

不同水氮条件对东北寒地黑土直播稻光响应特征的影响

贡宁晗¹, 张忠学^{1,2}, 李美娟³, 李铁男³

(1. 东北农业大学水利与土木工程学院, 哈尔滨 150030; 2. 农业部农业水资源高效利用重点实验室, 哈尔滨 150030; 3. 黑龙江省水利科学研究院, 哈尔滨 150080)

摘要: 为了揭示寒地黑土直播稻在不同灌水方式和施氮水平下功能叶片光响应特征, 以测坑试验水直播水稻为研究对象, 采用全面试验方法, 设灌水方式和施氮量 2 个因素, 针对水稻分蘖期和抽穗开花期开展了不同水肥条件下直播水稻叶片光响应特征的研究。结果表明: 随氮肥施用量的增加, 直播稻功能叶片的光响应曲线上升, 光强高于 $600 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 时, 不同施氮量处理的光响应曲线间距变大。运用非直角双曲线模型建立水稻叶片光合光响应曲线的拟合, 得出不同水氮处理下直播水稻叶片的光响应特征参数, 结果显示, 随着施氮量的增加, 最大净光合速率 P_{max} 、表观量子效率 α 和光饱和点 LSP 上升, 光补偿点 LCP 下降; 而同施氮量条件下, 控制灌溉处理的 P_{max} 、 α 和 LSP 高于淹灌处理, LCP 低于淹灌处理。因此, 在 $0 \sim 135 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 的范围内增加施氮量和控制灌溉有助于提升直播稻功能叶片光合作用能力, 提高其对光能的利用率和对强光及弱光的适应能力, 有效改善叶片光响应特征, 提高水稻产量, 所以在进行直播水稻栽培研究时, 要充分考虑不同水肥条件对其光响应特征的影响。

关键词: 直播稻; 水稻; 控制灌溉; 氮肥; 光响应

中图分类号: S311; S511

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2018)03-0315-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2018.03.047

Effects of Different Water and Nitrogen Conditions on Characteristics of Light Response Curve of Direct-seeding Rice in Cold and Black Soil Region of Northeast China

YUN Ninghan¹, ZHANG Zhongxue^{1,2}, LI Meijuan³, LI Tienan³

(1. College of Water and Civil Engineering, Northeast Agriculture University, Harbin 150030; 2. Key Laboratory of Water-saving Agriculture of Heilongjiang Province, Harbin 150030; 3. Heilongjiang Water Conservancy Science Research Institute, Harbin 150080)

Abstract: In order to reveal the influence of irrigation methods and nitrogen fertilizer on characteristics of functional leaf's photosynthetic light response of direct-seeding rice in cold and black soil region, the test-pit experiments was carried out Two factors were set, including irrigation methods and nitrogen fertilizers. The characteristics of photosynthetic light curve of rice leaf with different water and nitrogen regulations in the tillering stage and the heading-and-flowering stage was studied by using comprehensive test design. The result showed that when nitrogen rate increased, photosynthetic light response curves of direct-seeding leaf rised, especially when the photosynthetic photon flux density was higher than $600 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$. Parameters derived from non-rectangular hyperbola model indicated P_{max} (maximum photosynthesis rate), α (apparent quantum yield) and LSP (light saturation points) increased with the increase of the nitrogen rate, while LCP (light compensation points) reduced. P_{max} , α and LSP of controlled irrigation treatments were higher than those of flood irrigation treatments at the same nitrogen rate, while LCP was lower. In conclusion, higher nitrogen inputs, within the range of $0 \sim 135 \text{ kg}/\text{hm}^2$, and controlled irrigation method lead to the increase of photosynthetic capacity, enhancing the light use efficiency and the adaptability to both strong and weak light of rice leaf. These findings were helpful for improvement of photosynthetic light response curve and rice yield. It should be taken into full consideration for the effects different nitrogen levels and irrigation ways on leaf's photosynthetic light response curve in paddy of direct-seeding rice.

收稿日期: 2017-12-15

资助项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0400108); 黑龙江省应用技术与开发计划重大项目(GA15B101)

第一作者: 贡宁晗(1993—), 女, 在读硕士研究生, 主要从事农业节水理论研究。E-mail: ygpcslww@163.com

通信作者: 张忠学(1967—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事水土保持技术、生态农业研究。E-mail: zhangzhongxue@163.com

Keywords: direct-seeding rice; rice; controlled irrigation; nitrogen fertilizer; photosynthetic light response curve

在我国当前水资源极度短缺的大背景下,农业节水成为当前我国一个重要课题。目前,我国稻作水分管理主要采用淹灌的灌水方式,容易造成灌水不均、大量水分无效渗漏和蒸发、灌溉水利用系数低等问题,进而导致农业水资源严重浪费,加剧水资源短缺,很不适应现在农业精准灌溉的要求,而控制灌溉作为水稻的高效节水技术,节水增产效果显著,已经得到了大面积的推广应用^[1-5]。控制灌溉实际上是适度降低土壤水分而改变作物生理,提高作物抗旱能力,从而在高产基础上实现水资源的高效利用^[6-10]。氮肥是水稻生理生长的重要限制因子,它对水稻生产的影响仅次于水分^[11],氮肥施用量的变化对水稻生长发育有着重要影响^[12]。因此,不同水氮条件下水稻生理变化规律十分值得研究。光合作用是作物生长发育的基础和生产力高低的决定性因素^[13],是作物进行干物质积累的重要生理过程。光是光合作用的主导因子,不同生育阶段、不同生长条件下作物的光响应机制也有所差异^[14-18]。研究水稻叶片的光响应特征,对于研究水稻光合产物积累的运转机理和水稻产量的形成具有重要意义。

黑龙江省属于典型的寒地黑土稻作区,移栽是目前水稻种植的主要方式,但由于育秧移栽投入成本大、费工费时、不便于进行水稻大面积机械化生产等问题,移栽稻的可持续发展问题面临严峻考验^[19]。当前水稻直播技术日臻成熟,已在全国多个省市推广应用,取得了显著的增产提效成果^[20],但在黑龙江省范围内还未得到大范围推广,直播稻的光合特性和光响应特征对不同水氮条件的响应也鲜有研究。基于此,本文以寒地黑土区直播水稻为研究对象,进行不同灌水方式和施氮水平调控试验,以研究寒地黑土区直播水稻功能叶片的光合光响应特征,为进行更高效合理的直播稻的水肥管理提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验于 2017 年 5—10 月在黑龙江省庆安国家灌

溉试验重点站进行,该站(东经 127°30′04″,北纬 46°52′41″)地处于绥化市庆安县和平灌区,是典型的寒地黑土分布区。该地临界于第 2 积温带和第 3 积温带之间,多年平均气温为 2.5℃,年降水量 550 mm,作物水热生长期为 164 d,无霜期 128 d^[3]。气候特征属寒温带大陆性季风气候。土壤类型为白浆土型水稻土,容重 1.01 g/cm³,孔隙度 61.8%。土壤基本理化性质为:有机质含量 41.8 g/kg,pH 6.40,全氮 15.06 g/kg,全磷 15.23 g/kg,全钾 20.11 g/kg,碱解氮 154.36 mg/kg,有效磷 25.33 mg/kg 和速效钾 157.25 mg/kg。

1.2 试验材料与设计

试验水稻品种为龙庆稻 3 号。供试氮肥为尿素(含 N 46%)。试验于测坑进行,配全自动遮雨棚。小区面积 4 m²,四周种植同种水稻作为保护行。水泥测坑无侧向渗透和垂直渗漏。试验采用水直播栽培方式,水稻品种、播种、植保及用药等技术措施以及田间管理条件相同。种植密度为 175 株/m²,每穴播种 8~10 粒,定苗 5 株。

试验选定灌水方式和氮肥 2 个因素,设淹灌(F)、控制灌溉(C)2 个灌水方式和 0,85,110,135 kg/hm² 4 个施氮水平。采用全面试验,共设 F0、F60、F110、F135 和 C0、C60、C110、C135 共 8 个处理,每个处理重复 3 次。

水稻不同灌水方式的土壤水分调节标准如表 1 所示,苗期按照水直播水稻要求进行统一的田间管理。氮肥按照基肥:分蘖肥:促花肥:保花肥比例为 4.5:2:1.5:2 分施;磷肥作为基肥一次性施入;钾肥按照基肥:幼穗分化期肥比例为 1:1 分 2 次施入。5 月 6 日施基肥,5 月 10 日泡田,5 月 12 日播种,5 月 22 日出苗,6 月 20 日施分蘖肥,7 月 28 日施促花肥,8 月 6 日施保花肥,9 月 23 日收获。水稻生育期 125 d,分为苗期(5 月 22 日至 6 月 12 日)、分蘖期(6 月 13 日至 7 月 16 日)、拔节孕穗期(7 月 17 日至 8 月 1 日)、抽穗开花期(8 月 2—11 日)、乳熟期(8 月 12—31 日)、黄熟期(9 月 1—22 日)。

表 1 不同灌水方式下的稻田田间水分管理

处理	分蘖 初期	分蘖 盛期	分蘖 末期	拔节 孕穗期	抽穗 开花期	乳熟期	黄熟期
控制灌溉	85~100	85~100	晒田	85~100	85~100	75~100	落干
淹灌	10~50	10~30	晒田	10~50	10~50	10~30	落干

注:表中控制灌溉灌水量为田间土壤含水率占土壤饱和含水率的值(%);淹灌灌水量为灌水深度(mm)。

1.3 观测方法

分别于水稻分蘖期和抽穗开花期,选择晴朗无风天气,于 9:00—11:30 利用 LI-6400XT 型光合测定

仪测定直播水稻叶片的光响应特征,以此绘制光响应特征曲线。测定时,控制光合有效辐射通量密度(PPFD)分别在 0,20,50,75,100,200,400,600,800,

1 000,1 200,1 500,1 800,2 000 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,每个光强梯度下测定时间为 120~180 s,采用仪器内置功能控制 CO_2 浓度、叶温等环境条件恒定不变。每次测定时,夹住水稻倒数第 2 功能叶片距离叶尖 1/3 处进行测定。

1.4 数据处理方法

利用 Excel、Matlab 2014a、SPSS 18.0 等软件进行数据处理和统计分析。

1.5 光响应曲线模型

描述光响应曲线的数学方程有很多,本文选用非直角双曲线模型(即 Farquhar 模型)^[21]对不同水氮调控下直播水稻叶片的光响应特征进行数学模拟,得到不同灌水方式和施氮条件下直播水稻分蘖期和抽穗开花期叶片的光响应特征参数,包括最大净光合速率 P_{max} 、暗呼吸速率 R_d 、表观量子效率 α 和光响应曲线凸度 θ 等。对曲线 0~200 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 进行线性回归,得到的直线与净光合速率为零(x 轴)和净光合速率为最大净光合速率值两条水平线的交点分别为光补偿点 LCP 和光饱和点 LSP。非直角双曲线模型表达式为:

$$P_n = \frac{\alpha I + P_{\text{max}} - \sqrt{(\alpha I + P_{\text{max}})^2 - 4\theta\alpha I P_{\text{max}}}}{2\theta} - R_d$$

(1)

式中: P_n 为叶片净光合速率($\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$); α 为表观量子效率(AQY, $\mu\text{mol}/\mu\text{mol}$); P_{max} 为叶片达到光饱和时的表观最大净光合速率($\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$); θ 为非直角双曲线的凸度,无量纲; R_d 为暗呼吸速率

($\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$); I 为入射到叶片上的光合有效光子通量密度($\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$)。

光响应曲线模型中的参数是描述植物光合作用特征的重要生理生态特征参数。 α 反映了植物光合作用对光的利用效率,即每片叶子每吸收 1 mol 量子所固定的摩尔数; P_{max} 是叶片光合能力的度量,反映了叶片的光合潜力; LCP 是植物进行光合作用所需的最低光照强度,反映了植物对弱光的利效率; LSP 表示了植物光合作用达到最大时的光照强度,反映了植物对强光的利用效率, R_d 为暗呼吸速率,一定程度反映了植物的生理活动活跃程度^[22]。

2 结果与分析

2.1 不同水氮条件下直播稻叶片的光响应特征

由图 1、图 2 可知,光强 PPFD 由 0 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 增加到 200 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 时,各时期各处理的净光合速率呈线性增加趋势,之后曲线斜率随光强增加而不断下降,直到光强在 600 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 后光响应曲线呈水平状,即光合速率达到光饱和和同化速率的光饱和阶段。随着施氮水平提高,直播水稻功能叶片的净光合速率增加,且在光强高于 400 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 时各氮处理光响应曲线的间距增大,表明在 0~135 kg/hm^2 内提高施氮水平可以提升水稻功能叶片对强光的转化利用能力,有效改善其光合光响应特征。不同灌水方式间做对照,2 个时期的淹灌处理水稻净光合速率均略低于控制灌溉净光合速率。相同光强下,同施氮量不同灌水方式的处理间控制灌溉的净光合速率大多高于淹灌,淹灌处理受氮肥亏缺的影响大于控制灌溉处理。

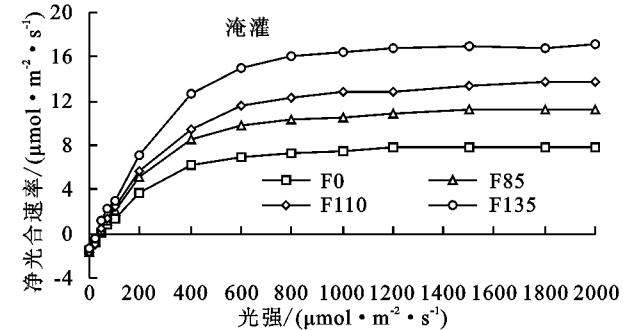


图 1 分蘖期不同水氮条件下直播稻叶片的光响应曲线

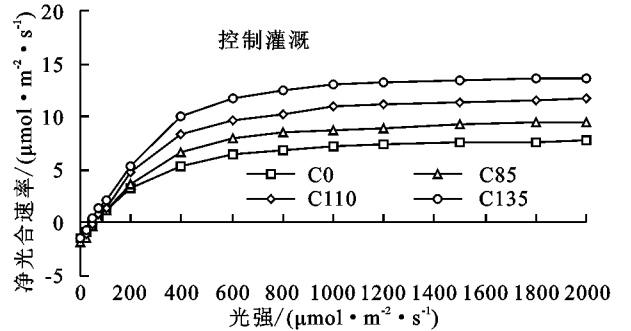
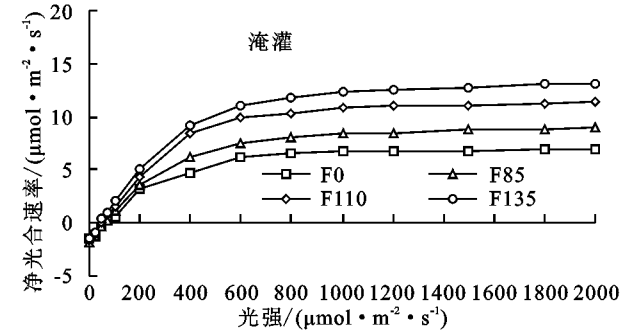
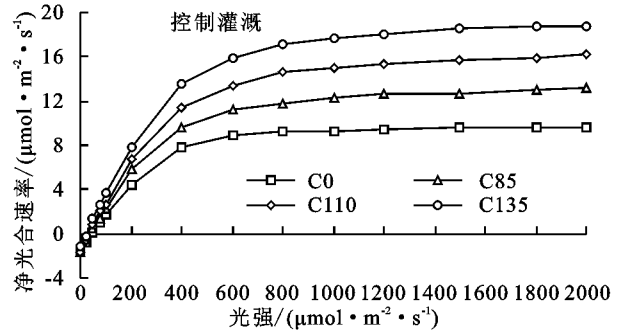


图 2 抽穗开花期不同水氮条件下直播稻叶片的光响应曲线

2.2 不同水氮处理光响应曲线特征参数变化规律

应用公式(1)中的非直角双曲线模型建立直播水稻功能叶片光响应曲线的数学拟合,得到的大部分拟合决定系数 R^2 都在 0.9 以上,最低为 0.879,在 0.850 以上;模型拟合结果的均方根误差 RMSE 除个别较大外(0.52~0.61 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$),都小于 0.5 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot$

s);所有拟合结果均显著($p<0.05$)。表明非直角双曲线模型能够很好地表述不同水氮条件下分蘖期和抽穗开花期直播稻功能叶片的光响应特征。模型拟合出的光响应特征参数见表 2,所有参数均具有明确的物理意义,比较不同处理的模型拟合的光响应特征参数能够全面准确地揭示直播水稻叶片的光合光响应特性。

表 2 不同水氮处理直播稻叶片光响应曲线特征参数

生育期	灌水 方式	施氮水平/ ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	$P_{\text{max}}/$ ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	$\alpha/$ ($\mu\text{mol} \cdot \mu\text{mol}^{-1}$)	$R_d/$ ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	LSP/ ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	LCP/ ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	θ	R^2	RMSE/ ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)
分蘖期	淹灌	0	8.83	0.025	1.571	448.70	66.53	0.845	0.879	0.52
		85	11.12	0.030	1.795	473.89	64.99	0.812	0.915	0.29
		110	13.36	0.034	1.724	491.03	52.97	0.891	0.916	0.30
		135	15.43	0.040	1.649	506.15	42.67	0.792	0.930	0.26
	控制灌溉	0	9.51	0.027	1.395	454.74	56.84	0.775	0.906	0.24
		85	11.86	0.033	1.927	485.37	63.48	0.796	0.924	0.27
		110	14.01	0.037	1.778	497.47	51.26	0.800	0.900	0.36
		135	15.88	0.042	1.632	511.96	37.81	0.834	0.911	0.45
抽穗开花期	淹灌	0	12.06	0.039	1.809	424.62	50.18	0.815	0.980	0.23
		85	16.72	0.050	2.340	443.88	42.94	0.808	0.937	0.31
		110	20.41	0.056	2.147	481.49	40.67	0.745	0.963	0.40
		135	24.08	0.062	1.843	488.38	27.16	0.860	0.930	0.61
	控制灌溉	0	14.29	0.043	1.924	427.37	46.33	0.892	0.959	0.28
		85	19.26	0.056	2.189	457.14	41.10	0.786	0.912	0.36
		110	23.18	0.062	2.005	485.32	32.68	0.772	0.974	0.49
		135	26.39	0.068	1.651	496.24	21.54	0.796	0.978	0.43

对 2 个生育期的光响应曲线参数进行纵向对比,发现抽穗开花期的最大净光合速率 P_{max} 、表观量子效率 α 分别较分蘖期上升 33.6%~66.2%,56.0%~61.9%,而光饱和点 LSP 和光补偿点 LCP 分别下降 1.9%~6.3%和 18.5%~43.0%,可知直播水稻抽穗开花期时叶片的光合潜力得到大幅提升,光能转化率显著升高,但对强光的利用能力降低而对弱光的利用能力提高。这表明直播水稻各生育期的光合光响应特性与其本身生育阶段密切相关,会随着水稻本身的长势盛衰而起伏。

比较不同处理光响应曲线的参数可以得知,直播水稻在分蘖期和抽穗开花期功能叶片的最大净光合速率 P_{max} 、表观量子效率 α 、光饱和点 LSP 均随着施氮量的增加而上升,光补偿点 LCP 除分蘖期 C0 处理外,基本随着施氮量的增加而降低,而暗呼吸速率 R_d 和光响应曲线凸度 θ 与施氮量没有明显的对应关系。灌水方式处理间对比表明,相同施氮量条件下, P_{max} 、 α 、LSP 均为控制灌溉处理大于淹灌, LCP 值也基本为控制灌溉小于淹灌,不同灌水方式间 R_d 和 θ 无显著差别。综合分析表明,高施氮量和控制灌溉有助于改善直播水稻分蘖期和抽穗开花期的光合特性,提高叶片对光能的利用率,增强该时期水稻对强光

和弱光的利用能力。一定范围内较高的施氮量有利于改善水稻对水分亏缺的适应,而控制灌溉有利于改善氮肥亏缺时的光响应特性,因此在进行直播水稻水肥调控时,要充分考虑不同水肥调控对水稻光响应特征的影响。

进一步进行分析,可以得出与 F0 相比,分蘖期和抽穗开花期 F85、F110、F135 处理的 P_{max} 分别提高 26.0%,51.3%,74.8%和 38.7%,69.3%,99.7%; α 分别提高 20%,36%,60%和 28.2%,43.6%,59.0%; LSP 分别提高 5.6%,9.4%,12.8%和 4.5%,13.4%,15.0%;而 LCP 分别下降 2.3%,20.4%,35.9%和 14.4%,19.0%,45.9%。与 C0 相比,分蘖期和抽穗开花期 C85、C110、C135 处理的 P_{max} 分别提高 24.7%,47.3%,67.0%和 34.8%,62.2%,84.7%; α 分别提高 22.2%,37.0%,55.6%和 30.2%,44.2%,58.1%; LSP 分别提高 6.7%,9.4%,12.6%和 7.0%,13.6%,16.1%;而 LCP 分别下降 11.7%(分蘖期 C0 处理 LCP 较低),9.8%,33.5%和 11.3%,29.5%,53.5%。对比可知,淹灌条件下,增施氮肥时光合光响应参数变化的幅度明显大于控制灌溉,说明淹灌处理有助于在直播稻分蘖期和抽穗开花期获得更高的光合速率反弹。且抽穗开花期光响应参数随施氮量的变化幅度又显著大于分

蘗期,可能与抽穗开花期保花肥和促花肥所占施肥比例较大,氮肥施用量对该时期水稻生理生态变化影响较分蘗期更大所致。

相同供氮水平处理下,分蘗期控制灌溉 $P_{\max}$ 和 α 较淹灌对应处理分别升高 7.7%,6.6%,4.9%,2.9% 和 8.0%,10.0%,8.8%,5.0%,而抽穗开花期 $P_{\max}$ 和 α 较淹灌对应处理分别升高 18.5%,18.2%,13.5%,9.6%和 10.3%,12.0%,10.7%,9.7%。LSP 控制灌溉均高于淹灌而 LCP 均低于淹灌,但两者升降幅度差异不大。可见抽穗开花期时,控制灌溉的 $P_{\max}$ 和 α 与淹灌相比上涨的幅度大于分蘗期的上涨幅度,这与抽穗开花期是水稻的关键需水期,该时期水稻对水分变化较敏感而分蘗期较不敏感所致。氮肥量升高时控制灌溉与淹灌的差异缩小,表明高施氮量可以减小水分差异对光合光响应带来的负面影响,改善淹灌时的光响应特征。

表 3 不同水氮处理直播稻叶片光响应特征参数与产量相关系数

生育期	$P_{\max}$	α	R_d	LSP	LCP	θ
分蘗期	0.963**	0.954**	0.443	0.973**	-0.772*	0.104
抽穗开花期	0.970**	0.969**	-0.171	0.984**	-0.882**	-0.454

注: * 表示在 0.05 水平上差异显著; ** 表示在 0.01 水平上差异显著。

3 讨论

直播水稻在分蘗期和抽穗开花期时功能叶片的净光合速率 $P_{\max}$ 、表观量子效率 α 和光饱和点 LSP 均为高氮大于低氮,控制灌溉大于淹灌,而光补偿点 LCP 为低氮大于高氮,淹灌大于控制灌溉,与刘宇峰等^[23]的研究结论相同,与陈劲丰等^[24]的研究中采用间歇灌溉的节水灌溉方式比淹灌净光合速率、 $P_{\max}$ 、LSP 增大,且随施氮量增加,灌溉方式导致的差异减弱的结论基本一致。这说明施氮量的增加提高了水稻叶片内叶绿素的相对含量,促进了叶片与环境的气体交换,而控制灌溉条件下,水稻将水分更多地运用于光合物质积累等更重要的生理活动,减少水分的蒸腾损耗,从而共同促进了水稻叶片光合光响应特性的改善。

徐俊增等^[13]研究指出,非充分灌溉会导致水稻叶片对强光的适应能力降低,光响应曲线下降;张忠学等^[25]的研究指出控制灌溉相较淹灌而言光饱和点后延而光补偿点前移,有利于对弱光的适应而不利于强光,与本研究中控制灌溉有助于提升水稻叶片对弱光和强光的转化利用率大有不同,这可能与直播水稻与插秧移栽水稻对土壤水分的需求不完全相同有关。且本研究中的控制灌溉水分管理虽然在一定范围内降低了田间土壤含水量,但并没有造成严重的水分亏缺,损害水稻器官,影响作物生理,说明本研究中控制灌溉形成的水分胁迫处在较适宜的范围内,不仅不会

2.3 光响应曲线模型参数与产量相关性分析

为了研究直播水稻分蘗期和抽穗开花期的光响应特性对产量的影响,将各时期不同水氮条件下直播水稻的光响应模型参数与水稻产量进行相关性分析(表 3)。由 Pearson 相关性分析结果可知,在直播水稻的分蘗期和抽穗开花期,水稻最大净光合速率 $P_{\max}$ 、表观量子效率 α 、光饱和点 LSP 分别与水稻产量呈 0.01 水平上的极显著正相关,且抽穗开花期相关系数均略高于分蘗期。光补偿点 LCP 与产量在分蘗期呈 0.05 水平上的显著负相关,在抽穗开花期呈 0.01 水平上的极显著负相关。暗呼吸速率 R_d 和光响应曲线凸度 θ 在 2 个生育期均与水稻产量无显著的相关性。相关性分析结果表明,直播水稻分蘗期和抽穗开花期光响应模型特征参数变化对水稻产量影响显著,通过对这两个时期叶片光响应特征参数的分析,可以对水稻产量进行初步预测。

对直播水稻光合特性造成负面作用,反而能提高水稻对土壤水分的利用率,在达到节水目的的同时,促进叶片光合作用,有利于光合产物的积累。

通过光响应模型参数与产量的相关性分析可知,直播水稻分蘗期和抽穗开花期的光响应特性与其产量有明显的相关关系,即分蘗期和抽穗开花期光合光响应特征表现越好,产量则相应越高。可见施氮水平的提高和控制灌溉有助于直播稻通过叶片光合作用积累有机物质,从而提高水稻产量。

此外,本研究的供氮水平为 0~135 kg/hm²,而张忠学等^[25]研究中施氮量为 0~160 kg/hm²,徐俊增等^[13]研究中施氮量为 200~300 kg/hm²,陈劲丰等^[24]研究中施氮量为 135~225 kg/hm²,施氮水平均大于本研究中施氮水平,与试验区为黑土区、土壤中营养成分含量较多有关,但也表明本试验中施氮量水平可以增设几个高氮水平,以便更加全面地了解施氮量对直播水稻光响应特征影响的变化趋势。同时,研究缺乏同样条件下移栽水稻的对照处理,无法对直播水稻和移栽水稻光响应特征的差异进行对比分析,今后研究中应当予以改善。

4 结论

(1)随着施氮水平的增加,水稻功能叶片净光合速率增大,光响应曲线上升,且在光强高于 400 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 时,不同施氮水平间的光响应曲线的间

距变大。控制灌溉处理的净光合速率高于淹灌处理,但随着施氮量增加,由于灌水方式引起的差异逐渐弱化。控制灌溉处理受氮肥亏缺的影响低于淹灌处理。

(2)直播水稻在分蘖期和抽穗开花期功能叶片的 $P_{\max}$ 、 α 、LSP 均随施氮量的增加而上升,LCP 基本随施氮量的增加而降低。同施氮量条件下,控制灌溉的 $P_{\max}$ 、 α 、LSP 均大于淹灌,LCP 值基本为控制灌溉小于淹灌。 $0\sim 135\text{ kg/hm}^2$ 内增加施氮量和控制灌溉有利于提升直播水稻分蘖期和抽穗开花期的光合光响应水平,增强水稻叶片对弱光和强光的转化利用能力,更有利于水稻进行光合作用。

(3)淹灌处理有助于在直播稻分蘖期和抽穗开花期获得更高的光合反弹。抽穗开花期时,光响应参数随施氮量的变化幅度显著大于分蘖期,控制灌溉的 $P_{\max}$ 和 α 与淹灌相比上涨的幅度明显大于分蘖期。

(4)直播水稻分蘖期和抽穗开花期水稻叶片的 $P_{\max}$ 、 α 、LSP、LCP 与产量相关系数分别为 0.963 和 0.970,0.954 和 0.969,0.973 和 0.984,-0.772 和 -0.882,该时期叶片的光响应特征参数与产量间具有明显的相关关系。

因此,不同的灌水方式和施氮水平对水稻不同时期的光响应特征的影响具有差异性,且会对水稻产量产生一定影响。在进行水稻节水灌溉和施肥管理时,应综合考虑不同水氮水平的影响,合理安排灌溉施肥措施。

参考文献:

- [1] 彭世彰,蔡敏,孔伟丽,等.不同生育阶段水分亏缺对水稻干物质与产量的影响[J].水资源与水工程学报,2012,23(1):10-13.
- [2] 葛岩,窦超银,魏丹,等.拔节孕穗和抽穗开花期控制灌溉对水稻生长的影响[J].灌溉排水学报,2012,31(3):78-82.
- [3] 王孟雪,张忠学.适宜节水灌溉模式抑制寒地稻田 N_2O 排放增加水稻产量[J].农业工程学报,2015,31(15):72-79.
- [4] 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.
- [5] 周明耀,赵瑞龙,顾玉芬,等.水肥耦合对水稻地上部分生长与生理性状的影响[J].农业工程学报,2006,22(8):38-43.
- [6] 康绍忠,胡笑涛,蔡焕杰,等.现代农业与生态节水的理论创新及研究重点[J].水利学报,2004,35(12):1-7.
- [7] Ierna A, Mauromicale G. Physiological and growth response to moderate water deficit of off-season potatoes in a mediterranean environment [J]. Agricultural Water Management, 2006, 82(1): 193-209.
- [8] 郝树荣,郭相平,张展羽.水分胁迫及复水对水稻冠层结构

的补偿效应[J].农业机械学报,2010,41(3):52-55,61.

- [9] 上官周平,邵明安.改善旱区作物水分利用的生理调控机制[J].水利学报,1999,30(10):33-37.
- [10] 郝树荣,郭相平,张展羽,等.水稻根冠功能对水分胁迫及复水的补偿响应[J].农业机械学报,2010,41(5):52-55.
- [11] 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.
- [12] 徐优,王学华.水肥耦合及其对水稻生长与 N 素利用效率的影响研究进展[J].中国农学通报,2014,30(24):17-22.
- [13] 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.
- [14] 李力,张祥星,郑睿,等.夏玉米光合特性及光响应曲线拟合[J].植物生态学报,2016,40(12):1310-1318.
- [15] 方保停,邵运辉,岳俊芹,等.冬小麦灌浆后期光响应曲线特征参数及其对施氮量响应[J].西北农业学报,2011,20(3):52-56.
- [16] 陆红飞,郭相平,甄博,等.旱涝交替胁迫条件下梗稻叶片光合特性[J].农业工程学报,2016,32(8):105-112.
- [17] Zhang H H, Zhong H X, Wang J F, et al. Adaptive changes in chlorophyll content and photosynthetic features to low light in physocarpus amurensis maxim and physocarpus opulifolius "diabolo" [J]. PeerJ, 2016, 4(3): e2125.
- [18] Jiao X R, Kørup K, Andersen M N, et al. Low-temperature leaf photosynthesis of a miscanthus germplasm collection correlates positively to shoot growth rate and specific leaf area [J]. Annals of Botany, 2016, 117(7): 1229-1239.
- [19] 李志民.寒地水稻折衷直播栽培技术体系研究[J].黑龙江农业科学,2011(1):28-31.
- [20] 张洪程,龚金龙.中国水稻种植机械化高产农艺研究现状及发展探讨[J].中国农业科学,2014,47(7):1273-1289.
- [21] Farquhar G D, Caemmerer S, Berry J A. A biochemical model of photosynthetic CO_2 assimilation in leaves of C3 species [J]. Planta, 1980, 149(1): 78-90.
- [22] 于贵瑞,王秋凤.植物光合、蒸腾与水分利用的生理生态学[M].北京:科学出版社,2010.
- [23] 刘宇锋,李伏生.灌溉方式与施肥水平对超级稻光合生理的影响[J].中国生态农业学报,2013,21(4):416-425.
- [24] 陈劲丰,时元智,崔远来,等.不同水肥模式下水稻光合光响应特性研究[J].中国农村水利水电,2015(7):16-20.
- [25] 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.