

寒地黑土区水稻耗水特性及其对水分利用效率的影响

魏永霞^{1,2} 汝晨^{1,2} 吴昱^{3,4} 刘慧^{2,5} 杨军明^{1,2} 侯景翔^{1,2}

(1. 东北农业大学水利与土木工程学院, 哈尔滨 150030;

2. 东北农业大学农业农村部农业水资源高效利用重点实验室, 哈尔滨 150030;

3. 黑龙江农垦勘测设计研究院, 哈尔滨 150090; 4. 东北林业大学林学院, 哈尔滨 150040;

5. 东北农业大学理学院, 哈尔滨 150030)

摘要: 为了探究寒地黑土区水稻耗水特性及其对水分利用效率的影响,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,分析了各生育期水稻生育阶段、昼夜间及逐时耗水量的变化特征,明确了各生育阶段耗水量对产量及生物量水分利用效率的影响。结果表明:拔节孕穗期各处理耗水量及耗水模系数均值最高,分别为77.25 mm、23.09%;水稻各处理昼间、夜间耗水量总体呈现“低-高-低”的变化趋势,抽穗开花期昼、夜间耗水量均值达到最大,为6.32、0.76 mm/d;分蘖前期、分蘖中期水稻昼间耗水特征呈倒“V”形曲线,耗水量高峰出现在12:00—13:00;分蘖后期至乳熟期呈“M”形曲线,耗水量高峰分别出现在11:00—12:00、13:00—14:00,乳熟期首个耗水量峰值相对提前,为10:00—11:00;阶段耗水量对水分利用效率(WUE)的直接作用和对 R^2 总贡献排列一致,由大到小依次为抽穗开花期耗水量(ET_5)、分蘖中期耗水量(ET_2)、拔节孕穗期耗水量(ET_4)、分蘖后期耗水量(ET_3)、乳熟期耗水量(ET_6)、分蘖前期耗水量(ET_1);分蘖后期、乳熟期耗水量对 WUE 存在直接负作用,阶段耗水量对 WUE 影响决定系数较大的变量由大到小依次为 ET_5 、 $ET_4 \times ET_5$ 、 $ET_2 \times ET_5$ 、 ET_2 、 ET_4 ;抽穗开花期生物量水分利用效率($SWUE_5$)与水稻产量及 WUE 均呈显著正相关,分蘖前期至抽穗开花期耗水量对 $SWUE_5$ 的影响由大到小依次为 ET_5 、 ET_4 、 ET_3 、 ET_1 、 ET_2 。该研究结果可为深入研究黑土区水稻耗水特性、水分利用规律及水稻节水高效生产提供依据。

关键词: 水稻; 寒地黑土区; 耗水特性; 水分利用效率; 通径分析

中图分类号: S274.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2019)04-0245-10

Water Consumption Characteristics of Rice and Its Effect on Water Use Efficiency in Cold Black Soil Region

WEI Yongxia^{1,2} RU Chen^{1,2} WU Yu^{3,4} LIU Hui^{2,5} YANG Junming^{1,2} HOU Jingxiang^{1,2}

(1. School of Water Conservancy and Civil Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China

2. Key Laboratory of High Efficiency Use of Agricultural Water Resources, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China

3. Heilongjiang Agricultural Reclamation Survey and Research Institute, Harbin 150090, China

4. College of Forestry, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China

5. School of Science, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

Abstract: In order to explore the effect of rice water consumption characteristics on WUE in cold black soil region, the experiment was carried out by lysimeter at the rice irrigation experiment station of Heilongjiang Province in 2017. The $U_7(7^6)$ experiment was conducted to analyze the variation regular of water consumption of rice stage water consumption, during daytime, nighttime and hourly at different growth stages, the effects of water consumption at different growth stages on WUE and biomass WUE were clarified. The results showed that water consumption and water consumption percentage were the highest

收稿日期: 2018-09-28 修回日期: 2018-10-17

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC040010101)和东北农业大学农业农村部农业水资源高效利用重点实验室开放项目(2017009)

作者简介: 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

通信作者: 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

at the jointing-booting stage, which were 77.25 mm and 23.09%, respectively. The daytime and nighttime water consumption of rice showed a trend of “low-high-low”, The daytime and nighttime water consumption reached the maximum at the heading-flowering stage, which were 6.32 mm/d and 0.76 mm/d, respectively. The water consumption characteristics of rice in the daytime showed an inverted “V” curve at the early and mid-tillering stage, the water consumption peak was at 12:00—13:00. It showed an “M” curve from the late tillering stage to the milky stage, the water consumption peak was at 11:00—12:00 and 13:00—14:00, respectively. The time of the maximum water consumption was at 10:00—11:00 during the milky stage. The direct effect of stage water consumption on WUE and the total contribution to R^2 were consistent, and the order from large to small was ET_5 , ET_2 , ET_4 , ET_3 , ET_6 and ET_1 . The water consumption at the late tillering and milky stage had a direct negative impact on WUE , the order of the determinant coefficient of water consumption in each stage on WUE was ET_5 , $ET_4 \times ET_5$, $ET_2 \times ET_5$, ET_2 and ET_4 . There were significant positive correlations between $SWUE_5$ and rice yield and WUE , the effect order of water consumption on $SWUE_5$ from the early tillering to heading-flowering stage was ET_5 , ET_4 , ET_3 , ET_1 and ET_2 . The study would be helpful in understanding water consumption and water use efficiency of rice and formulating water-saving plan in black soil region.

Key words: rice; cold black soil region; water consumption characteristics; water use efficiency; path analysis

0 引言

黑龙江省是我国水稻主产区,在保障国家粮食安全中占有举足轻重的地位^[1]。该地区降雨时空分布不均导致水稻干旱频繁发生,不利于该地区水稻产量及水分生产力的提高,干旱缺水已成为影响我国东北半干旱地区农业生产发展的重要因素,如何有效防御和减缓干旱对农业生产带来的威胁是实现旱区农业生产节水、高效、高产的关键^[2]。只有明确水稻本身的耗水特性及水分利用规律,才能准确地估算农田土壤水分动态,使水资源得到有效利用。

作物耗水量不仅是田间水分平衡的重要组成部分,也是制定灌溉计划和分析水分供应状况的前提^[3]。在保持产量前提下,提高作物水分利用能力成为当前节水农业的研究热点。传统水稻多采用淹水灌溉方式,不仅水分利用效率低下,而且还会导致土壤板结和土壤结构的破坏^[4]。近年的相关研究表明,适度水分胁迫有助于构建适宜株型结构,为优质高产和提高水分利用效率奠定了基础^[5]。目前,传统淹水栽培逐渐向节水栽培模式转变,在水稻某些生育期适度亏水,有利于提高籽粒产量及水分利用效率,增加土壤贮水的有效利用^[6]。迟道才等^[7]对比了多生育期不同程度水分胁迫对水分利用效率的影响,指出分蘖期和乳熟期中度亏水互作效应可显著提高水分利用效率。董淑喜等^[8]研究发现,生育中期连续中旱对产量影响较大,灌浆乳熟期适当建立无水层,有利于提高产量及水分利用效率。刘展鹏等^[9]研究指出,土壤水分胁迫并非完全是负效应,在特定发育阶段、有限的水分胁迫后,复水对产

量提升是有益的。可见,作物在某些阶段经受适度干旱后存在补偿效应,适当进行水分调控不会造成作物减产,甚至有利于增产。周英捷等^[10]对生物量水分利用效率的研究表明,孕穗期—开花期重度亏水明显降低生物量水分利用效率,而拔节后期—孕穗期轻、重度亏水均会显著降低以产量及生物量为基础的水分利用效率。有关水稻生物量水分利用效率的研究前人涉及较少,有关水稻产量与水分利用关系的研究较多,而从作物自身的节水潜能出发,结合水稻的耗水特性分析其与水分利用效率变化的研究鲜有报道。为此,本文以不同生育时期控水标准为处理方式,采用小型蒸渗仪研究寒地黑土区水稻耗水特性及水分利用规律,分析、评价其不同土壤水分条件下水分消耗特点、节水能力差异及耗水与水分利用效率的响应关系,以期对寒地黑土区水稻节水高效灌溉制度的制定提供依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验区位于黑龙江省水稻灌溉试验站基地,该站(46°41′~47°44′N,127°20′~127°49′E)位于庆安县和平镇,是典型的寒地黑土分布带。多年平均水面蒸发量 750 mm,多年平均温度 2.5℃,作物水热生长期为 155~170 d,全年无霜期 128 d。属于典型的寒温带半干旱、半湿润的大陆性气候。供试土壤种类为黑土型水稻土,容重为 1.02 g/cm³、孔隙度 61.6%、0~30 cm 体积饱和含水率平均为 55.5%、pH 值为 6.51。在移栽前,对蒸渗仪内 0~20 cm 土层进行土壤理化性质分析,耕层土壤基础肥力(质量比)为:有机质 41.5 g/kg、全氮 15.10 g/kg、全磷

15.21 g/kg、全钾 20.09 g/kg、碱解氮 153.98 mg/kg、有效磷 25.21 mg/kg、速效钾 157.19 mg/kg。

1.2 试验设计

试验根据作物各生育阶段时长近等原则,将水稻生育期划分为 6 个主要生育阶段,以 6 个生育阶段耗水量为试验因素,采用 $U_7(7^6)$ 均匀试验设计,灌水上限为适宜灌溉水层,土壤含水率下限取饱和含水率的百分比,在适宜灌溉水层上限与严重调亏之间设定 6 个调亏水平,对照处理按正常灌溉的水分条件管理,水稻各生育时期水分调控标准如表 1 所示,7 个处理,3 次重复,共 21 个蒸渗仪。试验采用 HSY.XHZ-1 型自动称重式蒸渗仪(测筒高 1.5 m,直径 1.13 m,表面积 1 m²),供试作物为当地主栽品

种龙庆稻 3 号,在充满优质土壤的育秧盆中将欲发芽的种子栽培成苗,于 2017 年 5 月 18 日将长势一致的水稻幼苗移栽至蒸渗仪中,插秧规格为行距 22.5 cm,株距 12.5 cm,共 4 行 24 穴,每穴定 5 株,并配备自动感应式遮雨棚。蒸渗仪四周种植同一品种水稻作为保护田,生长期为 121 d,9 月 20 日收获。水稻在各生育阶段均采用相同田间管理方法,施肥、除草等均保持一致,全生育期总施 N 110 kg/hm²,氮肥按照基肥、分蘖肥、促花肥、保花肥比例为 4.5:2:1.5:2 分施;施 P₂O₅ 45 kg/hm²,磷肥在基肥中一次性施入;施 K₂O 80 kg/hm²,分别在基肥和水稻 8.5 叶龄时期(幼穗分化期)2 次施入,前后比例为 1:1。

表 1 水稻不同生育期水分控制标准
Tab.1 Water control standards at different growth stages of rice

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
T1	60% ~ 100%	70% ~ 100%	80% ~ 100%	90% ~ 100%	0 ~ 30 mm	20 ~ 30 mm
T2	70% ~ 100%	90% ~ 100%	20 ~ 30 mm	60% ~ 100%	80% ~ 100%	0 ~ 30 mm
T3	80% ~ 100%	20 ~ 30 mm	70% ~ 100%	0 ~ 30 mm	60% ~ 100%	90% ~ 100%
T4	90% ~ 100%	60% ~ 100%	0 ~ 30 mm	70% ~ 100%	20 ~ 30 mm	80% ~ 100%
T5	0 ~ 30 mm	80% ~ 100%	60% ~ 100%	20 ~ 30 mm	90% ~ 100%	70% ~ 100%
T6	20 ~ 30 mm	0 ~ 30 mm	90% ~ 100%	80% ~ 100%	70% ~ 100%	60% ~ 100%
CK	0 ~ 30 mm	0 ~ 30 mm	0 ~ 30 mm	0 ~ 30 mm	0 ~ 30 mm	0 ~ 30 mm

注:“%”为占土壤饱和含水率百分比的量纲,“mm”为水层深度的量纲。

1.3 观测指标与方法

1.3.1 作物耗水特性

采用 TPIME-PICO64/32 型土壤水分速测仪于每天 08:00 测定 0 ~ 20 cm 土壤含水率(无水层),确定土壤含水率是否达到下限;采用专用水尺测定土壤水分变化(有水层),土壤含水率接近或达到控制下限即灌至设计上限,维持土壤含水率介于灌溉上限及下限之间,灌水前后需加测,灌水量由水表读出。并于每天 08:00 读取自动称重式蒸渗仪的总质量(土体+植株),根据前后两天质量差计算水稻每天实际耗水量,由于试验在自动感应式遮雨棚内展开,且蒸渗仪底部有底,故忽略生育期内降水量、地表径流量及地下水补给量的影响。在插秧前已人工对各个蒸渗仪内土体进行搅浆及踏实,使蒸渗仪内土壤的紧实度一致,使土体更为粘重,有效地防止灌溉水向地下深层土壤入渗,当生育阶段经历连续淹水时,蒸渗仪底部排水孔出水量为零,并未有渗漏水产生,因此连续淹水对地下水位产生的影响可忽略不计。作物阶段耗水量、耗水模系数计算公式为

$$ET_i = \Delta W_i + I_i \tag{1}$$

$$R_i = ET_i / ET \times 100\% \tag{2}$$

式中 ET_i ——阶段耗水量,mm

ΔW_i ——阶段储水量差值,mm

I_i ——阶段灌水量,mm

R_i ——阶段耗水模系数,%

ET ——全生育期耗水总量,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

分别在各生育时期选择 1 ~ 2 个典型晴天,每间隔 1 h 对蒸渗仪(土体+植株)进行称量(08:00—20:00),计算水稻逐时段耗水量,根据称量结果分别计算出水稻日耗水量(当日 08:00—翌日 08:00)、昼间耗水量(当日 08:00—20:00)、夜间耗水量(当日 20:00—翌日 08:00)。

1.3.2 产量及水分利用效率

根据不同生育期群体干物质积累量和耗水量,计算阶段水分利用效率;成熟期时,每个蒸渗仪选取具有平均有效穗数的 6 穴水稻进行测产,每个蒸渗仪单打单收,并依据稻粒标准含水率计算水稻每穴实际产量,根据每公顷穴数计算每公顷产量,根据水稻产量和总耗水量计算水分利用效率

$$SWUE_i = G_i / ET_i \tag{3}$$

$$WUE = Y / ET \tag{4}$$

式中 $SWUE_i$ ——阶段生物量水分利用效率, g/mm
 G_i ——各生育阶段干物质增加量, g
 WUE ——水分利用效率, kg/m³
 Y ——水稻产量, kg/hm²

1.4 数据处理

以分蘖前期、分蘖中期、分蘖后期、拔节孕穗期、抽穗开花期、乳熟期耗水量为变量,采用多元回归分析与因变量建立水分响应方程,并对方程及各因素进行显著性检验;运用 Excel 进行数据处理, Origin 9.10 作图,其中通路图采用 Visio 2013 绘制, SPSS 22.0 进行通路分析并计算通路系数;多重比较采用 LSD 法,显著性水平取 0.05。

2 结果与分析

2.1 水稻阶段耗水特征

图 1(图中同组不同小写字母表示在 0.05 水平上差异显著,下同)为各处理水稻生育阶段耗水量及耗水模系数。由图 1a 可知,各处理水稻阶段耗水量表现为相同阶段具有相似的变化规律,拔节孕穗期各处理耗水量均值最大,为 77.25 mm,分蘖前期、分蘖中期各处理耗水量较低。分蘖前期 T1 处理耗水量显著低于其他处理,为 43.05 mm;T4、T5、T6 处理耗水量与 CK 处理间差异不显著。至分蘖中期,除 T2、T3 处理外,其他处理间差异均达显著水平。分蘖后期 T1 处理土壤含水率增至 80%~100%,但由于土壤持续水分胁迫引起的叠加效应明显,其耗水量仍然最低,为 42.48 mm;T3 处理在拔节孕穗期复水后效果明显,较 CK 处理增加 6.10%,而 T5 处理增幅不明显,是由于上一时期重旱导致其部分生理功能受到抑制,导致复水后无法在短期内迅速恢复正常,这可能与植物为了防止恢复充分灌水后细胞快速膨大而采取的一种自我保护机制有关^[11]。

抽穗开花期各处理耗水量显著低于 CK 处理,T1、T6 处理间耗水量差异不显著,乳熟期各处理耗水量均值降至 53.40 mm,T6 处理耗水量较 CK 处理降幅最大,为 30.37%。由图 1b 可知,分蘖前期各处理耗水模系数差异较小,变异系数为 9.84%。由于分蘖中期 T1 处理连续较重于旱导致其耗水模系数显著低于其他处理,为 7.70%,T5、T6 处理间差异未达显著水平,但均显著高于 CK 处理($P<0.05$)。分蘖后期各处理耗水模系数均值有所上升,保留水层的 T4 处理耗水模系数却较低,为 14.35%,分析其原因可能是分蘖中期重旱导致水稻茎蘖数较低,其各项生理活动也均处于较弱水平,蒸腾耗水量减少,故耗水模系数偏低。拔节孕穗期各处理耗水模系数均值最大,为 23.09%,由于此时期为枝梗与颖花发育的重要时期,充分灌溉能够为水稻孕穗出穗提供良好生长环境,其中 T3 处理耗水模系数最大,为 26.39%,较 CK 处理提高 23.72%,而重旱的 T2 处理耗水模系数为 CK 处理的 83.83%。另外,此时期历时较抽穗开花期稍长,故耗水模系数最大。随着生育期的推进,水稻逐渐步入籽粒灌浆及产量形成的重要阶段,乳熟期各处理耗水模系数均值仍较高,为 16.02%,其中 T1 处理复水后耗水模系数最高,为 19.36%,T6 处理最低,为 11.91%。

2.2 水稻各生育阶段逐日耗水特征

水稻日耗水量能够衡量水稻在该生育阶段消耗水分的潜力,比较各生育阶段水稻的耗水能力可以明确其内在耗水机理及节水潜质。表 2 为各生育阶段不同处理昼、夜间耗水量。分蘖前期日平均气温较低导致分蘖前期历时稍长,植株蒸腾量较小,水稻昼、夜间耗水量分别为 2.32~3.39 mm/d、0.40~0.53 mm/d,各亏水处理昼、夜间耗水量由大到小顺序均为 T4、T3、T2、T1,4 个处理间昼间耗水量差

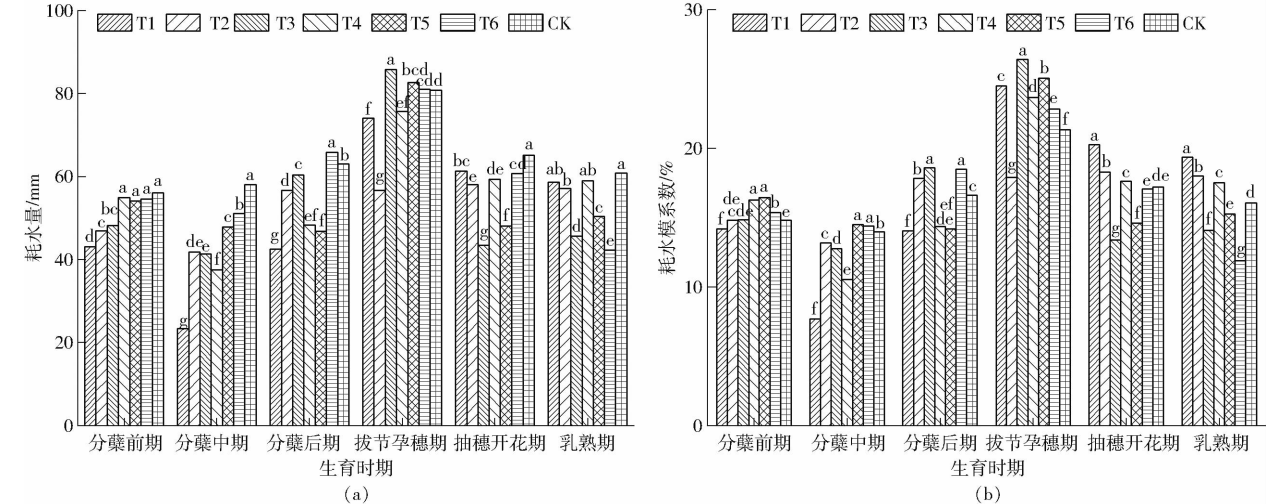


图 1 水稻阶段耗水量及耗水模系数

Fig. 1 Water consumption and water consumption percentage of rice at different stages

异显著,但夜间耗水量差异不显著,极差仅为 0.07 mm/d。充分灌溉的 T5、T6 处理夜间耗水量与 CK 处理差异不显著。水稻在进入旺盛的营养生长阶段(分蘖中期)后,田间耗水由棵间蒸发逐渐转向植株蒸腾为主,T6 处理昼、夜间耗水量与 CK 处理差异不显著,T1 处理昼、夜间耗水量均为各处理最低,仅为 CK 处理的 68.72%、82.76%;T1、T4 处理夜间耗水量与 CK 处理差异显著,但由于此时期作物植株需水量较少,夜间温度偏低,且两处理间土壤含水率差异不明显导致夜间耗水量差异不显著。至分蘖后期,各处理昼、夜间耗水量分别增至 3.83~5.24 mm/d、0.53~0.62 mm/d,CK 处理昼间耗水量显著高于其他处理,CK 处理夜间耗水量仅与重旱的 T5 处理差异达显著水平,土壤含水率相近的 T2、T4 和 CK 处理夜间耗水量差异不显著;轻度亏水的 T6 处理夜间耗水量仅次于 CK 处理,可能是因为该水分控制下的土壤含水率使浅层土壤与外界空气流通性增强,更利于根系对水分的吸收利用,进而增强对

土壤水分的消耗导致夜间耗水量较高。拔节孕穗期 CK 处理昼间耗水量显著高于其他处理,仅 T3、T5 处理间昼间耗水量差异不显著,T2 处理夜间耗水量最低,较 CK 处理降低 20.0%,且与 T1、T4 处理差异未达显著水平,T3、T5、T6 处理夜间耗水量与 CK 差异不显著。随着生育进程推进,抽穗开花期植株冠层覆盖率最高,水稻需水量大,各处理昼、夜间耗水量均值分别增至 6.32、0.76 mm/d,依次较拔节孕穗期增长 11.22%、10.67%,保留水层的 T1、T4、CK 处理昼、夜间耗水量显著高于其他处理,其他亏水处理昼、夜间耗水量变化趋势总体一致,由大到小顺序均为 T5、T6、T2、T3;对于各亏水处理的夜间耗水量,轻旱的 T5 处理显著高于其他亏水处理,为 0.76 mm/d,而其他亏水处理间差异不显著。水稻灌浆后,叶片开始脱落,各处理日耗水量迅速回落,乳熟期昼、夜间耗水量均值分别降至 4.33、0.54 mm/d,连旱的 T6 处理昼、夜间耗水量仅为 CK 处理的 70.68%、72.58%。

表 2 各生育阶段不同处理昼、夜间耗水量

Tab.2 Daytime and nighttime water consumption of different treatments at different growth stages mm/d

指标	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
昼间耗水量	T1	2.32 ^f	3.23 ^f	3.83 ^{fg}	5.32 ^e	6.72 ^c	4.53 ^{cd}
	T2	2.53 ^e	4.10 ^e	4.77 ^e	4.87 ^g	5.47 ^f	4.31 ^d
	T3	2.77 ^d	4.39 ^b	4.32 ^e	6.22 ^{bc}	5.08 ^g	3.91 ^f
	T4	3.02 ^c	3.46 ^e	4.61 ^d	5.14 ^f	6.89 ^b	4.69 ^b
	T5	3.26 ^{ab}	3.89 ^d	3.70 ^g	6.14 ^c	6.58 ^d	4.10 ^e
	T6	3.23 ^b	4.61 ^a	4.96 ^b	5.51 ^d	5.71 ^e	3.64 ^g
	CK	3.39 ^a	4.70 ^a	5.24 ^a	6.55 ^a	7.76 ^a	5.15 ^a
夜间耗水量	T1	0.40 ^e	0.48 ^c	0.55 ^{ab}	0.67 ^{bcd}	0.82 ^{ab}	0.57 ^{abc}
	T2	0.43 ^{de}	0.57 ^a	0.60 ^{ab}	0.60 ^d	0.65 ^{de}	0.55 ^{abc}
	T3	0.45 ^{cd}	0.58 ^a	0.58 ^{ab}	0.72 ^{ab}	0.64 ^e	0.49 ^{cd}
	T4	0.47 ^{bcd}	0.52 ^{bc}	0.60 ^{ab}	0.64 ^{cd}	0.85 ^a	0.55 ^{abc}
	T5	0.52 ^a	0.55 ^{ab}	0.53 ^b	0.72 ^{ab}	0.76 ^b	0.52 ^{bcd}
	T6	0.52 ^a	0.57 ^a	0.61 ^a	0.68 ^{abc}	0.67 ^{cde}	0.45 ^d
	CK	0.53 ^a	0.58 ^a	0.62 ^a	0.75 ^a	0.86 ^a	0.62 ^a

注:同一列不同小写字母表示在 $P<0.05$ 水平下显著,下同。

2.3 水稻各生育阶段逐时耗水特征

图 2 为水稻各生育阶段典型日昼间耗水量的变化曲线。由图 2 可知,分蘖前期、分蘖中期水稻昼间耗水特征呈倒“V”形曲线,分蘖后期至乳熟期则呈“M”形双峰曲线。分蘖前期、分蘖中期水稻耗水高峰出现在 12:00—13:00,由于分蘖前期水稻植株矮小,生理需水较低,各处理耗水量平均峰值仅为 0.39 mm/h,分蘖中期耗水量平均峰值升至 0.55 mm/h,较分蘖前期增加 41.03%。随着生育进程推进,分蘖后期至抽穗开花期第 1 个耗水量高峰时间为 11:00—12:00,峰值分别为 0.63、0.75、0.80 mm/h,第

2 个耗水量高峰时间为 13:00—14:00,峰值分别为 0.70、0.81、0.86 mm/h;抽穗开花期水稻地上部冠层构建完成,耗水过程主要是通过植株蒸腾完成,该时期空气温度及辐射均为全生育期最高,水稻耗水量峰值较拔节孕穗期增幅 6.67%;乳熟期植株下层叶片枯黄并衰老死亡,单株叶面积减少,首个耗水量峰值较上一阶段大幅下降,平均为 0.61 mm/h,且首个耗水量高峰时间提前至 10:00—11:00。

就不同水分处理而言,分蘖前期各处理耗水量峰值随着亏水程度增大呈降低趋势,CK 处理最大,为 0.43 mm/h,是重旱 T1 处理的 1.23 倍。分蘖中

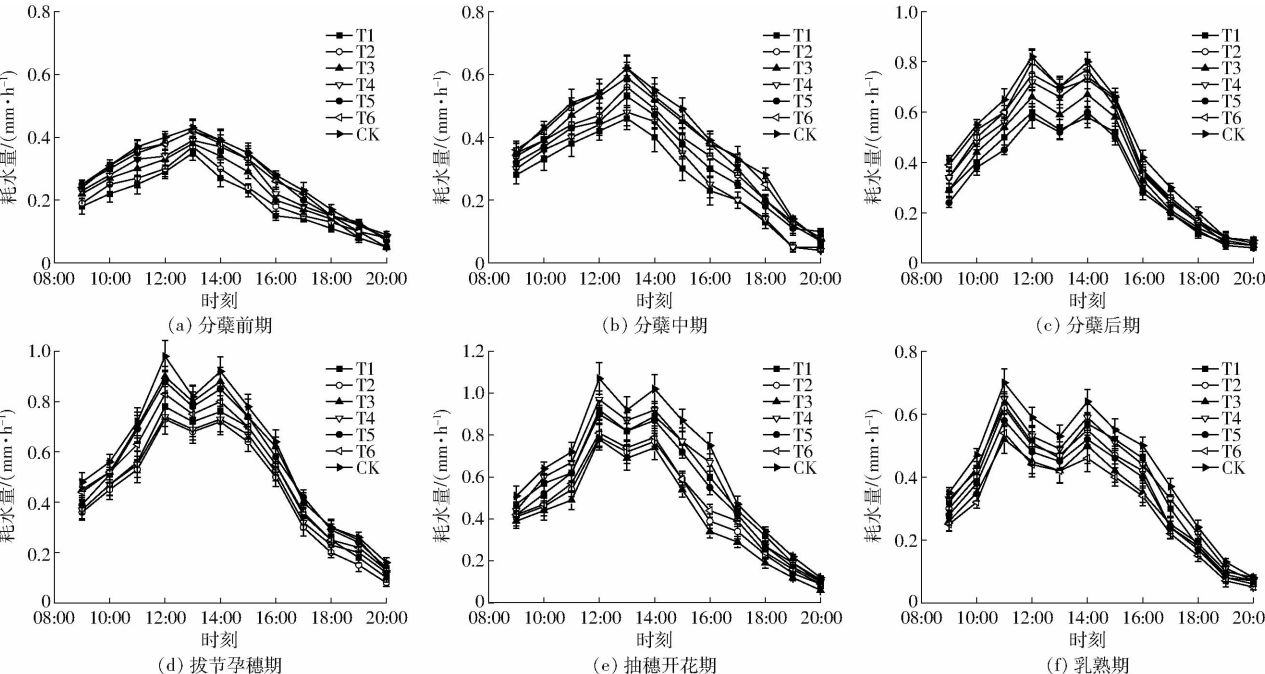


图2 水稻各生育阶段逐时耗水量变化特征

Fig. 2 Diurnal variation characteristics of hourly water consumption at different growth stage of rice

期遭遇旱的 T4 处理逐时耗水量较 T1 处理均有所增加,充分灌溉的 T3、T6 处理逐时耗水量峰值与 CK 处理差异不显著。分蘖后期各处理 08:00 后逐时耗水量提升幅度较分蘖前期、分蘖中期有所提高,经历连续亏水的 T1、T5 处理耗水量峰值仅为 CK 处理的 73.17%、70.73%。至拔节孕穗期,CK 处理耗水量峰值最大,为 0.98 mm/h,较其他处理提高 0.08 ~ 0.25 mm/h,保留水层的 T3 处理耗水量峰值略高于 T5 处理,由于 12:00—13:00 植株受高温和强辐射影响,叶片气孔开度减小以减少自身蒸腾所消耗的水量,这体现了叶片为适应水分亏缺的自身调节机制^[12]。水稻各处理耗水量在 13:00—14:00 有所回升,T2、T4 处理由于受旱程度较为严重,耗水量峰值较 CK 处理分别减小 25.51%、24.49%。抽穗开花期 CK 处理逐时耗水量为 0.12 ~ 1.07 mm/h,T3 处理各时段耗水量均为最低,介于 0.06 ~ 0.79 mm/h 之间,说明严重水分亏缺下水稻耗水量受气象因子日变化规律影响不大;各处理在 08:00—11:00 的耗水量稳步上升,11:00—12:00 耗水量增幅最大,较上一时期平均提高 38.09%,CK 处理耗水量峰值最大,为 1.02 mm/h,T3 处理最低,为 0.74 mm/h。T1、T2、T6 处理在第 2 个耗水量高峰后迅速降低至 0.34、0.39、0.44 mm/h。乳熟期各处理 2 个耗水量峰值分别为 0.52 ~ 0.70 mm/h、0.46 ~ 0.64 mm/h,各处理耗水量在 14:00 后开始下降且处理间差异逐渐减小。

2.4 水稻阶段耗水特征对水分利用效率的影响

作物水分利用效率是指作物单位耗水量所生产

的籽粒质量,是表征灌溉农业水分利用水平的重要指标^[13]。不同处理的水稻产量、总耗水量及水分利用效率见表 3。由表 3 可知,各处理 WUE 由大到小依次为 T4、T6、T1、T5、CK、T3、T2,T4 处理 WUE 为 1.931 kg/m³,较 CK 处理增加 4.60%,T2 处理 WUE 为 1.776 kg/m³,较 CK 处理减少 3.79%。结合产量与水分利用效率综合分析,T4 处理 WUE 明显增加是产量提高与耗水量降低综合调控的结果,实现了节水与稳产的高效统一,而 T6 处理 WUE 较高的原因是其耗水量降幅较产量降幅大而引起。

表 3 各处理水稻产量、总耗水量和水分利用效率
Tab.3 Yield, water consumption and water use efficiency of different treatments of rice

处理	Y/(kg·hm ⁻²)	ET/mm	WUE/(kg·m ⁻³)
T1	5 721.27 ^{fg}	304.32 ^g	1.880 ^{ab}
T2	5 636.21 ^g	319.15 ^f	1.776 ^d
T3	5 825.91 ^{ef}	324.56 ^e	1.795 ^{cd}
T4	6 694.91 ^c	346.77 ^c	1.931 ^a
T5	6 180.85 ^d	328.07 ^d	1.874 ^{ab}
T6	6 731.62 ^{bc}	355.46 ^b	1.894 ^{ab}
CK	7 168.57 ^a	388.43 ^a	1.846 ^{bc}

由于水稻植株对水分的消耗是一个连续变化的过程,故水稻耗水过程对 WUE 的影响也应是一个连续过程,即水稻阶段耗水量不仅会对 WUE 产生直接影响,还会影响作物后续生育阶段的耗水量,进而对 WUE 产生一定间接影响。采用通径分析明晰了各生育期耗水量对 WUE 的直接作用与间接作用。各变量与 WUE 的通径图如图 3 所示,其中自变量为阶段耗水量(ET₁ ~ ET₆),因变量为 WUE,e 为误差项,

* 表示在显著性水平 0.05 下显著(下同)。各变量间及变量与 WUE 的通路系数如图 3 所示。

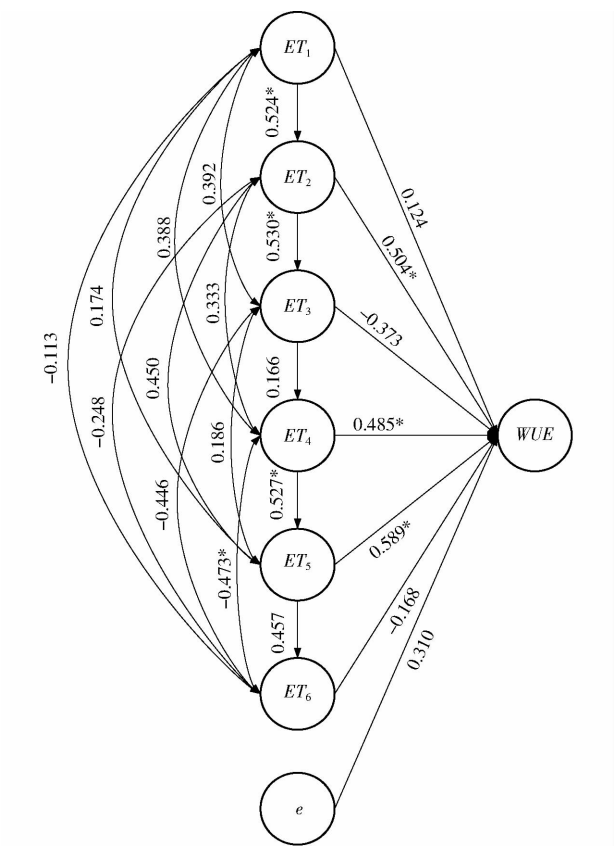


图 3 阶段耗水量对 WUE 的通路图
Fig. 3 Path diagram of water consumption on rice WUE

依次计算阶段耗水量对水稻 WUE 的直接作用及间接作用,以及最大的 5 个变量对 WUE 的决定系数和各变量对 R^2 总贡献,结果见表 4、5。各生育阶段耗水量对 WUE 的直接作用由大到小排序为 ET_5 、 ET_2 、 ET_4 、 ET_3 、 ET_6 、 ET_1 ,其中 ET_3 和 ET_6 对 WUE 的直接作用为负,表明分蘖后期、乳熟期耗水量对 WUE 存在直接负效应;各变量对 WUE 的 R^2 贡献率均为正值,且排序与直接作用相一致。各生育阶段耗水量对 WUE 间接影响总和由大到小依次为 ET_1 、 ET_4 、 ET_2 、 ET_3 、 ET_5 ,其中 $ET_4 \times ET_5$ 、 $ET_1 \times ET_2$ 、 $ET_2 \times ET_5$ 和 $ET_2 \times ET_4$ 间接通路系数较大;决定系数较大的指标由大到小依次为 ET_5 、 $ET_4 \times ET_5$ 、 $ET_2 \times ET_5$ 、 ET_2 、 ET_4 ,误差项的决定系数为 0.096。总体来看, ET_5 对 WUE 的决定系数及总贡献均最大,表明抽穗开花期耗水量是影响 WUE 的最重要变量。

2.5 水稻阶段耗水特征对生物量水分利用效率的影响

阶段生物量水分利用效率($SWUE_i$)反映了单位耗水量提高阶段植株干物质积累的能力。图 4 为各生育期水稻的 $SWUE_i$ 。由图 4 可知,整个生育期各处理 $SWUE_i$ 均呈“双峰”曲线。T5 处理 $SWUE_1$ 显著高于其他处理,为 0.09 g/mm;T2、T3、T4 处理间差异不显著。分蘖中期以 T1 处理 $SWUE_2$ 最高,为 0.25 g/mm,除 T5、T6 处理外,其他处理 $SWUE_2$ 均高

表 4 阶段耗水量对水稻水分利用效率的直接作用和间接作用							
Tab. 4 Direct and indirect effects of stage water consumption on WUE of rice							
指标	直接作用	间接作用					
		总和	通过 ET_2	通过 ET_3	通过 ET_4	通过 ET_5	通过 ET_6
ET_1	0.124	0.427	0.264	-0.146	0.188	0.102	0.019
ET_2	0.504	0.322		-0.198	0.213	0.265	0.042
ET_3	-0.373	0.265			0.081	0.109	0.075
ET_4	0.485	0.413				0.334	0.079
ET_5	0.589	-0.045					-0.045
ET_6	-0.168						

表 5 阶段耗水量对 WUE 的决定系数和对 R^2 总贡献			
Tab. 5 Coefficient of determination of water consumption on WUE and total contribution to R^2			
变量	决定系数	变量	对 R^2 总贡献
ET_5	0.347	ET_1	0.009
$ET_4 \times ET_5$	0.301	ET_2	0.290
$ET_2 \times ET_5$	0.267	ET_3	0.084
ET_2	0.254	ET_4	0.175
ET_4	0.235	ET_5	0.348
e	0.096	ET_6	0.035

理 $SWUE_4$ 与 CK 处理差异均达显著水平。各处理 $SWUE_5$ 随着土壤亏水程度的加剧总体呈降低趋势, T2 处理最低,为 0.16 g/mm。乳熟期各处理 $SWUE_6$ 逐渐降低, T4 处理降幅最大,为 0.11 g/mm。由水稻 $SWUE_i$ 与产量、 WUE 的相关系数(表 6)可知, $SWUE_2$ 、 $SWUE_3$ 与水稻产量呈负相关($P > 0.05$),与 WUE 呈正相关($P > 0.05$)。 $SWUE_4$ 仅与产量达显著正相关水平($P < 0.05$),而 $SWUE_5$ 与产量、 WUE 均呈显著正相关($P < 0.05$),表明提高 $SWUE_5$ 有利于实现水稻节水增产的高效统一。以分蘖前期、分蘖中期、分蘖后期、拔节孕穗期、抽穗开花期耗水量($ET_1 \sim ET_5$)为自变量,抽穗开花期生物量水分利用

于 CK 处理。CK 处理 $SWUE_3$ 处于较低水平,为 0.10 g/mm,与 T3、T6 处理差异不显著。各亏水处

效率($SWUE_5$)为因变量建立水分响应方程,得

$$SWUE_5 = 0.039 - 0.000\ 3ET_1 + 0.000\ 2ET_2 - 0.000\ 5ET_3 + 0.001\ 3ET_4 + 0.001\ 5ET_5$$
$$(R^2 = 0.921; P < 0.05) \quad (5)$$

该方程拟合效果较为理想,且通过显著性检验。在式(5)中, ET_1 、 ET_2 、 ET_3 未通过显著性检验($P_1 = 0.105$ 、 $P_2 = 0.124$ 、 $P_3 = 0.089$),表明分蘖期耗水量对 $SWUE_5$ 影响不显著; ET_4 、 ET_5 通过显著性检验且系数为正($P_4 = 0.036$ 、 $P_5 = 0.029$),表明拔节孕穗期、抽穗开花期耗水量对 $SWUE_5$ 存在显著正影响。

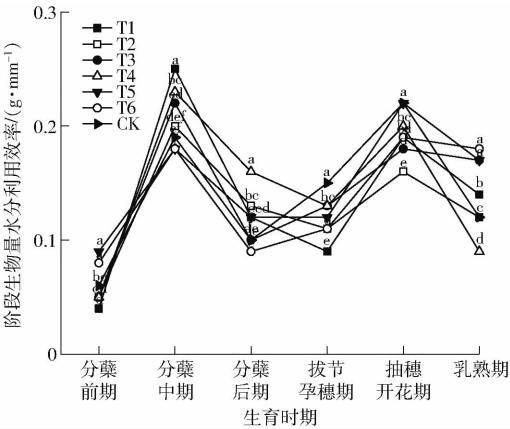


图 4 不同处理水稻阶段生物量水分利用效率

Fig. 4 Biomass water use efficiency of rice for different treatments at different stages

表 6 $SWUE_i$ 与产量、 WUE 的相关系数

Tab.6 Correlation coefficient of $SWUE_i$ with yield and WUE

指标	$SWUE_1$	$SWUE_2$	$SWUE_3$	$SWUE_4$	$SWUE_5$	$SWUE_6$
产量	0.310	-0.453	-0.144	0.704 *	0.735 *	-0.190
WUE	0.245	0.164	0.320	0.081	0.614 *	-0.201

3 讨论

作物耗水量不仅是田间水平平衡的重要组成部分,也是制定灌溉制度、评价气候资源和水份供应状况的前提,对作物耗水规律的研究能够明确水稻调节自身水分损耗能力及适应干旱环境的能力差异^[14]。本研究中,水稻生育期内日耗水量及阶段耗水量均呈现出“低-高-低”的变化趋势,这与路兴花等^[15]研究结论一致。研究结果还表明,分蘖期耗水模系数占全生育期 44%,可能是由于分蘖期阶段历时最长,地上部光合产物覆盖率较低,土壤无益蒸发强度增大所致。水稻是耗水量较大的作物,对其耗水量的准确监测对提高水分利用效率和水资源优化配置具有重大意义。本研究结果表明,严重亏水各处理昼间耗水量受气象因子变化的影响不大,在 12:00—14:00 表现最为明显。由于较重干旱胁迫使得植物通过关闭大部

分气孔来调节自身耗水,而气孔关闭导致环境因子失去了对植物耗水特性的间接控制,导致气象因子对耗水量的影响有所减弱。分蘖后期至乳熟期 13:00—14:00 耗水量峰值低于第 1 个耗水量峰值,是因为叶片气孔导度受高温和辐射作用而选择主动降低或关闭,当环境条件缓解后,叶片气孔导度不能迅速恢复原始状态,而是存在一定时间滞后性^[16]。乳熟期耗水量峰值时间稍有提前,可能是因为此时期水稻植株生理活动较弱,叶片气孔导度及蒸腾速率均较上一时期明显降低,在未达到白天最高温度时,叶片已经提前进入“午休”状态。这与刘笑吟等^[17]的研究结果相似。

水分利用效率反映了作物生长中能量转化效率,同时也是评价缺水条件下作物生长适宜程度的一个指标^[18]。本研究结果表明,拔节孕穗期、抽穗开花期连续干旱的 T2 处理较 CK 处理减产 21.38%,导致水分利用效率低下,这和汪妮娜等^[19]、夏琼梅等^[20]的研究结论一致。这是因为这两个阶段光合产物的形成需要水分作为载体来运转到结实器官,水分亏缺抑制了茎叶积累的营养物质向籽粒的转移,从而严重减产。T4 处理不仅获得了较高的产量,同时实现了水分高效利用。因此,在实际生产中从获得高产和提高水稻 WUE 的角度,应在水稻生育前期和末期进行适当水分调控,在拔节孕穗期和抽穗开花期进行充分灌水,有利于促进水稻的光合作用,激发水稻的生长和生产潜能,提高产量及 WUE 。本研究采用通径分析明确了阶段耗水量对 WUE 的影响,计算结果表明,在水稻分蘖前期, ET_1 对 WUE 的间接影响大于直接影响;而开始进入旺盛的营养生长阶段(分蘖中期)后, $ET_2 \sim ET_6$ 对 WUE 的直接影响大于间接影响。各生育阶段耗水量对 WUE 的直接作用及对 R^2 总贡献大小排序一致,表明各阶段耗水量对 WUE 的直接作用起到主导调控作用。 ET_3 、 ET_6 对 WUE 的直接作用为负,是因为分蘖后期适当水分调控可促进有效分蘖,保证后期成穗率而利于增产;而乳熟期水稻植株对水分敏感性较低,因亏水而减产影响较小^[21],故适当减少耗水量有利于 WUE 的提高。从决定系数来看, ET_5 、 $ET_4 \times ET_3$ 相对较高,表明拔节孕穗期、抽穗开花期耗水量对 WUE 的影响最为显著,拔节孕穗期植株各项生理活动旺盛,抽穗开花期为生殖生长的关键阶段^[22]。在这两阶段保持水分充足,有利于激发水稻叶片光合作用能力,极大地促进光合物质生产并向着提高 WUE 的方向进行。 $ET_2 \times ET_5$ 和 ET_2 对 WUE 决定系数也处于较高水平,且 $ET_2 \times ET_5$ 高于 ET_2 ,

表明在分蘖中期加强灌水以期作为营养器官提供良好发育环境外,还应注意在关键生育期保证供水充足,极大提升产量以获得高 WUE 。综合各评价指标分析, ET_2 、 ET_4 、 ET_5 3 个变量对 WUE 的直接作用、 R^2 总贡献和决定系数均较高,且与其相关的间接作用及决定系数均排在前列,表明分蘖中期、拔节孕穗期和抽穗开花期耗水量对 WUE 存在显著效应。

阶段生物量水分利用效率实质上反映了植物阶段耗水量与阶段干物质生产之间的关系,是评价植物生长适宜程度的综合生理生态指标^[23]。研究各时期水分亏缺对 $SWUE_i$ 的影响进而对产量及 WUE 的贡献具有重要意义。本研究结果表明,水稻 $SWUE_i$ 分别在分蘖中期和抽穗开花期达到高峰,表明作物在这两阶段对水分利用能力相比其他时期更强,分蘖中期对水分亏缺较为敏感,水量充足使茎蘖增长速度加快,地上部群体冠层覆盖率与光合生产物质的积累速率迅速提升^[24]。抽穗开花期为水稻生殖生长的关键阶段,是水稻光合作用及新陈代谢最旺盛时期,也是对水分最敏感阶段,此时期充分灌水有利于水稻茎鞘、穗部生长,抽穗扬花,对于抽穗开花期干物质积累起到积极促进作用,也为成熟期获得较高干物质进而获得高产提供必要条件。这与张亚琦等^[25]对稻谷研究认为仅抽穗期生物量水分利用效率最高有所差异,可能是与作物种类、土壤结构及生长环境不同有关。研究结果还发现,仅有 $SWUE_5$ 与水稻产量、 WUE 呈显著正相关,且 $SWUE_5$ 对拔节孕穗期、抽穗开花期耗水量正响应关系达显著水平,这是由于拔节孕穗期耗水量增加会促使叶片、茎鞘光合产物易于向穗部转运,对 $SWUE_5$ 增加提供重要保证^[26],而抽穗开花期耗水量增加引起干

物质积累提升幅度高于耗水量本身增加幅度,故 ET_5 对 $SWUE_5$ 的正影响最为显著。

4 结论

(1)水稻阶段耗水量在生育期内大体表现为先上升后下降,整个分蘖期均以 T1 处理耗水量最低, T3 处理在拔节孕穗期复水后耗水量较 CK 处理高 6.10%;抽穗开花期各处理耗水量均显著低于 CK 处理,乳熟期 T6 处理耗水量较 CK 处理减幅最大,为 30.37%;拔节孕穗期耗水模系数均值最大,为 23.09%,乳熟期耗水模系数仍较高,为 16.02%。水稻生育期内昼、夜间耗水量呈先上升后下降趋势,抽穗开花期昼、夜间耗水量均值达到最大,为 6.32、0.76 mm/d。

(2)分蘖前期、分蘖中期水稻逐时耗水特征呈倒“V”形曲线,水稻耗水量高峰出现在 12:00—13:00;分蘖后期至乳熟期水稻逐时耗水特征呈“M”形曲线,水稻耗水量高峰分别出现在 11:00—12:00、13:00—14:00;乳熟期首个耗水量峰值相对提前,为 10:00—11:00;抽穗开花期各处理耗水量峰值最高,为 0.78 ~ 1.07 mm/h。

(3)阶段耗水量对 WUE 直接作用与对 R^2 总贡献的排序一致,由大到小依次为 ET_5 、 ET_2 、 ET_4 、 ET_3 、 ET_6 、 ET_1 ,对 WUE 影响决定系数较大变量依次为 ET_5 、 $ET_4 \times ET_5$ 、 $ET_2 \times ET_5$ 、 ET_2 、 ET_4 ; $SWUE_5$ 与水稻产量、 WUE 均达显著相关水平, ET_4 、 ET_5 对 $SWUE_5$ 存在显著正影响。综上分析,建议在寒地黑土区灌溉水量有限的条件下,应该首先满足抽穗开花期、拔节孕穗期的灌溉用水,以保证获取高产同时 WUE 达到最大,其次是保证分蘖中期的水分供应,这有利于水稻茎蘖生长,形成合理高产群体。

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 Irrigation and Drainage, 2010, 29(5): 139-142. (in Chinese)

[2] 山立,邹宇锋. 我国旱区农业的地位和发展潜力及政策建议[J]. 农业现代化研究, 2013, 34(4):425-430. SHAN Li, ZOU Yufeng. Status and potential for development of China's dryland agriculture and suggestions on its policymaking [J]. Research of Agricultural Modernization, 2013, 34(4):425-430. (in Chinese)

[3] 程裕伟,马富裕,冯治磊,等. 滴灌条件下春小麦耗水规律研究[J]. 干旱地区农业研究, 2012, 30(2):112-117. CHENG Yuwei, MA Fuyu, FENG Zhilei, et al. Study on water consumption rules in spring wheat under drip irrigation[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2012, 30(2):112-117. (in Chinese)

[4] 董浩,陈雨海,周勋波. 灌溉和种植方式对冬小麦耗水特性及干物质生产的影响[J]. 应用生态学报, 2013, 24(7):1871-1878. DONG Hao, CHEN Yuhai, ZHOU Xunbo. Effects of irrigation and planting pattern on winter wheat water consumption characteristics and dry matter production[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2013, 24(7):1871-1878. (in Chinese)

[5] 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):1026-1036. ZHU Guang, ZHAN Mingfei, ZHU Kuanyu, et al. Effects of alternate wetting and drying irrigation on yield and water use efficiency of rice[J]. Acta Agronomica Sinica, 2016, 42(7):1026-1036. (in Chinese)

[6] ZHOU Qun, CHENG Xinju, WANG Z Q, et al. Grain yield and water use efficiency of super rice under soil water deficit and alternate wetting and drying irrigation[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2017, 16(5):1028-1043.

[7] 迟道才,佟延旭,陈涛涛,等. 多生育期不同水分胁迫耦合对水稻产量及水分生产率的影响[J]. 沈阳农业大学学报, 2016, 47(1):71-77. CHI Daocai, TONG Yanxu, CHEN Taotao, et al. Effects of water stress coupling in different growth stage on rice yield and

- water productivity[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2016, 47(1):71–77. (in Chinese)
- [8] 董淑喜, 徐淑琴. 水分胁迫对寒区水稻生长特性及产量的影响[J]. 灌溉排水学报, 2008, 27(6):64–66.
DONG Shuxi, XU Shuqin. The influence of the different degrees in different periods of water stress on rice growth characteristic and yield in cold region[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2008, 27(6):64–66. (in Chinese)
- [9] 刘展鹏, 褚琳琳. 作物干旱胁迫补偿效应研究进展[J]. 排灌机械工程学报, 2016, 34(9):804–808.
LIU Zhanpeng, CHU Linlin. Advances in research on compensation effects of crops under drought stress[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2016, 34(9):804–808. (in Chinese)
- [10] 周英捷, 梁燕菲, 李伏生. 不同时期亏水对糯玉米产量和水分利用的影响[J]. 玉米科学, 2012, 20(2):119–123.
ZHOU Yingjie, LIANG Yanfei, LI Fusheng. Effect of water deficit at different growth stages on yield and water use of sticky maize[J]. Maize Science, 2012, 20(2):119–123. (in Chinese)
- [11] BUCKLEY T N. The control of stomata by water balance[J]. New Phytologist, 2005, 168(2):275–291.
- [12] O'TOOLE J C, CRUZ R T. Response of leaf water potential, stomatal resistance, and leaf rolling to water stress[J]. Plant Physiology, 1980, 65(3):428–432.
- [13] 时学双, 李法虎, 闫宝莹, 等. 不同生育期水分亏缺对春青稞水分利用和产量的影响[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(10):144–151.
SHI Xueshuang, LI Fahu, YAN Baoying, et al. Effects of water deficit at different growth stages on water use and yield of spring highland barley[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(10):144–151. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20151019&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.10.019. (in Chinese)
- [14] 招礼军, 李吉跃, 于界芬, 等. 干旱胁迫对苗木蒸腾耗水日变化的影响[J]. 北京林业大学学报, 2003, 25(3):42–47.
ZHAO Lijun, LI Jiyue, YU Jiefen, et al. Daily variation in transpiring water-consumption rates of seedlings in different drought stress[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2003, 25(3):42–47. (in Chinese)
- [15] 路兴花, 吴良欢, 庞林江. 不同土壤水分含量对水稻水分利用特征的影响[J]. 中国水稻科学, 2009, 23(2):186–190.
LU Xinghua, WU Lianghuan, PANG Linjiang. Effects of soil moisture on water utilization characteristics of rice[J]. Chinese Journal of Rice Science, 2009, 23(2):186–190. (in Chinese)
- [16] ASSENG S, RITCHIE J T, SMUCKER A J M, et al. Root growth and water uptake during water deficit and recovering in wheat[J]. Plant & Soil, 1998, 201(2):265–273.
- [17] 刘笑吟, 王冠依, 杨士红, 等. 不同时间尺度节水灌溉水稻腾发量特征与影响因素分析[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(8):91–100.
LIU Xiaoyin, WANG Guanyi, YANG Shihong, et al. Influence factors and characteristics of transpiration and evaporation in water-saving irrigation paddy field under different temporal scales[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(8):91–100. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20160813&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.08.013. (in Chinese)
- [18] 栗丽, 洪坚平, 王宏庭, 等. 水氮互作对冬小麦耗水特性和水分利用效率的影响[J]. 水土保持学报, 2012, 26(6):291–296.
LI Li, HONG Jianping, WANG Hongting, et al. Effects of nitrogen and irrigation interaction on water consumption characteristics and use efficiency in winter wheat[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2012, 26(6):291–296. (in Chinese)
- [19] 汪妮娜, 黄敏, 陈德威, 等. 不同生育期水分胁迫对水稻根系生长及产量的影响[J]. 热带作物学报, 2013, 34(9):1650–1656.
WANG Nina, HUANG Min, CHEN Dewei, et al. Effects of water stress on root and yield of rice at different growth stages[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2013, 34(9):1650–1656. (in Chinese)
- [20] 夏琼梅, 毛桂祥, 王定开, 等. 幼穗分化期至齐穗期水分胁迫对水稻产量及功能叶性状的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2015, 33(3):111–116, 27.
XIA Qiongmei, MAO Guixiang, WANG Dingkai, et al. Effects of water stress on rice grain yield and functional leaf traits during panicle differentiation to full heading stages[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2015, 33(3):111–116, 27. (in Chinese)
- [21] 刘慧, 魏永霞, 汝晨. 寒地黑土区水稻植株干物质积累对耗水过程的响应[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(7):195–204.
LIU Hui, WEI Yongxia, RU Chen. Response of rice dry matter accumulation to water consumption process in cold black soil region[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(7):195–204. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20180724&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.07.024. (in Chinese)
- [22] 何海兵, 武立权, 杨茹, 等. 干旱区控制灌溉下水稻光合特性与蒸腾效率研究[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(9):186–193.
HE Haibing, WU Liquan, YANG Ru, et al. Photosynthesis characteristics and transpiration efficiency of rice plants under controlled irrigation technology in arid region[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(9):186–193. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20160927&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.09.027. (in Chinese)
- [23] 曹生奎, 冯起, 司建华, 等. 植物水分利用效率研究方法综述[J]. 中国沙漠, 2009, 29(5):853–858.
CAO Shengkui, FENG Qi, SI Jianhua, et al. Summary on research methods of water use efficiency in plant[J]. Journal of Desert Research, 2009, 29(5):853–858. (in Chinese)
- [24] 周毅, 郭世伟, 宋娜, 等. 水分胁迫和供氮形态耦合作用下分蘖期水稻的光合速率、水分与氮素利用[J]. 中国水稻科学, 2006, 20(3):313–318.
ZHOU Yi, GUO Shiwei, SONG Na, et al. Effects of nitrogen form and water stress interaction on photosynthesis, utilization of water and nitrogen of rice plants at the tillering stage[J]. Chinese Journal of Rice Science, 2006, 20(3):313–318. (in Chinese)
- [25] 张亚琦, 李淑文, 付巍, 等. 施氮对杂交谷子产量与光合特性及水分利用效率的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(5):1119–1126.
ZHANG Yaqi, LI Shuwen, FU Wei, et al. Effects of nitrogen application on yield, photosynthetic characteristics and water use efficiency of hybrid millet[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2014, 20(5):1119–1126. (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)