论与技术研究,E-mail: xiaolaida@163.com

**通信作者:** 魏永霞(1961—),女,教授,博士生导师,主要从事农业水土资源高效利用与保护研究,E-mail: wyx0915@163.com

the dry matter accumulation in 0.0113 g/d. During the reproductive growth stages, the direct effect of water consumption on the dry matter quality was greater than that of indirect effect. The effects of water consumption in each stage on rice yield and dry matter quality were the same, and the order from large to small was bloom, jointing and booting, filled tillering, milk-ripe, early tillering, and late tillering, while the water consumptions in jointing and booting stage and in bloom stage were negatively correlated with the economic coefficient. The result could provide theoretical basis for making the irrigation system in cold black soil region.

**Key words:** rice; cold black soil region; water consumption; dry matter accumulation; path analysis; Logistic growth equation

## 0 引言

我国是世界上水稻播种面积第二、稻谷产量第一的国家,2016年度水稻播种面积、总产量、单产水平比2004年度分别增长6.28%、15.55%和8.72%。黑龙江省是我国重要的粮食产区,得天独厚的黑土资源为水稻生长提供了充足的养分。然而也应看到,水稻是“喜水作物”,传统的建立水层的淹水灌溉模式使得占黑龙江省粮食产量40%的水稻生产消耗着全省96%的农业用水,占全省社会用水总量的70%<sup>[1]</sup>,这对于地处寒地黑土、半干旱旱区的黑龙江省水稻灌区是一个严峻的考验。明晰水稻耗水规律,探明水稻耗水过程对产量形成的影响,实现节水增产,对于保障本省乃至国家粮食安全和农业可持续发展具有极其重要的现实意义。

为了缓解水稻耗水量高与灌溉可用水量日趋紧张的矛盾,学者们展开了一系列水稻节水灌溉技术研究,逐步形成了控制灌溉、间歇灌溉、浅湿灌溉等节水灌溉模式<sup>[2-3]</sup>。这些灌溉方式比传统淹水灌溉可节约用水32%左右,但水稻产量并没有显著降低<sup>[4]</sup>,表明水稻对水分亏缺具有一定的适应性和补偿性,在水稻某些生育阶段进行适度的水分亏缺,可在保证产量的前提下实现节约用水,提高水稻水分利用效率。因此,有必要探究水稻产量形成对耗水过程的响应规律,明确水稻耗水关键阶段,并据此制定灌溉制度,以达到节水增产的目的。目前对于产量形成与耗水过程的响应关系的研究主要是借助水分生产函数研究产量与各生育阶段耗水量的函数关系<sup>[1,5-10]</sup>,得到水稻产量对各生育阶段耗水量的敏感指数,并据此制定灌溉制度<sup>[11]</sup>。然而,水稻产量的形成是一个连续变化的过程,不同生育阶段的耗水量对水稻产量的形成也应具有持续的影响,即单一阶段的耗水量不仅直接影响该阶段水稻的生长发育,同时又会对后续阶段耗水过程产生影响,进而间接影响产量的形成,而水分生产函数和敏感指数无法描述这一影响机制。水稻产量形成的过程实质上是干物质不断积累和分配的过程<sup>[3]</sup>,且水稻产量与

成熟期干物质质量呈显著正相关<sup>[12]</sup>,增加干物质质量能有效提高产量。目前对干物质积累的研究,多集中在干物质积累与产量的关系<sup>[12-13]</sup>,或者采用Logistic<sup>[13-16]</sup>、Richards<sup>[17-19]</sup>等经验模型模拟作物干物质积累过程,而针对耗水对干物质积累过程及干物质质量的影响研究鲜有报道。本研究将耗水因子引入水稻干物质积累的动态过程中,采用均匀试验设计,各处理在不同生育阶段采用不同控水标准,解析水稻干物质质量及干物质积累过程对耗水过程的响应,以期为寒地水稻合理制定灌溉制度、实现节水高产提供理论和技术支撑。

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验区概况

试验于2017年在位于黑龙江省绥化市庆安县和平灌区的黑龙江省水稻灌溉试验站(46°41'N、127°20'E,海拔高度200m)进行。该区属寒温带大陆性季风气候,夏季温热多雨,冬季寒冷干燥。年平均日照时数为2599h,年平均气温1.69℃,无霜期128d,年平均降雨量577mm,主要集中在7—9月。试验区土壤类型为白浆土型水稻土<sup>[2]</sup>,速效氮(N)质量比154.36mg/kg,速效磷(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)质量比为25.33mg/kg,速效钾(K<sub>2</sub>O)质量比157.25mg/kg;土壤容重1.01g/cm<sup>3</sup>,孔隙度61.8%,pH值6.4。

### 1.2 试验设计

试验在HSY.XHZ-1型自动称重式蒸渗仪<sup>[20]</sup>(测筒高1.5m,直径1.13m,表面积1m<sup>2</sup>,测量精度100g)内进行,同时配有移动式遮雨棚,以避免天然降雨的干扰。在蒸渗仪外侧种植同一品种的水稻作为保护田。供试水稻品种为“庆龙稻3号”,于2017年5月18日插秧,9月20日收获,全生育期126d。插秧规格为行株距22.5cm×12.5cm,共24穴,每穴5株。采用U<sub>7</sub>(7<sup>6</sup>)均匀设计,以水稻分蘖前期、分蘖中期、分蘖后期、拔节孕穗期、抽穗开花期、乳熟期6个关键生育阶段的稻田水分作为试验因素,在适宜灌溉水层上限与重度亏缺之间设置6个水分(田面水层深度或土壤含水量)调亏水平,以正常灌溉

适宜水分条件(CK)为对照,共7个处理,3次重复,共计21个蒸渗仪。各处理在水稻不同生育阶段的水分控制标准如表1所示。各处理采用相同的施肥管理,全生育期内施氮肥110 kg/hm<sup>2</sup>,按基肥(5月15日):分蘖肥(6月10日):促花肥(7月17日):

保花肥(7月24日)比例4.5:2:1.5:2施入;P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 45 kg/hm<sup>2</sup>,全部用于基肥一次性施入;K<sub>2</sub>O 80 kg/hm<sup>2</sup>,按基肥:8.5叶龄时期(7月9日)比例1:1施入。除草、农药等其他农艺措施均按当地高产优质模式统一管理。

表1 各处理在水稻不同生育阶段的水分控制标准  
Tab.1 Water control standards in each stage for each treatment

处理	分蘖前期	分蘖中期	分蘖后期	拔节孕穗期	抽穗开花期	乳熟期
处理1	60%~100%	70%~100%	80%~100%	90%~100%	0~30 mm	20~30 mm
处理2	70%~100%	90%~100%	20~30 mm	60%~100%	80%~100%	0~30 mm
处理3	80%~100%	20~30 mm	70%~100%	0~30 mm	60%~100%	90%~100%
处理4	90%~100%	60%~100%	0~30 mm	70%~100%	20~30 mm	80%~100%
处理5	0~30 mm	80%~100%	60%~100%	20~30 mm	90%~100%	70%~100%
处理6	20~30 mm	0~30 mm	90%~100%	80%~100%	70%~100%	60%~100%
CK	0~30 mm					

注:表中“%”为占土壤饱和含水量的百分比,“mm”为土层深度。

### 1.3 观测指标与方法

#### 1.3.1 灌水量

从分蘖前期开始控制水分,每日08:00采用便携式土壤水分速测仪测定土壤含水量(无水层处理),或采用水尺观测土层深度(有水层处理),当土壤含水量或土层深度达到各处理该生育阶段的灌水下限时,人工灌水至灌水上限,灌水量采用水表计量,并记录灌水日期和水表读数。

#### 1.3.2 阶段耗水量

水稻阶段耗水量采用水量平衡方程计算。由于试验场配备有移动式防雨棚,且试验所用蒸渗仪的测筒下端有底密封,故水稻生育期内降水量、地表径流量、地下水补给量可忽略不计,则水量平衡方程简化为

$$ET_i = I_i + \Delta W_i \quad (1)$$

式中  $ET_i$ ——阶段耗水量,mm

$I_i$ ——阶段灌水量,mm

$\Delta W_i$ ——时段内土壤储水量变化量,mm

$i$ ——生育阶段, $i$ 为1、2、3、4、5、6分别代表分蘖前期、分蘖中期、分蘖后期、拔节孕穗期、抽穗开花期和乳熟期

#### 1.3.3 水稻植株干质量

分别于分蘖前期、分蘖中期、分蘖后期、拔节孕穗期、抽穗开花期、乳熟期、成熟期进行取样,每个处理取3穴代表性植株去根后获得完整冠部,按茎鞘、叶、穗分开擦拭表面灰尘后装袋,105℃杀青30 min,80℃干燥至恒质量,用精度0.01 g的电子天平称取各部分干质量。

#### 1.3.4 水稻产量及经济系数

在水稻成熟期于每个蒸渗仪内选取10穴代表

性水稻计产,单打单收计算每穴实际产量,根据每公顷穴数计算单位面积产量。经济系数为成熟期的籽粒干质量除以植株地上部分干物质量。

### 1.4 相关指标计算方法

#### 1.4.1 水稻干物质积累特征参数

采用Logistic生长方程拟合水稻干物质积累曲线,其函数形式为

$$y = \frac{K}{1 + ae^{-bt}} \quad (2)$$

式中  $y$ ——水稻植株干物质量,g/穴

$t$ ——播种后时间,d

$K$ 、 $a$ 、 $b$ ——大于0的待定参数

当 $t \rightarrow \infty$ 时有 $y \rightarrow K$ ,即参数 $K$ 为干物质积累的理论最大值。通过对式(2)计算一阶、二阶和三阶导数可以得到快速生长起始时间( $T_1$ ,d)、快速生长结束时间( $T_2$ ,d)、达到最快增长速率的时间( $T_0$ ,d)以及最快增长速率( $V_{max}$ ,g/d),各参数的计算公式分别为

$$T_1 = \frac{1}{b} \ln(a(2 - \sqrt{3})) \quad (3)$$

$$T_2 = \frac{1}{b} \ln(a(2 + \sqrt{3})) \quad (4)$$

$$T_0 = \frac{1}{b} \ln a \quad (5)$$

$$V_{max} = \frac{Kb}{4} \quad (6)$$

DARROCH等<sup>[21]</sup>认为,当干物质达到最大生物量的95%时,作物停止生长,据此计算各处理水稻的生育时间( $T$ ,d)为

$$T = \frac{1}{b} \ln(19a) \quad (7)$$

#### 1.4.2 敏感指数

水稻干物质积累特征参数随耗水量的敏感指数



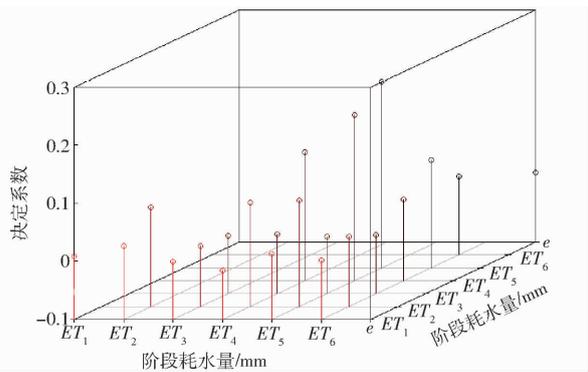


图 2 各生育阶段耗水量对水稻干物质质量的决定系数

Fig. 2 Determination coefficient of evapotranspiration in each stage on rice dry matter quality

## 2.2 耗水过程对水稻干物质积累过程主要特征参数的影响

### 2.2.1 不同耗水过程条件下水稻干物质积累过程拟合

不同阶段耗水量的差异基本不影响水稻干物质积累过程的变化趋势,随着生育时间的推进,各处理干物质积累均单调递增,且呈现出“慢-快-慢”的“S”型曲线变化规律(图 3)。采用 Logistic 生长曲线模拟各处理干物质积累随生育时间的变化规律,拟合参数及模型有效性如表 3 所示。各处理的模型一致性指数和效率系数均接近 1,表明采用 Logistic 生长函数模拟干物质积累过程效果十分理想;各处理模拟值与实测值相关系数均在 0.98 以上,表明模拟值与实测值线性相关程度极高。同时,模型的模拟结果与实测值的吻合度较高,也验证了试验结果的可靠性。

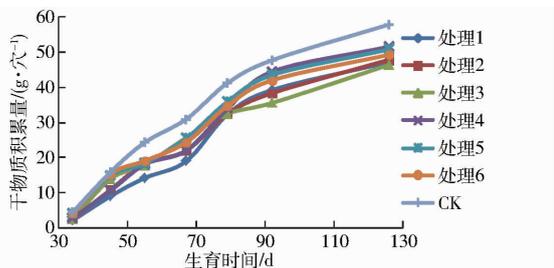


图 3 干物质积累随生育时间的变化曲线

Fig. 3 Changing curves of dry matter accumulation with growth time

计算结果显示,不同耗水过程条件下各处理水稻干物质积累的理论最大值为 46.46 ~ 58.52 g/穴,其中以全生育期内均有水层的 CK 处理为最大,其他各处理由于在不同生育阶段有不同程度的控水,导致其干物质积累理论最大值分别较 CK 低 8.42% ~ 20.61%,处理 3 由于在对水分最为敏感的抽穗开花期严重亏水,导致其干物质积累理论最大值位于所有处理的最末位。

表 3 不同处理 Logistic 生长方程参数估计及模型有效性

Tab. 3 Parameter estimation and effectiveness of Logistic model for each treatment

处理	参数估计			模型有效性		
	K	a	b	AI	EF	R
处理 1	48.49	110.90	0.066 9	0.997 6	0.990 7	0.995 3
处理 2	49.03	54.19	0.058 5	0.995 9	0.984 0	0.992 2
处理 3	46.46	38.38	0.056 5	0.992 6	0.972 0	0.986 4
处理 4	53.59	78.61	0.062 7	0.996 8	0.987 3	0.993 7
处理 5	52.51	47.37	0.058 4	0.997 1	0.988 7	0.994 4
处理 6	51.13	39.50	0.055 9	0.995 5	0.982 6	0.991 3
CK	58.52	42.97	0.058 8	0.996 4	0.986 0	0.993 3

### 2.2.2 干物质积累主要特征参数及其敏感指数

利用式(3)~(7)分别计算各处理干物质积累过程的主要特征参数,结果如表 4 所示。不同耗水过程对干物质积累过程的影响表现为各处理干物质积累快速增长的起止时间、干物质积累最大增长速率及达到最大增长速率的时间,以及水稻生长周期的差异。处理 2、处理 3、处理 5、处理 6 和 CK 于分蘖中期进入干物质积累快速增长阶段,而处理 1 和处理 4 由于在分蘖前期和分蘖中期控水标准较低,导致水稻耗水量低于其他处理,影响了植株体发育,两个处理于分蘖后期进入干物质积累快速增长阶段,较最早进入干物质积累快速增长阶段的处理 3 分别延迟 9.45 d 和 7.36 d。各处理均于乳熟期结束干物质积累快速增长阶段,其中以处理 2 结束最晚,较其他处理晚 0.15 ~ 4.41 d。各处理均于拔节孕穗期与抽穗开花期的过渡阶段达到干物质积累最快增长速度,但不同的耗水过程导致各处理最快增长速度差异显著,变异系数达到 9.74%。不同耗水过程条件下水稻生育周期在 114 ~ 119 d,其中 CK 与处理 1 约为 114 d,处理 3、处理 4、处理 5 约为 117 d,处理 2 和处理 6 约为 119 d,变异系数 1.51%。

表 4 不同处理干物质积累过程主要特征参数

Tab. 4 Characteristic parameters of dry matter accumulation for each treatment

处理	$T_0/d$	$V_{max}/(g \cdot d^{-1})$	$T_1/d$	$T_2/d$	$T/d$
处理 1	70.38	0.811 0	50.70	90.07	114.40
处理 2	68.25	0.717 1	45.74	90.76	118.58
处理 3	64.56	0.656 2	41.25	87.87	116.67
处理 4	69.61	0.840 0	48.61	90.61	116.57
处理 5	66.06	0.766 6	43.51	88.61	116.48
处理 6	65.77	0.714 5	42.21	89.32	118.44
CK	63.95	0.860 2	41.56	86.35	114.03

图 4 为不同处理干物质积累主要特征参数对耗水量的敏感指数,敏感指数的绝对值代表单位耗水

量的变化引起的特征参数的变化量;敏感指数的符号代表特征参数的变化方向,正号表示随着耗水量的增加该特征参数将增大,负号则表示减小。计算结果显示,各特征参数对耗水量的敏感程度由大到小依次为: $V_{\max}$ 、 $T_1$ 、 $T_0$ 、 $T_2$ 、 $T$ ,其中 $V_{\max}$ 的敏感指数为正,耗水量每增加1个单位,干物质最快增长速率将提高0.9545个单位;其余各特征参数的敏感指数均为负,耗水量每增加1个单位,干物质积累快速增长阶段的起止时间、达到最快增长速率的时间以及水稻生长周期将分别提前0.5629、0.2492、0.3273、0.1753个单位。

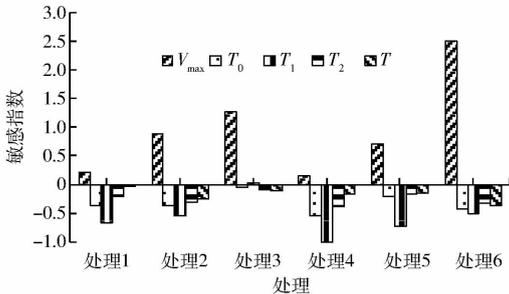


图4 特征参数的敏感指数

Fig. 4 Sensitivity coefficients of characteristic parameters

### 2.2.3 干物质积累主要特征参数随耗水过程的变化规律

选取对前期耗水量较为敏感的干物质积累快速增长的起始时间( $T_1$ )和干物质积累最大增长速率( $V_{\max}$ )2个特征参数,建立其关于各生育阶段耗水量的线性回归方程。由于多数处理于分蘖中期进入干物质积累快速增长阶段,故 $T_1$ 以分蘖前期、分蘖中期耗水量为自变量;各处理均在拔节孕穗期与抽穗开花期的过渡阶段达到干物质积累最快增长速率,故 $V_{\max}$ 以分蘖前期至拔节孕穗期耗水量为自变量,得

$$T_1 = 54.9960 + 0.1856ET_1 - 0.4590ET_2 \quad (R^2 = 0.7838, F = 7.25) \quad (9)$$

$$V_{\max} = 0.2141 - 0.0042ET_1 + 0.0015ET_2 - 0.0025ET_3 + 0.0113ET_4 \quad (R^2 = 0.9833, F = 29.38) \quad (10)$$

两个方程拟合效果较为理想,且均通过显著性检验。在方程(9)中,分蘖前期耗水量没有通过显著性检验( $P_1 = 0.4919$ ),表明该阶段对水稻干物质积累进入快速增长阶段的时间影响不显著;分蘖中期耗水量的系数为负且通过显著性检验( $P_2 = 0.0350$ ),表明该阶段耗水量对水稻干物质积累进入快速增长阶段的时间有显著影响。在方程(10)中,分蘖前期、分蘖中期、分蘖后期耗水量均没有通过显著性检验( $P_1 = 0.2653$ 、 $P_2 = 0.5182$ 、 $P_3 = 0.1730$ ),表明水稻分蘖期的耗水量对干物质积累最快增长速度没有显著影响;拔节孕穗期耗水量在

显著性水平0.05下显著( $P_4 = 0.0128$ )且回归系数为正,表明该阶段耗水量对干物质积累的最快增长速度有显著正效应。

## 2.3 耗水过程对水稻产量及经济系数的影响

### 2.3.1 耗水过程对水稻产量的影响

不同耗水过程的水稻产量如图5所示,其中以CK处理产量最高,达7168.57 kg/hm<sup>2</sup>,较其余各处理增产11.93%~21.49%。由于在本研究中水稻产量与成熟期干物质质量呈极显著正相关,相关系数达0.9945( $P < 0.0001$ ),故可以通过耗水过程对产量的影响来验证上述关于耗水过程对干物质积累的影响研究结果的可靠性。采用Jensen模型<sup>[1]</sup>描述各处理产量对耗水过程的响应关系。分别计算水稻不同生育时期水分敏感指数,得水稻籽粒产量对耗水过程的响应关系为

$$\frac{y_a}{y_m} = \left(\frac{ET_1}{ET_{m1}}\right)^{0.0881} \left(\frac{ET_2}{ET_{m2}}\right)^{0.1204} \left(\frac{ET_3}{ET_{m3}}\right)^{0.0845} \left(\frac{ET_4}{ET_{m4}}\right)^{0.2442} \left(\frac{ET_5}{ET_{m5}}\right)^{0.2523} \left(\frac{ET_6}{ET_{m6}}\right)^{0.1047} \quad (R^2 = 0.9836, F = 11.25) \quad (11)$$

式中  $y_m$ ——水稻潜在产量, kg/hm<sup>2</sup>

$y_a$ ——水稻产量, kg/hm<sup>2</sup>

$ET_{mi}$ ——第*i*阶段水稻潜在腾发量, mm

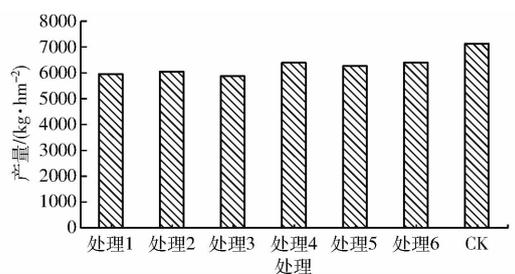


图5 各处理水稻产量

Fig. 5 Rice yield of each treatment

方程拟合效果较为理想,且通过显著性检验。在Jensen模型中,水分敏感指数表征了产量对该生育阶段缺水的敏感程度。敏感指数越大,表明该阶段缺水对产量的影响越大。根据不同生育阶段的水分敏感指数,得各生育阶段耗水量对水稻籽粒产量的影响由大到小依次为:抽穗开花期、拔节孕穗期、分蘖中期、乳熟期、分蘖前期、分蘖后期。抽穗开花期、拔节孕穗期和分蘖中期是水稻产量对缺水的最为敏感的阶段,在这些阶段保证充足的供水,有利于获得较高的籽粒产量。耗水过程对水稻籽粒产量的影响与其对干物质积累的影响相一致,验证了上述研究结果的可靠性。

### 2.3.2 耗水过程对水稻经济系数的影响

水稻经济系数是水稻的经济产量与地上部总生

物产量之比,反映了水稻群体光合同化物转化为经济产品的能力,是评价水稻品种产量水平和栽培成效的重要指标<sup>[22]</sup>。在本研究中,各处理经济系数介于 0.515 8 ~ 0.529 4 之间,变异系数为 1.00%,低于水稻产量和干物质积累的变异系数(6.29% 和 7.01%),表明耗水过程对水稻经济系数的影响小于对产量和干物质积累的影响。各生育阶段耗水量

与水稻经济系数的相关系数如表 5 所示。拔节孕穗期、抽穗开花期耗水量与水稻经济系数呈显著负相关,在这两个生育阶段增加耗水量将显著降低水稻经济系数,这是由于这两个生育阶段的耗水量在提高水稻籽粒产量的同时也增加了水稻干物质质量,且其对水稻干物质积累的影响大于对籽粒产量的影响。

表 5 各生育阶段耗水量与水稻经济系数的相关系数

Tab. 5 Correlation coefficients between rice economic coefficient and water consumption in each stage

生育阶段	$ET_1$	$ET_2$	$ET_3$	$ET_4$	$ET_5$	$ET_6$
相关系数	-0.565 2	-0.126 2	0.253 9	-0.854 0*	-0.804 7*	-0.530 4

### 3 讨论

植株地上部干物质积累量是反映作物生产能力的重要指标,是构成作物经济产量的基础<sup>[23]</sup>。在农业耕作条件、土壤养分供应基本一致的条件下,水分状况成为影响作物生长的主要因素。对水稻耗水过程与干物质积累的关系研究,有助于理清水稻干物质积累及产量形成对耗水过程的响应机制,进而制定合理的灌溉制度,实现节水与高产的统一。

本研究采用  $U_7(7^6)$  均匀设计,保证了各处理在不同生育阶段有不同程度的控水标准,得到更为合理科学的研究成果。由于耗水过程对干物质积累的影响是一个连续的过程,各阶段耗水量除直接影响干物质积累外,还会通过影响后续阶段的耗水量进而对干物质质量产生间接影响。本研究采用通径分析解析耗水过程对干物质积累的直接作用和间接影响。在传统通径分析中<sup>[24-25]</sup>,各自变量间相互影响,故变量间为相关线。在本研究中,各阶段耗水量仅对该阶段及其后续阶段产生影响,故自变量间为直接通径。从计算结果看,在水稻营养生长阶段,各生育阶段耗水量对干物质积累的间接作用大于直接作用;进入生殖生长阶段,各生育阶段耗水量对干物质积累的直接作用大于间接作用。各生育阶段耗水量对干物质积累的直接作用及对  $R^2$  的贡献率排序一致,由大到小依次为:抽穗开花期、拔节孕穗期、分蘖中期、乳熟期、分蘖前期、分蘖后期,且均为正效应,从决定系数看,抽穗开花期、拔节孕穗期及拔节孕穗期与抽穗开花期的耦合效应决定系数最大,表明抽穗开花期、拔节孕穗期耗水量对水稻成熟期的干物质质量影响最大,拔节孕穗期是水稻营养生长与生殖生长并进阶段,是决定水稻粒数的关键阶段;抽穗开花期是水稻生殖生长阶段,是决定水稻结实率和粒质量的关键时期,它们是决定水稻产量的重要阶段。在幼穗形成时及抽穗开花期加强水分灌溉,

提高茎鞘干物质向穗部的转运量<sup>[26]</sup>,在这两个生育阶段进行充分灌水,有利于水稻长茎、长穗、抽穗扬花,为成熟期获得较高的干物质质量提供了必要条件。分蘖中期的耗水量及其与拔节孕穗期、抽穗开花期耗水量的耦合效应的决定系数也处于较高水平,表明分蘖中期耗水量对干物质质量也有较大影响,分蘖中期正值水稻营养体增长阶段,在这一阶段水稻主要是长叶、分蘖,为后期水稻穗数粒数提供必要条件,在该阶段保证充足的供水,促进水稻有效分蘖,建立合理的群体结构,为成熟期获得较高的干物质质量奠定了基础。分蘖中期与抽穗开花期、分蘖中期与拔节孕穗期的耦合效应大于分蘖中期的效应,表明除在分蘖中期加强灌水以提高有效分蘖外,还应注意在拔节孕穗期、抽穗开花期等耗水关键期进行充分灌水,以获得更高的干物质质量。从计算结果看,抽穗开花期、拔节孕穗期、分蘖中期 3 个变量对干物质积累的直接作用、决定系数及对  $R^2$  的贡献均较大,且与之相关的间接作用及其决定系数亦排在前列,表明抽穗开花期、拔节孕穗期和分蘖中期的耗水量对干物质积累有显著影响。

从水稻干物质积累的过程看,不同阶段耗水量的差异基本不影响水稻干物质积累的变化趋势,各处理水稻干物质积累仍然呈“S”型曲线递增,用 Logistic 生长函数模拟效果十分理想。但不同的耗水过程会影响干物质积累理论最大值、干物质积累快速增长的起止时间、干物质积累最大增长速率及达到最大增长速率的时间,以及水稻生长周期等干物质积累过程的特征参数。已有研究表明,如果在作物营养生长阶段发生水分亏缺,到后期复水后作物有恢复或弥补这些影响的特性,对最终产量影响较小;如果亏水发生在生殖生长阶段特别是生殖生长的初期,即使后期复水也会对产量造成极大影响<sup>[27]</sup>。本研究中,各处理干物质积累理论最大值由大到小依次为:CK、处理 4、处理 5、处理 6、处理 2、

处理1、处理3,其中处理3由于在对水分最为敏感的抽穗开花期严重亏水,导致其干物质积累理论最大值在所有处理中排在最后。赵姣等<sup>[13]</sup>通过对冬小麦干物质积累特征的研究认为,灌水能显著缩短冬小麦干物质积累进入快速增长阶段和达到最大速率的时间。宋明丹等<sup>[19]</sup>则认为灌水会显著延长冬小麦干物质积累的总时间。本研究采用敏感指数平均值表征耗水过程对各特征参数的影响大小及方向,结果显示,耗水过程对干物质积累过程影响较大的是干物质积累最快增长速率以及进入快速增长阶段的时间,其中耗水量对干物质积累的最快增长速率有正效应,而对干物质积累快速增长阶段的起始时间有负效应。两个特征参数与阶段耗水量呈较好的线性关系,回归方程均通过显著性检验。在分蘖中期耗水量每增加1 mm,将提前0.459 d进入干物质积累快速增长阶段,在分蘖中期进行充分灌水以增加水稻阶段耗水量,有利于水稻干物质积累提前进入快速增长阶段。在拔节孕穗期耗水量每增加1 mm,干物质积累的最快增长速率增加0.011 3 g/d,在拔节孕穗期保证充足的灌水,有利于水稻干物质以更快的速度增长。研究结果与赵姣等<sup>[13]</sup>、宋明丹等<sup>[19]</sup>的结论有所不同,可能是由于不同作物的生理特性及生长季节的差异造成的。

采用 Jensen 模型描述各处理产量对耗水过程的响应关系,结果显示,各生育阶段耗水量对水稻籽粒产量的影响由大到小依次为:抽穗开花期、拔节孕穗期、分蘖中期、乳熟期、分蘖前期、分蘖后期。由于在本研究中水稻产量与成熟期干物质质量呈极显著的正相关,且各生育阶段耗水量对水稻产量和干物质质量的影响排序相一致,从而验证了前述研究结果的可靠性。但各生育阶段耗水量对水稻经济系数的影响较小,仅有拔节孕穗期和抽穗开花期耗水量与水稻经济系数呈显著负相关,这是由于这两个生育阶段的耗水量在提高水稻籽粒产量的同时也增加了水稻干物质质量,且其对水稻干物质积累的影响大于对籽粒产量的影响。从水稻经济系数的概念看,水稻经济系数与水稻经济产量成正比,而与生物产量成反比。但在本研究中,不同的控水标准影响了水稻的生长发育和产量形成,使得水稻经济产量和生物产量都受到影响,最终导致水稻经济系数与经济产量间呈现弱的负相关性( $R = -0.649 3, P = 0.114 5$ )。因此在灌溉水量有限的条件下,应向着提高水稻的生物产量的方向进行水量分配,进而提高水稻的经济产量。

本研究结果表明,耗水过程对水稻植株干物质积累过程的影响主要是在营养生长阶段,耗水过程

主要通过影响干物质积累进入快速增长的时间和最快增长速率进而间接影响干物质积累量;进入生殖生长阶段,耗水量对水稻干物质积累量的直接影响大于间接影响。对于随着耗水量的变化,水稻干物质在各器官间如何分配以及分配指数如何变化,本文尚未研究。探究水稻干物质分配过程对耗水过程的响应关系,实现水稻干物质在生殖器官与营养器官间的合理分配,协调源库关系,促进节水高产,是进一步研究的方向。

## 4 结论

(1)采用通径分析解析耗水过程对水稻干物质质量的影响,结果表明,在水稻营养生长阶段,各阶段耗水量对干物质积累的间接作用大于直接作用;进入生殖生长阶段,各阶段耗水量对干物质积累的直接作用大于间接作用。对干物质积累的影响决定系数较大的阶段由大到小依次为抽穗开花期、拔节孕穗期与抽穗开花期的耦合效应、拔节孕穗期、抽穗开花期与乳熟期的耦合效应、分蘖中期与抽穗开花期的耦合效应、分蘖中期与拔节孕穗期的耦合效应、分蘖中期。

(2)不同生育阶段耗水量对干物质积累主要特征参数的影响由大到小依次为: $V_{\max}$ 、 $T_1$ 、 $T_0$ 、 $T_2$ 、 $T$ ,耗水量每增加1个单位,干物质最快增长速率将提高0.954 5个单位,干物质积累快速增长阶段的起止时间、达到最快增长速率的时间以及水稻生育时间将分别提前0.562 9、0.249 2、0.327 3、0.175 3个单位。干物质积累进入快速增长的起始时间和最快增长速率与阶段耗水量呈较好的线性关系,在分蘖中期耗水量每增加1 mm,将提前0.459 d进入干物质积累快速增长阶段;在拔节孕穗期耗水量每增加1 mm,干物质积累的最快增长速率增加0.011 3 g/d。

(3)采用 Jensen 模型描述各处理产量对耗水过程的响应关系,得到各生育阶段耗水量对水稻产量的影响由大到小依次为:抽穗开花期、拔节孕穗期、分蘖中期、乳熟期、分蘖前期、分蘖后期,该排序与耗水量对水稻干物质质量的影响大小排序一致;但拔节孕穗期、抽穗开花期耗水量与水稻经济系数呈显著负相关。

(4)根据本研究得出的干物质积累对耗水的响应规律,抽穗开花期、拔节孕穗期和分蘖中期是水稻水分反应敏感阶段,建议寒地黑土区水稻生产中在灌溉定额有限的条件下,应优先保证抽穗开花期、拔节孕穗期的灌溉供水,以提高茎鞘干物质向穗部的转运量,获得较高的产量;其次是保证分蘖中期的灌溉用水以促进有效分蘖,形成合理的高产群体。

## 参 考 文 献

- 1 孙艳玲,李芳花,尹钢吉,等.寒地黑土区水稻水分生产函数试验研究[J].灌溉排水学报,2010,29(5):139-142.  
SUN Yanling, LI Fanghua, YIN Gangji, et al. Experimental research of the rice-water production functions in black soil of the cold regions[J]. Journal of the Irrigation and Drainage, 2010, 29(5): 139-142. (in Chinese)
- 2 王梦雪,张忠学.适宜节水灌溉模式抑制寒地稻田 N<sub>2</sub>O 排放增加水稻产量[J].农业工程学报,2015,31(15):72-79.  
WANG Mengxue, ZHANG Zhongxue. Optimal water-saving irrigation mode reducing N<sub>2</sub>O emission from rice paddy field in cold region and increasing rice yield[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(15): 72-79. (in Chinese)
- 3 赵黎明,李明,郑殿峰,等.灌溉方式与种植密度对寒地水稻产量及光合物质生产特性的影响[J].农业工程学报,2015,31(6):159-169.  
ZHAO Liming, LI Ming, ZHENG Dianfeng, et al. Effects of irrigation methods and rice planting densities on yield and photosynthetic characteristics of matter production in cold area[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(6): 159-169. (in Chinese)
- 4 郑天翔,唐湘如,罗锡文,等.不同灌溉方式对精量穴直播超级稻生产的影响[J].农业工程学报,2010,26(8):52-55.  
ZHENG Tianxiang, TANG Xiangru, LUO Xiwen, et al. Effects of different irrigation methods on production of precision hill-direct-seeding super rice[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(8): 52-55. (in Chinese)
- 5 迟道才,王瑄,夏桂敏,等.北方水稻动态水分生产函数研究[J].农业工程学报,2004,20(3):30-34.  
CHI Daocai, WANG Xuan, XIA Guimin, et al. Dynamic water production functions for rice in North China[J]. Transactions of the CSAE, 2004, 20(3): 30-34. (in Chinese)
- 6 程卫国,卢文喜,安永凯.吉林省水稻水分生产函数模型的适应性研究[J].灌溉排水学报,2015,34(2):61-66.  
CHENG Weiguo, LU Wenxi, AN Yongkai. Adaptability of water production function models for rice in Jilin province[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2015, 34(2): 61-66. (in Chinese)
- 7 柴江颖,崔远来,汪文超,等.鄱阳湖流域水稻水分生产函数模型试验研究[J].中国农村水利水电,2014(8):1-4.  
CHAI Jiangying, CUI Yuanlai, WANG Wenchao, et al. A study of water production function model for rice in Poyang Lake area[J]. China Rural Water and Hydropower, 2014(8): 1-4. (in Chinese)
- 8 CHEN Jinliang, KANG Shaozhong, DU Taisheng, et al. Modeling relations of tomato yield and fruit quality with water deficit at different growth stages under greenhouse condition[J]. Agricultural Water Management, 2014, 146: 131-148.
- 9 CHENG Weiguo, LU Wenxi, XIN Xin, et al. Adaptability of various models of the water production function for rice in Jilin Province, China[J]. Paddy Water Environ, 2016, 14: 355-365.
- 10 AMIR H, BIJAN G, BRIAN G L, et al. Deriving data mining and regression based water-salinity production functions for spring wheat (*Triticum aestivum*)[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2014, 101: 68-75.
- 11 于芷婧,尚松浩.华北轮作农田灌溉制度多目标优化模型及应用[J].水利学报,2016,47(9):1188-1196.  
YU Zhijing, SHANG Songhao. Multi-objective optimization method for irrigation scheduling of crop rotation system and its application in North China[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2016, 47(9): 1188-1196. (in Chinese)
- 12 张耗,余超,陈可伟,等.直播方式对水稻生理性状和产量的影响及其成本分析[J].农业工程学报,2017,33(13):58-64.  
ZHANG Hao, YU Chao, CHEN Kewei, et al. Effect of direct-seeding methods on physiological characteristics and grain yield of rice and its cost analysis[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(13): 58-64. (in Chinese)
- 13 赵姣,郑志芳,方艳茹,等.基于动态模拟模型分析冬小麦干物质积累特征对产量的影响[J].作物学报,2013,39(2):300-308.  
ZHAO Jiao, ZHENG Zhifang, FANG Yanru, et al. Effect of dry matter accumulation characteristics on yield of winter wheat analyzed by dynamic simulation mode[J]. Acta Agronomica Sinica, 2013, 39(2): 300-308. (in Chinese)
- 14 肖强,闫连波,朱欣宇,等.夏玉米植株干物质、氮磷钾养分积累速度和时间的动态分析[J].植物营养与肥料学报,2014,20(3):606-612.  
XIAO Qiang, YAN Lianbo, ZHU Xinyu, et al. Dynamic analysis of dry matter and NPK accumulation with time in summer maize[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2014, 20(3): 606-612. (in Chinese)
- 15 周新国,李彩霞,强小嫺,等.喷灌条件下液膜覆盖对玉米干物质积累及水分利用效率的影响[J].农业工程学报,2010,26(11):43-48.  
ZHOU Xinguo, LI Caixia, QIANG Xiaoman, et al. Effects of liquid film mulching on dry matter accumulation and water use efficiency of maize with sprinkler irrigation[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(11): 43-48. (in Chinese)
- 16 冯浩,刘匣,余坤,等.不同覆盖方式对土壤水热与夏玉米生长的影响[J/OL].农业机械学报,2016,47(12):192-202.  
[http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20161224&falg=1](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20161224&falg=1). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.12.024.  
FENG Hao, LIU Xia, YU Kun, et al. Effects of different mulching patterns on soil moisture, soil temperature and summer maize growth[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(12): 192-202. (in Chinese)
- 17 李艳大,汤亮,陈青春,等.水稻地上部干物质积累动态的定量模拟[J].应用生态学报,2010,21(6):1504-1510.  
LI Yanda, TANG Liang, CHEN Qingchun, et al. Dry matter accumulation in rice aboveground part: quantitative simulation[J].

- Chinese Journal of Applied Ecology, 2010, 21(6): 1504 - 1510. (in Chinese)
- 18 李向岭,赵明,李从峰,等. 播期和密度对玉米干物质积累动态的影响及其模型的建立[J]. 作物学报,2010,36(12):2143 - 2153.  
LI Xiangling, ZHAO Ming, LI Congfeng, et al. Effect of sowing-date and planting density on dry matter accumulation dynamic and establishment of its simulated model in maize[J]. Acta Agronomica Sinica, 2010, 36(12): 2143 - 2153. (in Chinese)
- 19 宋明丹,李正鹏,冯浩,等. 不同水氮水平冬小麦干物质积累特征及产量效应[J]. 农业工程学报,2016,32(2):119 - 126.  
SONG Mingdan, LI Zhengpeng, FENG Hao, et al. Effects of irrigation and nitrogen regimes on dry matter dynamic accumulation and yield of winter wheat[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(2): 119 - 126. (in Chinese)
- 20 司振江,庄德续,黄彦,等. 自动称重式蒸渗仪在水稻需水规律研究中的应用[J]. 水利天地,2015(1):24 - 26, 47.
- 21 DARROCH B A, BAKER R J. Grain filling in three spring wheat genotypes: statistical analysis[J]. Crop Science, 1990, 33(3): 525 - 529.
- 22 何强,邢俊杰,舒服,等. 水稻收获指数研究概况与展望[J]. 杂交水稻,2012,27(6):3 - 6.  
HE Qiang, XING Junjie, SHU Fu, et al. Review and prospect for the research on harvest index in rice[J]. Hybrid Rice, 2012, 27(6): 3 - 6. (in Chinese)
- 23 魏永霞,马瑛瑛,冯鼎瑞,等. 调亏灌溉下滴灌玉米根冠生长与水分动态响应特征[J/OL]. 农业机械学报,2017,48(7): 180 - 188. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20170723&flag=1](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20170723&flag=1). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.07.023.  
WEI Yongxia, MA Yingying, FENG Dingrui, et al. Characteristics of water dynamic response and growth of root and crown of maize under drip irrigation of regulated deficit irrigation[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(7): 180 - 188. (in Chinese)
- 24 庞桂斌,徐征和,杨士红,等. 控制灌溉水稻叶片水分利用效率影响因素分析[J/OL]. 农业机械学报,2017,48(4):233 - 241. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20170430&flag=1](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20170430&flag=1). DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.04.030.  
PANG Guibin, XU Zhenghe, YANG Shihong, et al. Influence factors analysis of rice leaf water use efficiency under controlled irrigation[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(4): 233 - 241. (in Chinese)
- 25 张芳,张建丰,薛绪掌,等. 气象因子对负水头供液下番茄日耗液量的敏感性分析[J/OL]. 农业机械学报,2017,48(8): 229 - 238. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20170826&flag=1](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20170826&flag=1). DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.08.026.  
ZHANG Fang, ZHANG Jianfeng, XUE Xuzhang, et al. Sensibility analysis of meteorological factors on daily consumption of nutrient solution for tomato using negative pressure[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(8): 229 - 238. (in Chinese)
- 26 王振昌,郭相平,杨静晗,等. 旱涝交替胁迫对水稻干物质生产分配及倒伏性状的影响[J]. 农业工程学报,2016,32(24): 114 - 123.  
WANG Zhenchang, GUO Xiangping, YANG Jinghan, et al. Effect of alternate flooding and drought stress on biomass production, distribution and lodging characteristic of rice[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(24): 114 - 123. (in Chinese)
- 27 董朝阳,刘志娟,杨晓光. 北方地区不同等级干旱对春玉米产量影响[J]. 农业工程学报,2015,31(11):157 - 164.  
DONG Chaoyang, LIU Zhijuan, YANG Xiaoguang. Effects of different grade drought on grain yield of spring maize in Northern China[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(11): 157 - 164. (in Chinese)