

分蘖期干旱胁迫对水稻光合特性及产量的影响

徐 强<sup>1,3</sup>,马晓鹏<sup>2,4</sup>,吕廷波<sup>1,3</sup>,王东旺<sup>1,3</sup>,白 蒙<sup>1,3</sup>,王泽林<sup>1,3</sup>,牛靖冉<sup>1,3</sup>

(1.石河子大学水利建筑工程学院,新疆 石河子 832000;2.新疆农业科学院土壤肥料与农业节水研究所,新疆 乌鲁木齐 830000;  
3.现代节水灌溉兵团重点实验室,新疆 石河子 832000;4.农业部西北绿洲农业环境重点实验室,新疆 乌鲁木齐 830000)

**摘 要:**采用测坑试验方式,设置 3 个水分梯度(相对田间持水量 80%~85%、70%~75%、60%~65%),以相对田间持水量为 90%~100%为对照,通过对滴灌水稻分蘖期进行干旱胁迫,测定不同处理叶绿素含量、光合特性、叶面积指数、分蘖动态、干物质积累量和产量等指标,分析不同干旱胁迫处理对滴灌水稻光合特性及产量的影响。结果表明:轻度和中度胁迫下水稻拔节期叶片总叶绿素含量分别较 CK 提高 4.66%、17.62%,拔节期净光合速率分别较 CK 提高 5.73%、10.98%,生育后期叶面积指数较 CK 分别提高21.41%、26.49%;轻度和中度干旱胁迫减少了拔节前干物质积累,提高了拔节后干物质积累量,优化干物质积累动态;轻度和中度干旱胁迫有利于控制水稻的分蘖数量,显著提高有效穗数,与 CK 相比提高了 8.05%、23.29%;轻度和中度胁迫下水稻穗粒数和千粒重显著降低,各处理间结实率无显著差异,成穗率显著高于 CK,与 CK 相比 3 种胁迫下成穗率分别提高了 22.83%、32.50%、13.20%;轻度和中度胁迫下产量与 CK 相比分别增加 2.73%、6.08%。滴灌水稻分蘖期水分调控时应考虑利用干旱胁迫的补偿效应,于分蘖期采用轻中度控水措施,有利于滴灌水稻光合作用和产量的提高。

**关键词:**水稻;分蘖期;滴灌;干旱胁迫;光合特性;产量

**中图分类号:**S511;S501 **文献标志码:**A

Effects of drought stress at tillering stage on photosynthetic characteristics and yield of rice

XU Qiang<sup>1,3</sup>, MA Xiaopeng<sup>2,4</sup>, LU Tingbo<sup>1,3</sup>, WANG Dongwang<sup>1,3</sup>,  
BAI Meng<sup>1,3</sup>, WANG Zelin<sup>1,3</sup>, NIU Jingran<sup>1,3</sup>

(1. School of Water Conservancy and Architectural Engineering, Shihezi University, Shihezi, Xinjiang 832000, China;  
2. Institute of Soil Fertilizer and Agricultural Water Saving, Xinjiang Academy of  
Agricultural Sciences, Urumqi, Xinjiang 830000, China;  
3. Key Laboratory of Modern Water Saving Irrigation Corps, Shihezi, Xinjiang 832000, China;  
4. Key Laboratory of Agricultural Environment of Northwest Oasis, Ministry of Agriculture, Urumqi, Xinjiang 830000, China)

**Abstract:** Three water gradients (relative field capacity 80%~85%, 70%~75%, and 60%~65%) were set up by pit test method to regulate water content during the whole tillering period for 30 days. The effects of drought stress on photosynthetic characteristics and yield of drip-irrigated rice were analyzed by measuring chlorophyll content, photosynthetic characteristics, leaf area index, tillering dynamics, dry matter accumulation, and yield under different treatments. The results showed that under mild and moderate stress, the total chlorophyll content in leaves increased by 4.66% and 17.62% respectively at jointing stage. The net photosynthetic rate increased by 5.73% and 10.98% at jointing stage and the leaf area index increased by 21.41% and 26.49% at later growth stage. The dry matter accumulation before jointing was reduced and the dynamic of dry matter accumulation was optimized under mild and moderate drought stress, and the tillering number of rice was controlled and the number of effective panicles increased by 8.05% and 23.29% compared with that of CK under mild and moderate drought stress. The num-

ber of kernal number and 1000-grain weight under mild and moderate stress were decreased significantly, and the seed setting rate among treatments had no significant difference. The panicle forming rate under different drought stresses at tillering stage were significantly increased by 22.83%, 32.50% and 13.20%, respectively, compared with CK. The yield under mild and moderate stresses increased by 2.73% and 6.08% over that of CK, respectively. The compensation effect of drought stress should be fully utilized in water regulation of drip irrigation rice at tillering stage, and the mild and moderate water control measures should be adopted at tillering stage, which is beneficial to the improvement of photosynthesis and yield of drip irrigation rice.

**Keywords:** rice; tillering stage; drip irrigation; drought stress; photosynthetic characteristics; yield

干旱胁迫是影响水稻生产的第一大障碍因子<sup>[1-2]</sup>,其对水稻产量的影响主要是通过影响水稻叶片的光合机构,降低其光合能力<sup>[3]</sup>。研究分蘖期干旱胁迫对水稻光合特性及产量的影响并提出合理调控措施,对指导滴灌水稻生产实践意义重大。前人关于水稻干旱胁迫的研究大多集中于拔节孕穗期、开花期和灌浆结实期,研究内容主要是生殖生长时期不同程度和时间的干旱胁迫对水稻生长的影响,且多以产量所受影响为主<sup>[4-6]</sup>。水稻不同生育时期需水量存在差异,水稻全生育期中,分蘖期对水分反应迟钝、抗旱性强,水稻分蘖期灌溉水量的合理调控空间较大,具有节水潜力<sup>[7]</sup>。控水控蘖是水稻生产前期重要的技术措施,减少无效分蘖,提高成穗率,对水稻的群体质量和产量有着重要的影响<sup>[8-9]</sup>。关于滴灌水稻分蘖期采取不同水分调控策略对光合特性及产量的影响鲜有报道。本研究测定滴灌水稻分蘖期干旱胁迫下叶绿素含量、光合特性、分蘖动态、干物质量积累等指标,探究滴灌水稻对土壤干旱胁迫的适应性,以期为水稻抗旱节水栽培提供参考。

# 1 材料与方法

## 1.1 试验区概况

试验于 2018 年 5—10 月在新疆石河子大学农试场二连现代节水灌溉兵团重点实验室试验基地(东经 85°59'47'',北纬 44°19'29'',海拔 412 m)进行,该站区为温带大陆性干旱气候,无霜期 171 d,平均地面坡度 6‰,多年平均降水量在 200 mm 左右,平均蒸发量 1 600 mm,平均日照时间 2 700 h,年平均风速 1.5 m·s<sup>-1</sup>。试验田土壤属于重壤土,田间持水量为 21.25%,土壤干容重为 1.56 g·cm<sup>-3</sup>。

## 1.2 试验设计

采用单因素完全随机设计,设 3 个水分处理,试验方案见表 1(干旱胁迫程度划分参考郝树荣等<sup>[10]</sup>)。每个测坑里装一个 sm100 土壤水分自动监测系统(智墒,云智能土壤水温传感器,北京东方润

泽生态科技股份有限公司生产),实时监测各处理土壤水分含量。试验水分控制从分蘖初期开始(即 2018 年 6 月 5 日),控制灌水下限,采用智墒高灵敏度追踪土壤水分变化,对土壤中 0~0.4 m 深度的水分、温度变化进行监测,到拔节期结束水分控制(2018 年 7 月 10 日),各处理土壤水分含量均保持一致。

选用新稻 16 号为试材,于 2018 年 5 月 5 日播种。本试验采用测坑方式进行,每个处理对应一个测坑,测坑面积为 6 m<sup>2</sup>(2 m×3 m),每个处理 3 个重复。模式为一膜两管四行,行距 15-30-15-30-15-30-15-50 cm(15 cm 表示窄行间距,宽行间距为 30 cm,相邻膜间距为 50 cm),穴距为 10 cm。每个测坑共有 4 根毛管,滴灌带间距 20 cm,流量 3.2 L·h<sup>-1</sup>。由人工将稻种点播到孔中,每穴点种 8 粒,深度 2~3 cm,干播湿出,并且将膜孔用土壤封口,防止草害。出苗后及时放苗,每穴保留 6 株,在苗期和分蘖初期分别中耕一次,全生育期人工拔草。各处理施肥管理一致,全生育期施肥总量为厩肥 15 t·hm<sup>-2</sup>,水溶性有机肥 120 kg·hm<sup>-2</sup>,纯氮 300 kg·hm<sup>-2</sup>、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 120 kg·hm<sup>-2</sup>、K<sub>2</sub>O 75 kg·hm<sup>-2</sup>。厩肥和基肥在临秋冬翻地时一次性施用;苗期肥分 3 次随水滴施纯氮 30 kg·hm<sup>-2</sup>,K<sub>2</sub>O 15 kg·hm<sup>-2</sup>;分蘖肥分 3 次随水滴施纯氮 110 kg·hm<sup>-2</sup>,K<sub>2</sub>O 10 kg·hm<sup>-2</sup>;拔节肥分 3 次随水滴施纯氮 110 kg·hm<sup>-2</sup>,K<sub>2</sub>O 25 kg·hm<sup>-2</sup>,有机肥 60 kg·hm<sup>-2</sup>;抽穗期施肥

表 1 试验方案

Table 1 Design of test plan

| 处理<br>Treatment | 分蘖期灌水下限<br>(相对于田间持水量)<br>Irrigation limit at<br>tillering stage/% | 胁迫程度<br>Degree of<br>stress | 其他生育期灌水下限(相对于田间持水量)<br>Irrigation limit at<br>other growth<br>periods/% |
|-----------------|-------------------------------------------------------------------|-----------------------------|-------------------------------------------------------------------------|
| CK              | 90~100                                                            | 无 No                        | 80~90                                                                   |
| T1              | 80~85                                                             | 轻度 Mild                     | 80~90                                                                   |
| T2              | 70~75                                                             | 中度 Moderate                 | 80~90                                                                   |
| T3              | 60~65                                                             | 重度 Severe                   | 80~90                                                                   |

量分 4 次随水滴施纯氮 50 kg · hm<sup>-2</sup>, K<sub>2</sub>O 25 kg · hm<sup>-2</sup>, 有机肥 60 kg · hm<sup>-2</sup>。其他田间管理措施保持一致。

1.3 测定项目与方法

(1)使用智墒对水稻全生育期 0~0.4 m 土层深度的水分、温度变化进行监测。

(2)叶绿素含量:分别于分蘖期(2018 年 6 月 20 日)和拔节期(2018 年 7 月 20 日)选取长势一致的具有代表性的顶三叶,每个测坑随机选取 3 穴。用 95%乙醇提取,测定提取液在 665、649 nm 处的吸光值,参考邵玺文等<sup>[11]</sup>方法计算出叶绿素含量。

(3)光合特性:选择晴朗无云天气,分别于分蘖期(2018 年 6 月 20 日)和拔节期(2018 年 7 月 20 日),每个测坑随机选取长势一致的水稻 3 穴,于北京时间 10:00—20:00 使用便携式光合测定仪(型号 LI-6400,LI-COR 公司,美国)测定稻株最顶端完全展开叶的净光合速率(*Pn*)、气孔导度(*Gs*)、蒸腾速率(*Tr*)以及胞间 CO<sub>2</sub>浓度(*Ci*)等光合特性,每隔 2 h 测定一次。

(4)叶面积指数:分别于拔节期、齐穗期和成熟期选取长势一致的具有代表性的单株完全叶作为标准叶,测量其长宽,按照叶面积=0.75×长×宽(成熟期经验系数为 0.67),每个测坑随机选取 3 穴,烘干称重后用来换算整穴叶面积,以计算叶面积指数  $LAI=S \times N/A$ ,式中,*S* 为单穴叶面积,*N* 为单位土地面积;*A* 为单位面积(m<sup>2</sup>);*LAI* 衰减指数=(灌浆期 *LAI*-黄熟期 *LAI*)/灌浆期 *LAI*。

(5)分蘖动态:每个测坑选取有代表性的 3 穴于 3 叶期前(膜中、边行、棵间)挂牌,2018 年 6 月 5 日开始每隔 7 d 测一次分蘖数量,到分蘖期 42 d 后结束。

(6)干物质积累量:每个测坑收取长势相近的 3 穴水稻,将植株冲洗干净,根、冠分开,在恒温箱中 105℃杀青 30 min,70℃烘至恒重,使用 0.0001 g 感量电子天平称重。

(7)考种测产:每个测坑随机选取 3 穴水稻测产。有效穗数:每穗结实粒数在 5 粒以上的稻穗数(被病、虫危害造成的白穗亦计算在内)。每穗粒数:包括实粒、空瘪粒(谷粒完全未灌浆的为空粒,灌浆充实程度不到 2/3 的为瘪粒)和已脱落粒在内的粒数。千粒重:2 次随机取晒干扬谷粒各 1 000 粒平均重量,两次之差不大于 3%。每个测坑收割后测实际产量。

(8)LWUE 测定: $LWUE=Pn/Tr$ 。

1.4 数据处理

试验数据采用 Excel 2003 进行整理,采用 Spss 19.0 软件进行统计分析,Origin 8.5 作图。

2 结果与分析

2.1 分蘖期干旱胁迫对水稻拔节期叶绿素含量的影响

叶绿素含量对光合作用产生直接影响<sup>[12]</sup>。由表 2 可以看出,干旱胁迫期间,T2 和 T3 处理水稻叶片叶绿素 a、叶绿素 b 含量均低于 CK 对照,随着胁迫程度加深而下降,表明胁迫抑制了叶绿素的合成或加速了其分解。T2、T3 处理水稻叶片总叶绿素含量与 CK 相比分别下降 9.68%、32.31%;T2、T3 处理水稻叶片叶绿素 a 含量与 CK 相比分别下降 31.58%、40.45%;T2、T3 处理水稻叶片叶绿素 b 含量与 CK 处理相比分别下降 2.22%、6.98%。

拔节期,T1、T2 和 T3 处理水稻叶片叶绿素 a、总叶绿素含量均有不同程度恢复,表现为 T2>T1>CK>T3。其中 T1、T2 处理叶绿素 a、总叶绿素含量均超过 CK,表现为超补偿效应,T1、T2 处理叶片叶绿素 a 含量较 CK 分别高出 2.70%、22.29%,总叶绿素含量较 CK 分别高出 4.66%、17.62%,叶绿素 b 含量各处理之间差异不显著。

2.2 分蘖期干旱胁迫对水稻拔节期光合特性的影响

由表 3 可知,分蘖期各处理光合速率、蒸腾速率、气孔导度变化随着干旱程度增加而下降,而胞间

表 2 分蘖期干旱胁迫对水稻叶片叶绿素含量的影响  
Table 2 Effect of water stress at tillering stage on chlorophyll content of drip irrigation rice

| 时期<br>Growth stage     | 处理<br>Treatment | 叶绿素 a<br>Chlorophyll a<br>/(mg · g <sup>-1</sup> ) | 叶绿素 b<br>Chlorophyll b<br>/(mg · g <sup>-1</sup> ) | 总叶绿素<br>Total<br>chlorophyll<br>/(mg · g <sup>-1</sup> ) |
|------------------------|-----------------|----------------------------------------------------|----------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|
| 分蘖期<br>Tillering stage | CK              | 1.25±0.07a                                         | 0.46±0.06a                                         | 1.71±0.04a                                               |
|                        | T1              | 1.29±0.06a                                         | 0.48±0.07a                                         | 1.77±0.09a                                               |
|                        | T2              | 0.95±0.36ab                                        | 0.45±0.03a                                         | 1.55±0.06b                                               |
|                        | T3              | 0.89±0.05b                                         | 0.43±0.03a                                         | 1.32±0.06c                                               |
| 拔节期<br>Jointing stage  | CK              | 1.48±0.07b                                         | 0.45±0.04a                                         | 1.93±0.09b                                               |
|                        | T1              | 1.52±0.07b                                         | 0.50±0.06a                                         | 2.02±0.09b                                               |
|                        | T2              | 1.81±0.12a                                         | 0.46±0.04a                                         | 2.27±0.11a                                               |
|                        | T3              | 1.34±0.27b                                         | 0.42±0.03a                                         | 1.75±0.27c                                               |

注:不同字母表示差异达到  $P<0.05$  显著水平,下同。  
Note:The different letters indicate significant difference at  $P<0.05$ , the same below.

CO<sub>2</sub>浓度变化则与之相反。净光合速率表现为 CK>T1>T2>T3, T1、T2、T3 处理光合速率仅为 CK 的 94.88%、87.26%、60.75%; T1、T2、T3 处理的气孔导度和蒸腾速率均低于 CK, 气孔导度与 CK 对照相比下降幅度分别为 22.22%、57.14%、83.33%, 蒸腾速率与 CK 相比下降幅度分别为 0.24%、22.25%、32.19%; 胞间 CO<sub>2</sub> 浓度则表现为 T3>T2>CK>T1, T2、T3 处理胞间 CO<sub>2</sub> 浓度与 CK 对照相比分别高出 6.32%、14.93%; T2、T3 处理气孔导度下降, 胞间 CO<sub>2</sub> 则升高, 叶片光合速率下降的原因可能是气孔限制。

拔节期复水后, 各处理光合速率有不同程度恢复, 表现为 T2>T1>CK>T3, T1、T2 处理光合速率与

CK 对照相比分别高出 5.37%、10.98%; 表现出超补偿效应, 且不同程度的干旱胁迫补偿效果有差异。T2 处理的气孔导度和蒸腾速率均高于 CK 对照, 蒸腾速率与 CK 对照相比上升幅度为 2.10%, 气孔导度与 CK 对照相比上升幅度为 20.00%; 胞间 CO<sub>2</sub> 浓度则表现为 T3>T1>CK>T2, T1、T3 处理胞间 CO<sub>2</sub> 浓度与 CK 对照相比分别高出 8.13%、19.13%。

分蘖期胁迫时, 各处理 LWUE 表现为 CK>T1>T2>T3, T1、T2、T3 处理叶片水分利用效率仅为 CK 对照的 95.17%、87.93%、80.19%; 拔节期复水后, LWUE 则表现为 T2>T1>CK>T3, T1、T2 处理叶片水分利用效率为 CK 的 1.04、1.09 倍; T3 处理叶片水分利用效率仅为 CK 对照的 86.00%。

表 3 干旱胁迫对水稻光合特性的影响

Table 3 Effect of water stress at tillering stage on photosynthesis of drip irrigation rice

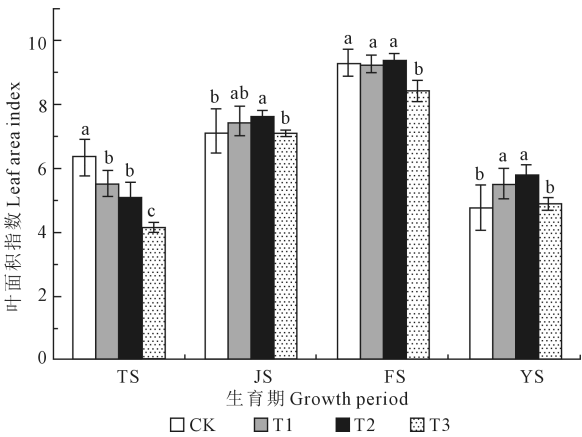
| 时期<br>Growth stage     | 处理<br>Treatment | $Pn/(\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$ | $Tr/(\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$ | $G_s/(\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$ | $C_i/(\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1})$ | LWUE        |
|------------------------|-----------------|--------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|---------------------------------------------|-------------|
| 分蘖期<br>Tillering stage | CK              | 8.79±0.62a                                                   | 4.23±0.27a                                                 | 0.11±0.01a                                                 | 223.1±16.45b                                | 2.07±0.33a  |
|                        | T1              | 8.34±0.75a                                                   | 4.22±0.37a                                                 | 0.09±0.02a                                                 | 222.1±16.65b                                | 1.97±0.37a  |
|                        | T2              | 7.67±0.99ab                                                  | 3.46±0.18bc                                                | 0.07±0.03ab                                                | 237.2±15.48c                                | 1.82±0.14ab |
|                        | T3              | 5.34±0.42b                                                   | 3.20±0.15c                                                 | 0.06±0.02b                                                 | 256.4±14.24a                                | 1.66±0.16b  |
| 拔节期<br>Jointing stage  | CK              | 8.56±0.76b                                                   | 4.27±0.23bc                                                | 0.10±0.01ab                                                | 233.7±15.67bc                               | 2.00±0.19ab |
|                        | T1              | 9.02±0.93b                                                   | 4.32±0.18b                                                 | 0.10±0.02ab                                                | 252.7±14.96b                                | 2.09±0.27a  |
|                        | T2              | 9.50±0.86a                                                   | 4.36±0.47a                                                 | 0.12±0.02a                                                 | 224.2±25.48c                                | 2.17±0.24a  |
|                        | T3              | 7.23±0.37c                                                   | 4.18±0.19c                                                 | 0.09±0.01b                                                 | 278.4±19.94a                                | 1.72±0.14b  |

2.3 分蘖期干旱胁迫对水稻叶面积指数的影响

由图 1 可知, 分蘖期干旱胁迫下滴灌水稻叶面积指数呈先升后降趋势, 并于灌浆期达峰值。分蘖期水分胁迫抑制水稻叶面积的扩展, 随着水分胁迫程度的加重, 叶面积指数降低。水稻在复水之后生长速度加快, 但是之前的胁迫影响了水稻的生长, 减少了分蘖产生。拔节期时, 叶面积指数表现为 T1>T2>CK>T3, T1、T2 处理与 CK, 相比分别高出 3.23%、0.42%; 灌浆期时叶面积指数达到全生育期最大值, 表现为 T2>CK>T1>T3, T2 处理叶面积指数与 CK、T1、T3 处理相比分别高出 0.11%、0.43%、10.52%, 各处理能保持较大叶面积, 更利于水稻光合产物的积累以及最终产量的形成。黄熟期时, 各处理叶面积指数表现为 T2>T1>T3>CK, T1、T2、T3 处理叶面积指数与 CK 对照相比分别高出 21.41%、26.49%、7.28%; 从灌浆期至黄熟期的各处理衰减指数分别为 0.51、0.41、0.39、0.43, T1 和 T2 处理在生育后期仍能够保持较高的群体光合叶面积。

2.4 分蘖期干旱胁迫对水稻分蘖的影响

群体茎蘖消长动态是分蘖发生与成穗状况的直观体现, 合理的茎蘖动态和成穗率是水稻获得高



注: 图中 TS、JS、FS、YS 分别代表分蘖期、拔节期、灌浆期、黄熟期。同时期不同字母表示处理间差异达到  $P<0.05$  显著水平, 下同。

Note: The TS indicates tillering stage; The JS indicates jointing stage; The FS indicates filling stage; The YS indicates yellow ripening stage. The different letters at the same stage indicate significant difference among treatments at  $P<0.05$ , the same below.

图 1 分蘖期干旱胁迫对水稻叶面积指数变化的影响  
Fig.1 Effect of drought stress at tillering stage on leaf area index of drip irrigation rice

产的重要群体指标之一<sup>[13]</sup>。从图 2 中可以看出,分蘖期不同水分处理对水稻分蘖动态的影响较大,各处理分蘖动态同步性较好,均表现为 31 d 达到分蘖最大值,之后趋于稳定。分蘖期不同干旱胁迫程度对分蘖增长速率的影响不同,分蘖期 19 d 以前,分蘖数量表现为 T2>CK>T1>T3,T2 处理的分蘖增长速率明显高于其他处理。T2 处理加快前期分蘖增长速率,降低分蘖后期分蘖增长速率。分蘖 25 d 时,各处理均晒田 5 d,分蘖增长速率明显下降,可有效抑制无效分蘖,并且晒死后期新生分蘖,从而降低分蘖数以及前期干物质积累。分蘖期结束时单穴分蘖数表现为 CK>T1>T2>T3,分蘖期受旱对最终分蘖数具有明显的影响,且有随着干旱胁迫加重而下降的趋势。

2.5 分蘖期干旱胁迫对水稻干物质积累量及其分配的影响

干物质积累动态与产量密切相关,同样的干物质积累量,穗分化前期积累量越大,成穗率越低。优化干物质积累动态是提高成穗率,实现高产的基础<sup>[14]</sup>。图 3 为拔节期、灌浆期、成熟期 3 个时期各处理单穴干物质积累量及其占总干物质质量比例。CK、T1、T2、T3 处理拔节期之前干物质累积及其占总干物质质量的比值分别为 34.14%、30.88%、29.69%、29.76%;干旱胁迫提高了各处理拔节期之后干物质积累量及其占总干质量的比值,拔节期之后 CK 积累了65.86%的干物质质量,T1、T2、T3 处理分别为 69.12%、70.31%、70.24%。由于拔节期前干物质积累量及其占总干物质质量的比例降低,有利于分蘖成穗。同时,由于后期群体光合叶面积较大(表 3),光合产物积累多,T1、T2 处理干物质总量较 CK 有所增加,分别提高 1.06%和 2.88%。

2.6 分蘖期干旱胁迫对水稻产量及产量构成因素的影响

水分胁迫对水稻生长产生的各种影响最终会通过水稻产量体现出来,水稻产量是水分胁迫条件下水稻生理机制的反映<sup>[15]</sup>。表 4 显示各处理有效

穗数表现为 T2>T1>CK>T3,T1、T2 处理有效穗数显著高于 CK 对照,与 CK 相比分别提高了8.05%、23.29%;每穗粒数表现为 CK>T1>T2>T3,T2、T3 处理显著低于 CK;千粒重表现为 CK>T1>T2>T3,T1、T2、T3 处理显著低于 CK;结实率表现为 T1>T2>T3>CK,各处理间无显著差异;分蘖期不同干旱胁迫处

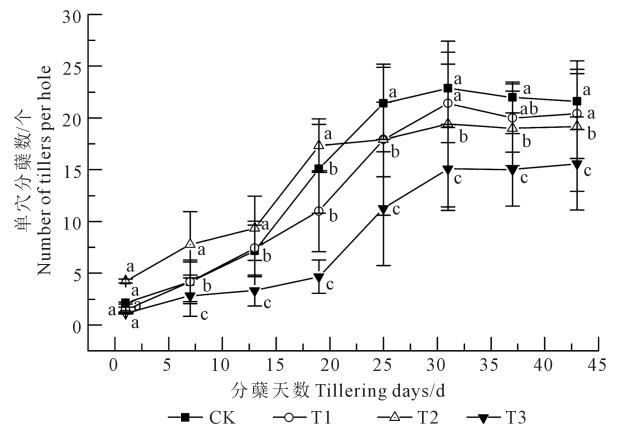


图 2 分蘖期干旱胁迫对水稻分蘖动态的影响  
Fig.2 Effect of drought stress at tillering stage on tillering dynamics of rice under drip irrigation

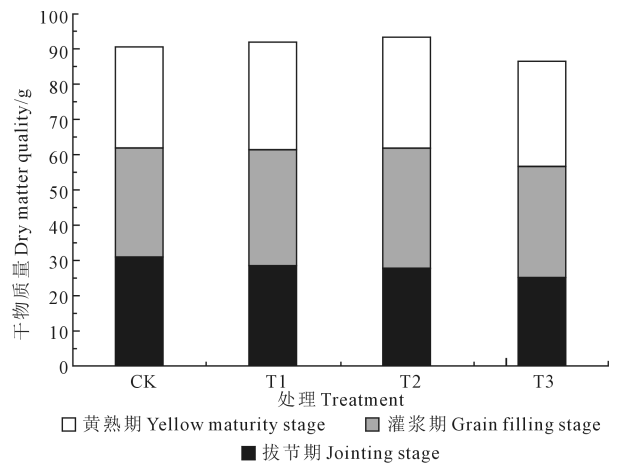


图 3 分蘖期干旱胁迫对水稻干物质积累的影响  
Fig.3 Effects of drought stress at tillering stage on dry matter accumulation of drip irrigation rice

表 4 分蘖期干旱胁迫对水稻产量及产量构成因素的影响

| Table 4 Effect of drought stress at tillering stage on yield and yield composition of drip irrigation rice |                                                         |                                       |                            |                            |                       |                                    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|---------------------------------------|----------------------------|----------------------------|-----------------------|------------------------------------|
| 处理<br>Treatment                                                                                            | 有效穗数<br>/(穗·穴 <sup>-1</sup> )<br>Spike numbers per hole | 每穗粒数/粒<br>Kernel numbers<br>per spike | 千粒重/g<br>1000-grain weight | 结实率/%<br>Seed setting rate | 成穗率/%<br>Panicle rate | 产量/(kg·hm <sup>-2</sup> )<br>Yield |
| CK                                                                                                         | 12.15bc                                                 | 120.68a                               | 25.21a                     | 79.16a                     | 62.12c                | 5963.35c                           |
| T1                                                                                                         | 13.14b                                                  | 115.33a                               | 24.26b                     | 81.20a                     | 76.30b                | 6126.23b                           |
| T2                                                                                                         | 14.98a                                                  | 110.35b                               | 24.17b                     | 80.36a                     | 82.31a                | 6498.69a                           |
| T3                                                                                                         | 10.61c                                                  | 103.99c                               | 22.97c                     | 79.21a                     | 70.32c                | 5632.12d                           |

理对成穗率影响显著,各处理成穗率显著高于 CK, T1、T2、T3 与 CK 相比分别提高了 22.83%、32.50%、13.20%;产量表现为 T2>T1>CK>T3, T1、T2 处理产量与 CK 相比分别增加 2.73%、6.08%, T3 处理则减产 5.88%。

### 3 讨 论

干旱胁迫下,本试验中分蘖期 T1、T2 处理叶绿素 a 含量与 CK 差异不显著,表明植株光合器官功能和结构相对完好。这是干旱胁迫复水后叶片叶绿素含量和光合速率出现超补偿效应的基础<sup>[16-17]</sup>。这与刘展鹏等<sup>[18]</sup>研究得出营养生长阶段或生殖生长阶段的初期,水分胁迫往往具有较好的补偿效应结果一致。雷舜等<sup>[19]</sup>研究发现分蘖期控制灌溉条件下中度晒田可以提高拔节期净光合速率和生育后期叶面积指数。本试验滴灌水稻分蘖期干旱胁迫下光合速率和叶面积指数变化情况与前人结果一致。但本研究的超补偿效应出现的水分下限,比前人研究结果略高,可能与灌溉方式、其它生育期水分处理、试验品种等因素有关。

孙骏威等<sup>[20]</sup>研究认为,干旱胁迫会显著降低植株叶绿素总量,且胁迫程度越高降幅越大。本试验结果表明随着干旱胁迫程度加重,在分蘖期叶绿素总量逐渐下降。李树杏等<sup>[21]</sup>在对水稻的研究中发现叶绿素 a 含量比叶绿素 b 含量在水分胁迫条件下受影响程度大,在水分胁迫后对水分的反应更为敏感。本研究结果亦表明:干旱胁迫对水稻叶片叶绿素 a 含量的影响比对叶绿素 b 含量影响大,总叶绿素含量的下降与叶绿素 a 关系密切。胡颂平等<sup>[12]</sup>认为总叶绿素、叶绿素 a 含量与剑叶净光合速率显著正相关。

当出现干旱胁迫时,作物体内水分含量降低,气孔阻力加大,蒸腾减小,光合速率降低<sup>[22]</sup>。本研究结果表明,分蘖期干旱胁迫条件下气孔的部分关闭而引起的气孔导度的降低是光合速率下降的主要原因,主要表现为光合速率下降和胞间 CO<sub>2</sub> 值的上升。适当水分胁迫可以提高作物体内 SOD、CAT、POD 等酶的活性<sup>[23-24]</sup>,并且在恢复供水后一定时段内仍然保持较高水平,从而增加了作物清除活性氧的能力,抑制叶片的衰老,在轻中度干旱胁迫下能保持较高叶面积,且复水后恢复能力强,更利于水稻光合作用的进行和光合产物的积累以及最终产量的形成。

水稻的高产与成穗率呈正相关关系,成穗率又与茎蘖动态密切相关。许轲等<sup>[25]</sup>认为水稻主要依

靠主茎和一次分蘖成穗的产量贡献,且分蘖早生快发,争取低位蘖有利于增产。一次分蘖的成穗对产量贡献最大,占总产量的 60% 左右。适宜条件下,充分利用有效分蘖叶位,争取分蘖早发多发,是提高单株成穗数和穗部质量、培育高产群体的显著特征之一。本研究表明干旱胁迫使水稻最终分蘖量减少,分蘖期高水分处理(CK)和 T1 处理分蘖数较高,早期分蘖速率较慢,造成最终成穗率较低,而 T3 处理分蘖数量最少,有效穗也较低, T2 处理可促进滴灌水稻分蘖早发,加快早期分蘖速率,减少后期高位蘖分蘖发生,促进低位蘖成穗,进而提高了水稻产量。

Chen 等<sup>[26]</sup>认为以足够穗数为基础,提高抽穗期~成熟期光合效率,从而提高群体库容总充实量,是寒地粳型超级稻的超高产特征。本试验条件下, T1、T2 这 2 个干旱处理有效穗数较高,且在生育后期仍能够保持较高的群体光合叶面积,进而提高了籽粒产量。Huang 等<sup>[27]</sup>认为超级杂交稻单位面积穗数与产量呈显著正相关,对产量贡献最大。这与本试验结果一致, T1、T2 处理有效穗数、成穗率显著提高对产量影响最大。于美芳等<sup>[28]</sup>认为分蘖期干旱胁迫主要导致穗粒数显著降低,同时结实率、千粒重也有一定程度的下降。这与本试验结果一致,干旱胁迫使水稻穗粒数显著下降,随着干旱程度加深,穗粒数下降趋势明显,而结实率、千粒重降低不显著。

### 4 结 论

水稻在分蘖期干旱处理期间及处理结束后均有较强的自我调节能力。不同程度干旱胁迫对水稻的光合特性及产量影响显著。

1) 轻度和中度的干旱胁迫处理拔节期叶绿素 a、b 含量、总叶绿素含量均高于 CK, T1、T2 处理叶片叶绿素 a 含量与 CK 相比分别高出 2.70%、22.29%; T1、T2 处理叶片总叶绿素含量与 CK 相比分别高出 4.66%、17.62%。

2) 拔节期复水后,轻度和中度的干旱胁迫处理光合速率与 CK 相比分别高出 10.98%、5.37%,叶片水分利用效率为 CK 的 1.04、1.09 倍,表现出超补偿效应,且不同程度的干旱胁迫补偿效果有差异。

3) 最终分蘖数表现为 CK>T1>T2>T3,分蘖期受旱对最终分蘖数具有明显的影响,且有随着干旱胁迫加重而下降的趋势。灌浆期叶面积指数达到全生育期最大值, T2 处理叶面积指数与 CK、T1、T3

处理相比分别高出 0.11%、0.43%、10.52%,各处理能保持较大叶面积,更利于水稻光合产物的积累以及最终产量的形成。

4)分蘖期干旱胁迫提高了各处理拔节期之后干物质积累量及其占总干物质质量的比值,T1、T2、T3 处理与 CK 对照相比分别提高 3.26%、4.45%、4.38%。由于拔节期前干物质积累量及占其总干物质质量的比例降低,有利于分蘖成穗。

5)分蘖期不同干旱胁迫处理对成穗率影响显著,T1、T2、T3 处理与 CK 相比分别提高了22.83%、32.50%、13.20%;T1、T2 处理产量与 CK 相比分别增加 2.73%、6.08%,T3 处理则减产 5.88%。

综上所述,在实际生产过程中水稻分蘖期水分调控时应考虑利用干旱胁迫的补偿效应,分蘖期轻中度控水有利于滴灌水稻光合作用和产量的提高,达到滴灌水稻的优质、高产和高效的目标。

参 考 文 献:

[1] Zubaer M A, Chowdhury A K M M, Islam M Z, et al. Effects of water stress on growth and yield attributes of aman rice genotypes[J]. International Journal of Sustainable Crop Production, 2007,2(6):25-30.

[2] Shao X W, Chang-Chun R, Zhao L P, et al. Effects of water stress on growth and yield of rice in tillering stage[J]. Journal of Jilin Agricultural University, 2005,26(3):237-241.

[3] Vinod K, Kurungara S, Gopala Krishnan N, et al. Improving salt tolerance in rice: Looking beyond the conventional [C] // Ahmad P, Azooz M M, Prasad M N V. Salt Stress in Plants: Signalling, Omics and Adaptations. New York: Springer,2013.

[4] 高继平, 张文忠, 隋阳辉, 等. 水分胁迫下水稻拔节孕穗期冠气温度差与产量及品质的关系[J]. 核农学报, 2016,30(3):596-604.

[5] 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.

[6] 江学海, 李刚华, 王绍华, 等. 不同生育阶段干旱胁迫对杂交稻产量的影响[J]. 南京农业大学学报, 2015,38(2):173-181.

[7] 魏征,彭世彰,孔伟丽,等.生育中期水分亏缺复水对水稻根冠及水肥利用效率的补偿影响[J]. 河海大学学报(自然科学版),2010,38(3):322-326.

[8] Sheehy E. 水稻群体成穗率与干物质积累动态关系的模拟研究[J]. 中国水稻科学, 2001,15(2):107-112.

[9] 王抄抄, 孔雷蕾, 李妹娟, 等. 分蘖期控水处理对超级稻产量和生理特性的影响[J]. 华北农学报, 2015,30(5):146-152.

[10] 郝树荣, 郭相平, 王为木, 等. 水稻分蘖期水分胁迫及复水对根系生长的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2007,25(1):149-152.

[11] 邵玺文, 张瑞珍, 童淑媛, 等. 松嫩平原盐碱土对水稻叶绿素含量的影响[J]. 中国水稻科学, 2005,19(6):570-572.

[12] 胡颂平, 王正功, 张琳, 等. 干旱胁迫下水稻叶片光合速率与叶绿素含量的相关性及其基因定位[J]. 中国生物化学与分子生物学报, 2007,23(11):926-932.

[13] 徐俊增, 彭世彰, 魏征. 分蘖期水分调控对覆膜旱作水稻茎蘖动态影响分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2010,38(5):511-515.

[14] 于美芳. 分蘖期干旱胁迫对寒地粳稻产量形成的影响[D]. 哈尔滨:东北农业大学, 2017.

[15] 关贤交, 彭春瑞, 陈先茂, 等. 分蘖期干旱胁迫下养分管理对双季晚稻生长及产量的调控效应[J]. 干旱地区农业研究, 2017,35(3):7-12.

[16] Jie Y, Yang H. Relationship between soil water content and water use efficiency of apple leaves[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2001,12(3):387.

[17] Zhang F J, Zhang K K, Du C Z, et al. Effect of drought stress on anatomical structure and chloroplast ultrastructure in leaves of sugarcane [J]. Sugar Tech, 2015,17(1):41-48.

[18] 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.

[19] 雷舜, 王抄抄, 黄炎, 等. 分蘖期控制灌溉对土温及水稻干物质积累等的影响[J]. 华北农学报, 2016,31(2):153-158.

[20] 孙骏威, 杨勇, 黄宗安, 等. 聚乙二醇诱导水分胁迫引起水稻光合下降的原因探讨[J]. 中国水稻科学, 2004,18(6):65-69.

[21] 李树杏, 郭慧, 李敏, 等. 幼穗形成期水分胁迫后复水对水稻叶片光合特性及物质生产的影响[J]. 华北农学报, 2013,28(5):133-137.

[22] 张玉屏, 朱德峰, 林贤青, 等. 不同时期水分胁迫对水稻生长特性和产量形成的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2005,23(2):48-53.

[23] Camp W V, Willekens H, Bowler C, et al. Elevated levels of superoxide dismutase protect transgenic plants against ozone damage [J]. Nature Biotechnology, 1994,12(2):165-168.

[24] Sun Y Y, Sun Y J, Wang M T, et al. Effects of seed priming on germination and seedling growth of rice under water stress [J]. Acta Agronomica Sinica, 2010,36(11):1931-1940.

[25] 许轲, 唐磊, 张洪程, 等. 不同机械直播方式对水稻分蘖特性及产量的影响[J]. 农业工程学报, 2014,30(13):43-52.

[26] Chen S Q, Xue Q F, Yang L M, et al. Population construction and super-high yield characteristics of japonica super rice in cold regions [J]. Agricultural Science & Technology, 2016,17(3):584-592.

[27] Huang M, Zou Y B, Jiang P, et al. Relationship between grain yield and yield components in super hybrid rice[J]. Agricultural Sciences in China, 2011,10(10):1537-1544.

[28] 于美芳, 王新鹏, 段云轩, 等. 分蘖期干旱胁迫对寒地粳稻光合特性及产量形成的影响[J]. 核农学报, 2017,31(9):1794-1802.