

浅水勤灌水稻荧光参数与光合特性对不同施氮调控的响应

刘琦峰, 徐淑琴*

(东北农业大学 水利与土木工程学院, 哈尔滨 150030)

摘要:【目的】探究浅水勤灌不同施氮量对寒地水稻荧光参数和光学特性的影响。【方法】于东北农业大学园艺试验站,采用盆栽试验,利用LI-6400XT型光合仪测定了龙粳32号水稻不同生育期6组施氮处理0、60、90、120、150、180 kg/hm²(简称为W0、W60、W90、W120、W150、W180)下的主要荧光参数和光合特性的变化。【结果】初始荧光 F_0 、最大荧光 F_m 、可变荧光 F_v 均随施氮量的增加而升高。PSII反应中心的光能转化效率 F_v/F_m 、潜在活性 F_v/F_0 、光化学淬灭系数 q_p 以及非光化学淬灭系数 q_n 均随施氮量的增加呈先升高后降低的趋势。W120、W150、W180处理与W0处理间出现显著差异次数多于W60、W90处理;净光合效率与气孔导度随施氮量增加而升高,而胞间CO₂摩尔分数降低,在施氮量达到150 kg/hm²之后,光合速率降低,胞间CO₂摩尔分数增加。仅W150处理净光合效率、气孔导度、胞间CO₂摩尔分数、蒸腾效率与其他处理差异显著。说明PSII反应中心电子传递,光合初反应进程以及热耗散能力随施氮量的改变而受到促进或抑制,在W150处理下PSII反应最为活跃;对不同施氮处理进行光响应曲线模拟得出,随施氮量的增加光响应曲线上扬,光强大于400 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 后,在拔节—抽穗期光响应曲线随施氮量的增加而上升的幅度大于分蘖期。而对W120、W150、W180处理进行光响应特征参数的拟合得出,最大净光合效率 $P_{n\max}$ 表现为W150处理>W180处理>W120处理,光补偿点LCP与之相反,表观量子效率 α 、曲线曲角 β 以及暗呼吸速率 R_d 差异不大。【结论】浅水勤灌模式下,高氮比低氮更有助于水稻对光强的吸收,促进光响应发生,因此适当的高氮肥可以有效改善水稻叶片光响应特征,促进水稻生育,施氮量为150 kg/hm²最佳。

关键词:浅水勤灌;水稻;氮肥;荧光参数;光合特性

中图分类号: S511;Q945

文献标志码: A

doi:10.13522/j.cnki.ggps.2017.0697

刘琦峰,徐淑琴.浅水勤灌水稻荧光参数与光合特性对不同施氮调控的响应[J].灌溉排水学报,2018,37(7):6-12.

0 引言

水稻是世界主要粮食作物之一,而我国是稻作历史最悠久、水稻遗传资源最丰富的国家之一。在广泛种植水稻的东北地区,水稻种植范围广,经济比重大,因此探究各因素对水稻生长发育的影响,对于高产高质水稻的获得具有重大意义。水稻的正常生长发育离不开最主要的2个因素:水和氮^[1]。其合理的配合模式不仅可以提高水稻的水肥利用效率,同时还能改变土壤养分机制,反之,水氮比例的失调会导致产量降低。因此,必须确立水肥耦合、节水灌溉、排控减污以及高效管理的新理念,提高水肥利用效率^[2]。

近年来,叶绿素荧光技术因其能够迅速、准确、无损伤地对研究对象进行研究,同时能够完整地探测整个植株在各种胁迫条件下进行光合作用的真实状况,被广泛应用于水稻等农作物的光化学反应研究。有研究证实水氮对水稻叶片荧光与光合特性均有显著影响^[3-5],适宜的水氮用量能提高叶绿素量和光合速率,提高水稻成穗率,进一步提高作物的品质与产量。水稻生产中水肥过量投入不仅会使氮肥利用率下降,品质、产量、抗病虫能力减退,浪费资源,而且会扰乱土壤肥力结构,对土壤产生恶性破坏,污染环境,影响下一代水稻的生产发育^[6-11]。一直以来人们对在淹灌、控制灌溉等灌水模式下的氮肥调控对叶绿素荧光的影响有较深研究与探索^[2,12-16],而对东北地区浅水勤灌模式下的水稻研究相对较少。因此,以东北黑土地地区水稻作为研究对象,研究不同施氮量对水稻荧光、光合的影响,对比不同生育期施氮量对水稻生长的影响,以期东北

收稿日期:2017-11-14

基金项目:黑龙江省教育厅科研项目(11551044);东北农业大学农业水土工程创新团队项目

作者简介:刘琦峰(1992-),男,黑龙江哈尔滨人。硕士研究生,主要从事农业水土方面的研究。E-mail: 742026630@qq.com

通信作者:徐淑琴(1964-),女,黑龙江桦南人。教授,博士生导师,主要从事农业水土方面的研究。E-mail: 1210569246@qq.com

黑土地区在水稻氮肥模式的选型、节水灌溉的优化、水稻生育的促进以及水稻产率的提高,提供有效可靠的基础依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验于2016年5—9月在东北农业大学园艺试验站进行,供试土壤为黑土,有机质量、全氮量、全磷量、全钾量分别为28.56、1.45、0.78、20.76 g/kg,速效氮、速效磷、速效钾分别为115.82、54.3、182.6 mg/kg,pH值为6.52。供试肥料为尿素(含N量46%)、磷酸二铵(含N量18%,含P₂O₅量46%)、钾肥(含K₂O量40%)

1.2 试验方案

试验选用龙粳32号水稻作为试验品种,在保证光照、温度等因素相同的条件下,采取浅水勤灌(表1),6组施氮水平分别为0、60、90、120、150、180 kg/hm²,处理代号用W0、W60、W90、W120、W150、W180表示。采用盆栽试验,试验盆高为25.5 cm,上口直径为24 cm,下部盆底直径为18 cm,底部设有排水孔、阀门。盆顶设有活动防雨棚防止降雨。每盆装黑土7.5 kg,土壤经日晒、碎块、筛分后均匀施入氮、磷、钾肥,其中氮肥按生育期分基肥、蘖肥、穗肥3个阶段。每个处理重复10次,共60盆。于2016年5月7日育秧(施基肥),5月20日选择长势基本相同的秧苗进行统一移栽,每盆3穴,每穴2株,6月1日施蘖肥,7月21日施穗肥,于9月23日收获,整个生育期共140 d。

表1 水稻生育期内水分管理模式

灌水模式	返青期	分蘖期	拔节期	抽穗期	乳熟期	黄熟期
浅水勤灌	5~25 mm	5~25 mm	5~25 mm	5~25 mm	5~15 mm	落干

1.3 光响应曲线模型

应用Farquhar模型^[17]模拟浅水勤灌模式下不同氮肥处理的水稻光合作用光响应特征,得到不同生育时期不同施氮量条件下的水稻叶片最大光合速率 $P_{n\max}$ 、表观量子效率 α 以及光响应曲线曲角 β 等指标。对光响应曲线起始阶段进行线性回归分析,得到的回归直线与净光合为0即X轴与净光合为0的两水平线的交点分别为光补偿点LCP和光饱和点LSP。

$$P_n = \frac{\alpha E + P_{n\max} - \left[(\alpha E + P_{n\max})^2 - 4\alpha\beta P_{n\max} \right]^{1/2}}{2\beta} - R_d, \quad (1)$$

式中: P_n 为净光合速率($\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$); α 为表观量子效率($\mu\text{mol}/\mu\text{mol}$); E 为入射到叶片的光合有效辐射通量密度PPFD($\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$); $P_{n\max}$ 为最大净光合速率($\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$); R_d 为暗呼吸速率($\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$); β 为光响应曲线曲角(无量纲)。

1.4 测量指标及方法

试验采用LI-6400XT型光合仪于10:00对水稻叶片测定光合速率 P_n 、气孔导度 G_s 、胞间二氧化碳摩尔分数以及蒸腾速率。每次测定前需对水稻叶片进行30 min暗处理,测定初始荧光 F_0 、可变荧光 F_v 、最大荧光 F_m 、PSII反应中心光合转化效率 F_v/F_m 、潜在活性 F_v/F_0 ,在自然光下测定光化学淬灭系数 q_p 与非光化学淬灭系数 q_n ,每组处理取10个测样点。

运用WPS对数据进行整合,并绘制图表,图表数据为独立试验平均值±标准误差,通过LSD检验($P < 0.05$)分析处理间的差异显著性。

2 结果与分析

2.1 不同施氮量对水稻 F_0 、 F_v 、 F_m 的影响

F_0 、 F_v 、 F_m 分别代表初始荧光、可变荧光、最大荧光,是用来反应PSII光合反应中心的基本荧光参数。图1为在浅水勤灌不同施氮量下,分蘖期、拔节期、抽穗期、乳熟期 F_0 、 F_v 、 F_m 的实测变化(图中同时期不同处理间不同字母表示差异显著($P < 0.05$),下同)。由图1可知,W90、W120、W150处理的 F_0 除分蘖期外的3个生育期未表现出显著差异,但与W0、W60处理差异显著,如在抽穗期与W0、W60处理相比,W90、W120、W150处理的趋势分别提高了9.35%、8.14%、12.00%和12.69%、11.44%、15.42%。总体上 F_0 随着施氮量增加呈先升高后降低变化,分蘖期、拔节期 F_0 变化幅度较小,抽穗期与乳熟期变化幅度较大。相同施氮量条件下,不同

生育期 F_o 在抽穗期和乳熟期较高,分蘖期最小,但 F_o 变化差异无明显规律。

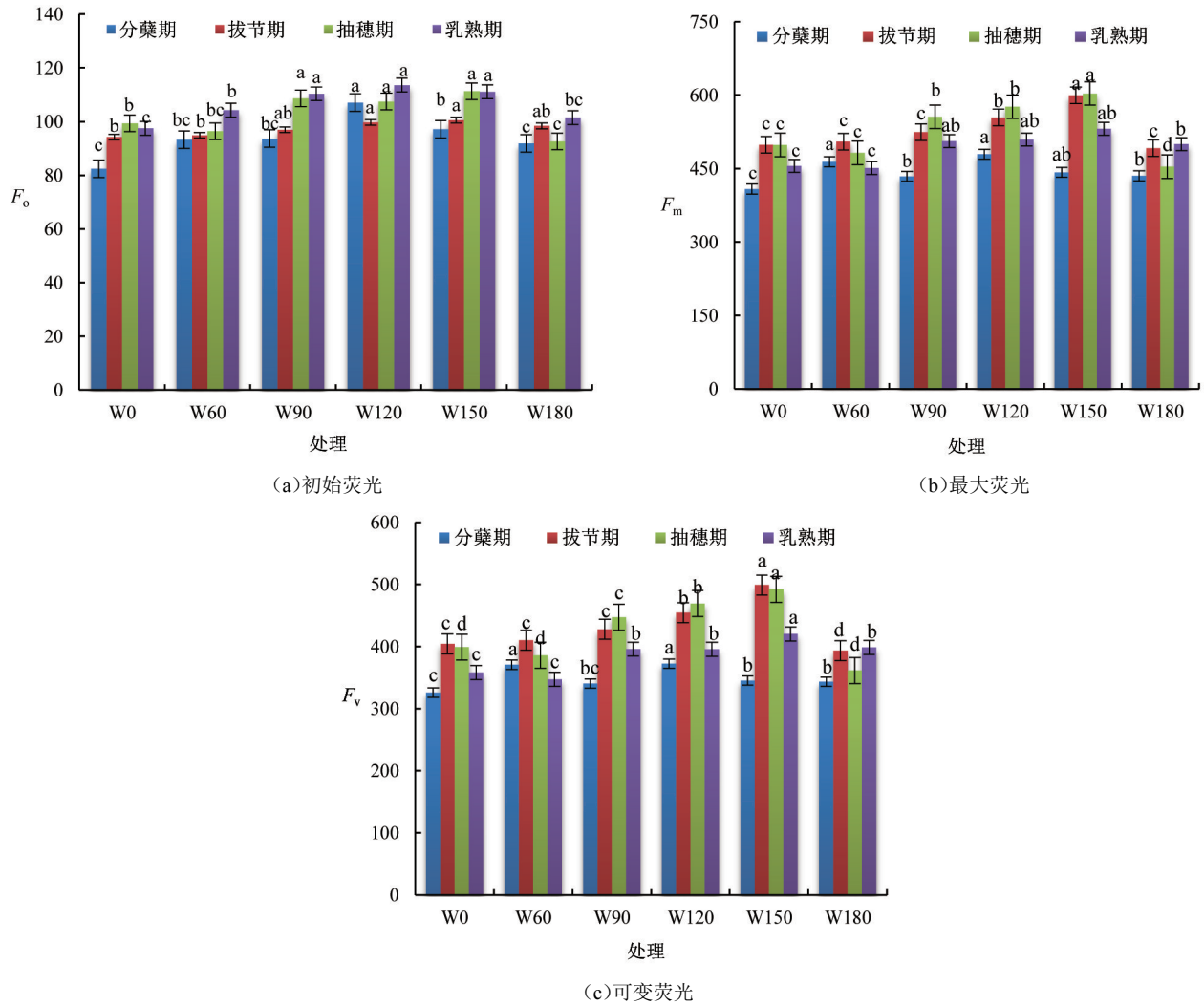


图1 不同施氮量处理下不同生育期水稻叶片荧光参数的变化

拔节期和抽穗期W150处理水稻的 F_m 与其他处理差异显著,与其他处理相比,W150处理的 F_m 在拔节期分别提高了20.27%、18.37%、14.29%、8.17%、21.96%,抽穗期提高了21.05%、25.11%、8.53%、4.64%、32.87%。分蘖期与乳熟期W150与W0、W60处理差异显著,在分蘖期W150处理相比W0、W60处理 F_m 变化了8.34%、-4.68%,乳熟期 F_m 增加了16.66%、17.74%,W150与W90、W120、W180处理未达到显著水平。在拔节期和抽穗期 F_m 平均值随着施氮量增加而增大,当达到W150处理水平之后,反而明显下降,反映出浅水勤灌模式下此施氮量的水稻叶片PSII反应中心的电子传递速率高于其他施氮量。而W180处理与W0处理的 F_m 值较低,部分生育期 F_m 值在W180处理下甚至低于W0处理,说明氮肥施用量过高对电子传递效率有破坏性,降低PSII反应,限制水稻的生长发育。

在各生育期内随着施氮量的增加, F_v 与 F_m 有相似的变化趋势。在拔节期W0、W60、W90、W120、W150、W180处理的 F_m 的变化率分别为1.30%、3.88%、5.66%、8.17%、-18.01%; F_v 的变化率分别为1.44%、4.28%、6.30%、9.78%、21.21%,从而反映可变荧光 F_v 更易受施氮量胁迫的影响。

2.2 浅水勤灌不同施氮量对光能转换效率 F_v/F_m 与潜在活性 F_v/F_o 的影响

F_v/F_m 是用于反映PSII(光化学系统)反应中心光能转换效率的重要指标。由图2可知,不同生育期同一施氮量处理下, F_v/F_m 呈现抛物线变化,分蘖期最小,拔节期迅速增大,达到峰值,在抽穗期、乳熟期逐渐下降。不同施氮量处理间对比显示,W90、W120、W150、W180处理的光能转化效率在乳熟期差异显著,其他3个生育期内均无显著差异,但总体表现为W150处理>W120处理>W90处理>W180处理。在达到拔节期峰值时,W60、W90、W120、W150、W180处理与W0处理相比, F_v/F_m 分别增加了0.63%、0.90%、0.95%、1.02%、0.42%,W150处理的 F_v/F_m 为最大。表明浅水勤灌在W150处理下水稻叶片PSII反应中心内其光能转化效率

最高,PSII反应中心光能转换效率的最快。

F_v/F_o 用于反映PSII反应的潜在活性的另一重要指标。从图2可看出, F_v/F_o 走势与 F_v/F_m 相似,同一施氮量下, F_v/F_o 呈倒“V”形状变化。在不同施氮量处理下, F_v/F_o 随着施氮量增加而逐渐增加,达到峰值后随着施氮量的增加逐渐下降。但在相同施肥量下, F_v/F_o 相较 F_v/F_m 随着施氮量变化更明显,变化差距更大。W90、W120、W150处理下的 F_v/F_o 最大,均与W0、W60、W180处理存在显著差异,且表现为W150处理>W120处理>W90处理。因此,与其他处理相比,W150处理水稻PSII的潜在活性更大。

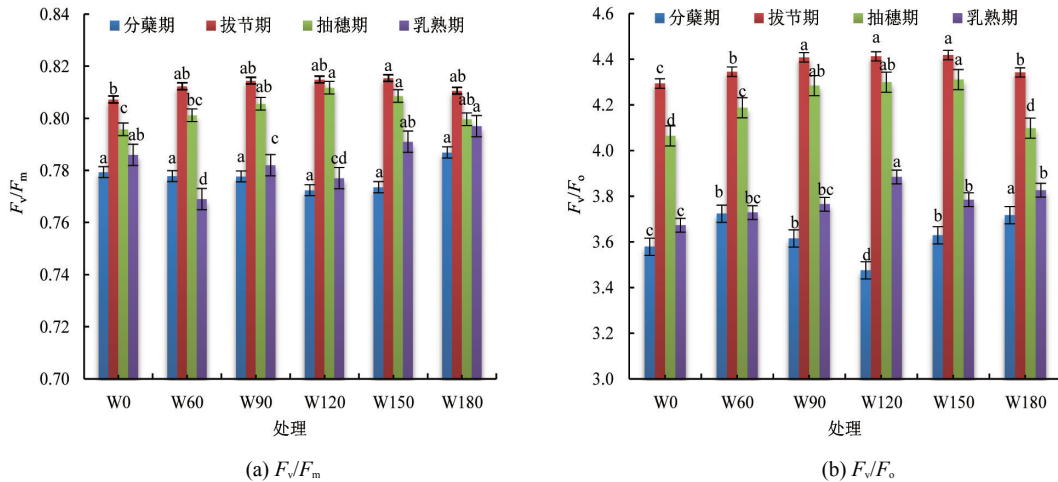


图2 不同施氮量处理下不同生育期水稻叶片 F_v/F_m 与 F_v/F_o 的变化

2.3 浅水勤灌不同施氮量对 q_p 、 q_N 的影响

光化学淬灭系数(q_p),一定情况下表示PSII反应中心光化学电子传递的情况。由表2可知,相同施氮量处理下,随着生育期的推进, q_p 从分蘖期升高,在拔节期达到峰值,随后逐步下降。说明PSII反应中心在拔节期程度最高。不同施氮量处理对比,W0、W60处理与W90处理仅在乳熟期表现为显著差异,其他3个生育期无显著差异,而拔节期、抽穗期、乳熟期W120、W150、W180处理与W0处理均表现出显著差异。如在拔节期W60、W90、W120、W150、W180处理与W0处理相比, q_p 分别提高了1.71%、10.23%、25.8%、34.97%、21.96%。拔节—抽穗期是水稻迅速生长发育的关键时期,对水肥的需求量很大,在采用浅水勤灌时增加氮肥能够有效促进PSII反应的进行,因此高施氮量对拔节抽穗期的PSII反应中心开放程度有较大促进效果,但过量的氮肥会使促进效果下降,使叶片PSII反应中心的电子传递效率活性受到抑制。

表2 不同施氮量处理下不同生育期水稻叶片 q_p 和 q_N 的变化

处理	q_p				q_N			
	分蘖期	拔节期	抽穗期	乳熟期	分蘖期	拔节期	抽穗期	乳熟期
W0	0.230±0.113a	0.469±0.050b	0.372±0.064b	0.133±0.071c	1.113±0.188b	1.428±0.038a	1.350±0.038b	1.401±0.137a
W60	0.277±0.159a	0.477±0.065b	0.384±0.082b	0.139±0.039c	1.163±0.203ab	1.438±0.069a	1.465±0.135a	1.413±0.106a
W90	0.286±0.122a	0.517±0.112b	0.385±0.102b	0.287±0.101b	1.180±0.258a	1.442±0.068a	1.388±0.127ab	1.391±0.879ab
W120	0.284±0.119a	0.590±0.116a	0.423±0.069a	0.288±0.051b	1.181±0.243a	1.455±0.050a	1.425±0.048a	1.362±0.147ab
W150	0.296±0.191a	0.633±0.621a	0.459±0.059a	0.348±0.073a	1.170±0.243a	1.417±0.032a	1.464±0.056a	1.415±0.203a
W180	0.3158±0.188a	0.572±0.13a	0.303±0.035c	0.238±0.111b	1.178±0.285a	1.453±0.077a	1.358±0.041b	1.305±0.135b

注 表中数据为平均值±标准差;同列不同字母表示差异显著($p<0.05$);下同。

q_N 是反映植物热量耗散程度的重要指标。由表2可知,氮量的改变对 q_N 的影响与 q_p 一致,随着施氮量升高,4个生育时期的 q_N 均有提高。各组处理差异性并不显著,W0、W60、W90处理间未表现出显著差异,而W120、W150、W180处理间在分蘖期与拔节期未表现出显著差异,仅在抽穗期与乳熟期差异显著。从 q_N 平均值来看,在抽穗期W120、W150处理水稻的 q_N 平均值略高于其他4组处理方式,较W0处理仅高5.56%和8.44%。说明施氮量的提高虽能提高对光合机构的保护能力,但效果并不显著。

2.4 浅水勤灌不同施氮量对水稻光合作用特征的影响

浅水勤灌不同施氮量处理下,水稻叶片净光合速率、叶片气孔导度、胞间 CO_2 摩尔分数与蒸腾速率的同步变化以及净光合效率与胞间 CO_2 摩尔分数的决定系数如表3所示。由表3可知,W120、W150、W180处理净光合速率、叶片气孔导度、蒸腾速率与W0、W60、W90处理均表现出显著差异,胞间 CO_2 摩尔分数只有

W150处理与其他5组处理达到显著水平,其他5处理间无显著差异,而与其他5处理相比,W150处理下胞间CO₂摩尔分数分别下降了7.59%、4.05%、3.59%、2.90%、4.95%。随着施氮量的不断提高,净光合效率与气孔导度呈正比例变化,而胞间CO₂摩尔分数减小。当施氮量达到W150的处理时,净光合效率与气孔导度达到峰值,分别为16.623 μmol/(m²·s)与0.510 μmol/(m²·s),而胞间CO₂摩尔分数为最小值(242.673 μmol/mol)。之后随着施氮量的进一步提高,净光合作用与气孔导度受到抑制,胞间CO₂摩尔分数有所回升。由此看出,施氮量的提高使叶片气孔张开,促进气孔导度与光合效率的提升,增加了CO₂的消耗,叶片胞间CO₂摩尔分数下降,而过高的施氮量抑制气孔舒张,降低光合作用,从而减少CO₂消耗量,胞间CO₂摩尔分数随之回升。W150处理水稻光合作用最强,生长最为旺盛。

表3 不同施氮量下水稻光合特性指数

处理	净光合速率/(μmol·m ⁻² ·s ⁻¹)	气孔导度/(μmol·m ⁻² ·s ⁻¹)	胞间CO ₂ 摩尔分数/(μmol·mol ⁻¹)	蒸腾速率/(μmol·m ⁻² ·s ⁻¹)	R ²
W0	12.444±0.021c	0.333±0.089d	258.052±0.269a	3.663±0.101c	0.809 2
W60	14.203±0.078c	0.421±0.034c	251.111±0.304a	4.364±0.058c	0.900 6
W90	14.497±0.214b	0.441±0.019c	247.349±0.171a	4.410±0.046b	0.827 7
W120	16.112±0.059a	0.493±0.039b	245.389±0.309a	4.903±0.203a	0.846 8
W150	16.623±0.028a	0.510±0.047a	238.473±0.098b	5.329±0.082a	0.851 5
W180	15.745±0.104a	0.509±0.022a	250.86±0.145a	4.943±0.100a	0.814 9

2.5 不同施氮量下的光响应曲线

在分蘖期与拔节—抽穗期进行光响应曲线模拟,分别绘制2个时期不同施氮量下水稻叶片光响应曲线(图3)。在浅水勤灌模式下W120、W150、W180处理光响应曲线明显优于W0、W60、W90处理,说明低施氮量对水稻光合作用促进作用较小甚至有抑制效果,不利于水稻生长有机物的生产和积累。而高施氮量处理下,净光合速率表现为W150处理>W180处理>W120处理。因此过高的施氮量对光合速率促进效果有所下降。不同曲线对比表明,随施氮量的增加,净光合速率增加,高氮处理下净光合速率高于低氮处理,拔节—抽穗期高于分蘖期,光强大于400 μmol/(m²·s)的不同施氮量光响应曲线开始分散,且拔节—抽穗期分散程度要大于分蘖期,说明在浅水勤灌模式下,低氮处理下叶片利用强光能力有所降低,并且不同施氮量处理光响应曲线在同等光照条件下的波动程度,以拔节—抽穗期最为敏感。

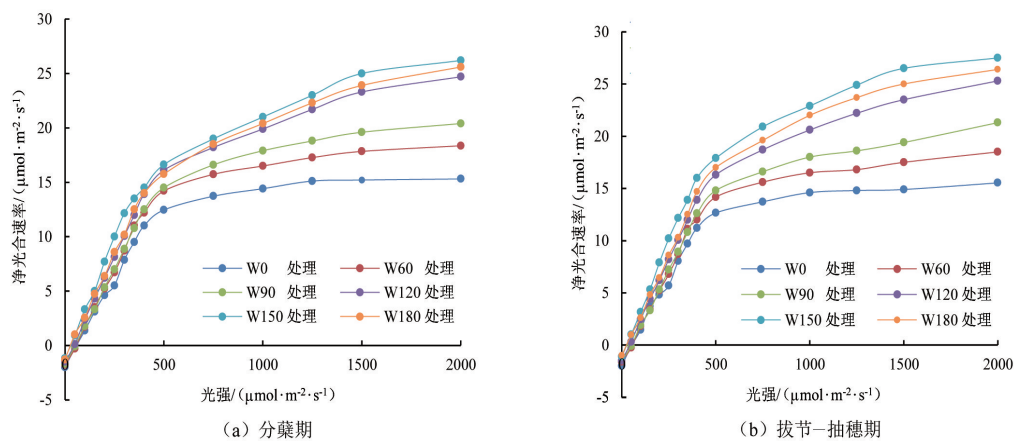


图3 不同施氮量处理下水稻叶片光响应曲线

在分蘖期与拔节—抽穗期对施氮量120~180 kg/km²处理建立水稻叶片光合速率光响应曲线拟合,采用Farquhar模型能够较好地反映不同氮质量浓度下水稻叶片光响应情况,且决定系数均大于0.90。模型各参数包括光饱和点(LSP)、光补偿点(LCP)、最大光合速率(P_{nmax})、表观量子效率(α)等(表4)。同等施氮量下拔节—抽穗期水稻LSP、LCP低于分蘖期,P_{nmax}高于分蘖期,其他参数变化不明显,这与拔节—抽穗期是水稻生长关键期,光合作用旺盛,对水氮更为敏感有关。随施氮量增加,分蘖期LSP、分蘖期和拔节—抽穗期LCP均表现为W150处理<W180处理<W120处理,而P_{nmax}与之相反。说明高氮肥有利于改善水稻对水分亏缺的适应,增强对于光线的利用,但过高施氮量效果有所下降。而不用施氮量对表观量子效率α、曲线曲角β、暗呼吸效率R₀虽有影响但无明显规律。整体上,在120~180 kg/km²高施氮量范围内,可有效改善叶片光响应特征,W150处理效果最佳。

表4 不同时期不同施氮处理光响应曲线特征参数

时期	处理	最大净光合速率/ ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	表观量子速率/ ($\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$)	光饱和点/ ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	光补偿点/ ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	暗呼吸速率/ ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	曲线曲角/ (无量纲)	R^2
分蘖期	W120	27.42	0.054	847.32	56.88	1.53	0.941	0.954
	W150	28.34	0.066	652.68	45.37	1.60	0.930	0.966
	W180	27.82	0.057	663.47	46.44	1.64	0.927	0.913
拔节—抽穗期	W120	28.02	0.062	524.50	42.71	1.70	0.911	0.916
	W150	29.63	0.076	488.74	30.16	1.34	0.922	0.904
	W180	28.71	0.070	540.32	34.65	1.81	0.917	0.924

3 讨论

不同施氮量对荧光参数与光合特性有较为明显的调控。初始荧光 F_0 、可变荧光 F_v 、最大荧光 F_m 、光能转化效率 F_v/F_m 、潜在活性 F_v/F_0 、光化学淬灭系数 q_p 与非光化学淬灭系数 q_n 均随施氮量增加呈抛物线变化,而在拔节抽穗期达到峰值,这与文献[10,18]结果一致。适量的氮质量浓度能够促进水稻叶片PSII反应的进行,提高电子传递,有效将过剩激发能耗散避免PSII反应中心的破坏。过高的施氮量会对PSII反应造成一定的抑制作用,降低光合作用潜能。整体上,高氮处理下的水稻荧光参数要优于低氮处理,这与其他有关研究^[19,20]结果相一致。

随施氮量的提高,水稻叶片气孔放大,气孔导度升高,使叶片吸收胞间 CO_2 参与光合作用速率加大,光合效率提高。通过光响应曲线模拟,随施氮量增加,净光合速率升高,达到 $400 \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 时,各曲线净光合速率差距逐步增加,且拔节—抽穗期分散程度大于分蘖期。对比分蘖期与拔节抽穗期光响应特征参数,随施氮量升高,分蘖期 LSP 、分蘖期和拔节—抽穗期 LCP 均表现为 $W150$ 处理 $<W180$ 处理 $<W120$ 处理,而 $P_{n\max}$ 与之相反,说明适量高氮肥有利于浅水勤灌模式下水稻叶片对于强光的吸收利用。相同施氮量处理下拔节—抽穗期的光合曲线参数优于分蘖期的,这与在水稻生长旺盛的拔节—抽穗期,水稻对于水氮的量更为敏感有关,试验中 α 、 β 、 R_d 无明显变化,与前人研究结果^[2,17]略有不同。这可能与试验地外界条件以及灌水模式不同有关,也可能与施氮水平差异有关。

4 结论

1)初始荧光 F_0 、最大荧光 F_m 、可变荧光 F_v 均随氮量升高而增大,在 $W150$ 处理达到峰值后逐渐降低。PSII反应中心的光能转换效率 F_v/F_m 与潜在活性 F_v/F_0 在施氮处理间呈抛物线走势。光化学淬灭系数 q_p 与非光化学淬灭系数 q_n 随施氮量变化与 F_v/F_m 、 F_v/F_0 变化情况相似,各荧光参数均在 $W150$ 处理的施氮处理下分别达到峰值, $W120$ 、 $W180$ 处理次之,因此适当高氮量有助于提高PSII反应中心的开放强度,促进叶片光合效率,提高水稻产率。

2)浅水勤灌模式下不同施氮量对净光合效率、气孔导度、外界与胞间 CO_2 摩尔分数之间的关系未造成太大影响。净光合效率与气孔导度随施氮量增加呈现先升高后回落的趋势,胞间 CO_2 摩尔分数的变化与净光合效率相反。 $W150$ 处理光合速率与其他处理差异显著,光合速率最强。

3)不同施氮量能够改变光响应曲线特征参数,随施氮量增加,使得水稻 $P_{n\max}$ 升高,水稻 LSP 、 LCP 下降,高氮处理下 $P_{n\max}$ 表现为 $W150$ 处理 $>W180$ 处理 $>W120$ 处理, LCP 变化与 $P_{n\max}$ 相反。

参考文献:

- [1] 柏彦超. 不同水、氮条件对水稻生长及部分生理特征的影响[D]. 扬州:扬州大学, 2008.
- [2] 张忠学, 郑恩楠, 王长明, 等. 不同水氮处理对水稻荧光参数和光合特性的影响[J]. 农业机械学报, 2017, 48(6): 176-183.
- [3] 和玉璞, 彭世彰, 豆沿斌, 等. 水氮调控对水稻叶片荧光参数影响的正交分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2013, 41(1): 75-79.
- [4] 徐俊增, 彭世彰, 魏征, 等. 节水灌溉水稻叶片胞间 CO_2 浓度及气孔与非气孔限制[J]. 农业工程学报, 2010, 26(7): 76-80.
- [5] 裴鹏刚, 张均华, 朱练峰, 等. 秸秆还田耦合施氮水平对水稻光合特性、氮素吸收及产量形成的影响[J]. 中国水稻科学, 2015, 29(3): 282-290.
- [6] 雷武生, 杨宝林, 戴金平. 不同氮肥运筹对水稻品种越光氮素吸收利用及产量的影响[J]. 江苏农业科学, 2014, 42(10): 54-56.
- [7] 宁慧峰, 崔嘉欣, 刘浩, 等. 灌溉方式和氮素对水稻产量和品质的影响[J]. 灌溉排水学报, 2017, 36(12):1-7.
- [8] 何军, 崔远来, 张大鹏, 等. 不同水肥耦合条件下水稻干物质积累与分配特征[J]. 灌溉排水学报, 2010, 29(5): 1-5.
- [9] 王文明, 高才华, 吴向海, 等. 不同肥料对水稻病虫害发生的影响[J]. 南方农业, 2017 (31): 1-2.
- [10] ZHANG Ennan, ZHANG Zhongxue, WANG Changming, et al. Influence of water-saving irrigation and nitrogenous fertilizer application on assessment of the rice quality[J]. International Journal of Agriculture & Biology, 2017, 19(5): 1 213-1 219.

- [11] 陈军, 叶荣榕, 李程勋, 等. 不同氮肥运筹方式对水稻氮素利用率及产量的影响[J]. 福建农业学报, 2012, 27(7): 759-763.
- [12] 郭晓荣, 曹坤芳, 许再富. 热带雨林不同生态习性树种幼苗光合作用和抗氧化酶对生长光环境的反应[J]. 应用生态学报, 2004, 15(3): 377-381.
- [13] 魏永霞, 何双红, 魏永华. 控制灌溉条件下水肥耦合对水稻产量及其构成因子的影响[J]. 灌溉排水学报, 2010, 29(5): 98-102.
- [14] 蒋谦陞. 水稻湿润灌溉的初步研究[J]. 水利学报, 1980(6): 54-59.
- [15] 孙爱华, 华信, 叶晓思, 等. 不同灌溉模式下施加控释肥对水稻生长特征及产量的影响研究[J]. 灌溉排水学报, 2016, 35(4): 48-52.
- [16] 刘欢欢, 邵东国. 节灌控排条件下稻田氮平衡模拟及利用效率分析[J]. 灌溉排水学报, 2013, 32(2): 52-56.
- [17] 徐俊增, 彭世彰, 魏征, 等. 不同供氮水平及水分调控条件下水稻光合作用光响应特征[J]. 农业工程学报, 2012, 28(2): 72-76.
- [18] 武文明, 陈洪俭, 李金才, 等. 氮肥运筹对孕穗期受渍冬小麦旗叶叶绿素荧光与籽粒灌浆特性的影响[J]. 作物学报, 2012, 38(6): 1 088-1 096.
- [19] 谷晓博, 李援农, 杜娅丹, 等. 水氮耦合对冬油菜氮营养指数和光能利用效率的影响[J]. 农业机械学报, 2016, 47(2): 122-132.
- [20] 陈钢, 黄翔, 张利红, 等. 不同氮素水平对西瓜幼苗生长及叶绿素荧光特性的影响[J]. 果树学报, 2011, 28(4): 657-661.

Response of Fluorescence Parameters and Photosynthetic Traits of Rice to Different Nitrogen Application under Sufficient Irrigation

LIU Qifeng, XU Shuqin*

(School of Water Conservancy and Civil Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

Abstract: **【Objective】** Nitrogen and soil water combine to affect physiological development of plants, and the purpose of this paper is to experimentally investigate the response of fluorescence parameters and photosynthetic traits to different nitrogen applications when soil moisture is not a limiting factor. **【Method】** Pot experiments were conducted at the experimental station of Northeast Agricultural University with japonica rice as the model plant. We examined six nitrogen levels: 0, 60, 90, 120, 150 and 180 kg/hm² (referred to as W0, W60, W90, W120, W150 and W180 respectively thereafter). At each growth stage, we measured the main fluorescence parameters and the photosynthetic traits using the LI-6400XT photosynthetic apparatus. **【Result】** The initial fluorescence F_o , the maximum fluorescence F_m and the variable fluorescence F_v increased with the applied nitrogen. The photo-energy conversion efficiency of PSII reaction center F_v/F_m , latent active F_v/F_o , photochemical quenching coefficient q_p and non-photochemical quenching coefficient q_N all increased with the applied nitrogen first, and then decreased after reaching a peak. Compared with W60 and W90, W120, W150 and W180 differed more significantly from W0. With nitrogen application increasing, the net photosynthetic efficiency and the stomatal conductance both increased, while the inter-cellular CO₂ molar concentration decreased. When nitrogen application reached 150 kg/hm², the photosynthetic rate decreased while the intercellular CO₂ molar concentration increased. The net photosynthetic efficiency, stomatal conductance, intercellular CO₂ molar concentration and transpiration efficiency in W150 differed considerably from those in other treatments, suggesting that increasing nitrogen application either enhanced or impeded the central electron transport in PSII reaction, the initial photosynthetic rate and the thermal dissipation capacity. The PSII reaction was most active in W150, and regressing the light response to the nitrogen application indicated a positive correlation. When the light strength exceeded 400 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, the increase in the light response with the nitrogen during the jointing and heading stages was more significant than during the tillering stage. In W120, W150 and W180, the maximum net photosynthetic efficiency $P_{n \max}$ was ranked in W150>W180>W120, while the LSP , the light compensation point, and the light saturation point LCP went the opposite direction. The apparent quantum efficiency α , curve bend angle β and the dark respiration rate difference R_d did not show noticeable changes in all treatments. **【Conclusion】** When soil water is sufficient, increasing nitrogen fertilizer enhanced light absorption by leaves and promoted the light response. For our experiments, the optimal fertilizer application was 150 kg/hm².

Key words: sufficient irrigation; rice; nitrogen fertilizer; fluorescence parameters; photosynthetic characteristics

责任编辑:陆红飞