

李 轲, 景元书, 谭孟祥, 等. 不同灌水量对拔节孕穗期水稻生理及水分利用率的影响[J]. 江苏农业科学, 2017, 45(13): 60–63.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2017.13.016

# 不同灌水量对拔节孕穗期水稻生理及水分利用率的影响

李 轲<sup>1,2,3</sup>, 景元书<sup>1,2,3</sup>, 谭孟祥<sup>1,2,3</sup>, 薛 杨<sup>1,2,3</sup>

(1. 气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 江苏南京 210044;

2. 江苏省农业气象重点实验室, 江苏南京 210044; 3. 南京信息工程大学应用气象学院, 江苏南京 210044)

**摘要:**在南京信息工程大学农业气象试验站进行 3 个不同处理灌溉试验, 研究不同灌水量对水稻叶片生理及水分利用率的影响。研究表明, 淹灌处理下的水稻叶温比湿润灌溉处理平均低 0.4~0.7℃; 当光合有效辐射强度的范围在 800~1 800  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  时, 淹灌处理下的水稻叶片平均气孔导度比湿润灌溉处理大 0.123~0.183  $\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ , 叶片水分利用率高 0.24 g/kg; 每天 10:00 之后淹灌的水分利用率始终高于湿润灌溉处理; 与湿润灌溉处理相比, 淹灌处理的水稻不仅叶片水分利用率较高, 而且最终产量也有比较明显的提升, 其水稻增产率达 5.89%~13.97%。

**关键词:**灌水量; 气孔导度; 水稻; 水分利用率; 产量

**中图分类号:** S511.07 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2017)13-0060-04

土壤水分与灌水量可影响水稻的生理活动过程及水分利用效率。由于全球地表温度增加, 极端天气事件频繁出现, 尤其是夏季高温的频发, 到 21 世纪末, 有可能导致水稻热带和温带地区的主要作物的产量每 10 年减少 0%~2%<sup>[1-3]</sup>。当温度超过 35℃ 时, 水稻的生殖生长就会受到危害<sup>[4]</sup>, 高温热害已经成为影响我国水稻种植的主要危害因素之一, 而灌溉能在一定程度上缓解高温热害。我国水资源相对匮乏, 而水稻作为农田用水的第一大作物, 每年耗水量在全国用水总量的 40% 以上<sup>[5]</sup>。为进一步发挥水稻产量潜力和实现水分高效利用, 国内外学者已做了大量相关研究<sup>[6-13]</sup>, 本试验在观测基础上, 研究不同深度灌水量对水稻在光合速率、水分利用率等生理方面及产量方面的影响, 并提出合理的灌溉方式, 以期田间管理提供实际参考依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

以两优 6326(杂交稻)为试验材料, 两优 6326 为长江中下游常见种植水稻, 其株型适中、茎秆粗壮、长势繁茂、叶色浓绿、剑叶挺直。

### 1.2 试验设计

两优杂交稻于 2015 年 4 月 28 日播种, 5 月 28 日移栽, 试验区域共分 3 个小区, 每个小区的规格为 2.5 m×2.5 m。试验小区分别进行 3 个处理, 处理 1( $T_1$ ): 湿润灌溉, 灌溉水深

为 0~1 cm; 处理 2( $T_2$ ): 中等水深淹灌, 灌溉水深为 4~6 cm; 处理 3( $T_3$ ): 深水淹灌, 灌溉水深为 8~10 cm。试验日期为 2015 年 7 月 27 日至 8 月 7 日, 此时水稻正处于拔节孕穗期, 7 月 27 日和 8 月 7 日分别为试验处理的第 1 天和最后 1 天。

### 1.3 测定项目

1.3.1 气象要素 气温及空气湿度由自动气象站自动记录。

1.3.2 叶温 用手持红外测温仪测取, 每个小区固定选取长势良好的稻叶 5 张, 从 08:00—17:00 每隔 1 h 进行 1 次叶温测量(12:00—14:00 不进行相关测量)。

1.3.3 光合速率、气孔导度的测定 用 Li6400 便携式光合作用测定仪进行测定, 光合有效辐射强度设为 50、100、150、200、400、600、800、1 000、1 200、1 400、1 600、1 800、2 000  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  等 13 个水平, 日变化测定时间段为测定日期的 08:00—17:00(12:00—14:00 不进行相关测定), 每隔 1 h 进行 1 次光合速率、蒸腾速率、气孔导度、胞间  $\text{CO}_2$  浓度等生理要素测量, 每个小区选取 3 张长势良好的稻叶进行测定试验; 光响应曲线的测定时间为 08:00—11:00, 时间间隔以及重复次数与日变化相同。

1.3.4 水分利用率 水分利用率(WUE)是指作物消耗单位水量生产出的同化量, 反映作物生长的能量转化效率<sup>[14]</sup>。在叶片水平上, WUE 用净光合速率( $P_n$ )与蒸腾速率( $T_r$ )的比值来表示:

$$WUE = \frac{P_n}{T_r} \quad (1)$$

1.3.5 产量测定 选取试验小区, 去掉边行和边列的水稻之后, 选取 1 m×1 m 面积内的水稻, 数出单位面积内的穗数、每穗粒数和实粒数, 并用烘干箱将千粒稻烘干后测出千粒质量, 产量公式如下:

$$\text{产量} = \frac{\text{单位面积穗数} \times \text{每穗粒数} \times \text{结实率} \times \text{千粒质量}}{1\ 000 \times 1\ 000} \quad (2)$$

收稿日期: 2016-03-10

基金项目: 国家公益性行业(气象)科研专项(编号: GYHY201406025); 国家自然科学基金(编号: 41575111); 第九批“六大人才高峰”资助计划(编号: NY-038)。

作者简介: 李 轲(1991—), 男, 江苏徐州人, 硕士研究生, 研究方向为应用气象学。E-mail: wslike1210@163.com。

通信作者: 景元书, 博士, 教授, 主要从事农业气象、应用气象研究。E-mail: jingyushu@163.com。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同灌水量处理下水稻叶温

由图 1 可知,水稻叶温变化大致符合气温变化波动规律。从 7 月 30 日开始气温开始逐渐升高,不同处理的叶温也开始逐渐升高;湿润处理的水稻叶温始终高于其他 2 组处理,平均较中等水深淹灌处理高 0.4 ℃ 左右,较深水淹灌高 0.7 ℃ 左右。由此可以看出,淹灌处理对稻田冠层的叶温具有一定的调节作用。

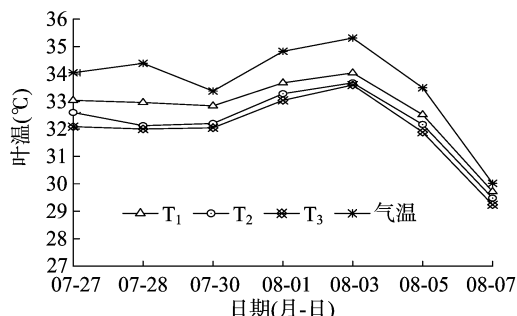


图1 不同灌水量处理的水稻叶温变化

### 2.2 不同灌水量处理下水稻光合速率、蒸腾速率、水分利用率与光合有效辐射强度的关系

由图 2 可见,经过湿润、淹灌处理之后,随着光合有效辐射强度增加,光合速率也随之增加,光合有效辐射强度到达  $1\ 200\ \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  之前,光合速率增幅比较明显,但之后光合速率几乎不再变化;在光合有效辐射强度较低[低于  $200\ \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ]时 3 组处理的光合速率没有明显差异,但当光合有效辐射强度大于  $200\ \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  时,3 组处理的光合速率差异随着光合有效辐射强度的增加而变得更明显,而且湿润灌溉处理( $T_1$ )的光合速率最小,最大仅达到  $12.83\ \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ,中等水深淹灌处理( $T_2$ )最大达到  $17.79\ \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ,深水淹灌处理( $T_3$ )最大光合速率为  $19.28\ \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。蒸腾速率的变化趋势和光合速率非常相似(图 3),而且深水淹灌处理( $T_3$ )的蒸腾速率大于另外 2 组试验处理,湿润灌溉处理( $T_1$ )最小,中等水深灌溉处理( $T_2$ )次之。

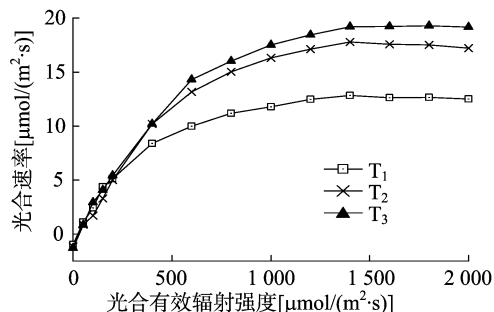


图2 不同灌水量处理的水稻光响应曲线变化

根据式(1)求出的水分利用率如图 4 所示,在一定范围内,随着光合有效辐射强度的增加,水分利用率也呈增加的趋势,在  $1\ 200\ \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  左右,水分利用率便不再有明显的上升趋势,这与光合速率和蒸腾速率变化趋势一致。根据拟合曲线可知,在设定的光合有效辐射强度内湿润处理( $T_1$ )的水分利用率整体低于另外 2 组,深水处理( $T_3$ )的水分利用率

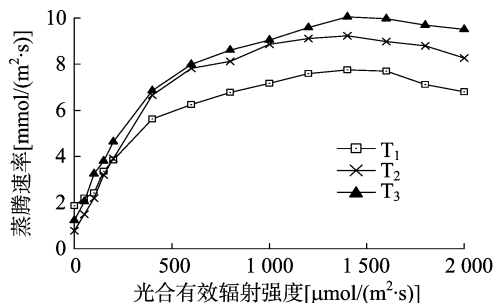


图3 不同灌水量处理的水稻蒸腾速率变化

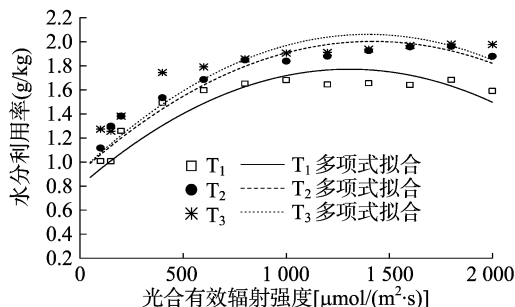


图4 不同灌水量的水稻水分利用率曲线变化

最高。

### 2.3 不同灌水量处理下水稻叶片气孔导度与光合有效辐射强度的关系

水稻作物通过调节气孔导度改变光合速率和蒸腾速率,从而影响作物的水分利用率,图 5 表明,水稻的气孔导度与光合有效辐射强度之间有比较明显的曲线关系。

湿润灌溉  $T_1$  处理下,光合有效辐射强度  $PAR$  和气孔导度  $Cond$  的二次曲线关系为

$$Cond_{T_1} = -1.51 \times 10^{-7} PAR^2 + 3.73 \times 10^{-4} PAR + 0.064\ 05。$$

当  $PAR = 1\ 235\ \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  时,气孔导度达到最大值  $0.29\ \text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。

中等深水淹灌  $T_2$  处理下,光合有效辐射强度  $PAR$  和气孔导度  $Cond$  的二次曲线关系为

$$Cond_{T_2} = -2.89 \times 10^{-7} PAR^2 + 7.08 \times 10^{-4} PAR + 0.002\ 08。$$

当  $PAR = 1\ 225\ \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  时,气孔导度达到最大值  $0.46\ \text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。

深水淹灌  $T_3$  处理下,光合有效辐射强度  $PAR$  与气孔导度  $Cond$  之间的二次曲线关系可以表示为

$$Cond_{T_3} = -3.5 \times 10^{-7} PAR^2 + 8.21 \times 10^{-4} PAR + 0.011\ 85。$$

当  $PAR = 1\ 172\ \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  时,气孔导度达到最大值  $0.49\ \text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。

从以上的方程以及图 5 可以看出,在一定范围内,气孔导度随着光合有效辐射的增加而增加,在  $1\ 200\ \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  左右时气孔导度达到最大值,之后便有减小的趋势,但深水淹灌处理( $T_3$ )状态下水稻叶片的气孔导度大于其他 2 组处理,湿润淹灌处理( $T_1$ )明显最小。

### 2.4 不同灌水量处理下水稻水分利用率与叶片气孔导度的关系

图 6 表明,在一定范围内,水分利用率与气孔导度呈正相关关系,不同灌水量处理水稻叶片的气孔导度与水分利用率也存在较明显的曲线关系,如表 1 所示。当湿润灌溉处理水

稻叶片气孔导度为  $0.328 \text{ mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  时,叶片水分利用率达到最大值  $1.71 \text{ g}/\text{kg}$ ;当中等水深淹灌处理的水稻叶片气孔导度为  $0.513 \text{ mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  时,叶片水分利用率达到最大值  $1.92 \text{ g}/\text{kg}$ ;当深水淹灌处理的水稻叶片气孔导度为  $0.403 \text{ mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  时,叶片水分利用率达到最大值  $1.96 \text{ g}/\text{kg}$ 。由于湿润灌溉处理( $T_1$ )的气孔导度小于深水淹灌处理( $T_3$ ),因此湿润灌溉处理( $T_1$ )的水分利用率也整体小于深水淹灌处理( $T_3$ ),当气孔导度到达一定程度时水分利用率便呈现下降趋势。

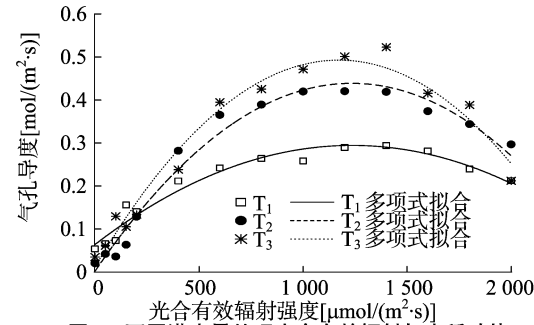


图5 不同灌水量处理光合有效辐射与水稻叶片气孔导度的关系

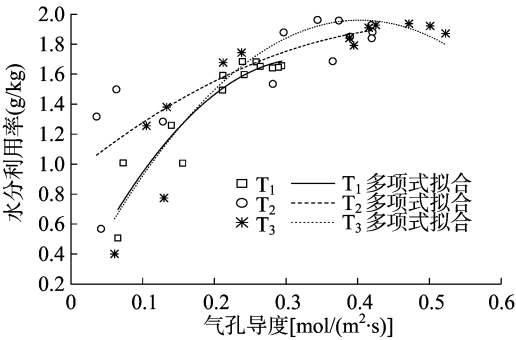


图6 不同灌水量处理水稻叶片气孔导度与水分利用率的关系

表 1 不同灌水量处理水稻叶片气孔导度与水分利用率二次曲线关系

处理	气孔导度与叶片水分利用率二次曲线关系
湿润灌溉	$WUE_{T_1} = -14.54Cond^2 + 9.56Cond + 0.133\ 07$
中等水深灌溉	$WUE_{T_2} = -3.79Cond^2 + 3.89Cond + 0.925\ 28$
深水灌溉	$WUE_{T_3} = -11.33Cond^2 + 9.13Cond + 0.121\ 81$

2.5 不同灌水量处理下水稻胞间 CO<sub>2</sub> 浓度与水分利用率的变化

胞间 CO<sub>2</sub> 浓度与光合速率以及气孔导度有密切关系,从而影响叶片的水分利用率<sup>[15]</sup>。不同灌水量处理下水稻胞间 CO<sub>2</sub> 浓度与光合有效辐射强度呈现负相关关系,随着光合有效辐射强度的增加而降低,3 种不同处理的胞间 CO<sub>2</sub> 浓度变化规律一致(图 7)。

由图 8 可知,不同灌水量处理下水稻水分利用率随着胞间 CO<sub>2</sub> 浓度的降低而增加,其中深水淹灌处理( $T_3$ )水分利用率随胞间 CO<sub>2</sub> 浓度降低而增加的增长率明显大于另外 2 组,湿润灌溉处理( $T_1$ )的增长率最小,中等水深灌溉处理( $T_2$ )介于湿润灌溉处理( $T_1$ )和深水灌溉处理( $T_3$ )之间。可见胞间 CO<sub>2</sub> 浓度和光合有效辐射相互作用,共同影响水分利用率的提高。

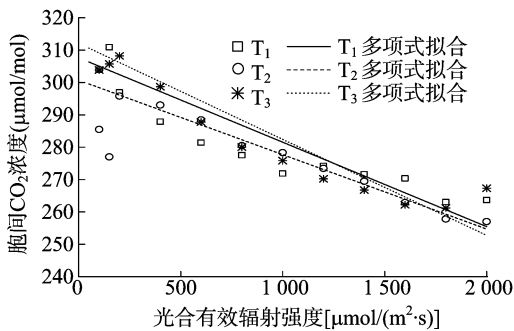


图7 不同灌水量处理下水稻胞间 CO<sub>2</sub> 浓度与光合有效辐射强度的关系

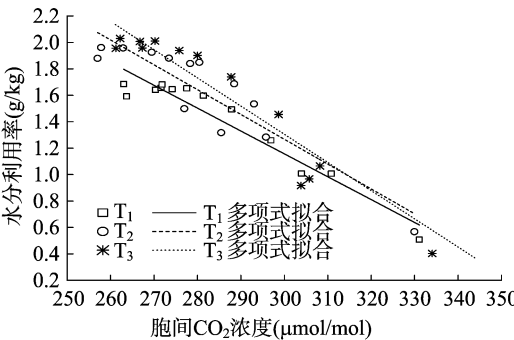


图8 不同灌水量处理下水稻胞间 CO<sub>2</sub> 浓度与水分利用率的关系

2.6 水分利用率日变化

图 9 为孕穗期叶片水分利用率的平均日变化,本试验测定光合速率期间(7 月 28 日至 8 月 6 日水稻处于孕穗期)为南京市日平均温度最高的时期,日均温都在 31 ℃ 以上,08:00—09:00 空气温度相对偏低,湿润处理( $T_1$ )和中等水深处理( $T_2$ )的叶片水分利用率(WUE)明显高于深水处理( $T_3$ ),但是 09:00 之后,随着气温不断升高, $T_1$ 、 $T_2$  的 WUE 明显开始下降,其中  $T_2$  处理下降的幅度要小于  $T_1$  处理, $T_3$  处理的 WUE 开始逐渐缓慢上升,10:00 之后上升趋势缓慢,在叶片经过“午休”之后,下午的气温有所回落,各处理的 WUE 均开始增加,但  $T_1$  处理 <  $T_2$  处理 <  $T_3$  处理。由此可知,在高温期间,淹灌处理有助于提高叶片的水分利用率,湿润灌溉处理在高温时期对叶片的水分利用率影响不明显。

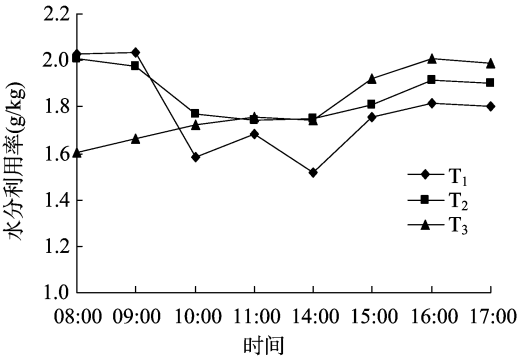


图9 不同灌水量处理的水稻叶片水分利用率平均日变化

2.7 空气湿度及水分利用率变化趋势

图 10 表明,从 7 月 27 日开始作物的水分利用率开始下

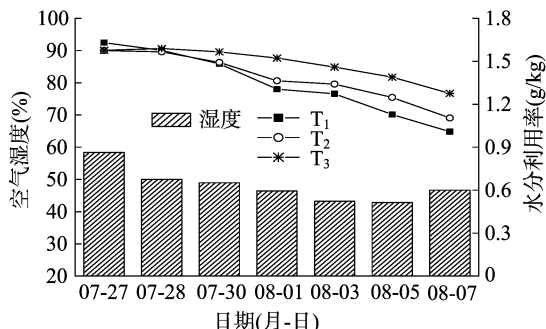


图10 试验期空气湿度变化以及不同灌水量处理的水稻水分利用率变化比较

降,深水淹灌处理水稻的水分利用率相比于其他 2 组处理的变化幅度较小,从原有的 1.59 g/kg 降至 1.28 g/kg,降幅为 19.5%;湿润灌溉处理水稻水分利用率变化最为明显,从最高值 1.63 g/kg 降到 1.01 g/kg,降幅为 38.0%,中等水深淹灌处理水稻水分利用率的变化幅度介于深水淹灌处理和湿润灌溉处理之间。前人研究指出,空气湿度通过影响蒸腾速率来

影响水分利用率,空气湿度越低,水分利用率便越高<sup>[16]</sup>。从图 10 可以看出,自 7 月 27 日开始空气湿度便开始有所降低,从原有的 58.3%降至 8 月 5 日的 42.8%,水分利用率的变化趋势与空气湿度变化趋势大致相同。

## 2.8 不同灌水量处理水稻产量

高温时期灌溉方式的不同对水稻生长发育和生理因素的影响,最终都会显现在水稻产量上,从产量公式中可以看出,影响水稻产量的因素主要为单位面积穗数、每穗粒数、千粒质量以及结实率。

从表 2 可以看出,不同处理对水稻平均稻穗长有一定的影响,深水淹灌处理水稻的产量最高,中等水深淹灌处理的次之,湿润灌溉处理的最少。其中 T<sub>3</sub> 处理的单位面积穗数比 T<sub>1</sub> 处理的多约 2.18%,每穗粒数多 7.01%,千粒质量高约 2.72%,结实率高约 1.47%,产量最终比 T<sub>1</sub> 处理高约 13.97%;中等水深淹灌处理(T<sub>2</sub>)比湿润灌溉处理(T<sub>1</sub>)的单位面积穗数多约 1.75%,每粒穗数多约 2.55%,千粒质量多约 1.11%,结实率高约 0.37%,最终产量比 T<sub>1</sub> 处理仅多 5.89%。

表 2 不同灌水量的水稻产量结构比较

处理	单位面积穗数 (穗/m <sup>2</sup> )	平均穗长 (cm)	每穗粒数 (粒)	千粒质量 (g)	结实率 (%)	产量 (kg/hm <sup>2</sup> )
湿润灌溉(T <sub>1</sub> )	229	21.7	157	24.26	0.814	7 099.869
中等水深淹灌(T <sub>2</sub> )	233	22.1	161	24.53	0.817	7 517.984
深水灌溉(T <sub>3</sub> )	234	22.2	168	24.92	0.826	8 091.951

## 3 结论

在高温时期淹灌对水稻田间温度有一定的调节作用,淹灌处理之后的水稻叶温比湿润灌溉处理的平均低 0.4~0.7℃,从而有助于水稻在高温时期的光合、蒸腾等生理生化过程。

本研究结果表明,在高温期间,湿润灌溉处理的水稻由于受到高温胁迫,叶片光合速率和蒸腾速率以及气孔导度均低于淹灌处理,叶片的水分利用率也低于淹灌处理;深水淹灌处理的水稻光合速率、蒸腾速率和气孔导度以及水分利用率均为 3 组处理中最大的,可见深水淹灌在高温期间对水稻的高温胁迫有一定的缓解作用。

就产量而言,深水淹灌处理水稻的产量最多,中等水深淹灌处理的次之,湿润灌溉处理的最少。因此,在水稻生育期内遇到高温胁迫等恶劣环境时,可采取深水淹灌措施对稻田进行调温,以保障水稻的产量以及正常生理活动。

## 参考文献:

[1]朱德峰,程式华,张玉屏,等. 全球水稻生产现状制约因素分析[J]. 中国农业科学,2010,43(3):474-479.  
[2]Edenhofer O, Seyboth K. Intergovernmental panel on climate change (IPCC) [J]. Encyclopedia of Energy, Natural Resource and Environmental Economics,2013,26(D14):48-56.  
[3]田小海,罗海伟,周恒多,等. 中国水稻热害研究历史、进展与展望[J]. 中国农学通报,2009,25(22):166-168.  
[4]杨惠城,黄仲青,蒋之坝,等. 2003 年安徽早中稻花期热害及防御技术[J]. 安徽农业科学,2004,32(1):3-4.  
[5]程旺大,赵国平,王岳钧,等. 浙江省发展水稻节水高效栽培技术的探讨[J]. 农业现代化研究,2000,21(4):197-200.

[6]Sun Y J, Ma J, Sun Y Y, et al. The effects of different water and nitrogen managements on yield and nitrogen use efficiency in hybrid rice of China[J]. Field Crops Research,2012,127:85-98.  
[7]林贤青,周伟军,朱德峰,等. 稻田水分管理方式对水稻光合速率和水分利用效率的影响[J]. 中国水稻科学,2004,18(4):333-338.  
[8]Kato Y, Okami M, Katsura K. Yield potential and water use efficiency of aerobic rice (*Oryza sativa* L.) in Japan[J]. Field Crops Research, 2009,113(3):328-334.  
[9]张荣萍,马均,王贺正,等. 不同灌水方式对水稻生育特性及水分利用率的影响[J]. 中国农学通报,2005,21(9):144-150.  
[10]程建平,曹湊贵,蔡明历,等. 不同灌溉方式对水稻生物学特性与水分利用效率的影响[J]. 应用生态学报,2006,17(10):1859-1865.  
[11]赵俊芳,杨晓光,陈斌,等. 不同灌溉处理对早稻根系生长及水分利用效率的影响[J]. 中国农业气象,2004,25(4):44-48.  
[12]张秋平,杨晓光,杨婕,等. 不同灌溉处理下早稻光合生理特征及水分利用效率[J]. 干旱地区农业研究,2005,23(6):67-72.  
[13]Zhang Z C, Zhang S F, Yang J C, et al. Yield, grain quality and water use efficiency of rice under non-flooded mulching cultivation [J]. Field Crops Research,2008,108(1):71-81.  
[14]山仑. 水分利用效率[M]//邹承鲁. 当代生物学. 北京:中国致公出版社,2000:399-400.  
[15]彭世彰,丁加丽,徐俊增,等. 不同灌溉模式下光合有效辐射与水稻叶片水分利用效率关系研究[J]. 灌溉排水学报,2006,25(5):1-5.  
[16]王建林,于贵瑞,房全孝,等. 作物水分利用效率的制约因素与调节[J]. 作物杂志,2007(2):9-11.