

DOI: 10.3876/j.issn.1000-1980.2011.01.021

农田水位调控下水稻净光合速率日变化规律试验研究

丁继辉^{1,2}, 俞双恩^{1,2}, 于智恒^{1,2}, 付春晓^{1,2}

(1. 河海大学南方地区高效灌排与农业水土环境教育部重点实验室, 江苏 南京 210098;

2. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 为了研究不同水位调控下水稻光合速率日变化规律及其影响因素, 采用蒸渗测坑进行了水稻各生育阶段的水位调控试验. 结果表明: 农田水位调控对水稻光合速率日变化有显著影响, 水分胁迫(干旱胁迫或蓄水胁迫)会降低水稻光合效率, 恢复正常水位管理后, 受旱处理的水稻净光合速率迅速恢复甚至高于正常水平, 出现超补偿效应, 涝渍处理的净光合速率仍较低, 具有一定的后效性. 光合有效辐射强度日变化影响水稻光合速率日变化, 水稻光合速率日变化出现 M 形曲线的条件是中午的光合有效辐射强度大于 $600 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 在水分胁迫的情况下, 水稻光合速率日变化难以形成 M 形曲线. 在全天光合有效辐射强度低于 $600 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 时, 水分胁迫和正常水分的水稻光合速率日变化曲线均为单峰曲线, 全天各时段光合速率差异较小, 而且淹水并保持一定渗漏量的受涝处理, 其光合效率具有一定的优势.

关键词: 水位调控 水分胁迫 净光合速率 光合有效辐射 水稻

中图分类号: S274

文献标志码: A

文章编号: 1000-1980(2011)01-0104-05

水稻是我国主要粮食作物, 同时也是高耗水作物, 90% 以上的稻田集中分布在秦岭淮河以南, 青藏高原以东的水资源比较丰富的区域^[1]. 由于降雨的时间分布不均, 水稻生长期旱涝灾害经常发生, 灌溉排水是保证水稻高产稳产的重要措施^[2-3]. 稻田的水层深浅通常作为判断水稻灌排的标准, 因此, 水稻的灌排决策问题, 实际上就是稻田水位的管理问题. 稻田水位管理是指通过灌溉排水措施保持田面适当水层深度或维持田间地下水水位适当埋深的策略, 通过稻田水位调控来实现田间水分的调节. 光合作用是制约植物生长发育的最重要的生理过程, 是农作物产量形成的物质基础^[4-12], 在作物籽粒形成过程中, 光合速率与作物产量之间显示出正相关关系. 稻田水位的高(涝)与低(旱)都会影响水稻的生长发育^[13], 其直接表现为水稻光合速率的变化. 笔者通过测坑水位控制试验, 研究农田水位调控对水稻光合速率变化规律的影响.

1 试验材料与方法

试验于 2008 年 5—10 月在河海大学节水园区节水与农业生态试验场内进行. 试验区属亚热带湿润气候, 冬冷夏热, 四季分明, 年平均降雨量 1 021.3 mm, 年平均蒸发量 900.0 mm, 年平均气温 15.7℃, 最热月平均气温 28.1℃, 年无霜期 237 d, 年均日照时数 2 212.8 h. 节水与农业生态试验场共有 32 个固定式蒸渗测坑(有底 28 个, 无底 4 个), 地面设有移动式雨棚, 地下有观测廊道.

供试品种为镇稻 99, 5 月 6 日育秧, 6 月 26 日移栽, 10 月 10 日收割, 本田生育期为 106 d. 在水稻分蘖期、拔节孕穗期、抽穗开花期和乳熟期进行不同深度和历时的水位调控试验, 各处理设计及各生育阶段的划分及控水时段见表 1, 每个处理在 2 个测坑内布置.

每天定时观测农田水位深度, 按要求控制各处理水位. 在控水前、控水期间及恢复正常水位后, 利用美国 LI-COR 公司生产的 LI-6400 型便携式光合仪测定水稻最新全展功能叶的净光合速率(10 30 前后). 在控水临近结束时测定净光合速率的日变化. 同时利用 HL20 型自动气象站收集光合有效辐射、气温、蒸发量、降雨量、风速等气象指标.

收稿日期: 2010-03-31

基金项目: “十一五”国家科技支撑计划(2006BAD11B06) 国家自然科学基金(50839002)

作者简介: 丁继辉(1984—), 男, 河南巩义人, 硕士研究生, 主要从事水土资源规划与环境保护研究. E-mail: dingjihui_student@sina.com

表 1 2008 年水稻水位调控试验处理设计及控水时段

Table 1 Design and period of water level control tests on paddy rice in 2008

处理	控制水位/mm				控水起止时间
	分蘖期 (7 月 7 日—8 月 4 日)	拔节孕穗期 (8 月 5—18 日)	抽穗开花期 (8 月 19 日—9 月 2 日)	乳熟期 (9 月 3—21 日)	
1	120	− 300 ~ 30	− 300 ~ 30	− 300 ~ 30	7 月 15—24 日
2	− 600	− 300 ~ 30	− 300 ~ 30	− 300 ~ 30	7 月 20—24 日
3	120	− 300 ~ 30	− 300 ~ 30	− 300 ~ 30	7 月 18—24 日
4	− 200 ~ 20	250	− 300 ~ 30	− 300 ~ 30	8 月 6—15 日
5	− 200 ~ 20	− 600	− 300 ~ 30	− 300 ~ 30	8 月 11—15 日
6	− 200 ~ 20	250	− 300 ~ 30	− 300 ~ 30	8 月 9—15 日
7	− 200 ~ 20	− 300 ~ 30	250	− 300 ~ 30	8 月 21—30 日
8	− 200 ~ 20	− 300 ~ 30	− 600	− 300 ~ 30	8 月 26—30 日
9	− 200 ~ 20	− 300 ~ 30	250	− 300 ~ 30	8 月 24—30 日
10	− 200 ~ 20	− 300 ~ 30	− 300 ~ 30	250	9 月 6—15 日
11	− 200 ~ 20	− 300 ~ 30	− 300 ~ 30	− 600	9 月 11—15 日
12	− 200 ~ 20	− 300 ~ 30	− 300 ~ 30	250	9 月 9—15 日
CK	− 200 ~ 20	− 300 ~ 30	− 300 ~ 30	− 300 ~ 30	

注 : (a) 数字正值表示田面水层深度, 负值表示田面无水层时地下水埋深 ; (b) 处理 1, 4, 7, 10 为受涝处理, 控水时间均为 10 d, 保持 4 mm/d 渗漏量 ; (c) 处理 2, 5, 8, 11 为受旱处理, 控水时间为 5 d ; (d) 处理 3, 6, 9, 12 为涝渍处理, 控水时间为 7 d。

2 试验结果与分析

2.1 水稻分蘖期光合速率日变化规律

7 月 24 日 (晴天多云, 白天平均温度 31.43℃、相对湿度 75.52%、光合有效辐射强度 425.14 μmol/(m²·s)) 是分蘖期各处理控水最后一天, 受涝和对照处理的净光合速率日变化曲线均呈 M 形, 受旱和涝渍处理基本呈单峰曲线型走势, 见图 1。清晨各处理的净光合速率随着光合有效辐射强度和温度的增高急速上升, 10 00 左右达到第 1 个高峰, 随着光合有效辐射强度的升高以及蒸腾作用的加剧, 气孔局部关闭, CO₂ 无法正常进入叶片, 植物不能正常进行光合作用, 而出现‘午休’现象。其中受旱和涝渍处理净光合速率因水气胁迫而持续回落。受涝和对照处理因水分相对适宜在 14 00 左右有所恢复, 达到第 2 个高峰。12 00 之前对照和受旱处理的净光合速率大于受涝和涝渍处理, 原因是对照处理水分适宜, 光合效率高, 受旱处理经过一夜的水气调整植株生命活力得以恢复, 在气温较低、蒸腾量较小的情况下, 光合效率提高 ; 14 00 以后受涝和对照处理的净光合速率大于涝渍和受旱处理, 原因是对照和受涝处理水分充足, 土壤通气性较好, 水稻生理活动处于正常状态, 受旱处理尽管土壤通气性好, 但由于受到缺水胁迫, 水稻生理活动受到抑制, 涝渍处理水分虽然充足但土壤通气性差, 水稻生理活动受到蓄水胁迫, 因而光合效率均处于较低水平。强光会造成光合作用的光抑制现象, 而温度和水分的胁迫会加剧光合作用的光抑制^[1]。上午由于光合有效辐射的急速上升, 使各处理的净光合速率较早达到峰值 ; 12 00 左右持续较高的光合有效辐射强度 (> 600 μmol/(m²·s)) 使得各处理的净光合速率出现不同程度的下降 (光抑制), 受旱和涝渍处理的光抑制现象尤为明显, 净光合速率下降最多且难以

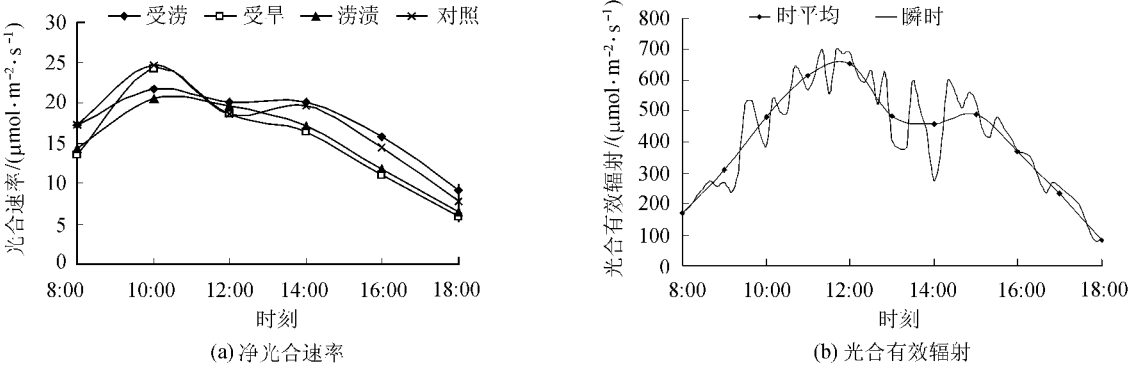


图 1 不同水位调控下水稻分蘖期净光合速率及光合有效辐射日变化曲线

Fig. 1 Diurnal variations of net photosynthetic rate and intensity of photosynthetic active radiation of paddy rice during stooling stage under water level control

恢复,可见水分胁迫(无论是缺水还是蓄水)加剧了光抑制现象,对水稻生长造成不利影响.

2.2 水稻拔节孕穗期光合速率日变化规律

8 月 13 日(多云,白天平均温度 33.57℃、相对湿度 67.85%、光合有效辐射强度 398.61 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$)拔节孕穗期控水结束前 3 d,4 种处理的净光合速率日变化均呈单峰曲线型走势.各处理的净光合速率随着光合有效辐射强度的增高急速上升,12 00 左右均达到峰值,之后持续下降.虽然气温较高,各处理均没有出现‘午休’现象,且净光合速率峰值($\leq 20 \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$)偏低.其原因主要是上午光合有效辐射上升较慢且有所反复,正午大部分时间光合有效辐射水平不高.可见,即使高温情况,只要太阳辐射不强($< 600 \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$),光抑制不会发生,水稻不会出现‘午休’现象,净光合速率日变化呈单峰曲线型走势,且在中午能保持较高水平.从图 2 可以看出,受涝处理净光合速率全天都大于其他 3 个处理,而受旱和涝渍处理由于水分胁迫时间较短,其净光合速率与对照处理相比没有明显差异.由此可见,在多云的天气条件下,拔节孕穗期稻田淹水并保持适当的渗漏量有利于提高水稻净光合速率.

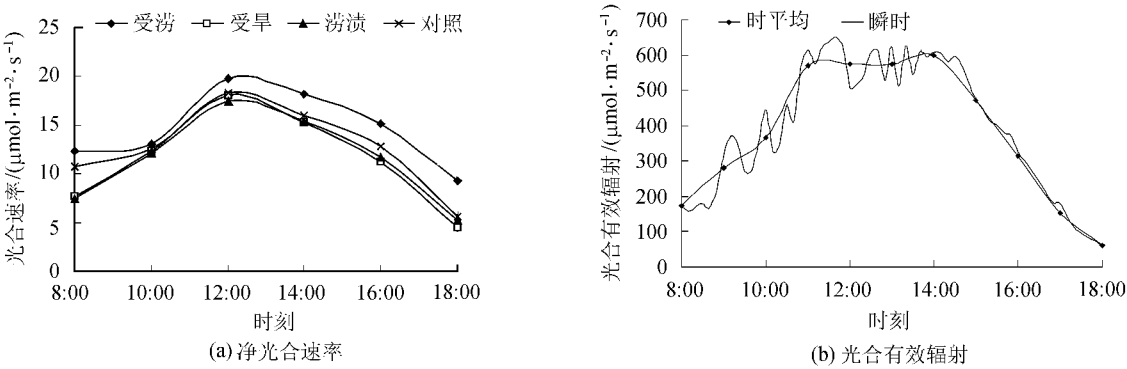


图 2 不同水位调控下水稻拔节孕穗期净光合速率及光合有效辐射日变化曲线

Fig. 2 Diurnal variations of net photosynthetic rate and intensity of photosynthetic active radiation of paddy rice during jointing-booting stage under water level control

2.3 水稻抽穗开花期光合速率日变化规律

9 月 1 日(晴间多云,白天平均温度 26.76℃、相对湿度 63.11%、光合有效辐射强度 405.82 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$)是抽穗开花期控水结束后的第 2 天,各处理净光合速率日变化曲线见图 3.上午各处理的净光合速率随着温度和光合有效辐射强度的增高逐渐上升,12 00 左右均达到峰值.12 00 以后,受涝处理的净光合速率随着光合有效辐射强度的降低逐渐下降,而受旱、涝渍和对照处理在 14 00 前急速下降,14 00—16 00 保持平缓甚至略有上升,而后下降.受旱处理净光合速率大于对照处理,受涝和涝渍处理净光合速率略小于对照处理.原因是受旱处理在复水后土壤水气状况适宜,净光合速率迅速恢复甚至高于正常水平,出现超补偿效应.而涝渍处理虽然恢复正常供水,解除了涝渍胁迫,但根部环境尚未到正常状态,其生理活动的抑制具有一定的后效性.由于光合有效辐射强度在 12 00—14 00 之间处于较高水平($> 600 \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$),持续的强辐射导致水

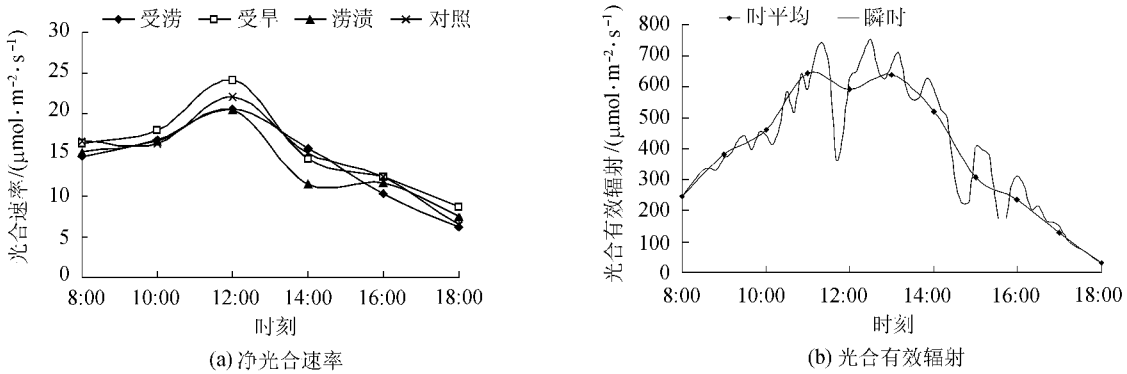


图 3 不同水位调控下水稻抽穗开花期净光合速率及光合有效辐射日变化曲线

Fig. 3 Diurnal variations of net photosynthetic rate and intensity of photosynthetic active radiation of paddy rice during heading and flowering stage under water level control

稻在 14 00 出现明显的‘午休’现象.由于 14 00 以后光合有效辐射急剧下降,使得净光合速率未能形成明显的回升过程,但 M 形曲线基本形成.

2.4 水稻乳熟期光合速率日变化规律

9 月 12 日(阴间多云,白天平均温度 27.78℃、相对湿度 78.34%、光合有效辐射强度 260.07 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$)是乳熟期控水结束前 3 d,各处理净光合速率日变化见图 4.8 00 以前为晴天多云,各处理的净光合速率较高,之后随着云层的增多,光合有效辐射强度较弱,在 11 30 左右出现低谷值,在 12 00 之前又达到光饱和点,使得净光合速率逐渐下降并在 12 00 左右达到谷点.随后光合有效辐射强度在 300~600 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 之间波动,受旱和对照处理快速上升在 14 00 左右形成一个峰值,而受涝和涝渍处理缓慢上升至 16 00 才形成一个峰值,之后急速下降,形成一个不太完整的 M 形曲线.由于观测是在受旱处理控水的第 2 天进行的,受旱胁迫尚未形成,故其净光合速率和对照处理基本相同.而受涝和涝渍处理控水已到中后期,受到蓄水胁迫净光合速率整体略低于对照处理.阴间多云的天气使光合有效辐射强度变化不规则,导致各处理净光合速率呈不规则变化,但整体来说各处理之间光合速率差异不大.这一现象进一步说明,多云天气,受涝或涝渍对水稻生长影响不大.

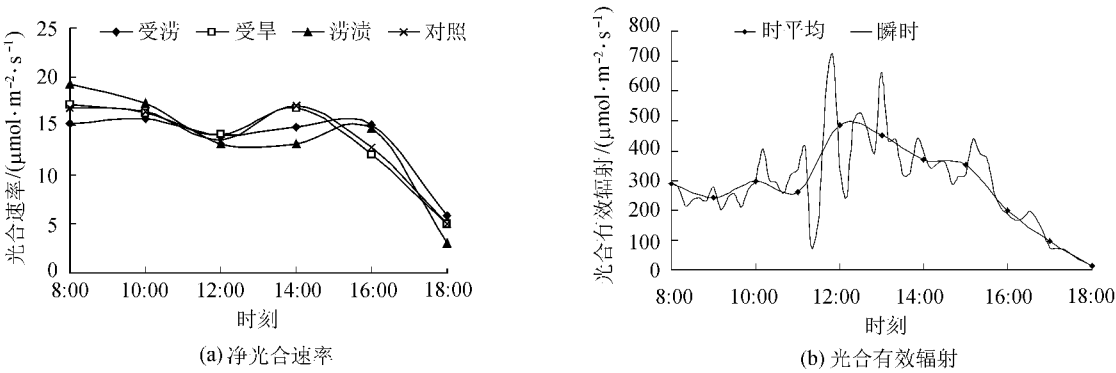


图 4 不同水位调控下水稻乳熟期净光合速率及光合有效辐射日变化曲线

Fig. 4 Diurnal variations of net photosynthetic rate and intensity of photosynthetic active radiation of paddy rice during milky stage under water level control

3 结 论

本试验通过稻田水位来实现农田水分状况的调控,根据实测资料研究不同水位调控下水稻光合速率日变化规律及其影响因素,研究结果表明:

- a. 水稻净光合速率日变化曲线随着光合有效辐射强度日变化曲线的变化而变化.农田水位调控对水稻净光合速率日变化有显著影响.在水分协调情况下,水稻光合速率随着光合有效辐射强度的增加而增加;当光合有效辐射强度大于 600 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 时,水稻光合速率随着光合有效辐射强度的增加而逐渐减小并出现‘午休’现象.水稻光合速率日变化出现 M 形曲线的条件是中午的光合有效辐射强度大于 600 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$.
- b. 水分胁迫在低光合有效辐射条件下对水稻净光合速率影响不大.多云且光合有效辐射强度小于 600 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 时,水分胁迫和正常水分的水稻光合速率日变化曲线均为单峰曲线,全天各时段光合速率差异较小,而且淹水并保持一定渗漏量的受涝处理,其光合效率具有一定的优势.从提高净光合速率的角度来讲,水稻在全生育期应尽量避免渍害,通过拔节孕穗期适当淹水、抽穗开花期受旱处理来提高其净光合速率.

参考文献:

[1] 曹卫星.作物栽培学总论[M].北京:科学出版社,2006.

[2] 张正良,彭世彰.不同灌溉方式下水稻产量构成因素投影寻踪评价方法[J].河海大学学报:自然科学版,2008,36(6):773-776.(ZHANG Zheng-liang, PENG Shi-zhang. Evaluation methods for component factors of rice yield based on projection pursuit classification model under different irrigation patterns[J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2008, 36(6): 773-776. (in Chinese))

[3] 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.(WEI Zheng, PENG Shi-zhang, KONG Wei-li, et al. Compensation effects of roots and shoots of rice and fertilizer utilization efficiency owing to rewating of water deficit during intermediate period of bering[J]. Journal of Hohai University:

Natural Sciences, 2010, 38(3): 322-326. (in Chinese))

- [4] 翁晓燕, 蒋德安, 陆庆, 等. 影响水稻叶片光合日变化因素的分析[J]. 中国水稻科学, 1998, 12(2): 105-108. (WENG Xiao-yan, JIANG De-an, LU Qing, et al. Major factors on diurnal changes of photosynthetic rate[J]. Chinese Journal of Rice Science, 1998, 12(2): 105-108. (in Chinese))
- [5] 许大全. 光合作用“午睡”现象的生态、生理和生化[J]. 植物生理学通讯, 1990(6): 5-10. (XU Da-quan. Ecology, physiology and biochemistry of midday depression of photosynthesis[J]. Plant Physiology Communications, 1990(6): 5-10. (in Chinese))
- [6] 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. (LIN Xian-qing, ZHOU Wei-jun, ZHU De-feng, et al. Effect of water management on photosynthetic rate and water use efficiency of leaves in paddy rice[J]. Chinese Journal of Rice Science, 2004, 18(4): 333-338. (in Chinese))
- [7] 郭相平, 袁静, 郭枫, 等. 旱涝快速转换对分蘖后期水稻生理特性的影响[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2008, 36(4): 516-519. (GUO Xiang-ping, YUAN Jing, GUO Feng, et al. Effects of rapid shift from drought to waterlogging stress on physiological characteristics of rice in late tillering stage[J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2008, 36(4): 516-519. (in Chinese))
- [8] 黄乾, 彭世彰, 徐俊增, 等. 不同灌溉条件下水稻光合规律试验研究[J]. 灌溉排水学报, 2008, 27(1): 31-34. (HUANG Qian, PENG Shi-zhang, XU Jun-zeng, et al. Photosynthetic comparison research on rice under different irrigations methods[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2008, 27(1): 31-34. (in Chinese))
- [9] 邹君, 谢小立, 王凯荣. 不同水分灌溉下水稻光合特征分析[J]. 中国生态农业学报, 2003, 11(1): 17-19. (ZOU Jun, XIE Xiao-li, WANG Kai-rong. Analysis on photosynthesis characteristics in rice under different irrigations[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2003, 11(1): 17-19. (in Chinese))
- [10] 于强. 农田生态过程与模型[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [11] SCHULZE E D, HALL A E. Encyclopedia of plant physiology[J]. Berlin: Springer-Verlag, 1982: 181.
- [12] DEMMING-ALAMS B, ADAMS W W. Photoprotection and other response of plants to high light stress[J]. Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology, 1992, 43: 599-629.
- [13] 季亚辉, 俞双恩. 水位管理对稻田地表水总磷的影响[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2008, 36(6): 777-780. (JI Ya-hui, YU Shuang-en. Influence of water level management on total phosphorus concentration of surface water in paddy fields[J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2008, 36(6): 777-780. (in Chinese))

Experimental study on variation rules of diurnal net photosynthetic rate of paddy rice under water level control in farmland

DING Ji-hui^{1, 2}, YU Shuang-en^{1, 2}, YU Zhi-heng^{1, 2}, FU Chun-xiao^{1, 2}

(1. Key Laboratory of Efficient Irrigation-Drainage and Agricultural Soil-Water Environment in Southern China,

Ministry of Education, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. College of Water Conservancy and Hydropower, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: In order to investigate the diurnal variation rules and factors of photosynthetic rate of paddy rice under different water level control conditions, the water level control tests on the paddy rice during various growth stages were performed by use of evaporation-infiltration test pits. The test results indicate that the water level control in farmland has significant effect on the diurnal variation of the net photosynthetic rate of the paddy rice. The water stress (drought stress or wetting stress) reduces the photosynthetic rate of the paddy rice. The net photosynthetic rate of the paddy rice treated by the drought stress rapidly recovers and even is higher than the normal one under the recovery of the normal water level, and the excess compensation effect is aroused. The net photosynthetic rate of the paddy rice treated by water logging is still lower than the normal one, and it has certain posterior effect. The diurnal variation of the photosynthetic rate of the paddy rice is influenced by the diurnal variation of the intensity of the photosynthetic active radiation, and its curve will be in a shape of “M” when the intensity of the photosynthetic active radiation at noon is larger than $600 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$. Under the water stress, the diurnal variation of the photosynthetic rate of the paddy rice is difficult to achieve the shape of “M”. The diurnal variation curves of the photosynthetic rate of the paddy rice under the water stress and normal water conditions both are unimodal when the intensity of the diurnal photosynthetic active radiation is lower than $600 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$. The photosynthetic rates of the paddy rice under the above two conditions have little difference. The photosynthetic rate of the paddy rice treated by flooding and maintaining a certain amount of leakage is superior.

Key words: water level control; water stress; net photosynthetic rate; photosynthetic active radiation; paddy rice