

吴英姿,胡继超,张雪松,等. 环境因子对水稻叶片水分利用效率的影响[J]. 江苏农业科学,2014,42(5):79-82.

环境因子对水稻叶片水分利用效率的影响

吴英姿, 胡继超, 张雪松, 张富存, 刘 斌

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

摘要:在水稻不同生育期测定了不同环境因子控制下的水稻叶片光合速率、蒸腾速率,并计算出其叶片水分利用效率,分析了 CO_2 浓度、高温、光强、土壤水分等环境因子变化对水稻叶片水分利用效率的影响,结果表明:水稻 LWUE 随 CO_2 浓度增加呈极显著的二次曲线变化, CO_2 浓度增加有利于水稻 LWUE 的提高。当光强高于 $1\ 000\ \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 时,随着光强的增强,两优培九的 LWUE 降低幅度比南粳 44 大。2 个水稻品种 LWUE 各时期日变化规律较为相似,曲线总体呈“L”形。适当的土壤水分亏缺有利于提高水稻 LWUE。

关键词:水稻;叶片水分利用效率;环境因子

中图分类号: Q945.78;S511.01

文献标志码: A

文章编号: 1002-1302(2014)05-0079-04

水分利用效率(water use efficiency, WUE)指作物消耗单位水分所生产的干物质量。作物水分利用效率包括产量、群体、叶片 3 个水平。叶片水平上的水分利用效率(LWUE)以净光合速率(P_n)与蒸腾速率(T_r)之比(P_n/T_r)来表示。随着经济的发展,我国南方稻区水质性缺水、水稻生长季内季节性干旱状况未见好转,已有较多学者研究了不同稻田水分管理方式对水稻水分利用率的影响^[1-4]。研究表明,适度旱作能提高作物水分利用效率^[2]。水稻干湿交替灌溉水分利用率比旱作及传统淹灌水分利用率更高^[5-6]。覆盖旱作也有利于提高水稻水分利用效率^[5-10]。研究人员认为,在作物的

不同生育阶段,干旱对产量、水分利用效率的影响也不同^[11-18]。温度、 CO_2 浓度、光合有效辐射通过影响水稻的光合作用及蒸腾作用间接影响水稻水分利用效率。研究表明,水稻水分利用效率随着光合有效辐射的增大呈现先增大后下降的趋势^[19]。 CO_2 浓度增加能提高水稻水分利用效率。研究发现,当温度高于 $25\ ^\circ\text{C}$ (常温)时,水稻水分利用效率随着温度增高而降低^[20]。本研究测定不同水稻品种在不同生育期、不同环境因子下的叶片水分利用效率,探讨气象因子及土壤水分胁迫对水稻 LWUE 的影响,旨在为量化气候变暖对水稻生产的影响提供依据。

收稿日期:2013-09-02

基金项目:公益性行业(气象)科研专项(编号:GYHY201106029-7);

南京信息工程大学基金(编号:2010356)。

作者简介:吴英姿(1988—),女,福建泉州人,硕士研究生,主要从事农业气象研究。E-mail:wyz07101085@163.com。

通信作者:胡继超,副教授,从事农业气象、农田信息技术、农业水资源与水循环研究。E-mail:jchu2005@nuist.edu.cn。

肥量,从而提高产量。

本试验建立了水稻高产与氮肥、磷肥及硅肥合理施用量的数学模型,经检验,与生产示范吻合。在本试验条件下,取得最佳施肥方案为:尿素 $204.91 \sim 267.46\ \text{kg}/\text{hm}^2$,过磷酸钙 $619.39 \sim 761.49\ \text{kg}/\text{hm}^2$,速效硅肥 $110.56 \sim 156.44\ \text{kg}/\text{hm}^2$,按照此施肥方案施肥,水稻产量可超过 $8\ 250\ \text{kg}/\text{hm}^2$ 。其中,3 种肥料施肥水平超过 0 水平时,磷肥的增产效果最明显,因此在增施氮肥的同时,一定要注意磷肥和硅肥的配合使用。本试验通过建立数学模型优化施肥方案,确定合理的施肥量,但在实际生产中要注意反馈信息,结合当地土壤肥力及肥料情况相应调整,以获取适合当地情况的最佳施肥方案。

参考文献:

- [1]潘宗东,柏光晓,石 明,等. 优质水稻中优 608 高产栽培的优化模式[J]. 贵州农业科学,2011,39(6):71-73.
- [2]谢必武,王季春,张 甲. 杂交稻强化栽培优化施肥模型建立及措施研究[J]. 西南农业大学学报:自然科学版,2005,27(3):

1 材料与方法

1.1 材料

试验于 2012 年 5—10 月在南京信息工程大学农试站进行,5 月 23 日播种,6 月 23 日移栽大田,10 月 25 日收获。选用两优培九(籼稻)、南粳 44(粳稻)作为供试品种,利用盆栽方式人工控制土壤水分,用人工气候箱控制温度。

365-369.

- [3]雷武逵. 优质稻优增效高产综合栽培技术[J]. 西南农业学报,2008,21(4):942-945.
- [4]吴素琴,肖炳宏,赵国成. 机插稻优质高产高效氮、磷、钾配方优化试验研究[J]. 上海农业科技,2013(2):73-98.
- [5]李政芳,陈孟珍,吴素芳,等. 不同施肥量与施肥方法对优质水稻品质的影响[J]. 西南农业学报,2010,23(2):424-426.
- [6]曾维超. 水稻施肥试验初探[J]. 安徽农学通报,2013,19(6):28-29.
- [7]侯继红,范 富,张庆国. 通辽市水稻高产优化施肥模型的建立和施肥参数的确定[J]. 扬州大学学报:农业与生命科学版,2012,33(1):61-65,90.
- [8]钱卫飞,徐巡军,钱卫东,等. 不同土壤类型水稻测土配方施肥对肥料利用率的影响[J]. 江苏农业科学,2013,41(1):83-85.
- [9]荣廷昭,朱孝达,唐富玉,等. 农业试验与统计分析[M]. 成都:四川科学技术出版社,1993.
- [10]茆诗松,丁 元,周纪芈,等. 回归分析及其试验设计[M]. 上海:华东师范大学出版社,1981.

1.2 方法

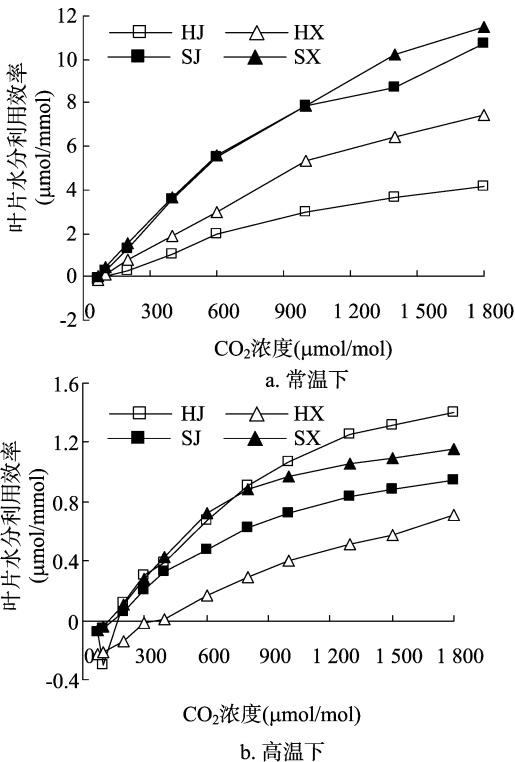
选择水稻分蘖期、拔节期、抽穗开花期、灌浆期 4 个时期的典型晴天,分别取两优培九、南粳 44 的倒数第 1 片、第 2 片、第 3 片完全展开叶,08:00 开始,每隔 2 h 用 LI-6400 便携式光合仪测定 1 次水稻叶片的光合速率、蒸腾速率,计算水稻叶片水分利用效率日变化。分别在水稻分蘖期、拔节期、抽穗开花期、灌浆期 4 个生育期测定土壤干旱胁迫对水稻水分利用效率的影响。分干旱、水层 2 个水分处理,每处理重复 3 次。干旱处理:试验开始后倒掉盆栽内的水,试验期间让土壤一直失水直至植株萎蔫,用土壤水分测定仪测定并记录土壤水分含量,用遮雨棚防雨。水层处理:试验期间始终保持 2~5 cm 水层。控制光强为 1 000 μmol/(m²·s),试验开始后第 1 天起每隔 1 d 于 09:00—12:00 测定 1 次水稻植株光合速率、蒸腾速率,计算水稻植株叶片水分利用效率。用 LI-6400 便携式光合仪于 09:00—11:00 分别在室外测定正常水层条件下两优培九、南粳 44 的光合速度蒸腾速率,计算水稻植株叶片水分利用效率。设置高温干旱胁迫、高温水层、正常温度水分(CK)3 个处理,每处理重复 3 次,在水稻灌浆初期进行。干旱处理:倒掉盆栽内的积水,试验期间不浇水。水层处理:试验期间一直保持 2~5 cm 水层。高温处理:测定叶片水分利用效率前 1 d 将干旱处理及水层处理的水稻盆栽搬入 40℃ 的人工气候箱内,第 2 天 09:00—12:00 用 LI-6400 便携式光合仪在光强为 1 000 μmol/(m²·s) 蓝紫光照下分别测定 3 个处理的水稻叶片水分利用效率在不同 CO₂ 浓度下的响应曲线。对照组:保持水层,室外常温下(28~30℃)测定水稻叶片水分利用效率。

2 结果与分析

2.1 不同温度处理下水稻叶片水分利用效率随 CO₂ 浓度变化规律

从图 1 可以看出,水稻 LWUE 随 CO₂ 浓度增加呈极显著的二次曲线变化,当 CO₂ 浓度小于 400 μmol/mol 时,水稻叶片光合作用受限制,对蒸腾作用影响不大,水稻叶片 LWUE

较低;随着 CO₂ 浓度增高,水稻叶片气孔导度降低,蒸腾速率减少,光合速率提高,水稻 LWUE 显著提高;到了后期,随着 CO₂ 浓度升高,蒸腾作用受抑制,LWUE 虽仍有所增长,但增幅变小。干旱胁迫下的水稻 LWUE 低于对照。常温下,不同水分处理下两优培九叶片水分利用效率均高于南粳 44。40℃ 高温胁迫之下,水稻叶片衰老,叶绿素降解,同时水稻叶片蒸腾作用加强,导致高温下水稻叶片 LWUE 远远低于常温状态(表 1)。



HJ、HX分别代表干旱处理下南粳44、两优倍九, SJ、SX分别代表水层处理下的南粳44、两优培九

图1 不同温度下水稻叶片水分利用效率随CO₂浓度的变化趋势

表 1 不同温度处理下 LWUE 与 CO₂ 浓度的关系式及其相关系数

处理	高温胁迫下			常温下		
	LWUE 随 CO ₂ 浓度变化关系式			LWUE 随 CO ₂ 浓度变化关系式		
HJ	$y = 0.0019x^2 + 0.0019x - 0.2835$	0.991	***	$y = 0.0045x^2 + 0.0045x - 0.5059$	0.999	***
SJ	$y = 0.0027x^2 + 0.0027x - 0.2274$	0.999	***	$y = 0.0113x^2 + 0.0113x - 0.7093$	0.996	***
HX	$y = 0.0008x^2 + 0.0008x - 0.2820$	0.998	***	$y = 0.0073x^2 + 0.0073x - 0.6534$	0.999	***
SX	$y = 0.0018x^2 + 0.0018x - 0.2588$	0.998	***	$y = 0.0114x^2 + 0.0114x - 0.6286$	0.999	**

注:“***”代表 0.001 显著水平。

2.2 光强对水稻叶片水分利用效率的影响

光强是影响光合作用最主要的因子,对水稻 LWUE 影响很大。从图 2 可以看出,水稻叶片光合速率随光强增加而增强,但光强增加到一定强度时,光合速率增幅变小,即光合接近达到了光饱和点。与此同时,光强增强引起温度上升,蒸腾速率几乎呈线性增强。水稻 LWUE 随光强变化曲线与光合速率随光强变化的曲线较为一致,均呈二次曲线状,随着光强增加,LWUE 比光合速率早一步达到最高值。当光强低于 1 000 μmol/(m²·s)时,两优培九光合速率略高于南粳 44,2

个品种蒸腾速率相近,两优培九 LWUE 比南粳 44 高。当光强高于 1 000 μmol/(m²·s)时,两优培九蒸腾速率增幅明显高于南粳 44,随着光强增加,两优培九 LWUE 明显下降。当光强高于 1 200 μmol/(m²·s)时,南粳 44 LWUE 略有下降。

2.3 不同生育期干旱胁迫对水稻叶片水分利用效率的影响

考虑到不同时期环境因子及作物本身的差异,将各时期测定的不同土壤水分下的 LWUE 与对照组的 LWUE 进行换算,并与土壤相对饱和含水量作关系曲线(图 3)。两优培九在分蘖期土壤相对饱和含水量低于 66% 时,LWUE 随土壤含

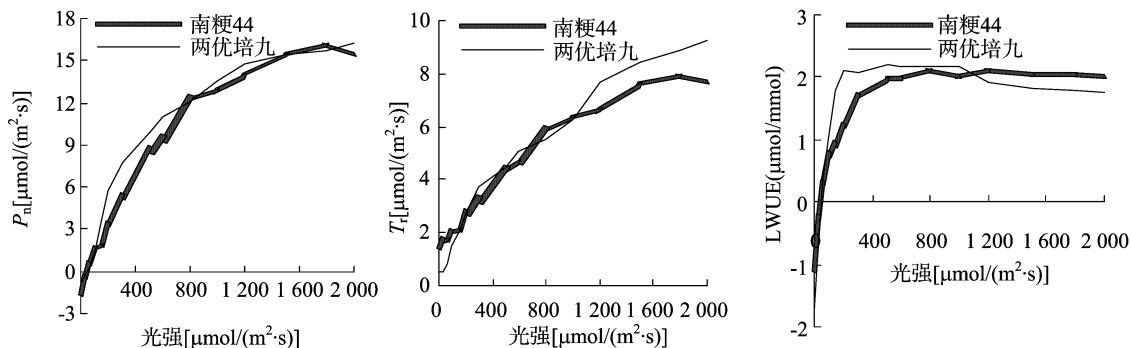
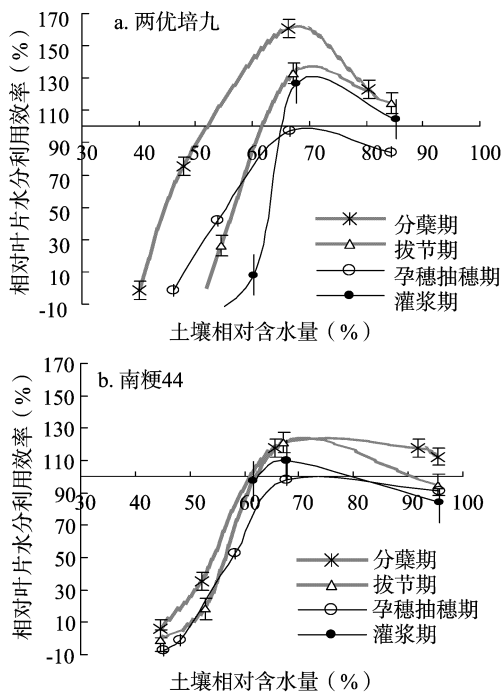
图2 水稻 P_n 、 T_r 、LWUE 随光强变化

图3 水稻相对叶片水分利用效率随土壤相对含水量的变化

水量的升高几乎呈直线升高;当土壤相对饱和含水量为 66% 时, LWUE 达最大值, 之后随着土壤含水量的增大而降低。水稻分蘖期, 当土壤相对饱和含水量高于 52% 时, 土壤含水量有利于水稻水分利用; 当土壤相对含水量低于 52% 时, 随着土壤含水量的减少, 稻叶逐渐衰老, 叶片叶绿素含量减少, LWUE 随之下降。水稻拔节期, 当土壤相对饱和含水量为 70% 时, LWUE 达峰值; 当土壤相对饱和含水量低于 62% 时, 稻叶开始衰老, 水分利用受到抑制。水稻灌浆期, 叶片容易早衰, 当土壤相对含水量低于 65% 时, 水分利用受到抑制。孕穗抽穗期除了当土壤相对含水量为 66% 时, 干旱处理下 LWUE 略高于对照外, 其余土壤水分处理下 LWUE 均低于对照。可见, 两优培九除了孕穗抽穗期, 各时期(分蘖期、拔节期、灌浆期)相对水分利用效率随土壤相对含水量的变化规律较为相似; 孕穗抽穗期水稻对土壤水分含量要求较高, 土壤水分含量过高或过低均不利于水稻生长。南梗 44 各时期相对水分利用效率随土壤相对含水量的变化规律与两优培九较为相似。分蘖期、拔节期、灌浆期(土壤相对含水量为 100%)干旱处理下 LWUE 与对照相当, 且随土壤水分减少而升高,

并在土壤相对含水量为 66%、67%、68% 时分别达到峰值; 在孕穗抽穗期, 当土壤相对含水量为 66% 时, 干旱处理下 LWUE 略高于对照组, 其余水分条件下均低于对照组。南梗 44 与两优培九受到干旱抑制时的土壤相对含水量为: 孕穗抽穗期 > 灌浆期 > 拔节期 > 分蘖期。这是因为: 分蘖前期水稻植株矮小, 处于营养生长阶段, 此时本身需水量较少, 对水分反应较为迟钝, 适当干旱不但不影响植株生长反而有利于其减少无效分蘖; 水稻拔节期无效分蘖逐渐死亡, 总茎蘖数较前期下降, 是保蘖增穗的重要时期, 此时对水分要求相对较高, 土壤水分胁迫对 LWUE 的影响较小; 水稻孕穗抽穗期是水稻营养器官旺盛生长期, 该期需水强度最大, 对水分亏缺最为敏感, 土壤水分胁迫对 LWUE 影响最大。水稻灌浆期是籽粒充实的重要时期, 若遇干旱缺水, 会引起叶片早衰, 不同水稻品种灌浆期在同一干旱条件下衰老程度不同, 因此不同品种水稻开始受干旱抑制时的土壤相对含水量不同。当土壤相对含水量低于 65% 时, 两优培九叶片开始衰老卷曲, LWUE 下降; 南梗 44 在灌浆期干旱胁迫下的表现明显优于两优培九, 当土壤含水量为 62% ~ 76% 时, 均有利于水稻生长。

2.4 不同生育期水稻叶片水分利用效率日变化

以不同生育期(分蘖期、拔节期、孕穗抽穗期、灌浆期)第 1 片展开叶 LWUE 为纵坐标, 以时间为横坐标作曲线(图 4), 研究不同生育期水稻 LWUE 日变化规律。2 个水稻品种 LWUE 各时期日变化规律较为相似, 皆在上午时段(08:00—11:00)高于下午时段, 且上午 LWUE 变幅较大, 下午则趋于稳定, 曲线总体呈“L”形。08:00 由于光强较弱, 光合速率较低, 同时空气相对湿度较大, 蒸腾速率较低, LWUE 不高; 09:00 左右气孔开度较大, 蒸腾速率虽有小幅上升, 但光合有效辐射较强, 净光合速率增加较快, LWUE 达该日最高值。此后由于光照增强、气温上升、空气相对湿度明显下降、叶内外水蒸气压差上升, 引起叶片气孔部分关闭, 限制 H_2O 、 CO_2 扩散, 此时 LWUE 开始下降。12:00—13:00, 由于叶片气孔关闭, LWUE 降至低谷, 此后由于光合有效辐射逐渐降低, 光合速率减少, LWUE 随之下降。

3 结论与讨论

20 世纪 80 年代以来, 全球气候变化及其对经济、社会、环境可能造成的影响一直是人们关注的焦点。本研究发现, 水稻 LWUE 随 CO_2 浓度增加呈极显著的二次曲线变化, CO_2 浓度增加有利于水稻 LWUE 的提高, 这与以往研究结果相

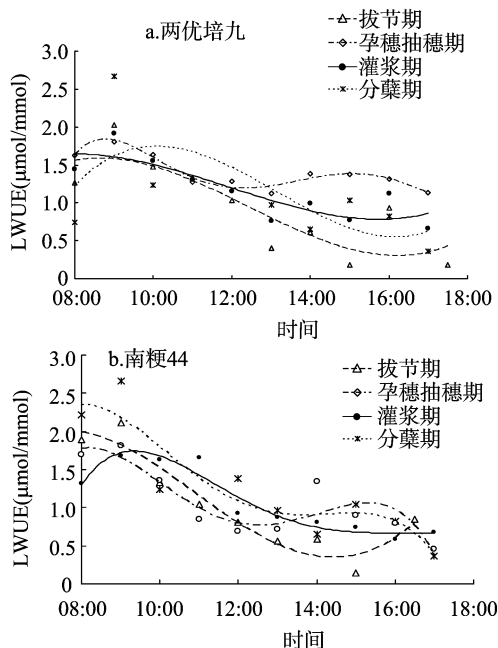


图4 水稻LWUE在不同时期的变化规律

同^[14]。当光强高于 $1\ 000\ \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 时,随着光强的增强,两优培九的 LWUE 降低幅度比南梗 44 大。2 个水稻品种各时期 LWUE 日变化规律较为相似,曲线总体呈“L”形。适当的土壤水分亏缺有利于提高水稻 LWUE。高温将严重抑制水稻的 LWUE,但不同品种受高温抑制程度不同。当 CO_2 浓度高于 $200\ \mu\text{mol}/\text{mol}$ 时,干旱处理下南梗 44 的 LWUE 甚至高于水层条件下两优培九与南梗 44。高光强下两优培九叶温上升,导致叶片蒸腾作用变强,最终引起 LWUE 大幅度降低。程建平^[1]等研究发现,适度旱作条件下,水稻叶片气孔关闭,减少了无效蒸腾,提高了水分利用效率^[1]。本研究表明,不同时期有利于提高 LWUE 的土壤水分含量范围不同,这是由于不同作物的需水关键期不同,同一作物不同生育阶段干旱对产量、LWUE 的影响也不同^[16-18]。两优培九与南梗 44 各时期相对叶片水分利用效率随土壤相对含水量的变化规律较为一致,土壤相对含水量为 65%~68% 时达到最大;2 个水稻品种开始受干旱抑制时的土壤相对含水量为:孕穗抽穗期>灌浆期>拔节期>分蘖期。水稻营养生长期(分蘖期、拔节期)对水分胁迫较不敏感,生殖生长期(抽穗孕穗期、灌浆期)对土壤水分含量十分敏感。抽穗孕穗期土壤水分过高或过低均不利于水稻水分利用,此时期应注意控制灌溉量。水稻灌浆期适度干旱虽有利于水稻水分利用,但不能过度干旱(土壤相对含水量最好不低于 65%),否则将导致水稻叶片早衰,干旱到一定程度后应及时灌溉,稻田后期不需保持水层,干干湿湿更利于灌浆。

参考文献:

- [1] 程建平,曹凑贵,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.
- [2] 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.

- [3] 潘圣刚,黄胜奇,汪金平,等. 不同灌溉模式下氮肥水平对水稻生物学特性及水分利用效率的影响[J]. 干旱区研究,2012,29(1): 161-166.
- [4] 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(27):85-98.
- [5] Zhang Z C, Zhang S F, Yang J, 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.
- [6] Liu X J, Ai Y W, Zhang F S, et al. Crop production, nitrogen recovery and water use efficiency in rice-wheat rotation as affected by non-flooded mulching cultivation (NFM) [J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems,2005,71(3):289-299.
- [7] Fan M S, Liu X J, Jiang R F, et al. Crop yields, internal nutrient efficiency, and changes in soil properties in rice-wheat rotations under non-flooded mulching cultivation[J]. Plant and Soil,2005,277(1/2):265-276.
- [8] Peng S, Shen K, Wang X, et al. A new rice cultivation technology: plastic film mulching[J]. Int Rice Res News Lett,1999,24:9-10.
- [9] Qin J T, Hu F, Zhang B, et al. Role of straw mulching in non-continuously flooded rice cultivation[J]. Agricultural Water Management,2006,83(3):252-260.
- [10] Li Y S, Wu L H, Zhao L M, et al. Influence of continuous plastic film mulching on yield, water use efficiency and soil properties of rice fields under non-flooding condition[J]. Soil and Tillage Research, 2007,93(2):370-378.
- [11] 彭世彰,徐俊增,黄乾,等. 控制灌溉水稻叶片水平的水分利用效率试验研究[J]. 农业工程学报,2006,22(11):47-52.
- [12] 唐梅,于松保,陈荣林,等. 不同灌溉方式对晚造超级稻产量及水分利用效率的影响[J]. 广西热带农业,2010(2):1-5.
- [13] 聂晓,王毅勇,刘兴士,等. 控制灌溉下三江平原稻田耗水量和水分利用效率研究[J]. 农业系统科学与综合研究,2011,27(2):228-232.
- [14] 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.
- [15] 刘广明,杨劲松,姜艳,等. 节水灌溉条件下水稻需水规律及水分利用效率研究[J]. 灌溉排水学报,2005,24(6):49-52,55.
- [16] 山仑. 植物水分利用效率和半干旱地区农业用水[J]. 植物生理学通讯,1994,30(1):61-66.
- [17] Hsiao T C. Plant response to water stress[J]. Ann Rev of Plant Physiol,1973,24:519-570.
- [18] Plaut Z. Sensitivity of crop plants to water stress at specific developmental stages: Reevaluation of experimental findings[J]. Israel Journal of Plant Sciences,1995,43(2):99-111.
- [19] Zhang B J, Chen Q Z, Hua C, et al. Response of gas exchange and water use efficiency to light intensity and temperature in transgenic rice expressing PEPC and PPDK genes[J]. Agricultural Sciences in China,2009,8(11):1312-1320.
- [20] 赵俊芳,杨晓光,王志敏,等. 不同水分条件下旱稻水分利用效率的研究[J]. 中国生态农业学报,2003,11(4):111-113.