

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.11.032

不同灌溉模式对水稻生长、水分和辐射利用效率的影响

孟翔燕¹ 周凌云² 张忠学^{3,4} 吴秋峰¹

(1. 东北农业大学理学院, 哈尔滨 150030; 2. 东北农业大学工程学院, 哈尔滨 150030;
3. 东北农业大学水利与土木工程学院, 哈尔滨 150030;
4. 东北农业大学农业农村部农业水资源高效利用重点实验室, 哈尔滨 150030)

摘要: 为研究不同灌溉模式对寒地黑土水稻农艺性状、光合特性、水分利用效率以及辐射利用效率的影响, 设置了控制灌溉、浅湿灌溉和全面淹灌 3 种灌溉模式, 于 2017—2018 年在黑龙江省庆安灌溉试验站进行了试验。结果表明: 两个生长季内, 控制灌溉水稻各生育时期叶面积指数比全面淹灌分别增加了 7.94% ~ 23.67% 和 5% ~ 14.47%, 控制灌溉下地上部干物质量的积累量比全面淹灌增加了 12.13% 和 7.98%, 控制灌溉和浅湿灌溉的冠层光合有效辐射截获总量较全面淹灌分别增加了 74.05、23.65 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 和 63.35、16.85 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$; 除乳熟期外, 其余生育期控制灌溉叶片叶绿素含量 (SPAD) 显著高于浅湿灌溉与全面灌溉; 3 种灌溉模式下最大初始转换效率从分蘖期开始上升, 拔节期和抽穗期达到最大值, 在乳熟期开始下降, 非光化学荧光淬灭系数、光化学荧光淬灭系数前期略有波动, 在乳熟期迅速下降, 光合电子传递速率从分蘖期到乳熟期逐渐下降。两个生长季内, 控制灌溉下产量略高于全面淹灌, 但灌溉用水量较全面灌溉分别减少了 31.45% 和 31.67%, 水分利用效率比全面淹灌提高了 46.45% 和 46.20%, 辐射利用效率分别较全面淹灌增加了 1.042% 和 1.036%, 表明控制灌溉为黑龙江省半湿润区最佳灌溉模式。

关键词: 水稻; 灌溉模式; 农艺性状; 荧光; 水分利用效率; 辐射利用效率

中图分类号: S511; S274 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2019)11-0285-08

Effects of Different Irrigation Patterns on Growth, Water and Radiation Use Efficiency of Rice

MENG Xiangyan¹ ZHOU Lingyun² ZHANG Zhongxue^{3,4} WU Qiufeng¹

(1. School of Science, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China
2. College of Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China
3. School of Water Conservancy and Civil Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China
4. Key Laboratory of Effective Utilization of Agricultural Water Resources, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

Abstract: In order to explore the effects of different irrigation patterns on agronomic traits, photosynthetic traits, water use efficiency (WUE) and radiation use efficiency (RUE), the experiments included control irrigation, wet irrigation and flood irrigation, which were carried out in Qing'an Irrigation Experimental Center in the semi-humid area of Heilongjiang Province from May to September in 2017 and 2018. During the two growing seasons, the results showed that compared with flood irrigation, the LAI under control irrigation was increased by 7.94% ~ 23.67% (2017) and 5% ~ 14.47% (2018), respectively. Compared with flood irrigation, the cumulative of IPAR under control irrigation and wet irrigation was increased by 74.05 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 23.65 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ (2017) and 63.35 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 16.85 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ (2018), respectively. Meanwhile, compared with flood irrigation, the accumulation of dry matter under control irrigation was also increased by 12.13% (2017) and 7.98% (2018), respectively. During the rest of the milky stage, the SPAD value of the leaves under control irrigation was significantly higher than that under wet irrigation and flood irrigation. On the other hand, F_v/F_m under the three irrigation methods was increased from tillering stage, and decreased at milky stage after F_v/F_m reached the maximum value at jointing stage and heading stage. Values of q_N and q_P were

fluctuated slightly at early three stage, and then decreased rapidly at milky stage. ETR showed a trend of decreasing at the beginning of tillering stage. The yield under control irrigation was slightly higher than that under flood irrigation. However, the irrigation water consumption under control irrigation was decreased by 31.45% (2017) and 31.67% (2018), respectively, and compared with the flood irrigation, the WUE under control irrigation was increased by 46.45% (2017) and 46.20% (2018), respectively. Additionally, compared with the flood irrigation, the RUE under control irrigation was increased by 1.042% (2017) and 1.036% (2018), respectively. It showed that the control irrigation was the best irrigation methods in the semi-humid area of Heilongjiang Province.

Key words: rice; irrigation patterns; agronomic traits; fluorescence; water use efficiency; radiation use efficiency

0 引言

水稻是我国三大粮食作物之一,根据 2017 年统计资料,水稻播种面积占粮食总播种面积的 26.70%,而水稻产量占到了 2017 年粮食总产量的 33.60%^[1]。水稻作为高耗水作物,其耗水量是玉米和小麦等其他谷类作物的 2~3 倍^[2]。据统计,黑龙江省农业用水总量 70.46 亿 m³,水稻灌溉用水量达 50.98 亿 m³,占农业总用水量的 72.35%。可见水资源短缺对水稻的可持续性发展造成严重威胁^[3]。黑龙江省是我国重要的水稻生产地区和商品粮生产基地^[4],其中,东部属半湿润地区,以种植水稻为主,也是全省水稻最适宜种植区。因此,研究黑龙江省半湿润区水稻节水灌溉技术,对黑龙江省水稻产业可持续发展具有重要意义。

水分利用效率和辐射利用效率是进行风险评估的两个重要指标^[5]。水分利用效率或辐射利用效率的提升都对提升土地生产力至关重要^[6]。辐射利用效率定义为作物通过叶片将到达冠层的光合有效辐射截获、并通过光合作用转化为干物质的转化效率^[7]。水分利用效率反映了作物通过蒸发蒸腾每单位水消耗产生的谷物产量的能力^[8]。传统水稻种植多采用淹水灌溉,耗水量大、水分利用效率低^[9]。目前,传统淹水灌溉已逐渐向节水灌溉转变,水稻生长的适宜阶段经历适度的水分亏缺为优质高产奠定了基础^[10]。聂晓等^[11]的研究表明,间歇灌溉、湿润灌溉处理下的水分利用效率比淹水灌溉提高 28.6% 和 42.9%。AVILA 等^[12]在巴西的研究表明,间歇灌溉比连续灌溉有更好的节水效果,且不会降低产量。SONIT 等^[13]在印度的试验也表明,与淹灌相比,滴灌和喷灌有更好的水分利用效率。相比淹灌节水灌溉在辐射利用效率表现方面的研究较少,已有研究表明,水分胁迫会影响作物的叶片生长,改变作物叶面积指数的垂直分布,使作物在生长过程中的光合有效辐射截获量更少,进而影响光合同化物的分配^[7]。HUSSAIN 等^[14]在巴勒斯坦地区

的研究发现,干旱胁迫对小麦的辐射截获效率产生了负面影响。

本文以控制灌溉、浅湿灌溉和全面淹灌为处理模式,以黑龙江省半湿润区水稻为研究对象,分析黑龙江省半湿润区水稻不同灌溉模式对水分利用效率和辐射利用效率的影响,并对水稻各生育期的农艺性状、叶片叶绿素含量、叶绿素荧光和光合有效辐射截获量等指标的变化规律进行研究,以期为制定黑龙江省半湿润区粳稻的节水灌溉制度提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于 2017 和 2018 年 5—9 月在庆安灌溉试验站进行,该站地处黑龙江省绥化市庆安县和平灌区,位于东经 127°30'4",北纬 46°52'41"。多年平均降水量 550 mm,多年平均气温 2.5℃。本区作物生长期在 156~171 d,平均 164 d。气候特征为寒温带大陆性季风气候^[15]。土壤类型为白浆土型水稻土,容重为 1.02 g/cm³、孔隙度 61.6%、0~30 cm 体积饱和含水率为 53.25%。土壤基本理化性质为:有机质质量比 41.4 g/kg、pH 值 6.40、全钾质量比 20.11 g/kg、全磷质量比 15.23 g/kg、全氮质量比 1.08 g/kg、有效磷质量比 25.33 mg/kg、碱解氮质量比 154.36 mg/kg 和速效钾质量比 157.25 mg/kg。

1.2 试验设计

试验设计控制灌溉、浅湿灌溉和全面淹灌 3 种水分管理模式(表 1)。控制灌溉即在返青期田面保持 0~30 mm 薄水层和黄熟期自然落干以外,其他各生育阶段灌水后均不建立水层,以根层土壤含水率为控制指标,灌水上限为饱和含水率。用 TPIME-PICO64/32 型土壤水分测定仪每天(07:00 和 18:00 各测 1 次)测取土壤含水率,当土壤含水率低于或接近灌水下限时,人工灌水至灌水上限,维持土壤含水率处于相应生育阶段的灌水上限和灌水下限之间。在分蘖后期进行晒田不进行灌水,分蘖前期、中期、拔节孕穗期、抽穗开花期以及乳熟期土壤含水率

下限分别取饱和含水率的百分比。淹灌小区和浅湿灌溉小区在每天 08:00 前后通过预埋在田面的砖块和竖尺读取水层深度,确定是否需要灌水。

1.3 试验管理

本试验共 3 个试验处理,3 次重复,共计 9 个田间试验小区,每个小区面积为 100 m² (10 m × 10 m)。小区四周种植水稻以加设保护行。水稻品种、育秧、移栽、植保及用药等技术措施以及田间管理条件相同。为减少侧向渗透对试验的影响,小区与小区之间采用隔渗处理,即小区四周用塑料板 and 水泥埂作为隔渗材料,埋入田间地表以下 40 cm 深。

表 1 不同灌溉模式水稻各生育期土壤水分管理方案
Tab.1 Water management scheme of different irrigation management patterns in rice growth stage

处理	返青期	分蘖初期	分蘖中期	分蘖后期	拔节期	抽穗期	乳熟期	黄熟期
控制灌溉	0 ~ 30 mm	0 mm ~ 70% θ _s	0 mm ~ 70% θ _s	晒田	0 mm ~ 80% θ _s	0 mm ~ 80% θ _s	0 mm ~ 70% θ _s	落干
浅湿灌溉	0 ~ 30 mm	0 ~ 30 mm	0 ~ 30 mm	晒田	0 ~ 30 mm	0 ~ 30 mm	0 ~ 30 mm	落干
全面淹灌	0 ~ 30 mm	0 ~ 50 mm	0 ~ 50 mm	晒田	0 ~ 50 mm	0 ~ 50 mm	0 ~ 50 mm	落干

注:% 为占土壤饱和含水率百分比的单位;mm 为田间水层深度的单位;θ_s 为根层土壤饱和含水率。

1.4 测定项目和方法

1.4.1 株高和茎粗

标记移栽时每个小区中生长均匀的植株 10 穴,从分蘖期到抽穗期定点观测。每个生育期观测株高,抽穗前为植株根部至每穴最高叶尖的高度,抽穗后为根部至最高穗顶的高度。测定完株高后,使用游标卡尺测定基部第 2 节间茎粗。

1.4.2 叶面积指数

标记移栽时每个小区中生长均匀的植株 3 株,从分蘖期到乳熟期定点观测,每个生育期观测一次。测量每株植株上各叶片的叶长和叶宽(叶片最宽处的宽度)并记录。采用长宽系数法计算单个叶片面积并得到每株植株的叶片总面积,单株植株叶面积为 3 株植株的叶片总面积的平均。叶面积指数为单株叶面积与小区中总株数的乘积再除以小区面积。

1.4.3 地上部干物质量

从分蘖期至乳熟期,每个生育期取每个小区中生长均匀的植株 3 穴,将植株按茎鞘、叶、穗(抽穗期后)分别装袋,经干燥箱 105℃ 杀青 30 min,再经 80℃ 干燥到质量恒定,测定各部位的干物质量。

1.4.4 SPAD

标记移栽时每个小区中生长均匀的植株 5 株,从分蘖期到乳熟期,每个生育期观测一次。用 SPAD-502 型叶绿素含量测定仪对 5 株水稻的顶端剑叶测量 SPAD 并取平均值。

1.4.5 叶绿素荧光

标记移栽时每个小区中生长均匀的植株 6 株,从分蘖期到乳熟期,每个生育期观测一次。选择晴

供试的化肥分别为尿素、五氧化二磷、氧化钾。供试水稻品种为龙粳 18 号,种植密度为 30 cm × 10 cm,每穴 3 株。各处理氮肥即施氮用量(纯 N 量)110 kg/hm²,氮肥施用采用前氮后移施肥技术,基肥、蘖肥、促花肥、保花肥比例为 4.5:2:1.5:2;各处理施用五氧化二磷 45 kg/hm²,氧化钾 80 kg/hm²,钾肥分基肥和叶龄(幼穗分化期)两次施用,前后比例 1:1,磷肥作基肥一次施用。各小区单独灌排,进水管接装小型计量水表,排水管末端接径流收集桶。所有小区排水口高度保持一致,均高于稻田表面 8 cm。

朗无云的天气,在 08:00—10:00 采用 LI-6400XT 型光合测定仪对已标记植株的叶片叶绿素荧光参数进行测定。每次测定前用叶片夹夹住选定的叶片进行暗适应 30 min,不照光状态下测定最大初始转化效率 F_v/F_m ;在自然光照下测定光化学荧光淬灭系数 q_p 和非光化学荧光淬灭系数 q_N 。植株在充分光照 2 h 后,测量光下的光合电子传递速率(ETR)。

1.4.6 光合有效辐射截获量

光合有效辐射截获量为冠层上方累计入射光合有效辐射量与透过冠层到达地表的累计光合有效辐射量之差。从分蘖期到乳熟期每隔 10 d 测量一次,选择晴朗无云的天气,在 08:00—16:00 每隔 2 h 整点观测一次,在小区中间用冠层分析仪,分别测定冠层上方 20 cm 及地表的光合有效辐射量并记录,每个小区重复测量 3 次并取平均值。

1.4.7 水分利用效率

水分利用效率公式为

$$WUE = Y/I_{RR} \tag{1}$$

式中 WUE ——水分利用效率,kg/m³
 Y ——产量,kg/hm²
 I_{RR} ——灌溉用水量,m³/hm²

1.4.8 辐射利用效率

辐射利用效率公式为

$$RUE = D_M/I_{par} \tag{2}$$

式中 RUE ——辐射利用效率,g/MJ
 D_M ——地上部干物质累积量,g/m²
 I_{par} ——光合有效辐射截获总量,MJ/m²

应用 Excel 2010 对数据进行整理,对数据进行 Duncan 显著性分析。采用 Excel 软件作图。

2 结果与分析

2.1 不同灌溉模式对水稻农艺性状的影响

不同灌溉模式下水稻株高与茎粗变化如图 1 (图中不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$),下同)所示。图 1a、1b 分别为两个生长季内水稻株高的变化。3 种灌溉模式下的株高从分蘖期到抽穗期逐渐增大,并在抽穗期达到最大值。两个生长季内,各生育时期全面淹灌模式下的株高均高于控制灌

溉。两个生长季中全面淹灌、浅湿灌溉和控制灌溉的株高最大值分别为 101.2、102.8、96.8 cm (2017 年)和 102.3、100.7、97.9 cm (2018 年)。图 1c、1d 分别为两个生长季内水稻茎粗的变化。从分蘖期到抽穗期,茎粗的变化趋势与株高一致,并在抽穗期达到最大。两个生长季内,分蘖期和拔节期,控制灌溉下水稻茎粗显著大于全面淹灌和浅湿灌溉,而抽穗期 3 种灌溉模式下茎粗差异不明显。两个生长季中全面淹灌、浅湿灌溉和控制灌溉的茎粗最大值为 7.32、7.26、7.31 mm (2017 年)和 7.21、7.15、7.18 mm (2018 年)。

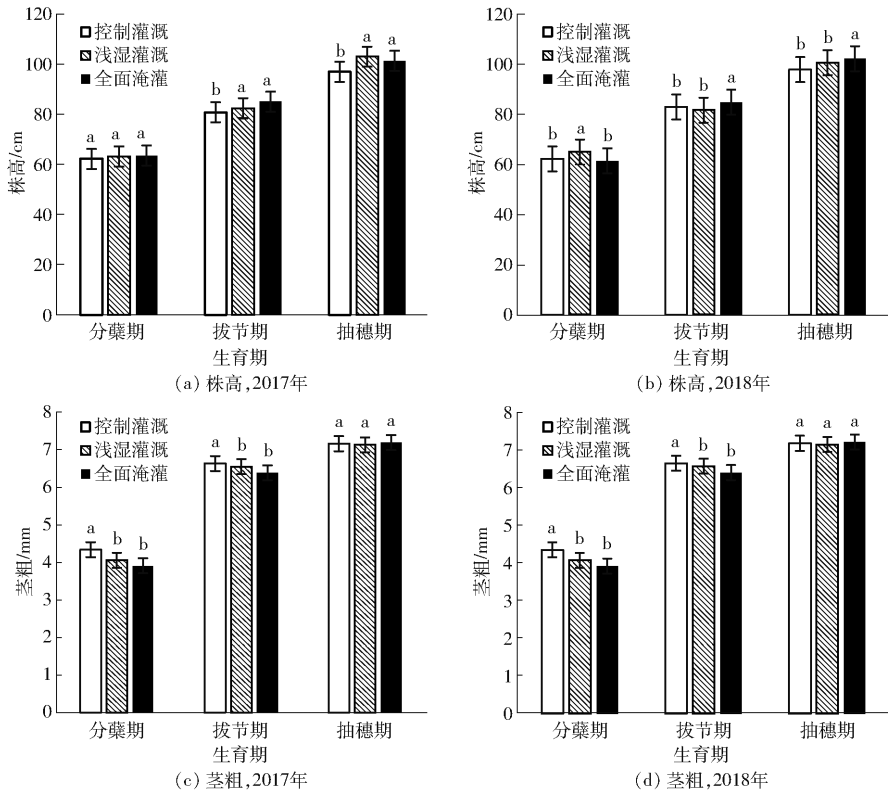


图 1 2017 年和 2018 年不同灌溉模式下水稻株高与茎粗

Fig. 1 Plant height and stem diameter under different irrigation patterns in 2017 and 2018

不同灌溉模式下水稻地上部干物质质量变化如表 2 所示。两个生长季内拔节期与抽穗期 3 种灌溉模式的地上部干物质质量差异显著,拔节期全面淹灌、浅湿灌溉和控制灌溉模式地下部干物质质量分别为 360.55、351.56、413.84 g/m² (2017 年)和 368.04、361.08、484.84 g/m² (2018 年)。抽穗期全面淹灌、

浅湿灌溉和控制灌溉模式地下部干物质质量分别为 398.46、400.46、455.38 g/m² (2017 年)和 402.40、408.96、467.08 g/m² (2018 年)。

不同灌溉模式下水稻叶面积指数的变化如图 2 所示。3 种灌溉模式下的水稻叶面积指数逐渐增大,抽穗期达到最大值后在乳熟期下降。不同灌溉

表 2 2017 年和 2018 年不同灌溉模式地下部干物质质量

Tab. 2 Above ground dry matter under different irrigation patterns in 2017 and 2018								
处理	分蘖期		拔节期		抽穗期		乳熟期	
	2017 年	2018 年	2017 年	2018 年	2017 年	2018 年	2017 年	2018 年
控制灌溉	227.27 ^a	234.96 ^a	413.84 ^a	484.84 ^a	455.38 ^a	467.08 ^a	230.59 ^a	235.49 ^a
浅湿灌溉	220.70 ^b	227.37 ^a	351.56 ^b	361.08 ^b	400.46 ^b	408.96 ^b	195.94 ^b	203.72 ^b
全面淹灌	218.56 ^b	241.67 ^a	360.55 ^b	368.04 ^b	398.46 ^b	402.40 ^b	184.35 ^b	180.20 ^b

注:同列不同字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$),下同。

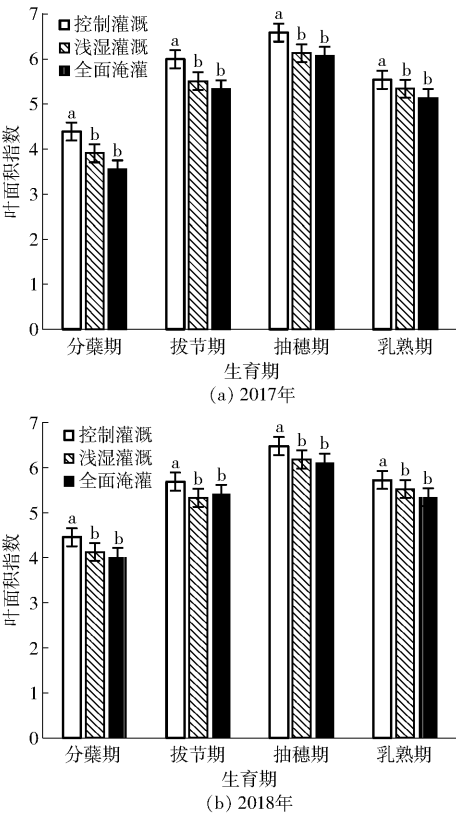


图 2 2017 年和 2018 年不同灌溉模式下叶面积指数
Fig.2 LAI under different irrigation patterns in 2017 and 2018

模式间对比表明,各生育期控制灌溉模式叶面积指数显著高于浅湿灌溉与全面淹灌,而浅湿灌溉与全面淹灌之间差异不显著。两个生长季中全面淹灌、浅湿灌溉和控制灌溉的叶面积指数最大值分别为 6.06、6.12、6.58(2017 年)和 6.11、6.18、6.49(2018 年)。控制灌溉水稻各生育时期叶面积指数比全面淹灌分别增加 7.94%~23.67%(2017 年)和 5%~14.47%(2018 年)。

2.2 不同灌溉模式对光合特性的影响

图 3 为不同灌溉模式下水稻光合有效辐射截获量日变化。由图 3 可知,两个生长季 3 种灌溉模式下整个生育过程中光合有效辐射截获量呈波浪变化,分别在拔节期和抽穗期后期达到波峰,且在拔节期后期达到最大值。两个生长季中控制灌溉、浅湿灌溉与全面淹灌下日光合有效辐射截获量的最高值分别为 22.30、21.69、20.70 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ (2017 年)和 24.6、23.8、23.5 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ (2018 年)。

表 3 为两个生长季内不同灌溉模式下水稻叶片 SPAD 与叶绿素荧光参数。由表 3 可知,两个生长季内不同灌溉模式下 SPAD 没有显著差异。3 种灌溉模式下叶片 SPAD 从分蘖期到抽穗期略有波动,并在乳熟期呈下降的趋势。两个生长季内,控制灌溉叶片 SPAD 在乳熟期略低于浅湿灌溉与全面淹

灌,其余生育时期控制灌溉均显著高于浅湿灌溉与全面淹灌。

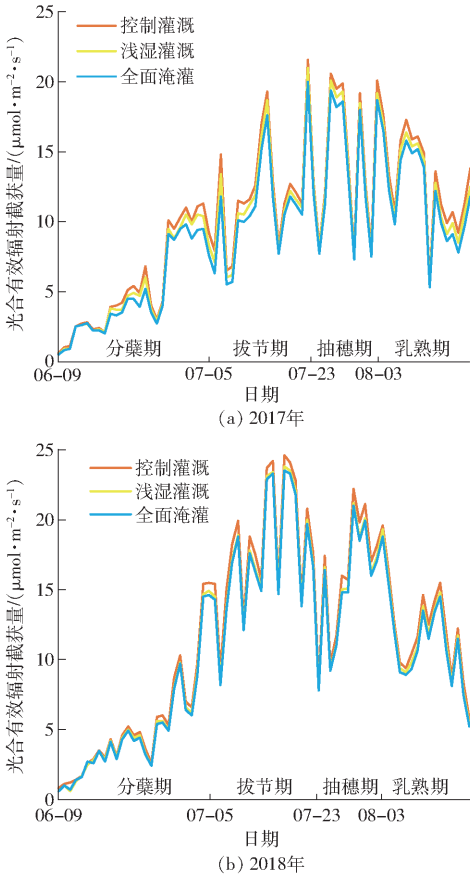


图 3 2017 年和 2018 年光合有效辐射截获量日变化曲线
Fig.3 IPAR under different irrigation patterns in 2017 and 2018

两个生长季内, F_v/F_m 从分蘖期开始上升,拔节期和抽穗期达到最大值后在乳熟期下降, q_N 、 q_P 前期略有波动,从乳熟期迅速下降,ETR 从分蘖期到乳熟期逐渐下降。 F_v/F_m 和 q_N 在 2017 年乳熟期时差异最大,控制灌溉 F_v/F_m 分别比浅湿灌溉与全面淹灌增加了 9.21% 与 5.06%,全面淹灌下 q_N 分别比浅湿灌溉与控制灌溉增加了 17.27% 与 7.95%。 q_P 和 ETR 在 2017 年拔节期时差异最大,全面淹灌下 q_P 分别比浅湿灌溉与控制灌溉增加了 18.52% 和 45.45%,全面淹灌下 ETR 分别比浅湿灌溉与控制灌溉增加了 23.92% 和 51.26%。 F_v/F_m 在各时期都有控制灌溉高于全面淹灌。两个生长季中,除分蘖期外,全面淹灌下 q_P 与 ETR 均高于浅湿灌溉与控制灌溉。在分蘖期,拔节期和抽穗期之间 3 种灌溉模式下 q_N 差异不大。

2.3 不同灌溉模式对水分和辐射利用效率的影响

不同灌溉模式下水分利用效率与辐射利用效率见表 4。控制灌溉下地上部干物质量的累积显著高于浅湿灌溉与全面淹灌,两个生长季内分别比全面淹灌增加了 12.13%(2017 年)和 7.98%(2018

年),比浅湿灌溉增加了 10.17% (2017 年)和 8.86% (2018 年);而冠层光合有效辐射截获总量,控制灌溉和浅湿灌溉较全面淹灌都所增加,两个生长季分别增加 74.05、23.65 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ (2017 年)和 63.35、16.85 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ (2018 年)。两个生长季内控制灌溉与浅湿灌溉的灌溉用水量较全面淹灌分别减少了 31.45%、9.16% (2017 年)和 31.67%、

7.88% (2018 年);控制灌溉下产量略高于全面淹灌但差异不显著,而显著高于浅湿灌溉。两个生长季内控制灌溉下灌溉水利用效率分别较浅湿灌溉和全面淹灌增加了 53.38%、46.45% (2017 年)和 51.97%、46.20% (2018 年);控制灌溉下辐射利用效率分别较浅湿灌溉和全面淹灌增加了 4.301%、1.042% (2017 年)和 3.723%、1.036% (2018 年)。

表 3 2017 年和 2018 年不同灌溉模式下叶片 SPAD 与叶绿素荧光参数

Tab.3 SPAD value and chlorophyll fluorescence parameters under different irrigation patterns in 2017 and 2018											
生育期	处理	SPAD		F_v/F_m		q_P		q_N		ETR	
		2017 年	2018 年	2017 年	2018 年	2017 年	2018 年	2017 年	2018 年	2017 年	2018 年
分蘖期	控制灌溉	46.63 ^a	47.25 ^a	0.74 ^a	0.74 ^a	0.62 ^a	0.65 ^a	2.27 ^a	1.93 ^b	227.91 ^a	206.08 ^a
	浅湿灌溉	44.27 ^b	42.97 ^c	0.72 ^b	0.73 ^a	0.54 ^b	0.55 ^b	1.81 ^b	2.00 ^b	158.17 ^b	178.41 ^b
	全面淹灌	45.61 ^b	45.60 ^b	0.74 ^a	0.73 ^a	0.54 ^b	0.53 ^b	1.88 ^b	2.09 ^a	166.64 ^b	181.78 ^b
拔节期	控制灌溉	45.31 ^a	44.38 ^a	0.81 ^a	0.78 ^a	0.44 ^c	0.52 ^a	1.88 ^b	2.01 ^a	135.19 ^b	171.58 ^a
	浅湿灌溉	42.50 ^b	43.76 ^b	0.82 ^a	0.75 ^b	0.54 ^b	0.54 ^a	1.88 ^b	1.80 ^c	165.02 ^b	158.04 ^b
	全面淹灌	43.44 ^b	43.02 ^b	0.81 ^a	0.76 ^b	0.64 ^a	0.58 ^a	1.96 ^a	1.90 ^b	204.49 ^a	180.45 ^a
抽穗期	控制灌溉	47.53 ^a	46.66 ^a	0.82 ^a	0.81 ^a	0.54 ^a	0.43 ^c	1.91 ^b	1.90 ^b	111.27 ^b	87.97 ^c
	浅湿灌溉	46.24 ^b	46.26 ^a	0.77 ^b	0.81 ^a	0.49 ^b	0.51 ^b	1.91 ^b	2.11 ^a	102.32 ^b	118.02 ^b
	全面淹灌	45.34 ^b	45.68 ^b	0.77 ^b	0.81 ^a	0.58 ^a	0.59 ^a	2.03 ^a	2.03 ^b	128.30 ^a	131.46 ^a
乳熟期	控制灌溉	37.50 ^b	39.23 ^b	0.83 ^a	0.77 ^a	0.45 ^a	0.38 ^a	1.51 ^b	1.41 ^b	99.43 ^b	73.40 ^b
	浅湿灌溉	41.30 ^a	41.96 ^a	0.76 ^b	0.74 ^b	0.38 ^b	0.27 ^b	1.39 ^c	1.48 ^b	70.16 ^c	57.48 ^c
	全面淹灌	39.83 ^a	41.30 ^a	0.79 ^b	0.76 ^a	0.46 ^a	0.41 ^a	1.63 ^a	1.59 ^a	112.31 ^a	98.59 ^a

表 4 2017 年和 2018 年不同灌溉模式下水分利用效率与辐射利用效率

Tab.4 WUE and RUE under different irrigation patterns in 2017 and 2018							
年份	处理	地上部干物质累	产量/	灌溉用水量/	光合有效辐射截获总	水分利用效率/	辐射利用效率/
		积量/($\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$)	($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)	($\text{m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$)	量/($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	($\text{g}\cdot\text{MJ}^{-1}$)
2017	控制灌溉	1 855.64 ^a	9 903 ^a	4 362.56 ^c	956.00 ^a	2.27 ^a	1.94 ^a
	浅湿灌溉	1 684.41 ^b	8 556 ^b	5 780.98 ^b	905.60 ^b	1.48 ^b	1.86 ^b
	全面淹灌	1 654.94 ^b	9 864 ^a	6 364.04 ^a	881.95 ^b	1.55 ^b	1.92 ^a
2018	控制灌溉	1 920.95 ^a	9 990 ^a	4 317.06 ^c	985.10 ^a	2.31 ^a	1.95 ^a
	浅湿灌溉	1 764.57 ^b	8 837 ^b	5 820.27 ^b	938.60 ^b	1.52 ^b	1.88 ^b
	全面淹灌	1 778.98 ^b	9 976 ^a	6 318.38 ^a	921.75 ^b	1.58 ^b	1.93 ^a

3 讨论

不同灌溉方式会对稻田土壤水分造成影响,而对水稻的株高、茎粗造成较大的影响^[16-18]。郭相等^[19]的研究发现,与常规淹灌相比,节水灌溉会使水稻株高受到抑制,而茎粗增加,与本试验的研究结果一致。本研究结果表明,控制灌溉与浅湿灌溉与全面淹灌相比,有利于水稻叶面积指数和地上部干物质的增加。表明节水灌溉对水稻的叶面积指数具有促进作用,从而有利于叶片光合能力的增强,促进有机质的积累,这与前人研究结果相同^[19-22]。

水稻地上部生物量与冠层截获光合有效辐射的能力有关。李华龙等^[7]的试验表明,水分胁迫对冠层光合有效辐射截获量的影响主要通过叶面积增长

来体现,叶面积指数与冠层光合有效辐射截获量成正相关。本试验结果同样表明,在整个生育期,控制灌溉和浅湿灌溉的冠层光合有效辐射截获量一直高于全面淹灌。一定范围内,光合强度随叶绿素含量的增加而加强,因此叶绿素含量是反映植物丰产性能的生理指标之一。郭相等^[23]研究表明,从抽穗期到乳熟期水稻叶片 SPAD 因叶片衰老而不断降低,但节水灌溉相比淹灌会减缓 SPAD 的下降。本试验研究同样发现,整个生育期中控制灌溉与浅湿灌溉下 SPAD 高于全面淹灌,表明节水灌溉能提高水稻叶片的 SPAD,从而增强水稻叶片的光合作用强度。叶绿素荧光参数是反映植物光合效率的指标。本试验中对叶绿素荧光进行了测量,选取了 F_v/F_m 、 q_P 、 q_N 、ETR 4 个参数作为检测指标。已有研

究^[24]表明,叶绿素荧光参数 F_v/F_m 、 q_p 会随着生育期的推迟逐渐下降,而 q_N 却会逐渐上升。而本试验结果发现, F_v/F_m 从分蘖期开始上升,拔节期和抽穗期达到最大值后在乳熟期下降, q_N 、 q_p 前期略有波动,从乳熟期迅速下降,ETR 从分蘖期到乳熟期逐渐下降。与前人的研究产生差异的原因可能是光照强度、水分胁迫、温度变化等因素对作物的光合作用能力造成了影响。

水分利用效率反映了作物生长中能量转化效率,也是评价缺水条件下作物生长适宜程度的指标^[25]。AVILA 等^[12]在巴西的试验结果表明,间歇灌溉与连续灌溉相比,产量没有造成影响,而灌溉用水减少了 22% ~ 76%,水分利用效率增加了 15% ~ 346%。本试验研究表明,控制灌溉与全面淹灌相比在产量上有一定的提升,灌溉用水量显著降低,控制灌溉下水分利用效率也显著高于全面淹灌,这与 SONIT 等^[13]试验结果相同。这是由于控制灌溉在生育期受到适宜的水分胁迫,激发水稻的生长与生产潜能,提高了产量与水分利用效率。作物的产量与冠层截获辐射能力与辐射转化为干物质的效率密切相关^[26]。而辐射利用效率与作物的干物质生产与冠层光截获率密切相关。辐射利用效率的差异能反映水分亏缺、养分胁迫、疾病和低温等环境因素对

水稻生长发育的影响。这是因为不同阶段的水分胁迫使作物根部与冠层光合同化物的分配不同或作物在不同生育期遭受水分胁迫使得光合有效辐射截获的不同造成的^[27]。研究结果表明,控制灌溉下地上部干物质质量的累积与光合有效辐射截获总量都显著高于全面淹灌,控制灌溉下辐射利用效率也高于全面淹灌,这和 ISLAM 等^[28]的结果相同,原因可能是水稻在不同生育时期受到水分胁迫,使得叶面积指数显著提升,进而增加了冠层光能有效辐射截获量,增大了辐射利用效率。

4 结论

(1)控制灌溉和浅湿灌溉较全面淹灌更能延迟水稻株高的生长、促进茎粗的增长,提升水稻叶面积指数,对地上部干物质质量的积累也有积极作用。

(2)在光合特性方面,控制灌溉和浅湿灌溉的 SPAD 较全面淹灌有一定的提升,能增强水稻冠层光合有效辐射截获量。除 F_v/F_m 外,全面淹灌下叶绿素荧光各参数均高于控制灌溉和浅湿灌溉。

(3)在不同生育期进行适宜的水分胁迫,控制灌溉比全面淹灌的辐射利用效率高,控制灌溉能显著提高水分利用效率,产量较全面淹灌也有提升。

(4)在黑龙江省寒地黑土半湿润区,相比浅湿灌溉与全面淹灌,控制灌溉是更适宜的灌溉模式。

参 考 文 献

- [1] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴(2017)[M]. 北京: 中国统计出版社, 2018.
- [2] BOUMAN B A M, HUMPHREYS E, TUONG T P, et al. Rice and water[J]. *Advances in Agronomy*, 2007, 92(4): 187 - 237.
- [3] BOUMAN B A M, TUONG T P. Field water management to save water and increase its productivity in irrigated lowland rice[J]. *Agricultural Water Management*, 2001, 49(1): 11 - 30.
- [4] 孙海正. 黑龙江省水稻生产特点及对我国粮食安全的影响[J]. *黑龙江农业科学*, 2012(8): 134 - 137.
SUN Haizheng. Characteristic of rice production in Heilongjiang Province and its effect on the food security of China[J]. *Heilongjiang Agricultural Sciences*, 2012(8): 134 - 137. (in Chinese)
- [5] DERCAS N, LIAKATAS A. Water and radiation effect on sweet sorghum productivity[J]. *Water Resources Management*, 2007, 21(9): 1585 - 1600.
- [6] NARAYANAN S, AIKEN R M, PRASAD P V V, et al. Water and radiation use efficiencies in sorghum[J]. *Agronomy Journal*, 2013, 105(3): 649 - 656.
- [7] 李华龙, 窦子荷, 蒋腾聪, 等. 水分胁迫对冬小麦冠层辐射截获率和利用效率的影响[J/OL]. *农业机械学报*, 2018, 49(9): 226 - 237.
LI Hualong, DOU Zihong, JIANG Tengcong, et al. Influences of soil water stress on solar radiation interception and use efficiency of winter wheat canopy[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2018, 49(9): 226 - 237. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180927&journal_id=jcsam. DOI: 10. 6041/j. issn. 1000-1298. 2018. 09. 027. (in Chinese)
- [8] SADRAS V O, RODRIGUEZ D. The limit to wheat water-use efficiency in eastern Australia. II. Influence of rainfall patterns[J]. *Australian Journal of Agricultural Research*, 2007, 58(7): 657 - 669.
- [9] 董浩, 陈雨海, 周勋波. 灌溉和种植方式对冬小麦耗水特性及干物质生产的影响[J]. *应用生态学报*, 2013, 24(7): 1871 - 1878.
DONG Hao, CHEN Yuhai, ZHOU Xunbo. Effects of irrigation and planting pattern on winter wheat water consumption characteristics and dry matter production[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2013, 24(7): 1871 - 1878. (in Chinese)
- [10] 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): 1026 - 1036.
CHU Guang, ZHAN Mingfei, ZHU Kuanyu, et al. Effects of alternate wetting and dry irrigation on yield and efficiency of rice[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2016, 42(7): 1026 - 1036. (in Chinese)

[11] 聂晓,王毅勇,刘兴土,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.
NIE Xiao,WANG Yiyong,LIU Xingtu,et al. Water consumption and water use efficiency of rice of Sanjiang Plain under control irrigation[J]. System Sciences and Comprehensive Studies in Agriculture,2011,27(2):228-232. (in Chinese)

[12] AVILA L A D,MARTINI L F D,MEZZOMO R F,et al. Rice water use efficiency and yield under continuous and intermittent irrigation[J]. Agronomy Journal,2015,107(2):442-448.

[13] SONIT A,RATHORE A L,HEMLATA D J H A,et al. Effect of pressurized irrigation systems on productivity, water and energy use efficiency of summer rice[J]. The Ecoscan,2015,9(1-2):249-254.

[14] HUSSAIN A,RAFIQ C M,WAJID A,et al. Influence of water stress on growth, yield and radiation use efficiency of various wheat cultivars[J]. International Journal of Agriculture & Biology,2004,6(4):1074-1079.

[15] 朱士江. 寒地稻作不同灌溉模式的节水及温室气体排放效应试验研究[D]. 哈尔滨:东北农业大学,2012.
ZHU Shijiang. Experiment for water-saving and greenhouse effect of irrigation mode in cold rice area[D]. Harbin:Northeast Agricultural University,2012. (in Chinese)

[16] 李爱传,衣淑娟,王熙,等. 寒地水稻节水控制灌溉的机理与研究[J]. 农机化研究,2014,36(12):46-49.
LI Aichuan,YI Shujuan,WANG Xi,et al. The mechanism and research of water saving irrigation of rice in cold region[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research,2014,36(12):46-49. (in Chinese)

[17] 刘江彪,潘国君,郑桂萍,等. 节水灌溉与常规灌溉对水稻生育动态及产量的影响[J]. 黑龙江农业科学,2018(9):18-22.
LIU Jiangbiao,PAN Guojun,ZHENG Guiping,et al. Effects of conventional irrigation and water-saving irrigation on growth dynamics and yield of rice[J]. Heilongjiang Agricultural Sciences,2018(9):18-22. (in Chinese)

[18] 李杰,张洪程,龚金龙,等. 不同种植方式对超级稻植株抗倒伏能力的影响[J]. 中国农业科学,2011,44(11):2234-2243.
LI Jie,ZHANG Hongcheng,GONG Jinlong,et al. Effects of different planting methods on the culm lodging resistance of super rice[J]. Scientia Agricultura Sinica,2011,44(11):2234-2243. (in Chinese)

[19] 郭相平,黄双双,王振昌,等. 不同灌溉模式对水稻抗倒伏能力影响的试验研究[J]. 灌溉排水学报,2017,36(5):1-5.
GUO Xiangping,HUANG Shuangshuang,WANG Zhenchang,et al. Impact of different irrigation methods on resistance of rice against bending and breaking[J]. Journal of Irrigation and Drainage,2017,36(5):1-5. (in Chinese)

[20] 金学泳,商文楠,曹海峰,等. 不同灌溉方式对水稻生育及产量的影响[J]. 中国农学通报,2005,21(8):125-128.
JIN Xueyong,SHANG Wennan,CAO Haifeng,et al. Effects of different irrigation style on rice growing and yield[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin,2005,21(8):125-128. (in Chinese)

[21] 胡继芳,刘传增,马波,等. 半干旱地区不同灌溉方式对粳稻生长发育及产量的影响[J]. 天津农业科学,2016,22(3):23-26,30.
HU Jifang,LIU Chuanzeng,MA Bo,et al. Effects of different irrigation methods on growth and yield of japonica rice in semi-arid region[J]. Tianjin Agricultural Sciences,2016,22(3):23-26,30. (in Chinese)

[22] 聂晓,王毅勇,刘兴土. 灌溉方式对寒地水稻生长和产量构成要素的影响[J]. 灌溉排水学报,2013,32(6):34-37.
NIE Xiao,WANG Yiyong,LIU Xingtu. Effects of irrigation modes on growth and yield structures of rice in cold area[J]. Journal of Irrigation and Drainage,2013,32(6):34-37. (in Chinese)

[23] 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.
GUO Xiangping,WANG Fu,WANG Zhenchang,et al. Effects of irrigation modes on yield and chlorophyll fluorescence characteristics after heading stage of rice[J]. Journal of Irrigation and Drainage,2017,36(3):1-6. (in Chinese)

[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.
HUANG Guangfu,TANG Qiaoling,TANG Yunping,et al. Advances of chlorophyll fluorescence analysis technique in the rice research[J]. Crop Research,2013,27(2):174-179. (in Chinese)

[25] 栗丽,洪坚平,王宏庭,等. 水氮互作对冬小麦耗水特性和水分利用效率的影响[J]. 水土保持学报,2012,26(6):291-296.
LI Li,HONG Jianping,WANG Hongting,et al. Effects of nitrogen and irrigation interaction on water consumption characteristics and use efficiency in winter wheat[J]. Journal of Soil and Water Conservation,2012,26(6):291-296. (in Chinese)

[26] LI Q,CHEN Y,LIU M,et al. Effects of irrigation and planting patterns on radiation use efficiency and yield of winter wheat in North China[J]. Agricultural Water Management,2008,95(4):469-476.

[27] CONNELL M G O,LEARY G J O,WHITFIELD D M,et al. Interception of photosynthetically active radiation and radiation-use efficiency of wheat, field pea and mustard in a semi-arid environment[J]. Field Crops Research,2004,85(2-3):111-124.

[28] ISLAM S M M,GAIHRE Y K,BISWAS J C,et al. Different nitrogen rates and methods of application for dry season rice cultivation with alternate wetting and drying irrigation: fate of nitrogen and grain yield[J]. Agricultural Water Management,2018,196:144-153.