



朱梅, 栗昕羽, 刘硕硕, 胡晨帆, 时运佳. 远红光辐照下响应面法优化水稻幼苗水分利用效率[J]. 中国农业大学学报, 2024, 29(12): 218-226.
ZHU Mei, LI Xinyu, LIU Shuoshuo, HU Chenfan, SHI Yunjia. Optimization of the water use efficiency of rice seedlings by response surface method under far-red irradiation[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2024, 29(12): 218-226.
DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2024.12.19

远红光辐照下响应面法优化水稻幼苗水分利用效率

朱梅 栗昕羽 刘硕硕 胡晨帆 时运佳

(安徽农业大学 工学院, 合肥 230036)

摘要 针对旨在提高水稻幼苗水分利用效率(Water use efficiency, WUE)的远红光间断辐照模式不清的问题,开展优明86、丰两优648、绿早639、镇稻18及荆占1号,5个品种水稻幼苗694 nm波长远红光LED灯辐照试验,测量水稻幼苗根茎长和幼苗气体交换参数,确定WUE最优的水稻品种;基于WUE最优水稻品种在836、720、755和694 nm 4种波长下进行远红光LED灯辐照试验,测量水稻幼苗根茎长和幼苗气体交换参数,确定WUE最优的远红光波长;利用Box-Behnken中心组合设计原理,以无远红光辐照为对照组,选择WUE最优的水稻品种和远红光波长,开展以远红光单次辐照时长、间断时长和辐照时段为控制因素,以WUE为响应值的多因素响应曲面优化试验及模拟。结果表明:绿早639品种水稻在波峰波长755 nm的远红光辐照下WUE最优;提高水稻幼苗WUE的远红光最优间断辐照模式组合为,单次辐照19 min,间断19 min,远红光辐照结束后立刻开始常规LED辐照;最优间断辐照模式下水稻幼苗WUE模拟值为8.8,验证试验实际测得水稻幼苗WUE为8.6,与预测模型的相对误差小于0.3,模型结果可靠。

关键词 水稻; 水分利用效率; 远红光; 响应曲面法

中图分类号 S636.2; Q945.43

文章编号 1007-4333(2024)12-0218-09

文献标志码 A

Optimization of the water use efficiency of rice seedlings by response surface method under far-red irradiation

ZHU Mei, LI Xinyu, LIU Shuoshuo, HU Chenfan, SHI Yunjia

(School of Engineering, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China)

Abstract In order to make clear the intermittent far-red light irradiation mode improving the water use efficiency (WUE) of rice seedlings, a 694 nm wavelength far red LED light irradiation experiment was conducted on five rice varieties, including Youming 86, Fengliangyou 648, Luhan 639, Jingzhan 1 and Zhendao 18. The root and stem length of rice seedlings and the gas exchange were measured to identify the optimal WUE rice variety. Based on the rice variety with optimal WUE, experiments were conducted with four different wavelengths of far-red LED light irradiation at 836, 720, 755, and 694 nm, respectively. The root and stem length of rice seedlings and gas exchange parameters were measured to determine the optima far-red light wavelength of the optimal WUE rice variety. Using the Box Behnken central combination design principle, with no far-red light irradiation as the control group, a multi factor response surface optimization experiment and simulation were conducted with single far-red light irradiation duration, interruption duration and irradiation period as control factors and WUE as response value. The results showed that Luhan 639 rice variety had the best WUE under far-red light irradiation with a peak wavelength of 755 nm. The optimal intermittent far-red irradiation mode combination for improving the WUE of rice

收稿日期: 2024-02-01

基金项目: 2022年安徽省教育厅自然科学重点项目(2022AH050905)

第一作者: 朱梅(ORCID:0000-0001-5379-7074),教授,主要从事农业水利工程研究,E-mail:810249691@qq.com

seedlings is as follows: Nineteen minutes of single irradiation, nineteen minutes of intermittent irradiation and the conventional LED irradiation immediately begins after the far-red light irradiation ends. The simulation result of rice seedling WUE under the optimal intermittent irradiation mode is 8.8, and the actual measured WUE of rice seedlings in the validation experiment is 8.6, with a relative error of less than 0.3 compared to the prediction model. The results of the model in this study are reliable.

Keywords rice; water use efficiency; far-red light; response surface method

水稻是高耗水作物,提高水稻水分利用效率(Water use efficiency, WUE),发展高水效农业是国家节水战略的重点。山仑院士首次提出“生物节水”的概念^[1-2],只有提高作物自身 WUE 才能获得节水上的新突破,以“真实节水”为目标的生物节水显示出更大的应用前景^[3]。在当前光控农业发展的大环境下,利用光辐照手段研究作物 WUE 的提高是当前高水效农业发展的一个重要方向。

国内外提高 WUE 的方法主要有:根系修剪^[4]、地表覆盖技术^[5]、亏缺灌溉技术^[6]和施用保水剂、抗蒸腾剂^[7-8]等。根系修剪方法中,冬小麦在根系修剪初期根冠比降低,打破了根系吸水与冠层蒸腾平衡关系,不利于根系吸水能力和冠层光合作用;地表覆盖和亏缺灌溉技术在干旱半干旱地区林业中应用较多,工程量大,工序繁琐。通过 LED 光照提高作物 WUE 更加安全方便节能。本研究前期调研发现,远红光间断辐照模式已呈现一定的正面效应^[9],但是,远红光辐照对植物发育影响方面的研究多以蔬菜类植物为研究对象,对禾本科作物的研究比较少见。响应曲面法是一种综合试验设计和数学建模的优化方法^[10],因其试验次数少、试验周期短、精密度高、预测性能好等优点,目前被广泛应用于化工与机械性能优化、食品风味及药物成分提取优化等研究中^[11-12]。

本研究拟从提高水稻幼苗 WUE 角度出发,通过单因素试验确定 WUE 最优的水稻品种和远红光波长;基于响应曲面法,通过控制远红光光源的单次辐照时长、间断时长和辐照时段,探求不同辐照情景下水稻幼苗 WUE 的变化,确定水稻幼苗 WUE 最优的远红光间断辐照模式,以为光控水稻育苗节水中远红光间断辐照模式提供试验依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

1.1.1 试验种子

试验选择 5 个水稻品种,分别为高产杂交水稻优明 86(YM)、籼型杂交水稻丰两优 648(FLY)、籼

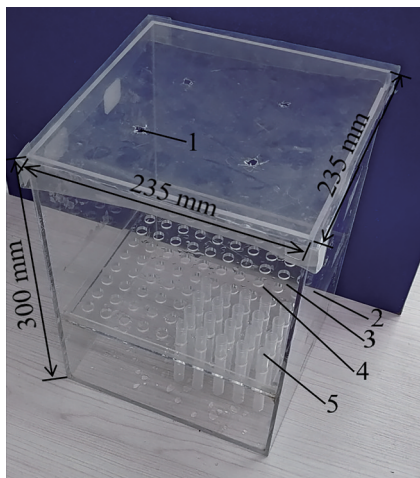
型杂交水稻绿早 639(LH)、粳型常规水稻荆占 1 号(JZ)、粳型常规稻镇稻 18(ZD)。5 个水稻品种在株型、抗旱性等方面各有差异,所选品种对本试验研究具有普适性。试验种子均购于合肥市种子市场。

1.1.2 试验光源

试验使用常规白光 LED 灯带模拟自然光,照度为 456.5 lx,样品接收到的白光辐射光功率为 1.463 W/m²。试验用远红光光源由合肥工业大学研制,型号分别为 LSO、MGO、GGO 和 YAB,波峰波长分别为 836、720、755 和 694 nm。光源电功率 8 W,输入电流 375 mA,试验样品接收到的远红光辐射光功率 2.074 W/m²。

1.1.3 培养箱及培养液

1)培养箱。供试培养容器为自行设计的定制培养箱,包括透明外壳、定植面板和 LED 光源槽孔装置 3 部分(图 1)。透明外壳由 5 mm 厚透明亚克力板制成,内设 100 孔的定植面板。定植面板的开孔大小为 12 mm。购入管径大小为 12 mm 的塑料试管,剪去试管底部圆弧部分,插入定植面板,用于



1. LED 光源槽孔装置;2. 透明外壳;3. 定植面板;4. 试管插孔;5. 试管
1. LED light source slot device; 2. Transparent case; 3. Colonize panels; 4. Test tube jacks; 5. Test tube

图 1 定制培养箱结构图

Fig.1 Structure diagram of incubato

固定植株。LED光源槽孔装置用来放置LED灯珠,LED灯连接定时插座,用于控制间断辐照次数及辐照时长。应用遮光布防止外界光源侵入影响试验结果。

2)培养液。标准霍格兰营养液,购于青岛高科技工业园海博生物技术有限公司,主要成分为硫酸钾、磷酸二氢铵、硫酸镁。将霍格兰营养液与蒸馏水按照体积比1:3制备1号培养液,按照体积比1:1制备2号培养液,备用。

1.2 试验设计

1.2.1 水稻种子培养

试验采取水培法。每个试验组选取200粒水稻种子,先使用75%的酒精消毒,后浸泡于常温蒸馏水中,浸种催芽48 h后开始种子萌发培养(图2)。种子萌发期在培养皿中培养,培养皿提前垫入2张中速滤纸,并添加1号培养液50 mL。培养皿放置于BSG-300型光照恒温箱(上海博讯医疗生物仪器股份有限公司)中,恒温28℃培养7天。之后将幼苗根部用海绵包裹,移至自制培养箱培养。箱体内加2号培养液5 L,培养箱幼苗培养18天,试验培养共进行25天。

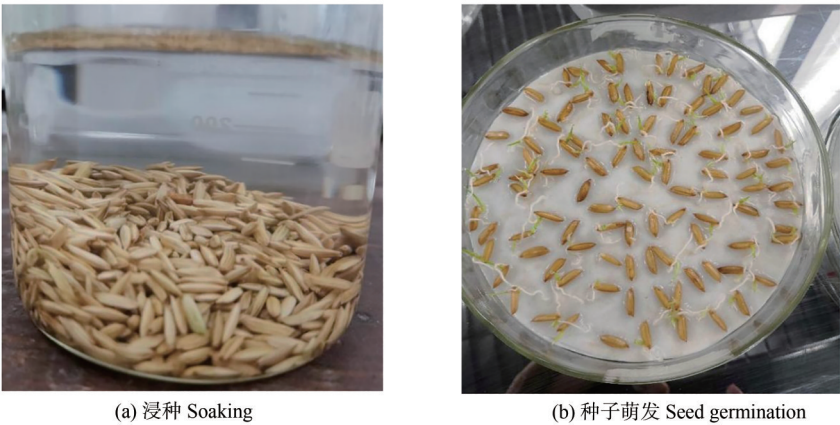


图2 种子培养过程
Fig.2 Seed culture process diagram

1.2.2 单因素试验设计

试验1:选择5个水稻品种种子培养,每天8:00—20:00使用常规LED模拟自然光,20:00开始使用波峰波长为694 nm的YAB型号远红光LED灯连续辐照,探索不同品种的水稻幼苗生长及水分利用效率(Water Use Efficiency, WUE)对远红光辐照的响应。

试验2:选用试验1中水分利用效率最优的品种,选择波峰波长分别为836、720、755和694 nm的4种不同型号远红光LED灯于每天20:00—次日8:00开始连续辐照,8:00开始使用常规LED模拟

自然光,探索不同波峰波长远红光LED对水稻幼苗生长及水分利用效率(WUE)的影响。设置无远红光辐照试验组(CK)作为对照组。

1.2.3 响应曲面试验设计

经单因素试验选定水稻幼苗WUE最优的品种与远红光LED型号后,根据Box-Behnken中心组合设计理论,开展基于响应曲面法的三因素三水平二次回归正交试验,以单次辐照时长(A)、间断时长(B)、辐照时段(C)为影响因素,水稻幼苗水分利用效率为响应值,探索远红光最优间断辐照模式。Box-Behnken设计试验因素和水平见表1。

表1 Box-Behnken设计试验因素及水平
Table 1 Factors and levels of Box-Behnken design test

水平 Level	因素 Factor		
	A, 单次辐照时长/min	B, 间断时长/min	C, 辐照时段
	Duration of a single irradiation	Duration of the break	Irradiation period
−1	10	10	黑暗初期
0	20	15	黑暗中期
1	30	20	黑暗末期

试验自种子培养第 16 天开始,每天 8:00—20:00 使用常规 LED 灯模拟自然光辐照。黑暗初期为每日 20:00 白光结束后立即开始远红光间断辐照,黑暗中期为白光结束后黑暗处理至凌晨 1:00 开始远红光间断辐照,黑暗末期为每日 20:00 开始黑暗处理,根据因素 A、B 的不同确定远红光的开始时间,远红光的结束时间控制在次日 8:00,之后立即开始自然光辐照。设置 1 个间断辐照周期为 1 次辐照+1 次间断,每天间断辐照 4 个周期,即每日远红光间断辐照总时长=(单次辐照时长+间断时长)×4。

1.3 指标测定

试验期内第 16 日至第 25 日每日测量水稻幼苗根茎长,并于培养第 25 日测量水稻幼苗气体交换参数,计算 WUE。水稻幼苗茎长与根长测量方法是,对每个品种每试验组随机选取 20 株水稻幼苗,使用精确度 0.01 mm 的游标卡尺直接测量,结果取平均值。

水稻气体交换参数包括净光合速率(Pn)和蒸

腾速率(Tr)。每组试验品种各随机选取 3 株幼苗,使用 Li-6400 便携式光合仪在试验室内进行测量,测量温度 25 ℃,8:00—12:00 时段内进行测量。CO₂ 浓度为(402±1) μmol/mol,测定光合有效辐射设定为 1 200 μmol/m²s,流量设定为 500 mL/s。测定水稻幼苗气孔交换参数并计算水分利用效率(WUE),计算公式^[13]为:

$$WUE = Pn/Tr \quad (1)$$

1.4 数据统计及分析

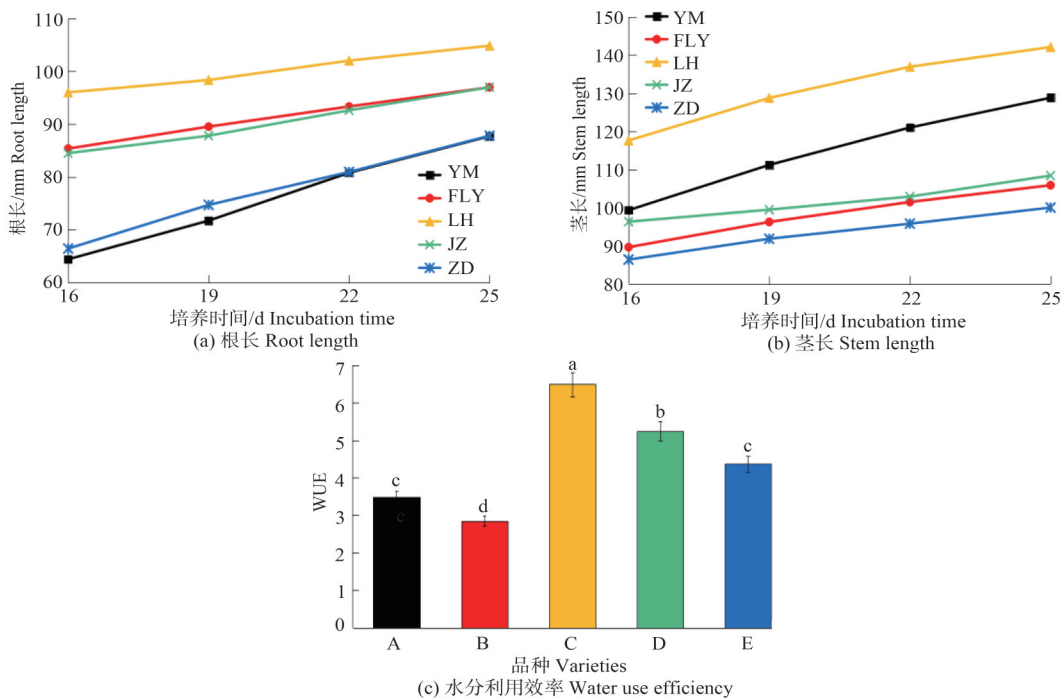
采用 Excel 进行数据整理,利用 SPSS8.0 软件对数据进行显著性分析, $P<0.05$ 为显著差异。利用 Design-Expert 软件进行响应面分析。

2 结果与分析

2.1 单因素试验结果

2.1.1 不同水稻品种对远红光辐照的响应

不同品种水稻根茎长及水分利用效率(WUE)对 YAB 型远红光辐照的响应见图 3。优明 86 和镇稻 18 根长增加较为明显,但整体根长较短,丰两优



YM, 优明 86; FLY, 丰两优 648; LH, 绿早 639; JZ, 荆占 1 号; ZD, 镇稻 18。

YM: Youming 86; FLY: Fengliangyou 648; LH: Luhan 639; JZ: Jingzhan 1; ZD: Zhendao 18.

柱上不同小写字母表示水稻幼苗不同品种间的水分利用效率差异显著($P<0.05$),相同字母表示差异不显著($P>0.05$)。

Different lowercase letters on the column indicate significant differences in water use efficiency among different varieties of rice seedlings ($P<0.05$), and the same letters are insignificant ($P>0.05$).

图 3 不同品种水稻幼苗根茎长及水分利用效率对 YAB 型远红光辐照的响应

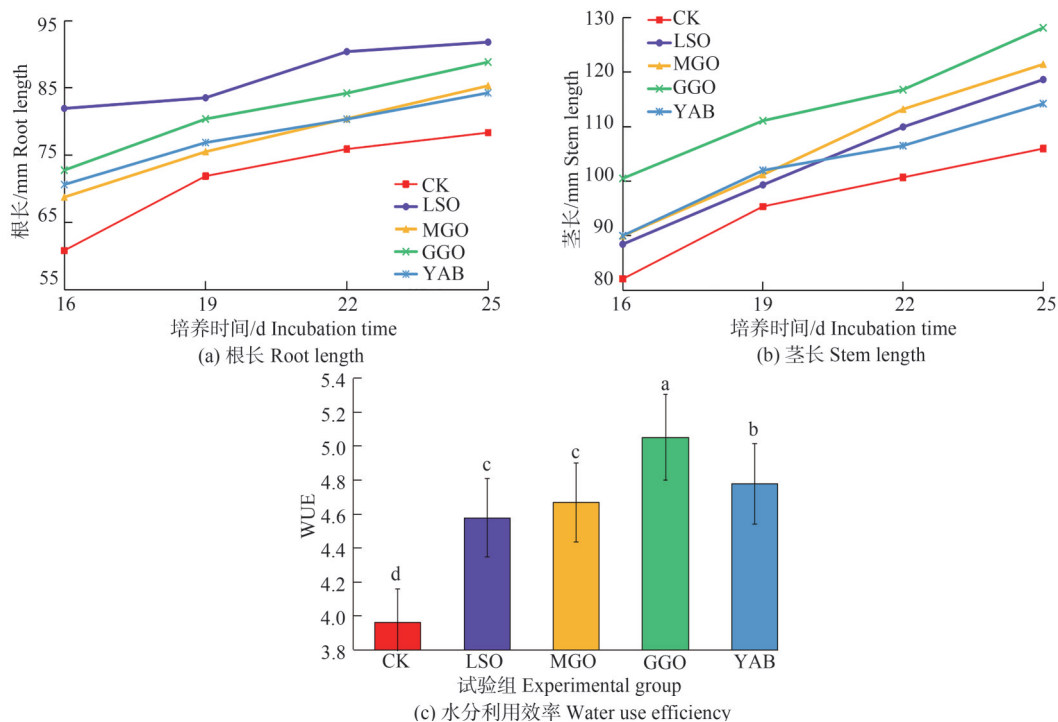
Fig.3 The response of root and stem length and WUE of different rice varieties to YAB far-red light irradiation

648、荆占1号及镇稻18茎长生长趋势及整体长度均较弱,绿早639的根长和茎长显著优于其他4个品种。5个水稻品种经YAB型远红光辐照后WUE差距显著,其中绿早639水稻幼苗WUE大于其他品种。综上,绿早639水稻幼苗经远红光辐照后长势及WUE显著优于其他品种。

2.1.2 不同型号远红光辐照对绿早639品种水稻幼苗的影响

试验水稻选择单因素试验1确定的对YAB远红光辐照下水分利用效率响应最优的绿早639品种。不同型号远红光LED辐照对绿早639水稻幼苗生长及水分利用效率的影响见图4。经远红光辐照的水

稻幼苗根茎长均显著大于无远红光辐照的CK组。经LSO远红光辐照下水稻幼苗根长最长,整体略大于GGO远红光辐照下水稻幼苗根长,LSO和GGO远红光辐照下水稻幼苗根长分别比对照组增加17.2%和13.4%。MGO和YAB远红光辐照下水稻根长长势相近;GGO远红光辐照下水稻幼苗茎长最大,比对照组增加20.89%。LSO、MGO和YAB远红光辐照下水稻幼苗茎长长势相近。不同型号远红光辐照下水稻幼苗水分利用效率差异显著,水稻幼苗水分利用效率经GGO远红光辐照显著优于其他型号远红光辐照5.7%~27.49%。综上,GGO远红光辐照下水稻幼苗长势及水分利用效率最优。



柱上不同小写字母表示不同型号远红光辐照水分利用效率差异显著($P < 0.05$),相同字母表示差异不显著($P > 0.05$)。

Different lowercase letters on the column indicate significant differences in water use efficiency under different types of far-red light irradiation ($P < 0.05$); and the same letters are insignificant ($P > 0.05$).

图4 不同型号远红光LED辐照对绿早639水稻幼苗生长及水分利用效率的影响

Fig.4 Effects of different types of far-red LED irradiation on the growth and WUE of Luhan 639 rice seedlings

2.2 响应曲面优化试验结果

基于单因素试验结果,选择绿早639水稻幼苗和GGO型号远红光开展响应曲面优化试验。利用Box-Behnken中心组合设计原理,设计三因素三水平试验,共17个试验处理,其中5个为零点估计误差处理,12个为分析因子处理。试验结果见表2。

2.2.1 响应曲面试验方差分析

根据表2中的试验数据,利用Design-Expert软件进行多元回归拟合,得到远红光单次辐照时长、

间断时长、辐照时段的水平值与响应值水分利用效率的回归模型:

$$Y = 6 + 0.55A_1 + 0.48B_1 - 0.47C_1 + 0.37A_1B_1 + 1.17A_1C_1 + 0.59B_1C_1 - 0.23A_1^2 + 0.57B_1^2 + 0.87C_1^2 \quad (2)$$

式中: A_1 、 B_1 、 C_1 分别为远红光单次辐照时长、间断时长、辐照时段的水平值; Y 为水分利用效率。

对模型进行方差分析结果见表3。回归模型极显著($P = 0.0004 < 0.01$),失拟项不显著($P =$

表 2 GGO 型号远红光辐照绿早 639 水稻幼苗响应面试验结果

Table 2 Response surface test results of Luhan 639 rice seedlings irradiated by GGO far-red light

试验编号 Trial number	因素水平 Factor level			水分利用效率 Water use efficiency
	A ₁ , 单次辐照时长 Duration of a single irradiation	B ₁ , 间断时长 Duration of the break	C ₁ , 辐照时段 Irradiation period	
1	0	−1	−1	7.746
2	0	0	0	5.542
3	0	0	0	6.029
4	−1	1	0	6.341
5	−1	0	1	4.447
6	1	0	1	8.231
7	1	−1	0	5.585
8	1	0	−1	6.486
9	−1	−1	0	5.587
10	0	0	0	5.942
11	0	0	0	6.329
12	−1	0	−1	7.374
13	0	−1	1	5.254
14	0	1	−1	8.439
15	1	1	0	7.829
16	0	1	1	8.319
17	0	0	0	6.142

表 3 响应曲面试验方差分析结果

Table 3 Variance analysis of response surface test

参数 Parameter	平方和 Sum of squares	自由度 Degree of freedom	均方 Mean square	F	显著性 Distinctiveness
模型 Model	22.23	9	2.47	18.82	**
A	2.40	1	2.40	18.29	**
B	5.71	1	5.71	43.47	**
C	1.80	1	1.80	13.71	**
AB	0.56	1	0.56	4.23	
AC	5.46	1	5.46	41.58	**
BC	1.41	1	1.41	10.72	*
A ²	0.23	1	0.23	1.74	
B ²	1.38	1	1.38	10.49	*
C ²	3.19	1	3.19	24.33	**
残差 Residuals	0.92	7	0.13	—	—
失拟项 Out-of-the-way items	0.58	3	0.19	2.24	
误差项 Error terms	0.34	4	0.086	—	—
总和 Sum	23.15	16	—	—	—

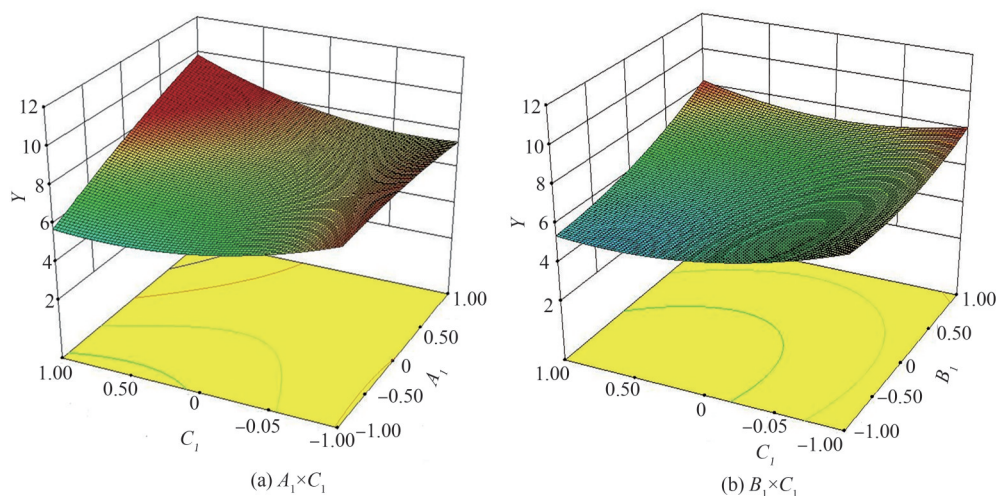
注：*、**分别表示结果差异显著($P<0.05$)和极显著($P<0.01$)。
Note: * and ** indicates a significant difference($P<0.05$)and a extremely significant difference in the results($P<0.01$) separately.

0.225 3 > 0.05), 说明模型模拟较好, 可用此模型对水稻水分利用效率进行分析与预测^[11]。该模型的决定系数 $R^2=0.96$, 调整系数 $R^2_{adj}=0.91$, 表明模型可信度高。模型一次项 A_1 、 B_1 、 C_1 均极显著 ($P<0.01$), 交互项 A_1C_1 极显著 ($P<0.01$)、 B_1C_1 显著 ($P<0.05$), 二次项 C_1^2 极显著 ($P<0.01$)、 B_1^2 显著 ($P<0.05$)。试验因素对水稻幼苗水分利用效率的影响显著顺序为: 间断时长 > 单次辐照时长 > 辐照时段。

2.2.2 交互因素对水稻幼苗水分利用效率的影响

图5为远红光单次辐照时长、间断时长和辐照时段交互因素对响应值水分利用效率的响应曲面

图。间断时长为0水平时, 随着单次辐照时长增大, 水稻幼苗水分利用效率逐渐增大, 变动幅度较为平缓; 而当辐照时段更晚时, 水稻幼苗水分利用效率先减后增, 变动幅度逐渐减弱, 响应曲面沿单次辐照时长方向变化更快, 在0水平时单次辐照时长比辐照时段对水稻幼苗水分利用效率的影响更为显著。单次辐照时长为1水平, 当间断时长和辐照时段增加时, 水稻幼苗水分利用效率先减后增, 且响应曲面沿间断时长方向变化更快, 在0水平下间断时长比辐照时段对水稻幼苗水分利用效率的影响更为显著。



A_1, B_1, C_1 分别为单次辐照时长、间断时长和辐照时段的水平值; Y 为水分利用效率。

A_1, B_1, C_1 are the single irradiation period, the intermittent duration, the irradiation period. Y is water use efficiency.

图5 各因素交互作用对水分利用效率的影响

Fig.5 Effect of the interaction of various factors on water use efficiency

2.3 参数验证

通过 Design-Expert 软件中的 Optimization 分析, 对响应曲面试验结果进行优化计算。本研究设计条件下, 使水稻幼苗水分利用效率最优的间断辐照模式为: 单次辐照 19 min, 间断 19 min, 远红光辐照结束后立刻开始白光辐照, 水稻幼苗水分利用效率为 8.8。根据最优参数进行 3 次验证试验, 实际测得水分利用效率为 8.6, 误差为 0.2, 模型结果准确可靠。

3 讨论与结论

光是影响植物生长发育的重要环境因素之一, 不仅参与植物的光合作用, 而且作为光信号影响植物生长发育等过程^[14]。不可见光, 如紫外光、远红

光同样可以调控植物生长发育^[15-16]。已有研究中所用远红光光源有效辐照波长为 650~830 nm, 范围较广。研究显示波长为 710 nm 远红光可促进番茄生长^[17], 波长为 660 nm 的远红光能促进芥蓝生长发育^[18], 波峰波长为 730 nm 的 LED 光源刺激番茄生长发育^[19]。本研究选择波峰波长为 836、755、720 和 694 nm 的远红光光源, 经试验研究发现, 与蔬菜类植物相类似, 水稻光受体对光环境的响应在相似的波长范围内。

植物补光多以连续光为主, 但有研究指出, 频繁的远红光脉冲且远红光闪烁的暗期短于 30 min 能够增强远红光反应, 与持续远红光处理相比, 即使是较短的暗处理也能显著促进远红光反应^[20]。本课题组在远红光的间断辐照研究中也进行了初

步探索,远红光的间断辐照促进了盐旱胁迫下水稻种子萌发及幼苗生长,对幼苗干物质质量与叶绿素的积累也有一定作用^[9]。此外,王达菲^[21]研究光的不同间断频率对黄瓜生长发育的影响,刘齐等^[22]对南瓜开展了暗前短暂远红光处理,探索其生长发育情况。上述研究均表明光源的不同间断模式与进入远红光的时间对植物生长发育影响很明显。因此,基于前期试验摸索和已有研究的基础上,本研究采取间断辐照的模式,设置远红光单次辐照时长、间断时长和辐照时段 3 个控制因素研究其对水稻幼苗水分利用效率的影响。

在间断辐照过程中,水稻幼苗光受体感知环境中光强、光质、光向和光周期的变化,将光信号转变为植物内源信号,做出响应并调控自身生长发育。根据已有试验研究发现,远红光在白光或黑暗期全程补光^[23-24],暗前进行短暂远红光补光^[25],均验证了植物在远红光辐照环境下产生一种荫蔽作用,且植物对此作出响应并调控自身产生对荫蔽的适应性。本研究中,通过数据分析、结果对比验证了水稻幼苗在远红光间断辐照环境下表现的对荫蔽的适应性,相比于远红光持续辐照,间断辐照显著增强了光对水稻幼苗水分利用效率的正向刺激。在本研究设计条件下提高水稻幼苗水分利用效率的远红光间断辐照参数最优组合为:单次辐照 19 min,间断 19 min,远红光辐照结束后立刻开始白光辐照。最优间断辐照模式下水稻幼苗水分利用效率模拟结果为 8.8,验证试验实际测得水稻幼苗水分利用效率为 8.6,与预测模型值误差小于 0.3,证明模型结果可靠。

参考文献 References

- [1] Oki T, Kanae S. Global hydrological cycles and world water resources [J]. *Science*, 2006, 313(5790): 1068-1072
- [2] 山仑, 徐萌. 节水农业及其生理生态基础[J]. *应用生态学报*, 1991, 2(1): 70-76
Shan L, Xu M. Water-saving agriculture and its physio-ecological bases [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1991, 2(1): 70-76 (in Chinese)
- [3] 王楠, 高静, 张岁岐, 王根轩. 基于海藻糖的生物节水抗逆农业研究进展[J]. *干旱地区农业研究*, 2018, 36(3): 202-209
Wang N, Gao J, Zhang S Q, Wang G X. Biological water saving and stress resistance in agriculture through trehalose [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2018, 36(3): 202-209 (in Chinese)
- [4] 方燕. 密度和根修剪对冬小麦产量及水分利用效率的影响[D]. 北京: 中国科学院研究生院(教育部水土保持与生态环境研究中心), 2010
Fang Y. Effect of seeding rate and root pruning on grain yield and water use efficiency in winter wheat on Loess Plateau [D]. Beijing: Research

- Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, 2010. (in Chinese)
- [5] 吕剑, 李金武, 郁继华, 颜建明, 冯致, 张国斌, 刘娜, 王俊文. 不同地表覆盖方式对松花菜土壤温度、产量和水分利用的影响[J]. *核农学报*, 2021, 35(8): 1941-1951
Lv J, Li J W, Yu J H, Xie J M, Feng Z, Zhang G B, Liu N, Wang J W. Effects of different surface covering methods on soil temperature, yeild and water utilization of loose-curd cauliflower (*Brassica oleracea var. botrytis* L.) [J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2021, 35(8): 1941-1951 (in Chinese)
- [6] 程铭慧, 范军亮, 张富仓, 王海东, 向友珍. 分根区交替灌溉下水分亏缺对夏玉米生长和水分利用效率的影响[J]. *排灌机械工程学报*, 2018, 36(9): 819-823
Cheng M H, Fan J L, Zhang F C, Wang H D, Xiang Y Z. Effects of water deficit on growth and water use efficiency of summer maize under alternate partial root-zone irrigation [J]. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*, 2018, 36(9): 819-823 (in Chinese)
- [7] 康永亮, 武继承, 郑惠玲, 杨永辉, 潘晓莹, 田志浩. 长期施用保水剂对小麦生长和水分利用的影响[J]. *水土保持通报*, 2020, 40(4): 83-90
Kang Y L, Wu J C, Zheng H L, Yang Y H, Pan X Y, Tian Z H. Effects of long-term application of water absorbent on winter wheat growth and water use efficiency [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2020, 40(4): 83-90 (in Chinese)
- [8] 陈怡昊, 李波, 丰雪, 姚名泽, 魏新光, 赵子龙, 解影. 复合醇抗蒸腾剂喷施模式对黄瓜产量、品质及水分利用效率的影响[J]. *灌溉排水学报*, 2018, 37(6): 9-15
Chen Y H, Li B, Feng X, Yao M Z, Wei X G, Zhao Z L, Xie Y. Impact of androgen applications on yield, quality and water use efficiency of greenhouse cucumber [J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2018, 37(6): 9-15 (in Chinese)
- [9] 朱梅, 栗昕羽, 张天彤, 陈雷. 远红光辐照对盐旱胁迫下水稻萌发及幼苗生长的影响[J]. *中国农业大学学报*, 2021, 26(6): 21-32
Zhu M, Li X Y, Zhang T T, Chen L. Effects of far red light irradiation on the germination and seedling growth of rice under salt and drought stress [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2021, 26(6): 21-32 (in Chinese)
- [10] Bowerman B L, Mason R L, Gunst R F, Hess J L. Statistical design and analysis of experiments with applications to engineering and science [J]. *Technometrics*, 1991, 33(1): 106
- [11] 王俊, 王克鲁, 鲁世强, 李鑫, 欧阳德来, 邱仟, 高鑫, 张开铭. 基于响应面法的 TA5 钛合金工艺参数优化[J]. *稀有金属材料与工程*, 2022, 51(6): 2130-2136
Wang J, Wang K L, Lu S Q, Li X, Ouyang D L, Qiu Q, Gao X, Zhang K M. Optimization of process parameters of TA5 titanium alloy based on response surface methodology [J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2022, 51(6): 2130-2136 (in Chinese)
- [12] 吴卫成, 忻晓庭, 张程程, 刘大群, 卢立志, 胡宏海, 章检明, 张治国, 郭阳. 番薯叶多酚提取工艺优化及其生物活性研究[J]. *中国食品学报*, 2022, 22(5): 189-199
Wu W C, Xin X T, Zhang C C, Liu D Q, Lu L Z, Hu H H, Zhang J M, Zhang Z G, Guo Y. Studies on optimization of extraction process and bioactivity of polyphenols from Sweet Potato Leaves [J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2022, 22(5): 189-199 (in Chinese)
- [13] 姜寒冰, 张玉翠, 任晓东, 要家威, 沈彦俊. 作物水分利用效率研究方法 & 尺度传递研究进展[J]. *中国生态农业学报: 中英文*, 2019, 27(1): 50-59

- Jiang H B, Zhang Y C, Ren X D, Yao J W, Shen Y J. A review of progress in research and scaling-up methods of crop water use efficiency [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture: Chinese and English*, 2019, 27(1): 50-59 (in Chinese)
- [14] Kami C, Lorrain S, Hornitschek P, Fankhauser C. Light-regulated plant growth and development [J]. *Current Topics in Developmental Biology*, 2010, 91: 29-66
- [15] Ballaré C L. Light regulation of plant defense [J]. *Annual Review of Plant Biology*, 2014, 65: 335-363
- [16] Kim D, Son J E. Adding far-red to red, blue supplemental light-emitting diode interlighting improved sweet pepper yield but attenuated carotenoid content [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2022, 13: 1-12
- [17] 盖淑杰, 吴美韩, 张晓娟, 李亚男, 黎倩, 彭露, 周智, 夏茂. 荧光粉激发型远红光LED植物灯对番茄生长的影响研究 [J]. *核农学报*, 2022, 36(10): 2084-2091
- Gai S J, Wu M H, Zhang X J, Li Y N, Li Q, Peng L, Zhou Z, Xia M. Effect of phosphor stimulated far-red LED plant lamp on tomato growth [J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2022, 36(10): 2084-2091 (in Chinese)
- [18] 李雅旻. 远红光影响芥蓝生长发育及硫苷合成代谢的转录组研究 [D]. 广州: 华南农业大学, 2020
- Li Y M. Transcriptomic analysis of the morphology and glucosinolate metabolism in chinese kale with supplemental far-red light [D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2020 (in Chinese)
- [19] 黄薪历. LED补光对番茄幼苗和生菜生长发育、产量及品质的影响 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2017
- Huang X L. Effects of supplemental light on tomato seedlings and lettuce growth and development, yield and quality [D]. Yangling: Northwest A & F University, 2017 (in Chinese)
- [20] 张少蔓. TZP调控植物远红光信号途径的分子机制研究 [D]. 北京: 中国农业大学, 2019
- Zhang S M. The molecular mechanisms underlying TZP regulation of far-red light signaling [D]. Beijing: China Agricultural University, 2019 (in Chinese)
- [21] 王达菲. LED连续光 and 不同频率间歇光对黄瓜幼苗生长及光合荧光特性的影响 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2016
- Wang D F. Effects of Continuous light and intermittent light with different frequencies on growth, photosynthesis and fluorescence of cucumber seedlings using lighting-emitting diodes (LED) [D]. Yangling: Northwest A & F University, 2016 (in Chinese)
- [22] 刘齐, 梅延豪, 李琦, 马宏秀, 武永军, 杨振超. 暗期短暂远红光处理对南瓜幼苗生长、细胞形态和激素含量的影响 [J]. *中国农业科学*, 2020, 53(20): 4248-4258
- Liu Q, Mei Y H, Li Q, Ma H X, Wu Y J, Yang Z C. Effects of end of day far-red light on growth, histiocyte morphology and phytohormones content of pumpkin seedlings [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2020, 53(20): 4248-4258 (in Chinese)
- [23] 刘丹, 刘晓英, 焦学磊, 朱家春, 徐志刚, 唐灿明. 不同LED光源对温室黄瓜幼苗生长和生理特性的影响 [J]. *江苏农业科学*, 2016, 44(8): 238-242
- Liu D, Liu X Y, Jiao X L, Zhu J C, Xu Z G, Tang C M. Effects of different LED light sources on growth and physiological characteristics of cucumber seedlings in greenhouse [J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2016, 44(8): 238-242 (in Chinese)
- [24] Ahres M, Pálmai T, Gierczik K, Dobrev P, Vanková R, Galiba G. The impact of far-red light supplementation on hormonal responses to cold acclimation in barley [J]. *Biomolecules*, 2021, 11(3): 450
- [25] 刘齐. 暗前远红光处理对于南瓜生长和莴笋、茼蒿产量与品质的影响 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2021
- Liu Q. Effects of end-of-day-far-red light treatment on the growth of pumpkin, the yield and quality of asparagus lettuce and chrysanthemum [D]. Yangling: Northwest A & F University, 2021 (in Chinese)

责任编辑: 刘迎春



第一作者简介: 朱梅, 博士, 教授。现任安徽农业大学农业水土工程学科负责人、农业水利工程专业负责人。安徽省学术和技术带头人后备人选, 安徽省农业工程学会理事, 安徽省机器人学会会员。主要从事作物与水分利用关系研究、农业水利工程规划设计、节水灌溉技术应用及推广、智能灌溉装备研发方面的工作。主持或者参与国家自然科学基金3项, 主持安徽省重点研发项目1项。获得省部级科技进步奖3项, 淮河水利委员会科技进步奖2项, 安徽省水利厅科技进步奖2项, 出版专著3部。发表科研论文30余篇, 授权发明专利10件, 软件著作权3件。