

# 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

关贤交, 彭春瑞, 陈先茂, 陈金, 邱才飞,  
钱银飞, 邵彩虹, 邓国强, 谢江

(江西省农业科学院土壤肥料与资源环境研究所/农业部长江中下游作物生理生态与耕作重点实验室/  
国家红壤改良工程技术研究中心, 江西 南昌 330200)

**摘要:** 针对丘陵双季稻区易发生季节性干旱导致养分供应受阻、水稻生长发育受影响、产量下降等问题, 研究了干旱条件下 5 种养分管理措施(即 T1: 增施钾肥 + 喷清水; T2: 叶面喷施 0.2% ZnSO<sub>4</sub>; T3: 增施钾肥 + 叶面喷施肥 0.2% ZnSO<sub>4</sub>; T4: 提高后期施 N 比例 + 喷清水; CK: 常规施肥 + 喷清水)对双季晚稻生长发育、产量形成以及产量的影响。结果表明, 分蘖期干旱胁迫下, 不同养分管理对双季晚稻生长发育和产量的影响具有明显的差异, 其影响程度由强到弱依次为: T3 > T1 > T2 > T4 > CK。T3 在分蘖期干旱胁迫下能有效促进水稻分蘖能力, 提升苗峰值和有效分蘖数, 最高分蘖数比 CK 高 7.26%, 并显著提高拔节期和齐穗期的叶片 SPAD 值、叶片光合速率和叶片蒸腾速率以及根系活力, 同时还显著增加拔节期、齐穗期和成熟期地上部单株干物重, 改善植株干物质的积累, 其增幅分别在 2.19% ~ 25.22%, 从而显著提高双季晚稻每公顷有效穗数、每穗实粒数、每穗总粒和结实率等产量构成因素, 最终使双季晚稻在干旱胁迫条件下获得较高产量。T3 的产量在所有处理中最高, 达 10.07 t·hm<sup>-2</sup>, 分别比 T1、T2、T4 及 CK 高 6.34%、7.70%、14.17% 和 25.56%。

**关键词:** 双季晚稻; 干旱胁迫; 养分管理; 生长发育; 产量

**中图分类号:** S511.4<sup>+</sup>2 **文献标志码:** A

## Effect of nutrient management on the growth and yield of double cropping late rice under drought stress during tillering stage

GUAN Xian-jiao, PENG Chun-rui, CHEN Xian-mao, CHEN Jin, QIU Cai-fei,  
QIAN Yin-fei, SHAO Cai-hong, DENG Guo-qiang, XIE Jiang

(Soil Fertilizer & Resource and Environment Research Institute, Jiangxi Academy of Agricultural Science/Key Laboratory of Crop Eco-physiology and Farming System for the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River, Ministry of Agriculture, P. R. China / National Engineering and Technology Research Center for Red Soil Improvement, Nanchang, Jiangxi, 330200, China)

**Abstract:** In order to promote rice production in the harsh environments of mountain and hills areas, we conducted five nutrient management methods including adding K fertilizer + spraying clean water(T1), foliage spraying 0.2% ZnSO<sub>4</sub>(T2), adding K fertilizer + foliage spraying 0.2% ZnSO<sub>4</sub>(T3), raising the ratio of N fertilizer in elongation stage + spraying clean water(T4), conventional fertilization + spraying clean water (CK), with the objective of elucidating the effect of the nutrient management methods on the growth and development, yield components and yield of double cropping late rice under drought stress condition. The results revealed significant difference among the five nutrient management methods on the growth and development and yield of double cropping late rice under drought stress condition during tillering stage, with the order of T3 > T1 > T2 > T4 > CK. T3 effectively increased tiller number, the seedling peak value, and number of effective tillers, significantly elevated the SPAD value, the photosynthetic rate and transpiration rate of leaf, root activity at elongation stage and full heading stage, with a range of increase by 2.19% ~ 25.22% compared with CK. In addition, it significantly increased single plant dry matter weight above ground at stem elongation stage and

收稿日期: 2016-04-27

修回日期: 2017-03-09

基金项目: 国家“十二五”科技支撑计划项目(2013BAD07B12); 江西省青年科学基金(20132BAB21402)

作者简介: 关贤交(1979—), 男, 湖南邵阳人, 博士, 副研究员, 从事节水节肥栽培与农田生态研究。E-mail: guanxianjiao@126.com。

通信作者: 彭春瑞, 博士, 研究员, 主要从事作物栽培与农业生态研究。E-mail: pcrfs@163.com。

full heading stage and maturity stage, improving the dry matter accumulation of plant by 5.47% and 8.05% and 7.22% compared with CK, respectively. Furthermore, the yield components including the effective panicles number per hectare, filled grain number per panicle, total grain number per panicle and seed setting rate were significantly enhanced. Finally, the highest yield level was achieved for T3 under drought stress, reaching  $10.07 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$  and being 6.34%, 7.70%, 14.17% and 25.56% higher than T1, T2, T4, and CK respectively.

**Keywords:** double cropping late rice; drought stress; nutrient management; growth and development; yield

作为中国最重要的粮食作物,水稻的常年播种面积和产量分别占全国粮食作物的 27% 和 34% 左右,其生产在粮食生产和国民经济中占有重要地位。我国水稻生产严重依赖生态环境,对于自然灾害和环境变化的胁迫尤为敏感,特别是水、旱灾害严重影响水稻生产。我国又是个严重缺水国家,人均水资源占有量仅为世界平均水平的 1/4,居世界第 109 位<sup>[1-2]</sup>。目前我国农田水分利用率比较低,其中农田灌溉水的利用率平均仅为 40% ~ 45% 左右,远远低于发达国家 70% ~ 80% 的水平。根据权威部门的预测,在不增加现有农田灌溉用水量的情况下,2030 年全国缺水高达 1 300 亿 ~ 2 600 亿  $\text{m}^3$ ,其中农业缺水 500 亿 ~ 700 亿  $\text{m}^3$ <sup>[3]</sup>。因此,加快发展抗旱节水高效农业,对保障我国粮食安全、生态安全和水资源安全具有重要的意义。

南方丘陵区是我国重要稻米产区之一,降雨丰沛、热量充足,但由于降水量时空分布不均,与蒸发量分布不同步,导致季节性干旱,严重阻碍水稻生产<sup>[4-5]</sup>。近年来,国内外关于水稻抗旱节水栽培<sup>[6-7]</sup>、干旱对水稻生理生化<sup>[8-9]</sup>、产量<sup>[10-11]</sup>、品质<sup>[12-13]</sup>、干物质转移与积累<sup>[14-15]</sup>及酶活性<sup>[16-17]</sup>的影响等方面进行了大量研究。这些研究多集中于干旱对水稻产量与品质影响的生态生理效应,而关于通过养分高效管理减轻季节性干旱对双季晚稻危害的研究较少。为改善水稻生产季节性缺水状况,提高水资源和养分利用效率,减小旱灾造成的损失,迫切需要开展双季晚稻抗旱节水栽培研究。为此,本试验在人为造成大田季节性干旱条件下,研究了不同养分管理对双季晚稻生长发育及产量形成的影响,以期通过优化养分管理缓解季节性干旱对水稻生产的危害,为水稻抗旱节水栽培提供理论依据与技术支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验设计

试验于 2014 年在吉安市农科所试验田进行,田间土壤 pH 值为 4.8,有机质含量为  $24.3 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,全氮含量为  $2.7 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,全磷含量为  $0.4 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,速效

磷含量为  $21.4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,有效钾含量为  $113.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。共设 5 个处理,分别为 T1:增施钾肥 + 喷清水;T2:常规施肥 + 叶面喷施 0.2%  $\text{ZnSO}_4$ ;T3:增施钾肥 + 叶面喷施 0.2%  $\text{ZnSO}_4$ ;T4:氮肥后移 + 喷清水;CK:常规施肥 + 喷清水。供试品种为‘荣优 225’, $\text{ZnSO}_4$  采用分析纯。随机区组排列,重复三次,每处理小区面积  $20 \text{ m}^2$ ,小区间作埂并覆塑料薄膜。

本试验氮肥采用尿素,磷肥采用钙镁磷肥,钾肥采用氯化钾。以常规施肥 + 喷清水为对照,常规施肥纯氮施用量为  $210 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ , $\text{N}:\text{P}_2\text{O}_5:\text{K}_2\text{O} = 1:0.5:0.8$ (即常规施肥每公顷施肥量为 456.2 kg 尿素、875 kg 钙镁磷肥和 280 kg 氯化钾),氮、钾肥分基肥和分蘖肥两次施入(基肥:分蘖肥 = 5:5),磷肥做基肥一次性施入,于水稻返青后 15 d 叶面喷施与 0.2%  $\text{ZnSO}_4$  溶液等容量的清水;T1 在 CK 的基础上增施 50% 的钾肥, $\text{N}:\text{P}_2\text{O}_5:\text{K}_2\text{O} = 1:0.5:1.2$ (即每公顷施肥量为 456.2 kg 尿素、875 kg 钙镁磷肥和 420 kg 氯化钾),并于水稻返青后 15 d 叶面喷施与 0.2%  $\text{ZnSO}_4$  溶液等容量的清水;T2 在常规施肥的基础上于水稻返青后 15 d 叶面喷施 0.2%  $\text{ZnSO}_4$  溶液;T3 在常规施肥的基础上增施 50% 的钾肥, $\text{N}:\text{P}_2\text{O}_5:\text{K}_2\text{O} = 1:0.5:1.2$ (施肥量与 T1 相同),并在分蘖期叶面喷施 0.2%  $\text{ZnSO}_4$  溶液;T4 为 30% 氮肥后移,即基肥:分蘖肥:穗肥 = 5:2:3(施肥量与常规施肥相同),并于水稻返青后 15 d 叶面喷施与 0.2%  $\text{ZnSO}_4$  溶液等容量的清水。

### 1.2 田间管理

6 月 25 日播种,7 月 24 日移栽,移栽密度为  $16 \text{ cm} \times 23 \text{ cm}$ ;移栽返青后开始排水晒田,每个小区备好防雨棚,出现突发性降雨时盖上防雨棚,人为造成分蘖期干旱。从开始排水晒田后 10 天每天用美国 TDR300 土壤水分速测仪监测土壤水分含量,并于中午观察水稻新生叶片的卷曲程度,当土壤容积含水量低于 30% 以及 80% 新生叶中午出现轻度卷曲并持续 5 d 后复水。从开始排水晒田到干旱结束,整个时期持续了 22 d 左右,人为造成的晚稻分蘖期干旱与我国南方季节性干旱出现的时期和持续时间相

类似。

正常情况下,江西省双季晚稻本田生育期间降雨量约为 650~780 mm,灌溉量约为 225~240 mm;2014 年 6—10 月江西省吉安县总降雨量约为 721.8 mm(各月具体的雨量分布见图 1),而本试验中双季晚稻大田生育期间的灌溉总量为 185 mm。其它栽培管理措施与大田生产一致。

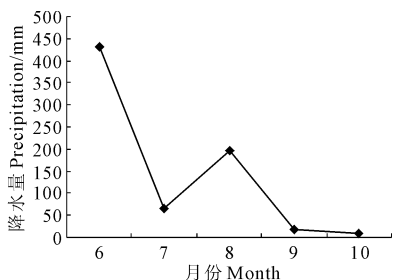


图 1 江西省吉安县 2014 年 6—10 月降水量

Fig.1 Precipitation of Ji'an county of Jiangxi province from June to October in 2014

### 1.3 测定项目

茎蘖动态是在移栽返青后各小区定点 10 蔸作为观察点,每隔 5 d 调查记载一次分蘖数,直到分蘖停止或减少为止。在拔节期和抽穗期用 SPAD 仪测定叶片 SPAD 值,于拔节期和抽穗期用 Li-6400 光合速率测定仪测定倒二叶全展叶光合速率和蒸腾速率,于拔节期、齐穗期和成熟期每小区取 3 蔸测定地上部干物重,在齐穗期用脱脂棉和自封袋取根系伤流液测定根系伤流强度,于收获前两天每小区按平均穗数取 3 蔸考种,测定产量构成因素,分小区实收测产。

### 1.4 数据计算与统计分析

采用 Microsoft Excel 2003 进行数据的录入和计算,运用 SAS9.0 软件进行统计分析,并使用 LSD 法进行多重比较,显著水平  $\alpha = 0.05$ 。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同养分管理对双季晚稻茎蘖动态的影响

如图 2 所示,不同养分管理下水稻茎蘖的动态变化规律基本一致,均表现出随生育期延续先迅速增大、后逐渐减小的变化规律。但 T1、T2 和 T3 在干旱条件下茎蘖数的增加比 CK 要快,尤其是 T3 的茎蘖数在生育中、后期明显要高于 CK,其茎蘖数峰值最大,比 CK 高 7.26%,且达到峰值后下降的速度也较慢。说明增施钾肥 + 叶面喷施 0.2% ZnSO<sub>4</sub> 有利于提高干旱条件下水稻的分蘖能力,增加有效分蘖数,并使水稻保持高的成穗率。

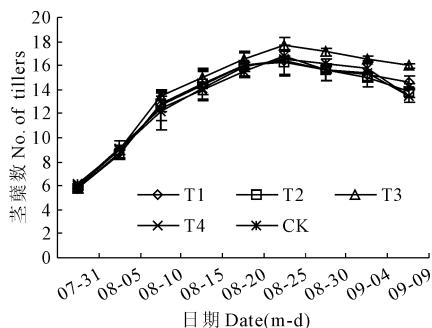


图 2 不同养分管理对双季晚稻茎蘖动态的影响

Fig.2 Effect of different nutrient managements on the tiller dynamic of double cropping late rice

T1: 增施钾肥 + 叶面喷施肥 0.2% ZnSO<sub>4</sub>; T2: 增施钾肥 + 喷清水; T3: 叶面喷施 0.2% ZnSO<sub>4</sub>; T4: 氮肥后移 + 喷清水; CK: 常规施肥 + 喷清水。下同。

T1, adding K fertilizer + foliage spraying 0.2% ZnSO<sub>4</sub>; T2, adding K fertilizer + spraying clean water; T3, foliage spraying 0.2% ZnSO<sub>4</sub>; T4, raising the ratio of N fertilizer in elongation stage + spraying clean water; CK, conventional fertilization + spraying clean water. The same as below.

### 2.2 不同养分管理对双季晚稻叶片 SPAD 值的影响

如图 3 所示,拔节期只有 T3 处理叶片 SPAD 值显著高于 CK,但齐穗期 T1、T2、T3 和 T4 处理的叶片 SPAD 值均显著高于 CK;拔节期和齐穗期均以 T3 最高,分别比 CK 高 2.19% 和 7.61%。说明增施钾肥 + 叶面喷施 0.2% ZnSO<sub>4</sub> 能显著提高干旱条件下晚稻叶片的叶绿素含量,提高叶片光合能力。

### 2.3 不同养分管理对双季晚稻叶片光合速率和蒸腾速率的影响

由表 1 可知,拔节期和齐穗期叶片光合速率的变化和叶片 SPAD 值的变化基本一致。拔节期只有 T3 处理叶片光合速率显著高于 CK,齐穗期 T1、T2

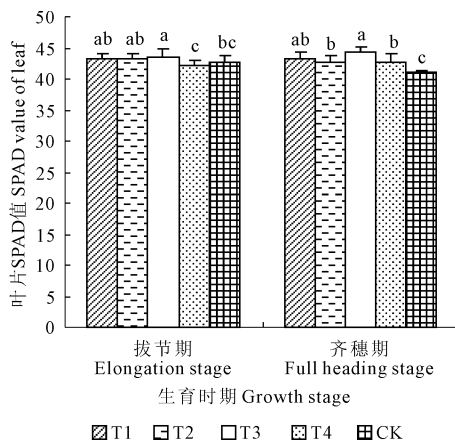


图 3 不同养分管理对双季晚稻叶片 SPAD 值的影响

Fig.3 Effect of different nutrient managements on SPAD value of double cropping late rice

和 T3 处理的叶片光合速率均显著高于 CK; 拔节期和齐穗期叶片光合速率均以 T3 最高, 分别比 CK 高 10.49% 和 13.29%。拔节期 T1、T2 和 T3 处理的叶片蒸腾速率显著高于 CK, 而齐穗期只有 T3 处理显

著高于 CK, 拔节期和齐穗期叶片蒸腾速率均以 T3 最高, 分别比 CK 高 6.61% 和 11.85%。说明增施钾肥 + 叶面喷施 0.2% ZnSO<sub>4</sub> 有利于增加干旱条件下水稻的光合作用, 减轻干旱胁迫对水稻的影响。

表 1 不同养分管理对双季晚稻叶片光合速率和蒸腾速率的影响

Table 1 Effect of different nutrient managements on the leaf photosynthetic rate and transpiration rate of double cropping late rice

处理 Treatment	拔节期 Elongation stage		齐穗期 Full heading stage	
	光合速率 Photosynthetic rate /( $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )	蒸腾速率 Transpiration rate /( $\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )	光合速率 Photosynthetic rate /( $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )	蒸腾速率 Transpiration rate /( $\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )
T1	23.10 ± 0.50 ab	6.98 ± 0.31 a	31.16 ± 0.39 a	6.84 ± 0.26 ab
T2	22.33 ± 1.77 abc	6.94 ± 0.29 a	30.98 ± 0.61 a	6.91 ± 0.06 ab
T3	23.79 ± 2.35 a	7.10 ± 0.34 a	32.40 ± 1.31 a	7.27 ± 0.44 a
T4	21.02 ± 0.95 c	6.49 ± 0.35 b	30.72 ± 0.64 ab	6.69 ± 0.29 ab
CK	21.53 ± 0.96 bc	6.66 ± 0.32 b	28.59 ± 2.00 b	6.50 ± 0.32 b

注: T1、T2、T3、T4、CK 分别表示增施钾肥 + 叶面喷施 0.2% ZnSO<sub>4</sub>、增施钾肥 + 喷清水、叶面喷施 0.2% ZnSO<sub>4</sub>、氮肥后移 + 喷清水、常规施肥 + 喷清水, 同列不同小写字母表示不同养分管理措施间在 0.05 水平差异显著。下同。

Note: T1, T2, T3, T4 and CK indicate adding K fertilizer + foliage spraying 0.2% ZnSO<sub>4</sub>, adding K fertilizer + spraying clean water, foliage spraying 0.2% ZnSO<sub>4</sub>, raising the ratio of N fertilizer in elongation stage + spraying clean water and conventional fertilization + spraying clean water. Different lowercases in a column indicate significant differences at  $P \leq 0.05$  level among different nutrient management methods. The same as below.

## 2.4 不同养分管理对双季晚稻根系伤流强度的影响

图 4 表明, 拔节期仅 T3 处理根系伤流强度显著高于 CK, 齐穗期 T1、T2 和 T3 处理的根系伤流强度显著高于 CK; 拔节期和齐穗期均以 T3 处理的伤流强度最高, 分别比 CK 高 11.51% 和 25.22%。说明增施钾肥 + 叶面喷施 0.2% ZnSO<sub>4</sub> 有利于提高水稻根系活力, 增强双季晚稻抗旱性。

## 2.5 不同养分管理对双季晚稻地上部单株干物重的影响

干旱条件下不同养分管理措施对双季晚稻地上部干物重的影响不同(图 5)。拔节期 T3 显著高于 CK, 其它处理与 CK 的差异均不显著, 齐穗期 T1、T2、T3 和 T4 处理的地上部干物重均显著高于 CK, 成熟期 T1 和 T3 处理显著高于 CK。三个时期均以 T3 最高, 分别比 CK 高 5.47%、8.05% 和 7.22%。说明增施钾肥 + 叶面喷施 0.2% ZnSO<sub>4</sub> 有利于增加干旱条件下水稻干物质的积累。

## 2.6 不同养分管理对双季晚稻产量构成及产量的影响

从表 2 可以看出, 干旱胁迫条件下不同养分管理能明显影响晚稻的产量及产量构成。T1、T2 和 T3 处理产量均显著高于 CK, 分别比 CK 高 18.08%、16.58% 和 25.56%, 其中 T3 产量最高, 达 10.07 t·hm<sup>-2</sup>, T4 产量与 CK 差异并不显著。各处理产量的增加主要是由于每公顷有效穗数、每穗实粒数、每

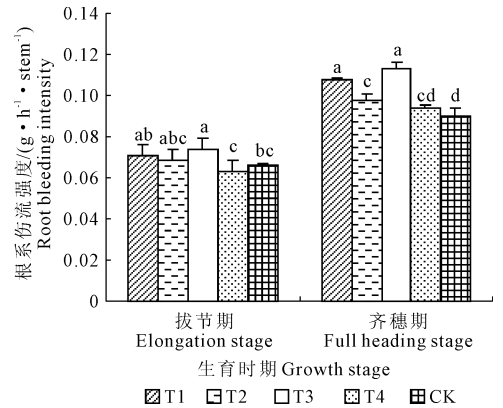


图 4 不同养分管理对双季晚稻根系伤流强度的影响  
Fig.4 Effect of different nutrient managements on the root bleeding intensity of double cropping late rice

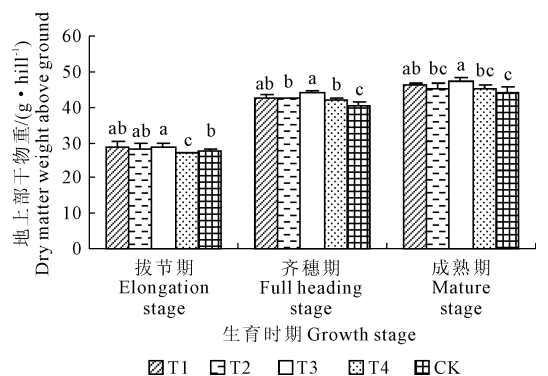


图 5 不同养分管理对双季晚稻地上部单株干物重的影响  
Fig.5 Effect of different nutrient managements on dry matter weight aboveground of double cropping late rice

穗总粒和结实率的提高,而不同养分管理对干旱条件下晚稻千粒重的影响不显著。以上结果表明,不同养分管理措施均有利于改善干旱胁迫条件下双季

晚稻穗部经济性状和提高产量,且以施钾肥 + 叶面喷施 0.2% ZnSO<sub>4</sub> 效果最显著。

表 2 不同养分管理对双季晚稻产量构成及产量的影响

Table 2 Effect of different nutrient managements on yield component and grain yield of double cropping late rice

处理 Treatment	有效穗数 No. of effective panicles /(10 <sup>4</sup> ·hm <sup>-1</sup> )	每穗实粒数 No. of filled grains per panicle	每穗总粒数 No. of total grains per panicle	结实率 Seed setting rate/%	千粒重 1000-grain weight/g	产量 Grain yield /(t·hm <sup>-2</sup> )
T1	399.51 ± 5.12 ab	106.22 ± 4.30 ab	143.52 ± 8.76 b	74.08 ± 1.73 a	24.43 ± 0.72 a	9.47 ± 0.38 ab
T2	394.88 ± 10.59 abc	101.29 ± 3.34 b	139.91 ± 4.94 bc	72.44 ± 2.85 a	24.97 ± 0.65 a	9.35 ± 0.78 ab
T3	411.20 ± 6.22 a	110.78 ± 3.75 a	155.16 ± 4.72 a	71.39 ± 0.27 ab	25.20 ± 0.20 a	10.07 ± 0.77 a
T4	360.81 ± 5.27 c	100.80 ± 6.39 b	147.00 ± 10.12 ab	68.59 ± 0.72 bc	25.03 ± 0.35 a	8.82 ± 0.57 bc
CK	369.494 ± 4.75 bc	89.01 ± 5.16 c	131.99 ± 3.88 c	67.40 ± 1.98 c	24.97 ± 0.45 a	8.02 ± 0.90 c

### 3 讨论

干旱胁迫使水稻最终有效分蘖减少,且分蘖期干旱处理的影响程度大于孕穗期干旱处理<sup>[18]</sup>。而施肥在一定程度上能补偿干旱条件下作物生长受抑制的不良反应<sup>[19]</sup>。本研究结果表明,分蘖期干旱条件下,增施钾肥、叶面喷施 0.2% ZnSO<sub>4</sub> 以及增施钾肥 + 叶面喷施 0.2% ZnSO<sub>4</sub> 等养分管理措施均能一定程度影响双季晚稻分蘖能力,其中增施钾肥 + 叶面喷施 0.2% ZnSO<sub>4</sub> 对干旱条件下水稻分蘖能力的影响效果最大,能显著增加有效分蘖数,提高水稻成穗率,这可能是由于钾肥与锌肥的施用提高了水分利用率,增强了水稻的抗旱能力,从而间接促进了水稻有效分蘖的发生,同时钾与锌之间还可能存在一定的协同促进效应。

光合作用能够反映植株逆境生长态势的强弱<sup>[20]</sup>。干旱胁迫下水稻植株吸水减少,光合速率下降,根系活力减弱,造成植株生长减缓,干物质积累减少。本研究表明,不同养分管理双季晚稻叶片 SPAD 值与光合速率变化基本一致,而增施钾肥 + 叶面喷施 0.2% ZnSO<sub>4</sub> 在拔节期和齐穗期两个时期均显著提高叶片 SPAD 值和光合速率。同时,增施钾肥 + 叶面喷施 0.2% ZnSO<sub>4</sub> 还提高了拔节期和齐穗期叶片的蒸腾速率,形成以上结果的原因可能是增施钾、锌肥有利于叶绿素的合成与稳定,提高叶片的叶绿素合成及净光合能力,并减少了叶肉细胞光合活性的下降,削弱非气孔因素对光合作用的限制,有效防止光合速率下降。同时增施钾肥还可能增强了气孔的调节能力、维持一定蒸腾速率、增加植株中输导组织所占比例、提高干旱条件下水分利用效率,获得相对较高的生物量。这与前人研究结果一致<sup>[21-23]</sup>。

根系活力是反映根系生命活动的基本生理指标,其强弱受干旱胁迫影响显著。本研究表明,在干旱胁迫条件下,增施钾肥 + 叶面喷施 0.2% ZnSO<sub>4</sub> 能增加根系伤流强度,显著提高根系活力。可见,在干旱胁迫条件下,施用钾、锌肥能够缓解水分亏缺对水稻生长的抑制,从而有利于提高水稻对干旱胁迫的适应性。这与谭勇、常蓬勃等钾、锌能够显著提高植物根系活力的结论一致<sup>[24-25]</sup>。但关于钾、锌对水稻根系吸水能力的生理机制尚不明确,可能是由于干旱胁迫下钾、锌能够促进根系脱落酸的合成,而脱落酸能够减轻干旱对植株的伤害,也可能是钾、锌营养的改变诱导了干旱胁迫下植株体内某些抗性蛋白如锌指蛋白等的表达从而提高植株对干旱胁迫的适应能力<sup>[26-27]</sup>。

产量的形成是一个复杂的过程,它不仅受到前期作物生理过程的影响,更受到后期光合作用、灌浆速度、干物质的积累和转运的影响<sup>[28-29]</sup>。其中干旱胁迫对水稻的生长发育及产量均具有直接的影响。但在干旱胁迫下通过施肥能不同程度地改善作物经济性状,并显著提高产量<sup>[30-31]</sup>。本研究表明,在干旱条件下,不同养分管理措施对双季晚稻的产量及产量构成具有明显影响效果,增施钾肥 + 叶面喷施 0.2% ZnSO<sub>4</sub> 显著增加了双季晚稻的产量,而产量的增加主要是由于每公顷有效穗数、每穗实粒数、每穗总粒和结实率等产量构成因素的提高。说明分蘖期干旱胁迫下,增施钾肥 + 叶面喷施 0.2% ZnSO<sub>4</sub> 可能增强了前期水稻植株体素质,提高了水稻有效分蘖能力和根系活力,促进叶片叶绿素合成及光合能力,增加了有效干物质的生产和积累,并促进了干旱胁迫下水稻的某些生理活动和代谢功能,从而为后期水稻经济性状的改善奠定了物质基础。

## 4 结 论

综上所述,本试验中养分管理措施均不同程度减轻了分蘖期干旱胁迫对水稻的危害。各养分管理措施效果由强到弱依次为增施钾肥 + 叶面喷施肥 0.2% ZnSO<sub>4</sub>(T3)、增施钾肥 + 喷清水(T1)、叶面喷施肥 0.2% ZnSO<sub>4</sub>(T2)、氮肥后移 + 喷清水(T4)、常规施肥 + 喷清水(CK);其中增施钾肥 + 叶面喷施肥 0.2% ZnSO<sub>4</sub> 在所有处理中效果最明显,较大程度缓解了分蘖期干旱胁迫对双季晚稻的危害,增施钾肥 + 叶面喷施肥 0.2% ZnSO<sub>4</sub> 主要是通过提高水稻分蘖能力、叶片 SPAD 值、光合速率和蒸腾速率、根系活力以及地上部干物重等指标来增强水稻抗旱性,从而促进有效穗数、每穗实粒数、每穗总粒数及结实率等产量构成因素的提升,确保了干旱胁迫下获得较高产量。此外,增施钾肥 + 叶面喷施肥 0.2% ZnSO<sub>4</sub> 对水稻抗旱能力的提高可能还与植株体内的保护酶活性和基因表达有关,这些方面有待进一步研究。

## 参 考 文 献:

[1] 郝艳飞. 我国水资源短缺现状及节水措施[J]. 水利科技与经济, 2011, 17(10): 65-67.

[2] 马润水, 樊彩霞, 刘明强. 从世界水资源概况看我国农业节水发展重点[J]. 中国水运, 2008, 8(10): 67-68.

[3] 武雪萍, 梅旭荣, 蔡典雄, 等. 节水农业关键技术发展趋势及国内外差异分析[J]. 中国农业资源与区划, 2005, 26(4): 28-32.

[4] 陈正法, 张茜茜. 我国南方红壤区季节性干旱及对林果业的影响[J]. 农业环境保护, 2002, 21(3): 241-244.

[5] 陈家宙, 陈明亮, 何圆球. 不同水分状况下红壤水稻的水量平衡和生产能力[J]. 华中农业大学学报, 2000, 19(3): 72-77.

[6] Brown L R, Halweil B. China's water shortage could shake world food security[J]. World Watch, 1998, 11(4): 10.

[7] 罗利军, 张启发. 栽培稻抗旱性研究的现状与策略[J]. 中国水稻科学, 2001, 15(3): 209-214.

[8] 郭贵华, 刘海艳, 李刚华, 等. ABA 缓解水稻孕穗期干旱胁迫生理特性的分析[J]. 中国农业科学, 2014, 47(22): 4380-4391.

[9] 陈小荣, 刘灵燕, 严崇虎, 等. 抽穗期干旱复水对不同产量早稻品种结实及一些生理指标的影响[J]. 中国水稻科学, 2013, 27(1): 77-83.

[10] 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.

[11] Marco Lauteri I, Matthew Haworth, Rachid Serraj, et al. Photosynthetic diffusional constraints affect yield in drought stressed rice cultivars during flowering[J]. Plos One, 2014, 9(10): 1-12.

[12] 段 骅, 唐 琪, 剧成欣, 等. 抽穗灌浆早期高温与干旱对不同水稻品种产量和品质的影响[J]. 中国农业科学, 2012, 45(22): 4561-4571.

[13] 赵 飞, 尹维娜, 肖艳云, 等. 半干旱条件下梗稻米外观品质性状的 QTL 分析[J]. 干旱地区农业研究, 2015, 33(3): 117-123.

[14] Boonjung H, Fukai S. Effects of soil water deficit at different growth stages on rice growth and yield under upland conditions II. Phenology, biomass production and yield[J]. Field Crops Research, 1996, 48: 47-55.

[15] 张卫星, 朱德峰, 林贤青, 等. 干旱胁迫对不同超级稻种植株形态和干物质积累的影响[J]. 福建农业学报, 2010, 25(1): 47-52.

[16] 赵贵林, 陈 强, 胡国霞, 等. 水稻脯氨酸代谢关键酶对水分胁迫的响应[J]. 干旱地区农业研究, 2011, 29(3): 80-83.

[17] 蔡昆争, 吴学祝, 骆世明, 等. 不同生育期水分胁迫对水稻根系活力、叶片水势和保护酶活性的影响[J]. 华南农业大学学报, 2008, 29(2): 7-10.

[18] 段素梅, 杨安中, 黄义德, 等. 干旱胁迫对水稻生长、生理特性和产量的影响[J]. 核农学报, 2014, 28(6): 1124-1132.

[19] 关军锋, 李广敏. 干旱条件下施肥效应及其作用机理[J]. 中国生态农业学报, 2002, 10(1): 59-61.

[20] 张仁和, 薛吉全, 浦 军, 等. 干旱胁迫对玉米苗期植株生长和光合特性的影响[J]. 作物学报, 2011, 37(3): 521-528.

[21] 魏永胜, 梁宗锁, 田亚梅. 土壤干旱条件下不同施钾水平对烟草光合速率和蒸腾效率的影响[J]. 西北植物学报, 2002, 22(6): 1330-1335.

[22] 王志强, 张丽婷, 彭凌馨, 等. 钾肥对水分逆境下玉米产量形成的影响[J]. 河南农业大学学报, 2014, 48(6): 674-679.

[23] 魏孝荣, 郝明德, 邱莉萍, 等. 干旱条件下钾肥对玉米生长和光合色素的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2004, 32(9): 111-114.

[24] 谭 勇, 梁宗锁, 王渭玲, 等. 氮、磷、钾营养胁迫对黄芪幼苗根系活力及根系导水率的影响[J]. 中国生态农业学报, 2007, 15(6): 69-72.

[25] 常蓬勃, 李志云, 杨建堂, 等. 氮钾锌配施对烟草超氧化物歧化酶和硝酸还原酶活性及根系活力的影响[J]. 中国农学通报, 2008, 24(1): 266-270.

[26] Liang J, Zhang J, Wong M H. Stomatal conductance in relation to xylem sap ABA concentration in two tropical trees: *Acacia confusa* and *Litsea glutinosa*[J]. Plant Cell Environ, 1996, 19: 93-100.

[27] 汪 洪, 汪立刚, 周 卫, 等. 干旱条件下土壤中锌的有效性及其与植物水分利用的关系[J]. 植物营养与肥料学报, 2007, 13(6): 1178-1184.

[28] 王成瑗, 赵 磊, 王伯伦, 等. 干旱胁迫对水稻生育性状与生理指标的影响[J]. 农学学报, 2014, 4(1): 4-14.

[29] 陈书强, 李金峰, 郑桂萍. 水分胁迫对水稻生长发育影响的研究进展[J]. 垦殖与稻作, 2004, (1): 12-15.

[30] 余华胜, 张冬青, 林宝刚, 等. 不同肥料对苗期干旱胁迫油菜产量及经济性状的的影响[J]. 江苏农业科学, 2012, 40(8): 82-83.

[31] 韩丽梅, 邹永久, 王树起, 等. 水分胁迫与施肥对小麦经济性状及产量影响的研究[J]. 吉林农业科学, 1998, (2): 19-22.