

不同灌溉模式对水稻抽穗后叶绿素荧光特征及产量的影响

郭相平, 王 甫, 王振昌, 黄双双, 刘 伟

(河海大学 水利水电学院, 南京 210098)

摘 要:以“南粳44”为试验品种,设置浅水勤灌(FSI)、湿润灌溉(WI)、控制灌溉(CI)和蓄水-控灌(RC-CI)4种灌溉模式,通过小区试验,研究不同灌溉模式下水稻抽穗后叶绿素荧光特征的差异及其与产量之间的相关关系。结果表明,抽穗开花期不同灌溉模式下水稻叶片叶绿素量(*SPAD*值)及荧光参数(最大光化学量子产量 F_v/F_m 、实际量子产量 Φ_{PSII} 、光化学淬灭 qP 和非光化学淬灭 qN)无明显差异。随着生育期推进,*SPAD*值、 F_v/F_m 、 Φ_{PSII} 和 qP 不断下降,不同灌溉模式降幅表现为FSI处理>WI处理>CI处理>RC-CI处理,同时 qN 不断上升,不同灌溉模式增幅表现为RC-CI处理>CI处理>WI处理>FSI处理;与FSI处理相比,WI、CI和RC-CI处理水稻结实率分别增加4.45%、5.95%和6.77%,千粒质量分别增加1.86%、3.49%和6.08%,每穴产量分别增加8.81%、13.78%和16.44%。相关分析表明,乳熟期和黄熟期叶片 $SPAD$ 值、荧光参数(F_v/F_m 、 Φ_{PSII} 、 qP 和 qN)与结实率、千粒质量、每穴产量呈显著($P<0.05$)或极显著($P<0.01$)正相关关系。合理水分调控能延缓水稻生育后期叶绿素分解,提高叶片PS II反应中心的光能转换效率、开放比例、潜在活性和稳定性,有利于提高结实率和千粒质量,可使水稻增产。

关键词:水稻;灌溉模式;叶绿素荧光;产量;相关性

中图分类号: S152.7

文献标志码: A

doi:10.13522/j.cnki.ggs.2017.03.001

郭相平,王甫,王振昌,等. 不同灌溉模式对水稻抽穗后叶绿素荧光特征及产量的影响[J]. 灌溉排水学报,2017,36(3):1-6.

0 引 言

水稻是我国主要粮食作物之一,种植面积占全国粮食种植面积的1/3左右,其耗水量占全国总用水量的50%以上,占全国农业用水量的65%以上^[1-2]。传统淹灌模式不仅限制水稻高产潜力的发挥,而且会加剧农业用水的紧张程度,同时,因田间渗漏和地表排水还会造成氮、磷等元素的污染^[3-4]。因此,选择适宜的节水灌溉模式对保证我国粮食安全及农业可持续发展意义重大。

光合作用是水稻物质生产的基础,水稻70%~80%的灌浆物质来自抽穗后叶片的光合作用^[5]。叶片吸收的光能,一部分通过光化学电子传递转换为化学能,剩余的部分以荧光和热的形式耗散掉^[6]。因此,可以用叶绿素荧光参数反映植物光合效率的强弱,光合系统II(PS II)是植物光合作用过程中进行光反应的重要结构^[7]。已有研究^[8-9]表明提高PS II反应中心的光能转换效率、潜在活性和开放程度,可有效减少非辐射能量耗散,提高光合系统反应中心的稳定性,有利于作物光合能力的提高。水稻生育后期光合能力的提高有利于光合产物的形成和积累,促进籽粒灌浆,提高结实率和千粒质量,使水稻增产^[8,10]。

目前,关于不同灌溉模式对水稻产量、品质、抗倒伏、水肥利用效率、氮磷流失、温室气体排放等方面的研究较多^[11-17],但在叶绿素荧光方面研究相对较少,不同灌溉模式下水稻叶绿素荧光参数与水稻产量指标相关关系的研究更是鲜有报道。为此,选择在南方稻作区具有代表性的浅水勤灌、湿润灌溉、控制灌溉和蓄水-控灌

收稿日期:2016-09-26

基金项目:国家自然科学基金项目(51079042,51309080);国家重点研发计划项目(2016YFC0400208);中央高校基本业务费项目(2013B06014);江苏省水利科技项目

作者简介:郭相平(1968-),男,教授,博士后,主要从事节水灌溉理论与技术研究。E-mail: xpguo@hhu.edu.cn

通信作者:王振昌(1981-),男,讲师,博士,主要从事灌排理论与技术研究。E-mail: wangzhenchang@hhu.edu.cn

等4种灌溉模式作为研究对象,通过小区试验,对比分析不同灌溉模式对水稻抽穗后叶绿素荧光特征的差异及其与产量指标的相关关系,以期揭示水稻不同灌溉模式下的增产机理,为南方稻作区最优水分管理模式提供理论支撑。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于2015年6—10月在河海大学节水园区(31°57'N,118°50'E)内进行。土壤取自节水园区,土壤田间质量持水率和饱和质量含水率分别为30.6%和39.6%,土壤类型为黏壤土,全磷、速效磷、全氮和速效氮质量分数分别为33.0、10.37、62.9和47.4 mg/kg,有机质质量分数为2.40%。

1.2 试验设计

试验设置4种灌溉模式:浅水勤灌(Frequent and Shallow Irrigation, FSI)、湿润灌溉(Wet Irrigation, WI)、控制灌溉(Controlled Irrigation, CI)和蓄水-控灌(Rain-catching and Controlled Irrigation, RC-CI),每个处理3次重复,共12个小区,小区长×宽为3.0 m×2.5 m。小区之间的田埂打入50 cm高的彩钢片,防止侧渗,各小区随机布置。灌排控制指标参考了彭世彰等^[18]、郭相平等^[19]的资料,具体试验方案见表1。当土壤水分降至灌水下限时,即灌水至上限,水层深度通过钢尺测量,遇降雨时加测,若水层深度超过最大蓄雨深度,则及时排水至蓄雨上限,无水层时利用埋设在土壤中0~30 cm的TDR探头(Mini-Trase System-Soil Moisture Equipment Crop, Santa Barbara, CA, USA)进行土壤水分测定。

水稻供试品种采用当地常用高产品种“南粳44”,6月10日插秧,行株距为20 cm×15 cm,每穴3株,10月23日收获,全生育期共135 d。6月5日施基肥(复合肥,N:P₂O₅:K₂O=15%:15%:15%)300 kg/hm²,6月17日、7月7日和8月19日分别施用尿素(含氮量≥46.2%)150.0、75.0和150.0 kg/hm²作为返青肥、分蘖肥和抽穗肥,各处理施肥量一致。全生育期人工拔草,除灌排措施外,其他农技措施均相同。

表1 不同灌溉模式下的设计灌排指标

处理	灌溉模式	灌溉控制指标	返青期	分蘖期	拔节孕穗期	抽穗开花期	乳熟期	黄熟期
FSI	浅水勤灌	灌水上限/mm	30	30	50	40	40	0
		灌水下限/mm	10	10%~60%*	10	10	10	60%~70%*
		蓄雨上限/mm	40	100	150	200	200	0
WI	湿润灌溉	灌水上限/mm	20~30	10	30	20	10	0
		灌水下限/%	100	70~80	80	90	80	60%~70%
		蓄雨上限/mm	40	100	150	200	200	0
CI	控制灌溉	灌水上限/%	30 mm*	100	100	100	100	80
		灌水下限/%	10 mm*	60~70	70~80	80	70	自然落干
		蓄雨上限/mm	40	60	80	80	80	0
RC-CI	蓄水-控灌	灌水上限/%	30 mm*	100	100	100	100	80
		灌水下限/%	10 mm*	60~70	70~80	80	70	自然落干
		蓄雨上限/mm	80	150	200	200	200	0

注 1)“mm”表示田面水深,“%”表示表层30 cm土壤的含水率占土壤饱和含水率的百分比,“*”表示本行数据表示方式不同于同行其他数据;
2)分蘖期灌溉控制指标前高后低,拔节孕穗期灌溉控制指标前低后高。

1.3 测试指标和方法

1)叶绿素荧光参数

分别在抽穗开花期(8月24日)、乳熟期(9月18日)和黄熟期(10月12日)测定倒2叶叶绿素荧光参数特征,每个小区选取代表性的3穴进行测定。用叶绿素计(SPAD-502, Minolta, Japan)测定叶绿素量,测定叶片中段的SPAD值,以平均值作为该小区叶片的SPAD值。采用超便携式调制叶绿素荧光仪(MINI-PAM-II, WALZ, Germany)测定水稻叶绿素荧光参数,将叶夹夹在叶片中部,测定前叶片暗适应15 min,再将光纤传感器插入叶夹,抽开叶夹上的遮光片,开启叶绿素荧光仪诱导曲线功能。指标研究参照张守仁^[20]和陈盈等^[6]的方法。

2)测产与考种

水稻完熟期,在每个小区取代表性的3穴植株,测定每穴有效穗数、每穗粒数、结实率和千粒质量,计算每穴产量,按小区面积单打单收换算实际产量。

1.4 数据计算和统计分析

采用 Excel(Excel 2010, Microsoft, USA)进行数据处理和绘图,运用 SPSS (SPSS 19.0, SPSS Inc., USA)软件进行单因素方差分析和不同参数间的相关分析,多重比较采用 Duncan法($P<0.05$)。

2 结果与分析

2.1 不同灌溉模式对水稻 SPAD 值的影响

表 2 是不同灌溉模式对水稻叶片叶绿素 (SPAD 值) 的影响。由表 2 可知,抽穗开花期各处理叶片 SPAD 值差异不显著,乳熟期和黄熟期不同处理间叶片 SPAD 值差异显著($P<0.05$)。各处理叶片 SPAD 值降幅具体表现为 FSI 处理>WI 处理>CI 处理>RC-CI 处理。其中,乳熟期 WI、CI、RC-CI 处理较 FSI 处理叶片 SPAD 值分别增加 3.81%、7.45%和 10.90%;黄熟期 WI、CI、RC-CI 处理较 FSI 处理叶片 SPAD 值分别增加 9.85%、16.32%和 28.74%。抽穗后,叶片 SPAD 值整体呈下降趋势,其中,FSI 处理叶片 SPAD 值乳熟期、黄熟期较抽穗开花期分别降低 17.48%和 45.79%;WI 处理分别降低 13.90%和 40.15%;CI 处理分别降低 11.08%和 36.76%;RC-CI 处理分别降低 9.74%和 31.17%。

表 2 不同灌溉模式对水稻叶片叶绿素含量 (SPAD 值) 的影响

处理	灌溉模式	抽穗开花期	乳熟期	黄熟期
FSI	浅水勤灌	45.57a	37.60d	24.70d
WI	湿润灌溉	45.33a	39.03c	27.13c
CI	控制灌溉	45.43a	40.40b	28.73b
RC-CI	蓄水-控灌	46.20a	41.70a	31.80a

注 同列不同小写字母分别表示同时期相同指标 4 个处理在 $\alpha=0.05$ 水平差异显著,下同。

2.2 不同灌溉模式对水稻叶片荧光参数的影响

表 3 是不同灌溉模式对水稻叶片荧光参数的影响。由表 3 可知,水稻抽穗开花期各处理叶片荧光参数 (Fv/Fm 、 Φ_{PSII} 、 qP 和 qN) 差异均不显著;乳熟期和黄熟期不同处理间叶片荧光参数 (Fv/Fm 、 Φ_{PSII} 、 qP 和 qN) 均差异显著($P<0.05$),且均表现为 RC-CI 处理>CI 处理>WI 处理>FSI 处理。其中,乳熟期 WI、CI、RC-CI 处理较 FSI 处理叶片 Fv/Fm 增加 2.57%~5.27%、 Φ_{PSII} 增加 2.44%~4.89%、 qP 增加 1.74%~4.06%、 qN 增加 4.60%~14.66%,黄熟期 WI、CI、RC-CI 处理较 FSI 处理叶片 Fv/Fm 增加 4.65%~9.59%、 Φ_{PSII} 增加 4.23%~19.90%、 qP 增加 3.57%~13.78%、 qN 增加 7.37%~18.32%。

表 3 不同灌溉模式对水稻叶片荧光参数的影响

生育期	叶绿素荧光参数	FSI	WI	CI	RC-CI
抽穗开花期	Fv/Fm	0.837a	0.834a	0.8286a	0.829a
	Φ_{PSII}	0.526a	0.521a	0.529a	0.523a
	qP	0.738a	0.728a	0.722a	0.729a
	qN	0.318a	0.302a	0.315a	0.304a
乳熟期	Fv/Fm	0.778c	0.798bc	0.807b	0.819a
	Φ_{PSII}	0.491b	0.503b	0.509ab	0.515a
	qP	0.689b	0.705b	0.722ab	0.733a
	qN	0.348b	0.364ab	0.385ab	0.399a
黄熟期	Fv/Fm	0.709c	0.742b	0.763a	0.777a
	Φ_{PSII}	0.402d	0.419c	0.444b	0.482a
	qP	0.588c	0.609c	0.643b	0.669a
	qN	0.475c	0.510b	0.526b	0.562a

随生育期推进,叶片 Fv/Fm 、 Φ_{PSII} 和 qP 不断下降,同一指标不同处理间下降幅度表现为 FSI 处理>WI 处理>CI 处理>RC-CI 处理;叶片 qN 不断升高,不同处理间 qN 上升幅度表现为 RC-CI 处理>CI 处理>WI 处理>FSI 处理。

2.3 不同灌溉模式对水稻产量的影响

表 4 是不同灌溉模式对水稻产量及产量性状的影响情况。方差分析结果显示,不同灌溉模式下每穴有效穗数、每穗粒数、结实率、千粒质量以及每穴质量均差异显著($P<0.05$)。与 FSI 处理相比,WI、CI 和 RC-CI 处理每穴有效穗数分别升高 7.40%、11.05%和 6.04%;每穗粒数分别降低 4.86%、6.61%和 3.04%;结实率分别

升高4.45%、5.95%和6.77%；千粒质量分别升高1.86%、3.49%和6.08%；每穴产量分别升高8.81%、13.78%和16.44%。

表4 不同灌溉模式对水稻产量及产量性状的影响

处理	灌溉模式	每穴有效穗数	每穗粒数	结实率/%	千粒质量/g	每穴产量/g
FSI	浅水勤灌	11.76c	131.7a	84.73c	24.67c	32.36c
WI	湿润灌溉	12.63b	125.3c	88.50b	25.13bc	35.21b
CI	控制灌溉	13.06a	123.0d	89.77a	25.53ab	36.82a
RC-CI	蓄水-控灌	12.47b	127.7b	90.47a	26.17a	37.68a

2.4 不同灌溉模式下水稻叶片叶绿素荧光参数与产量指标的相互关系

表5是水稻叶片叶绿素荧光特征与产量指标的相关系数。由表5可知，抽穗开花期叶绿素量及荧光参数与结实率、千粒质量以及每穴产量关系不显著，而随生育期推进，乳熟期和黄熟期叶绿素量、 Fv/Fm 、 Φ_{PSII} 、 qP 、 qN 与结实率、千粒质量、每穴产量均显著($P<0.05$)或极显著正相关($P<0.01$)。抽穗后的叶绿素量及荧光参数整体上与水稻每穴有效穗数、每穗粒数相关关系均未达显著水平($P>0.05$)。

表5 水稻叶片叶绿素荧光特征与产量指标的相关系数($n=12$)

生育期	叶绿素荧光参数	每穴有效穗数	每穗总粒数	结实率/%	千粒质量	每穴产量
抽穗开花期	叶绿素量	-0.115	0.167	0.151	0.190	0.151
	Fv/Fm	-0.438	0.384	-0.560	-0.410	-0.522
	Φ_{PSII}	0.177	-0.101	-0.160	0.071	0.025
	qP	-0.508	0.413	-0.540	-0.415	-0.547
	qN	-0.144	0.073	-0.415	-0.250	-0.349
乳熟期	叶绿素量	0.596*	-0.484	0.839**	0.782**	0.854**
	Fv/Fm	0.640*	-0.557	0.882**	0.844**	0.889**
	Φ_{PSII}	0.571	0.481	0.865**	0.580*	0.760**
	qP	0.615*	-0.449	0.761**	0.779**	0.841**
	qN	0.460	-0.460	0.680*	0.639*	0.716**
黄熟期	叶绿素量	0.501	-0.407	0.832**	0.881**	0.864**
	Fv/Fm	0.650*	-0.534	0.901**	0.904**	0.943**
	Φ_{PSII}	0.467	-0.371	0.796**	0.865**	0.836**
	qP	0.517	-0.370	0.866**	0.912**	0.918**
	qN	0.606*	-0.492	0.872**	0.941**	0.932**

注 “*”和“**”分别表示在 $\alpha=0.05$ 和0.01水平上同时期不同指标间相关性显著和极显著。

3 讨论与结论

叶绿素是光合作用中能量转化的参与者和载体^[21]。本试验发现不同灌溉模式下水稻抽穗开花期SPAD值无明显差异，随生育期推进，叶片衰老，SPAD值不断降低，各处理SPAD值降低幅度有所不同，具体为FSI处理>WI处理>CI处理>RC-CI处理。控制灌溉和蓄水-控灌生育期根层土壤水分长时间处于饱和和以下，土壤通气性良好^[19]，加强土壤通气、改善土壤环境有利于叶片合成较多的叶绿素^[22]。叶绿素荧光参数可以反映植物叶片光合系统PS II对光能的吸收和利用情况^[23]。已有研究^[24]表明，叶绿素荧光参数 Fv/Fm 、 Φ_{PSII} 、 qP 随作物生育期的推迟而下降，而 qN 随生育期的推迟而上升，本研究也发现水稻抽穗开花期后， Fv/Fm 、 Φ_{PSII} 、 qP 不断下降， qN 不断升高。不同灌溉模式在水稻不同生育期叶绿素荧光参数表现有所不同。侯会静等^[25]研究表明，分蘖末期水分亏缺复水后水稻有明显的补偿效应，表现为水稻叶片的 Fv/Fm 接近或超越浅水勤灌处理，本研究发现抽穗开花期 Fv/Fm 、 Φ_{PSII} 、 qP 和 qN 差异不显著，随生育期推进，各处理间叶绿素荧光参数差距不断扩大，乳熟期和黄熟期上述指标均表现为RC-CI处理>CI处理>WI处理>FSI处理。这可能是因为控制灌溉和蓄水-控灌经历了生育前期干旱和淹水胁迫，后期会产生明显的补偿效应^[26-27]。

试验中，按小区单打单收换算水稻实际产量表现为蓄水-控灌(10 171.97 kg/hm²)>控制灌溉(9 921.50 kg/hm²)>湿润灌溉(9 484.60 kg/hm²)>浅水勤灌(8 734.85 kg/hm²)。已有研究^[19,28-30]表明，节水灌溉模式在节水的同时，产量与保持水层灌溉持平或有所提高。本研究中湿润灌溉、控制灌溉和蓄水-控灌较传统的浅水勤灌水稻产量都有明显增加。朱士江等^[28]研究表明湿润灌溉的增产效果比控制灌溉好，但郭群善等^[31]得到的结果刚好与之相反，本研究结果与后者相似。或许是因为水稻品种的抗旱能力、生育期气候条件和土

壤类型不同所致^[32]。同时,本研究中蓄水-控灌和控制灌溉产量接近,蓄水-控灌维持产量较高的原因可能是作物生育后期有较多的功能叶,从而有助于籽粒灌浆和产量形成^[19]。本试验中对水稻产量构成分析表明,水稻结实率和千粒质量均表现为RC-CI处理>CI处理>WI处理>FSI处理,这可能是因为生育后期水稻叶片维持较高的SPAD值及Fv/Fm、 Φ_{PSII} 、qP、qN,从而延缓了叶片衰老^[33],维持水稻较长的光合功能期^[34],保证了叶片生育后期仍维持较高的光合效率,有助于籽粒灌浆,从而提高结实率和千粒质量。生育后期叶片SPAD值、叶绿素荧光参数与产量指标具有明显的相关关系^[34-36]。魏海燕等^[34]研究表明,齐穗期后10、20、30和40 d叶片SPAD值和叶绿素荧光参数(Fv/Fm、 Φ_{PSII} 、qP和qN)与千粒质量、结实率均呈极显著正相关。研究发现,乳熟期和黄熟期的叶片SPAD值和叶绿素荧光参数(Fv/Fm、 Φ_{PSII} 、qP和qN)与千粒质量、结实率均呈显著或极显著正相关。苏云松等^[35]研究表明,马铃薯叶片的SPAD值与单株产量呈极显著正相关,李友军等^[36]研究表明,小麦产量与开花期、灌浆前期和灌浆后期的叶绿素荧光参数(Fv/Fm、 Φ_{PSII} 、qP、qN)呈显著或极显著正相关,本研究也发现乳熟期和黄熟期叶片SPAD值和叶绿素荧光参数(Fv/Fm、 Φ_{PSII} 、qP、qN)与每穴产量均呈极显著正相关。

较传统浅水勤灌,节水灌溉模式(湿润灌溉、控制灌溉和蓄水-控灌)生育后期SPAD值、Fv/Fm、 Φ_{PSII} 、qP和qN明显提高,水稻结实率、千粒质量和每穴产量显著增加。相关分析表明,乳熟期和黄熟期的SPAD值、Fv/Fm、 Φ_{PSII} 、qP和qN与水稻结实率、千粒质量和每穴产量显著或极显著正相关。可见,节水灌溉模式不但能实现水稻生产节水的目的,而且对水稻产量的提高也具有显著的促进作用。

参考文献:

- [1] BORRELL A, GARSIDE A, SHU F. Improving efficiency of water use for irrigated rice in a semi-arid tropical environment[J]. Field Crops Research, 1997, 52(3):231-248.
- [2] 操信春,吴普特,王玉宝,等. 中国灌溉水粮食生产率及其时空变异[J]. 排灌机械工程学报,2012,30(3):356-361.
- [3] 茆智. 水稻节水灌溉在节水增产防污中发挥重要作用[J]. 中国水利,2009(21):11-12.
- [4] 彭世彰,徐俊增,黄乾,等. 水稻控制灌溉模式及其环境多功能性[J]. 沈阳农业大学学报,2004,35(Z1):443-445.
- [5] 杨建昌,朱庆森,王志琴,等. 水稻籽粒中内源多胺及其与籽粒充实和粒重的关系[J]. 作物学报,1997,23(4):385-392.
- [6] 李晓,冯伟,曾晓春. 叶绿素荧光分析技术及应用进展[J]. 西北植物学报,2006,26(10):2 186-2 196.
- [7] 许大全. 光系统II反应中心的可逆失活及其生理意义[J]. 植物生理学报,1999,35(4):273-276
- [8] 陈盈,张满利,刘宪平,等. 生物炭对水稻齐穗期叶绿素荧光参数及产量构成的影响[J]. 作物杂志,2016(3):94-98.
- [9] 李馨园,李晶,陈龙涛,等. 播种方式及追肥时期对寒地冬麦旗叶叶绿素荧光参数及产量的影响[J]. 作物杂志,2011(3):16-19.
- [10] 汪本福,黄金鹏,赵锋,等. 硅氮配施对水稻光合特性、叶绿素荧光及产量的影响[J]. 中国稻米,2016,22(1):30-34.
- [11] 郭以明,郭相平,樊峻江,等. 蓄水控灌模式对水稻产量和水分生产效率的影响[J]. 灌溉排水学报,2010,29(3):61-63.
- [12] 郭相平,杨骥,王振昌,等. 旱涝交替胁迫对水稻产量和品质的影响[J]. 灌溉排水学报,2015,34(1):13-16.
- [13] 朱成立,郭相平,刘敏昊,等. 水稻沟田协同控制灌排模式的节水减污效应[J]. 农业工程学报,2016,32(3):86-91.
- [14] 褚光,展明飞,朱宽宇,等. 干湿交替灌溉对水稻产量与水分利用效率的影响[J]. 作物学报,2016,42(7):1 026-1 036.
- [15] MIAO Y, ZHU Z, GUO Q, et al. Alternate wetting and drying irrigation-mediated changes in the growth, photosynthesis and yield of the medicinal plant *Tulipa edulis*[J]. Industrial Crops & Products, 2015(66):81-88.
- [16] 彭世彰,张正良,庞桂斌. 控制灌溉条件下寒区水稻茎秆抗倒伏力学评价及成因分析[J]. 农业工程学报,2009,25(1):6-10.
- [17] 王孟雪,张忠学. 适宜节水灌溉模式抑制寒地稻田N₂O排放增加水稻产量[J]. 农业工程学报,2015,31(15):72-79.
- [18] 彭世彰,艾丽坤,和玉璞,等. 稻田灌排耦合的水稻需水规律研究[J]. 水利学报,2014,45(3):320-325.
- [19] 郭相平,袁静,郭枫,等. 水稻蓄水-控灌技术初探[J]. 农业工程学报,2009,25(4):70-73.
- [20] 张守仁. 叶绿素荧光动力学参数的意义及讨论[J]. 植物学报,1999,16(4):444-448.
- [21] Lin Z H, Chen L S, Chen R B, et al. CO₂ assimilation, ribulose-1,5-bisphosphate carboxylase/oxygenase, carbohydrates and photosynthetic electron transport probed by the JIP-test, of tea leaves in response to phosphorus supply[J]. BMC Plant Biology, 2009, 9(1):43.
- [22] 朱练峰,刘学,禹盛苗,等. 增氧灌溉对水稻生理特性和后期衰老的影响[J]. 中国水稻科学,2010,24(3):257-263.
- [23] HAMILTON E M, VANDERVER A, SIRIWARDENA K, et al. Interactions between senescence and leaf orientation determine in situ patterns of photosynthesis and photoinhibition in field-grown rice[J]. Plant Physiology, 1999, 119(2): 553-564.
- [24] 黄光福,唐巧玲,唐云鹏,等. 叶绿素荧光分析技术在水稻研究中的应用[J]. 作物研究,2013,27(2):174-179.
- [25] 侯会静,魏征,彭世彰,等. 分蘖末期水分亏缺复水后水稻光合与荧光特性参数的补偿效应[C]// 现代节水高效农业与生态灌区建设:上. 昆明:云南大学出版社,2010.
- [26] 郭相平,张烈君,王琴,等. 拔节孕穗期水分胁迫对水稻生理特性的影响[J]. 干旱地区农业研究,2006,24(2):125-129.
- [27] 陆红飞,郭相平,甄博,等. 旱涝交替胁迫条件下粳稻叶片光合特性[J]. 农业工程学报,2016,32(8):105-112.
- [28] 朱士江,孙爱华,张忠学,等. 不同节水灌溉模式对水稻分蘖、株高及产量的影响[J]. 节水灌溉,2013(12):16-19.

- [29] 张荣萍,马均,王贺正,等. 不同灌水方式对水稻结实期一些生理性状和产量的影响[J]. 作物学报,2008,34(3): 486-495.
- [30] 赵黎明,李明,郑殿峰,等. 灌溉方式对寒地水稻产量及籽粒灌浆的影响[J]. 中国农业科学,2015,48(22):4 493-4 506.
- [31] 郭群善,贺玮. 水氮互作对水稻产量及品质的影响[J]. 节水灌溉,2016(5):42-47.
- [32] 张耗,剧成欣,陈婷婷,等. 节水灌溉对节水抗旱水稻品种产量的影响及生理基础[J]. 中国农业科学,2012,45(23):4 782-4 793.
- [33] 王复标,黄福灯,程方民,等. 水稻生育后期叶片早衰突变体的光合特性与叶绿体超微结构观察[J]. 作物学报,2012,38(5):871-879.
- [34] 魏海燕,张洪程,马群,等. 不同氮肥利用效率水稻基因型剑叶光合特性[J]. 作物学报,2009,35(12):2 243-2 251.
- [35] 苏云松,郭华春,陈伊里. 马铃薯叶片 SPAD 值与叶绿素含量及产量的相关性研究[J]. 西南农业学报,2007,20(4):690-693.
- [36] 李友军,熊瑛,陈明灿,等. 不同品质类型小麦叶绿素荧光特性及其与籽粒产量和淀粉积累的关系[J]. 麦类作物学报,2005,25(6):82-86.

Effects of Irrigation Modes on Yield and Chlorophyll Fluorescence Characteristics after Heading Stage of Rice

GUO Xiangping, WANG Fu, WANG Zhenchang, HUANG Shuangshuang, LIU Wei

(College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: In order to study the influence of yield and chlorophyll fluorescence characteristics after heading stage under different irrigation modes of rice, took Hybrid rice cultivar “Nan-jing 44” as material, four irrigation mode were set as FSI (frequent and shallow irrigation), WI (wet irrigation), CI (controlled irrigation), RC-CI (rain-catching and controlled irrigation), and relationships between chlorophyll fluorescence characteristics of leaf and yield characters were also analyzed. The results showed that chlorophyll content (*SPAD* value) and fluorescence characteristics (the maximum photochemical efficiency (*Fv/Fm*), the actual photochemical efficiency of photosystem II (Φ_{PSII}), the photochemical quenching coefficient (*qP*) and the non-photochemical quenching coefficient (*qN*)) had no significant difference under different irrigation modes at heading to flowering stage. Where, *SPAD* value, *Fv/Fm*, Φ_{PSII} , *qP* could be decreased and *qN* could be increased with the process of the application time, the decreasing and increasing range presented FSI>WI>CI>RC-CI and RC-CI>CI>WI>FSI, respectively. Compared with FSI, the setting percentage increased by 4.45%, 5.59% and 6.77% under WI, CI and RC-CI treatment, the thousand seed weight increased by 1.86%, 3.49% and 6.08% under WI, CI and RC-CI treatment, the grain yield per hole was increased by 8.81%, 13.78 and 16.44% under WI, CI and RC-CI treatment, respectively. Correlation analysis showed that *SPAD* value, fluorescence characteristics (*Fv/Fm*, Φ_{PSII} , *qP*, *qN*) of leaf were significant ($P<0.05$) or highly significant ($P<0.01$) positively correlated with setting percentage, thousand seed weight, grain yield per hole at mink ripening stage and yellow ripening stage of rice. The results indicated that appropriate water management could improve the light energy conversion efficiency, potential activity, open proportion and stability of PS II reaction center in later growth stage of rice, which improves the setting percentage and thousand seed weight, which would ultimately result in the increase of yield.

Key words: rice; irrigation mode; chlorophyll fluorescence; yield; correlation

责任编辑:白芳芳