

不同遮阴处理下施肥对水稻生长及生理特性的影响

刘迎霞, 娄运生, 王坤, 邢钰媛, 刘健, 苏磊, 汤丽玲

引用本文:

刘迎霞, 娄运生, 王坤, 等. 不同遮阴处理下施肥对水稻生长及生理特性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(12): 2603–2613.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0317>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

不同遮阴处理下施肥对稻田 CH_4 和 N_2O 排放的影响

王坤, 娄运生, 邢钰媛, 刘健

农业环境科学学报. 2021, 40(2): 464–472 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0953>

施用生物炭和硅肥对增温水稻叶片光合及荧光特性的影响

邢钰媛, 娄运生, 王坤, 刘健

农业环境科学学报. 2021, 40(2): 451–463 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0879>

不同生育期臭氧熏蒸对水稻光合作用及生长的影响差异

付娆, 尚博, 张国友, 冯兆忠

农业环境科学学报. 2021, 40(10): 2066–2075 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0139>

氮肥品种对露地蔬菜 NH_3 挥发及经济效益的影响

李晓明, 居静, 夏永秋, 钱晓晴, 颜晓元, 周伟

农业环境科学学报. 2021, 40(6): 1337–1343 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-1482>

稻田氨挥发和水稻产量对增效复合肥减氮施用的响应

朱荣, 柳丽丽, 齐永波, 穆静, 蒋东, 章力干, 邵红建

农业环境科学学报. 2021, 40(9): 1935–1943 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0104>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

刘迎霞, 娄运生, 王坤, 等. 不同遮阴处理下施肥对水稻生长及生理特性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(12): 2603–2613.

LIU Y X, LOU Y S, WANG K, et al. Effects of fertilization on the growth and physiological characteristics of rice under different shading conditions[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2021, 40(12): 2603–2613.



开放科学 OSID

不同遮阴处理下施肥对水稻生长及生理特性的影响

刘迎霞^{1,2}, 娄运生^{1,2*}, 王坤², 邢钰媛², 刘健², 苏磊^{3*}, 汤丽玲³

(1. 南京信息工程大学气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 南京 210044; 2. 南京信息工程大学江苏省农业气象重点实验室, 南京 210044; 3. 中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所, 河北 廊坊 065000)

摘要: 太阳辐射减弱是气候变化的重要特征之一, 研究太阳辐射减弱对水稻生产的影响, 探讨通过施肥能否减缓太阳辐射减弱对水稻生长及生理代谢影响, 具有重要的生产实际意义。采用田间模拟试验探讨了不同生育期遮阴条件下施用复合肥和施用硅肥对水稻生长和光合生理特性的影响。采用3因素3水平正交试验设计, 遮阴设3水平, 即不遮阴(S0, 遮阴率为0)、开花-成熟期遮阴(S1, 遮阴率为64%)和分蘖-成熟期遮阴(S2, 遮阴率为64%); 施用复合肥(N-P₂O₅-K₂O)设3水平, 即100(F1)、200 kg·hm⁻²(F2)和300 kg·hm⁻²(F3); 施用硅肥设3水平, 即不施硅(R0)、钢渣200 kg·hm⁻²(R1)和钢渣400 kg·hm⁻²(R2)。结果表明, 遮阴降低水稻株高、叶面积指数(LAI)和胞间CO₂浓度(Ci), 降低产量。与S0对比, S1、S2分别降低产量43.99%和54.24%。S1增加净光合速率(Pn)、气孔导度(Gs)和蒸腾速率(Tr), 降低叶绿素含量(SPAD值), S2则增加SPAD值和Tr, 降低分蘖数、Pn和Gs; 施用复合肥可提高水稻株高、分蘖数、SPAD值、Pn和Tr, 降低Ci和Gs。与F1相比, F2处理下LAI降低10.13%, F3则增加12.13%。与F2相比, F3处理下株高、分蘖数、SPAD值、Pn增加1.28%、8.21%、4.16%、7.64%, Tr则降低0.64%; 施用硅肥可提高LAI、Pn、Gs和Tr, 降低SPAD值和Ci。与R0相比, R1处理下株高和分蘖数减少1.27%和5.00%, R2处理下则增加0.50%和13.77%。研究认为, 模拟太阳辐射减弱条件下, 施用复合肥300 kg·hm⁻²和硅肥400 kg·hm⁻², 可有效减缓遮阴对水稻植株生长和光合作用的不利影响, 保持较高产量。

关键词: 遮阴; 复合肥; 硅肥; 水稻; 光合作用

中图分类号: X511 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2021)12-2603-11 doi:10.11654/jaes.2021-0317

Effects of fertilization on the growth and physiological characteristics of rice under different shading conditions

LIU Yingxia^{1,2}, LOU Yunsheng^{1,2*}, WANG Kun², XING Yuyuan², LIU Jian², SU Lei^{3*}, TANG Liling³

(1. Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China; 2. Jiangsu Key Laboratory of Agricultural Meteorology, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China; 3. Institute of Geophysical and Geochemical Exploration, Chinese Academy of Geological Sciences, Langfang 065000, China)

Abstract: The weakening of solar radiation is one of the main issues associated with global climate change. It is of great practical importance to understand the effect of weakening solar radiation on rice production, and to explore whether fertilization can mitigate the depressive effects of weaker solar radiation on plant growth and physiological metabolism in rice. A field simulation experiment was

收稿日期: 2021-03-16 录用日期: 2021-06-09

作者简介: 刘迎霞(1997—), 女, 河南商丘人, 硕士研究生, 从事气候变化与农业研究。E-mail: 1844306670@qq.com

*通信作者: 娄运生 E-mail: yunshlou@163.com; 苏磊 E-mail: sulei@igge.cn

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目(DD20190305); 国家自然科学基金项目(41875177, 41375159)

Project supported: The Geological Survey Project of China Geological Survey (DD20190305); The National Natural Science Foundation of China (41875177, 41375159)

performed to investigate the effects of compound fertilizer supply and silicate fertilization on the growth and photosynthetic physiological of rice. A black shading net was used to cover the plant canopy to simulate the weakened solar radiation. An orthogonal experimental design was adopted with three factors and three levels. Shading was set at three levels: no shading (S0, 0% shading rate), shading from flowering to maturity (S1, 64% shading rate), and shading from tillering to maturity (S2, 64% shading rate). NPK compound fertilizer was supplied at three levels: 100 (F1), 200 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (F2), and 300 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (F3), and silicate fertilization was also set at three levels: no silicate fertilizer (R0), slag fertilizer 200 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (R1), and slag fertilizer 400 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (R2). The results showed that shading decreased plant height, leaf area index (LAI), intercellular CO_2 concentration (C_i), and yield of rice. Compared with S0, the yields in the S1 and S2 treatments decreased by 43.99% and 54.24%, respectively. S1 increased tiller numbers, net photosynthetic rate (P_n), stomatal conductance (G_s), and transpiration rate (Tr), but decreased the SPAD value. S2 increased SAPD value and Tr , but decreased tiller numbers, P_n , and G_s compared to S0, while the NPK compound fertilizer supply increased plant height, tiller number, SPAD value, P_n , and Tr , but decreased C_i and G_s . Compared with F1, F2 decreased LAI by 10.13% and F3 increased LAI by 12.13%. Compared with F2, F3 increased plant height, tiller numbers, SPAD value, and P_n (by 1.28%, 8.21%, 4.16%, and 7.64%, respectively), and decreased Tr (0.64%), whereas silicate fertilization increased plant height, tiller numbers, LAI, P_n , Tr , and G_s , but decreased the SPAD value and C_i . Compared with R0, R1 decreased plant height and tiller numbers (1.27% and 5.00%, respectively), while R2 increased plant height and tiller numbers (0.50% and 13.77%, respectively). This study suggests that under reduced solar radiation, applying 300 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ of compound fertilizer and 400 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ of steel slag silicate fertilizer not only ensured higher yield but also clearly mitigated the depressive effects of decreased solar radiation on plant growth and physiological metabolism in rice.

Keywords: shading; compound fertilizer; silicate supply; rice; photosynthesis

水稻是我国主要粮食作物,种植面积达到2 969.4万 hm^2 ,占谷物种植总面积的30.35%,产量达到20 961.4万 t,占谷物总产量的34.16%^[1]。因此,保障水稻生产持续稳定对国家粮食安全意义重大。气候变化导致太阳辐射减少,阴雨寡照及霾天气发生频率增多^[2],我国东部地区太阳辐射也呈减弱趋势^[3]。太阳辐射减弱影响水稻生长、生理、产量和品质等方面。大多数研究认为,光照不足会降低水稻株高、分蘖数、叶面积指数,提高叶绿素含量^[4-7],也有研究认为,遮光网模拟弱光条件下水稻株高增加,叶面积指数呈现先增后减的趋势^[8-10]。大多数研究发现,采用遮阳网进行遮阴处理可降低水稻净光合速率,减少植株干物质积累,影响水稻产量及品质^[11-13]。可见,遮阴显著影响水稻生长及光合作用,但结果不一致,这可能与所用遮阴材料、遮阴强度和持续时间、试验环境条件等有关^[4]。

施肥对水稻植株生长、生理、产量和品质有重要影响。大多数研究认为,施用氮磷钾肥可有效促进水稻生长发育,增强水稻植株光合能力,增加产量,改善稻米品质^[14-15]。施用硅肥可促进水稻植株对氮磷钾元素的吸收利用,有效增加分蘖数、叶面积指数和叶绿素含量,提高净光合速率^[16-18]。

关于遮阴和施肥对水稻生产的影响研究已有报道,但大多基于单一因素或某个生育期,而对不同生育期遮阴、肥料种类和施肥量多因素对水稻生产的耦合影响关注较少。本研究通过大田模拟试验,探讨了

遮阴、肥料种类和施肥量对水稻生长及光合生理特性的影响,为区域水稻可持续生产及应对气候变化提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

田间试验在南京信息工程大学农业气象试验站(32.0°N, 118.8°E)进行,试验时间于2019年6月开始,结束于同年10月。试验站位于亚热带湿润气候区,年均气温15.6℃,降水量1 100 mm。试验田土壤质地为壤质黏土(黏粒含量26.1 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$),土壤类型为潜育型水稻土,土属为灰马肝土,呈弱酸性,pH为6.2(土水比1:1)。土壤中有有机碳、全氮、有效磷、速效钾含量分别为19.4、1.45 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、16.2 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和112.6 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。供试复合肥为高浓度氮磷钾肥(N-P₂O₅-K₂O,俄罗斯产),供试硅肥选用含有效硅(SiO₂)14.21%、铁氧化物(Fe₂O₃)22.89%的钢渣粉,呈弱碱性,pH 8.09(土水比1:10)。试验水稻选用南粳5055,该水稻品种适宜在江苏沿江及苏南地区种植,其特点为株高适中、抗倒伏性强。

1.2 试验设计

试验采用3因素3水平正交试验设计。因素A为遮阴,设3水平:不遮阴(S0,遮阴率0)、开花-成熟期遮阴(S1,遮阴率64%)和分蘖-成熟期遮阴(S2,遮阴率64%);因素B为施复合肥(N-P₂O₅-K₂O),设3水

平:100(F1)、200 kg·hm⁻²(F2)和300 kg·hm⁻²(F3);因素C为施硅肥,设3水平:不施硅(R0)、钢渣200 kg·hm⁻²(R1)和钢渣400 kg·hm⁻²(R2)。遮阴处理采用普通黑色遮阳网覆盖植株冠层,遮阳网与冠层间距离保持0.3 m以上,并随水稻生长及时调整,始终保持冠层通风良好。本次试验设9个处理,每个处理小区面积2 m×2 m=4 m²,按照L₉(3⁴)正交表安排处理(表1)。

表1 正交试验设计方案(L₉(3⁴))Table 1 Schedule of L₉(3⁴) orthogonal test

试验号 Number	因素 Factor		
	A	B	C
1	1(S0)	1(F1)	1(R0)
2	1(S0)	2(F2)	2(R1)
3	1(S0)	3(F3)	3(R2)
4	2(S1)	1(F1)	2(R1)
5	2(S1)	2(F2)	3(R2)
6	2(S1)	3(F3)	1(R0)
7	3(S2)	1(F1)	3(R2)
8	3(S2)	2(F2)	1(R0)
9	3(S2)	3(F3)	2(R1)

水稻于2019年5月10日育苗,6月14日移栽,株行距为20 cm×20 cm。育苗移栽前对大田进行耕作整地,育苗前1 d进行施肥。根据不同施肥处理,每小区将复合肥(N-P₂O₅-K₂O)和硅肥(钢渣)作为基肥施入。在水稻生长期合理灌溉,水层约为10 cm。2019年7月27日至8月12日晒田,晒田结束后灌溉复水,10月4日停止灌溉直至收获。大田病虫害防治根据实际情况处理。

1.3 测定项目及方法

在水稻分蘖期、拔节期、孕穗期、开花期、灌浆期和成熟期,分别测定植株生长及生理指标,测定时间为上午9:00—11:00。

1.3.1 分蘖数及株高

分别在水稻生长前期记录其分蘖数,全生育期记录株高,每个处理小区测定3组,并以3组平均值作为最终测定值。

1.3.2 叶面积指数(LAI)

采用手持叶面积仪(LAI-2000)测定,以3次测量的平均值作为该生育期最终测定值。

1.3.3 叶绿素含量(SPAD)

采用叶绿素仪(SPAD-502)测定叶绿素含量,每小区选取3片剑叶,分别测定叶片上、中、下3个部位,

取其平均数作为该叶片的SPAD值,3组叶片平均值作为最终测定值。

1.3.4 光合参数

采用便携式光合作用仪(Li-6400,美国)测定各生育期水稻叶片净光合速率(Pn)、蒸腾速率(Tr)、气孔导度(Gs)及胞间CO₂浓度(Ci)等,每小区选取3片剑叶,选择晴天时测定,以平均值作为最终数值。

1.3.5 产量

水稻成熟期,选取各小区中心区域0.25 m²作为考种样区,剪下该样区内稻穗并进行脱谷,记录下各小区产量。

1.4 数据处理及分析

采用Microsoft Excel 2016处理试验观测数据及编制计算表格进行极差分析,用SPSS 21.0统计分析软件进行正交试验方差分析。

2 结果与分析

2.1 不同遮阴及施肥对水稻生长的影响

2.1.1 株高

方差分析结果(表2)表明,遮阴在孕穗期、灌浆期对株高有显著影响($P<0.05$),开花期对株高有极显著影响($P<0.01$)。施用复合肥在开花期对株高有显著影响($P<0.05$),施用硅肥在开花期对株高有极显著影响($P<0.01$)。极差分析结果(表3)表明,3因素对株高的影响依次为:遮阴>施用复合肥>施用硅肥。S0条件下株高最高,S2条件下株高最小。与F1相比,F2和F3分别增加了1.23%和2.53%,与R0相比,R1降低1.26%,R2增加0.50%。S0F3R2处理组株高均值最高(图1)。

可见,遮阴处理在多个关键生育期影响水稻株高,而施复合肥和施硅肥仅在开花期显著影响株高,且随着施肥量的增加株高增加明显,但并不能显著改善S2对水稻株高的影响,可在一定程度上缓解S1对株高的影响。

2.1.2 分蘖数

方差分析结果(表2)显示,遮阴、施复合肥和施用硅肥对分蘖数无显著影响($P>0.05$)。极差分析结果(表3)表明,3因素对分蘖数的影响依次为:遮阴>施用硅肥>施用复合肥。S1处理下分蘖数最大,S2处理下分蘖数最小。与F1相比,F2和F3分别增加0.61%和8.86%,与R0相比,R1降低4.77%,R2增加13.77%,S1F3R2处理显著增加水稻分蘖数(图1)。

可见,施复合肥F3和施硅肥R2可增加水稻分蘖

数,由于S1遮阴处理时期为开花-分蘖期,此时遮阴对分蘖几乎无影响,因此,S1F3R2处理分蘖数增加可能的原因在于处理中所施用的复合肥和硅肥。

2.1.3 叶面积指数(LAI)

方差分析结果(表2)表明,遮阴在水稻分蘖期、孕穗期对LAI有显著影响($P<0.05$),在成熟期对LAI有极显著影响($P<0.01$)。复合肥对水稻叶片LAI无显著影响($P>0.05$),硅肥在成熟期对LAI具有极显著影响($P<0.01$)。极差分析结果(表3)表明,3因素对全生育期LAI的影响程度依次为:遮阴>施用复合肥>施用硅肥。与S0的LAI相比,S1和S2分别降低20.52%和43.32%,与F1的LAI相比,F2降低9.08%,F3增加12.43%,与R0的LAI相比,R1和R2分别增加1.42%和7.54%。最适处理组为S0F3R2(图1)。

可见,LAI随着施肥量的增加而变大,遮阴在水稻生长前期和末期对LAI有显著影响。因此S2条件下LAI降幅较大,该处理下施肥并不能缓解LAI的降低。

2.1.4 叶片叶绿素相对含量(SPAD值)

方差分析结果(表2)显示,遮阴在分蘖期对SPAD有极显著影响($P<0.01$),施用复合肥在拔节期对SPAD有显著影响($P<0.05$),施用硅肥对SPAD值无显著影响($P>0.05$)。极差分析结果(表3)表明,3因素对SPAD的影响程度依次为:施用复合肥>施用硅肥>遮阴,其中S2处理下SPAD值最高,与F1相

比,F2和F3分别增加6.25%和10.67%,与R0相比,R1和R2分别降低5.08%和9.43%,S2F3R0为最适处理(图1)。

遮阴处理下(64%),水稻叶片SPAD随着遮阴时间延长而增加,原因在于遮阴下叶片光照不足,光合能力减弱,一定程度上延缓了叶片衰老,从而使SPAD值较高。氮素水平与SPAD值呈正相关,因此,SPAD值随复合肥施用量增加而增加。随着施硅肥量的增加SPAD值降低,施用硅肥不能显著提高SPAD值。

2.2 不同遮阴及施肥对水稻生理特性的影响

2.2.1 净光合速率(Pn)

方差分析结果(表4)表明,遮阴在拔节期、开花期对Pn有极显著影响($P<0.01$);施用复合肥在拔节期对Pn产生极显著影响($P<0.01$),在开花期对Pn有显著影响($P<0.05$);施用硅肥在拔节期和开花期对Pn有显著影响($P<0.05$)。极差分析结果(表5)表明,3因素对Pn的影响程度为:施用硅肥>施用复合肥>遮阴。S1条件下Pn值最大,S2条件下Pn值最小。与F1相比,F2和F3分别增加5.28%和13.33%,与R0相比,R1和R2分别增加12.75%和16.02%,S1F3R2为最适处理组(图2)。

Pn随复合肥、硅肥的施用量增加而增大,说明施用复合肥和硅肥在一定程度上增强水稻叶片的光合能力。S2处理降低Pn值,而S1处理下Pn值增加,说明开花-灌浆时期,外界环境温度较高时,适度遮阴

表2 水稻各生育期生长指标方差分析(F值)

Table 2 Variance analysis of growth indexes in different growth periods of rice (F value)

生长指标 Growth indexes	因素 Factor	生育期 Growth period					
		分蘖期 Tillering period	拔节期 Elongation period	孕穗期 Booting period	开花期 Blooming period	灌浆期 Pustulation period	成熟期 Maturation period
株高	A 遮阴	1.62	3.58	38.77*	171.54**	21.98*	5.47
	B 施复合肥	8.20	1.97	5.12	23.06*	0.37	0.23
	C 施硅肥	6.04	2.56	1.08	134.79**	4.75	2.73
分蘖数	A 遮阴	3.20	—	—	—	—	—
	B 施复合肥	0.19	—	—	—	—	—
	C 施硅肥	0.61	—	—	—	—	—
叶面积指数 (LAI)	A 遮阴	22.78*	13.90	34.39*	6.57	3.09	113.05**
	B 施复合肥	0.60	0.14	7.05	1.04	3.15	0.65
	C 施硅肥	2.02	1.23	0.02	0.07	0.10	123.65**
叶绿素相对含量 (SPAD值)	A 遮阴	163.69**	7.94	4.45	1.66	0.35	7.58
	B 施复合肥	3.28	19.90*	0.47	0.73	18.35	0.23
	C 施硅肥	0.44	7.12	3.56	0.84	15.82	0.02

注:* $P<0.05$; ** $P<0.01$ 。下同。
Note: * indicates $P<0.05$; ** indicates $P<0.01$. The same below.

表3 水稻全生育期生长指标均值极差分析

Table 3 Range analysis of the average growth indexes in the whole growth period of rice

试验号 Number	因素 Factors			株高 Height/cm	分蘖数 Tiller number	LAI	SPAD 值 SPAD value
	A	B	C				
1	S ₀	F1	R0	93.72	13.70	2.78	43.00
2	S ₀	F2	R1	94.44	14.70	3.03	43.30
3	S0	F3	R2	97.22	15.90	3.38	42.90
4	S1	F1	R1	88.67	13.80	2.32	39.92
5	S1	F2	R2	90.61	17.10	2.11	40.67
6	S1	F3	R0	92.08	17.90	2.88	46.79
7	S2	F1	R2	88.13	12.20	2.06	39.42
8	S2	F2	R0	88.78	8.10	1.36	46.02
9	S2	F3	R1	88.03	9.30	1.78	45.69
株高	K ₁	285.39	270.52	274.58			
	K ₂	271.36	273.83	271.14			
	K ₃	264.94	277.34	275.97			
	$\bar{K}_1$	95.13	90.17	91.53			
	$\bar{K}_2$	90.45	91.28	90.38			
	$\bar{K}_3$	88.31	92.45	91.99			
	R	6.81	2.27	1.61			
分蘖数	K ₁	44.20	39.60	39.70			
	K ₂	48.70	39.80	37.80			
	K ₃	29.60	43.10	45.10			
	$\bar{K}_1$	14.74	13.20	13.22			
	$\bar{K}_2$	16.24	13.28	12.59			
	$\bar{K}_3$	9.87	14.37	15.04			
	R	6.37	1.17	2.44			
LAI	K ₁	9.20	7.16	7.03			
	K ₂	7.31	6.51	7.13			
	K ₃	5.21	8.05	7.56			
	$\bar{K}_1$	3.07	2.39	2.34			
	$\bar{K}_2$	2.44	2.17	2.38			
	$\bar{K}_3$	1.74	2.68	2.52			
	R	1.33	0.51	0.18			
SPAD 值	K ₁	129.10	122.30	135.80			
	K ₂	127.38	129.90	128.90			
	K ₃	131.13	135.40	123.00			
	$\bar{K}_1$	43.04	40.77	45.26			
	$\bar{K}_2$	42.47	43.32	42.96			
	$\bar{K}_3$	43.71	45.12	40.99			
	R	1.25	4.35	4.27			

注:K_i(i=1,2,3)为各因素水平之和, $\bar{K}_i$ (i=1,2,3)为各因素水平均值,R为极差。下同。

Note:K_i(i=1,2,3) is the sum of the level of each factor, $\bar{K}_i$ (i=1,2,3) is the average level of each factor, and R is the range. The same below.

反而能够优化光合条件,增强水稻生长活力。

2.2.2 气孔导度(Gs)

方差分析结果(表4)显示,遮阴在孕穗期对Gs有显著影响($P<0.05$),施用复合肥和施用硅肥在各生育期对Gs均无显著影响($P>0.05$)。极差分析结果(表5)

表明,3因素对Gs的影响程度为:遮阴>施用复合肥>施用硅肥。S2条件下Gs值最低,与F1相比,F2和F3分别降低2.44%和12.20%,与R0相比,R1和R2分别增加8.11%和5.41%。S1F1R1为最适处理(图2)。

S2处理下Gs降低明显,而S1处理对Gs影响较

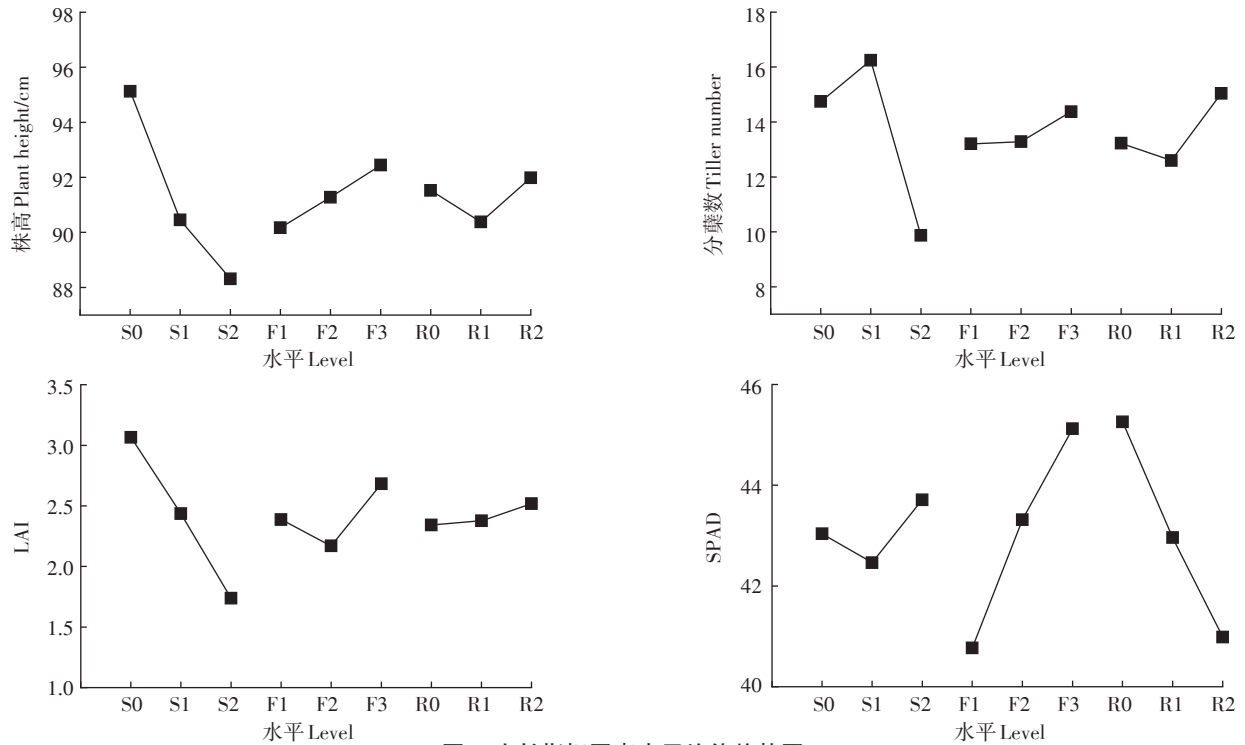


图1 生长指标因素水平均值趋势图
Figure 1 Factors level trend diagram of growth indexes

表4 水稻各生育期光合参数方差分析(F值)

Table 4 Variance analysis of photosynthetic parameters in different growth periods of rice(F value)

光合参数 Photosynthetic parameter	因素 Factor	生育期 Growth period					
		分蘖期 Tellingering period	拔节期 Elongation period	孕穗期 Booting period	开花期 Blooming period	灌浆期 Pustulation period	成熟期 Maturation period
净光合速率 Pn	A 遮阴	1.49	235.58**	0.77	170.73**	12.29	7.64
	B 施复合肥	3.38	205.01**	0.19	51.99*	1.96	1.77
	C 施硅肥	11.66	42.15*	0.31	37.33*	4.95	4.60
气孔导度 Gs	A 遮阴	0.36	9.13	42.83*	1.11	6.19	2.33
	B 施复合肥	6.95	2.54	9.96	2.44	1.30	2.08
	C 施硅肥	5.55	1.21	6.59	1.18	3.60	0.35
胞间 CO ₂ 浓度 Ci	A 遮阴	8.96	1.07	48.69*	2.37	2.73	0.94
	B 施复合肥	2.36	0.60	5.05	4.14	0.62	0.34
	C 施硅肥	1.74	1.30	2.29	3.49	0.51	0.27
蒸腾速率 Tr	A 遮阴	2.01	2.77	5.83	3.34	6.03	4.06
	B 施复合肥	2.04	1.24	3.76	0.33	2.16	2.26
	C 施硅肥	2.21	0.59	3.02	0.33	4.06	0.55

小,可见光照不足主要在水稻生长前期对Gs影响较大。

2.2.3 胞间CO₂浓度(Ci)

方差分析结果(表4)显示,遮阴在孕穗期对Ci有显著影响($P<0.05$),施用复合肥和施用硅肥在各生育期均无显著影响($P>0.05$)。极差分析结果(表5)

表明,3因素对Ci的影响程度为:遮阴>施用复合肥>施用硅肥。S0条件下Ci最高,S2条件下Ci最低。与F1相比,F2和F3分别降低了3.41%和4.51%,与R0相比,R1和R2分别降低0.38%和6.35%。S0F1R0为最适处理(图2)。Ci随着遮阴时间延长而降低,同时随施肥量增加而降低,施用复合肥和硅肥并不能改善

表5 水稻全生育期光合参数均值极差分析

Table 5 Range analysis of the average photosynthetic parameters in the whole growth period of rice

试验号 Number	因素 Factor			Pn/ ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	Gs/ ($\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	Ci/ ($\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$)	Tr/ ($\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)
	A	B	C				
1	S0	F1	R0	10.81	0.40	344.20	5.22
2	S0	F2	R1	13.57	0.42	324.23	5.98
3	S0	F3	R2	14.84	0.38	320.44	6.11
4	S1	F1	R1	13.41	0.48	336.02	6.17
5	S1	F2	R2	13.97	0.46	327.20	6.29
6	S1	F3	R0	13.64	0.38	321.91	5.76
7	S2	F1	R2	12.67	0.35	312.71	6.13
8	S2	F2	R0	11.32	0.31	307.65	5.70
9	S2	F3	R1	13.34	0.31	305.75	5.98
Pn	K_1	39.22	36.90	35.78			
	K_2	41.02	38.86	40.32			
	K_3	37.33	41.82	41.48			
	$\bar{K}_1$	13.07	12.30	11.92			
	$\bar{K}_2$	13.68	12.95	13.44			
	$\bar{K}_3$	12.44	13.94	13.83			
	R	1.23	1.64	1.90			
Gs	K_1	1.20	1.23	1.10			
	K_2	1.32	1.19	1.21			
	K_3	0.97	1.08	1.19			
	$\bar{K}_1$	0.40	0.41	0.37			
	$\bar{K}_2$	0.44	0.40	0.40			
	$\bar{K}_3$	0.32	0.36	0.39			
	R	0.12	0.05	0.04			
Ci	K_1	988.86	992.92	973.75			
	K_2	985.13	959.08	966.00			
	K_3	926.11	948.10	960.35			
	$\bar{K}_1$	329.61	330.97	329.62			
	$\bar{K}_2$	328.38	319.70	328.38			
	$\bar{K}_3$	308.70	316.03	308.70			
	R	20.92	14.94	4.47			
Tr	K_1	17.31	17.53	16.68			
	K_2	18.23	17.97	18.14			
	K_3	17.82	17.86	18.54			
	$\bar{K}_1$	5.77	5.84	5.56			
	$\bar{K}_2$	6.08	5.99	6.05			
	$\bar{K}_3$	5.94	5.95	6.18			
	R	0.30	0.15	0.62			

遮阴对Ci的影响。

2.2.4 蒸腾速率(Tr)

方差分析结果表明(表4),遮阴、施用复合肥和施用硅肥在各个生育期对Tr均无显著影响($P>0.05$)。极差分析结果显示(表5),3因素对Tr影响程度为,施用硅肥>遮阴>施用复合肥。S1条件下Tr最高,与F1相比,F2和F3分别增加2.57%和1.88%,与

R0相比,R1和R2分别增加8.81%和11.15%,S1F2R2为最适处理组(图2)。S1遮阴处理下Pn、Gs增加,因此Tr最大,可见,S1遮阴处理利于植株进行光合作用。

2.3 不同遮阴及施肥对水稻产量的影响

方差分析结果(表6)表明,遮阴、施复合肥和施硅肥对产量均无显著影响。极差分析结果(表7)显

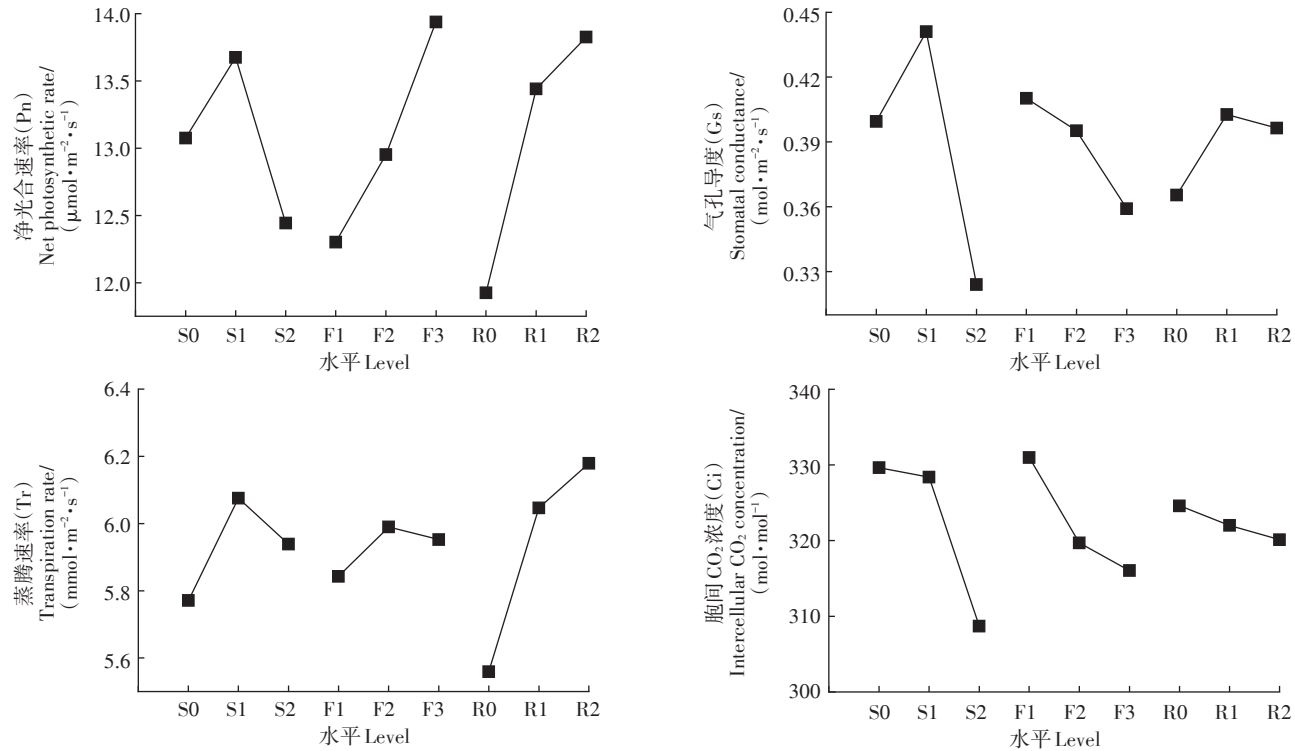


图2 光合参数因素水平均值趋势图

Figure 2 Factors level trend diagram of photosynthetic parameters

示,3因素对产量的影响依次为:遮阴>施硅肥>施复合肥,与S0相比,S1、S2遮阴条件下产量分别降低44.02%和54.29%,与R0相比,R1、R2处理下产量分别增加27.15%和13.97%,施复合肥处理下水稻产量相差较小。S0F1R1为最适处理组,S1处理下施用复合肥F1和硅肥R1增产效果明显(表7),S2处理下施用复合肥F3和施硅肥R2增产效果明显(图3)。说明不遮阴、开花-成熟期遮阴处理下少量配施复合肥和硅肥对水稻产量形成较为有利,全生育期遮阴处理下配施较多复合肥和硅肥可增产。

3 讨论

光照影响植物外部形态变化^[19]。本研究中,遮阴抑制水稻株高和LAI,随着遮阴时间增长抑制加强,但也有研究认为,遮阴使水稻株高和LAI增加^[11],这与本研究结果相悖,原因在于光照强度变化显著影响

叶片生长,但不同品种对弱光反应不同^[20],弱光胁迫不利于本试验供试水稻品种株高增加;此外,遮阴程度及时间对结果也有较大影响^[21],本研究遮阴率达64%,遮阴时间从水稻营养生长期持续到生殖生长

表7 水稻产量极差分析

Table 7 Range analysis of the rice yield

试验号 Number	因素 Factor			产量 Yield/(t·hm ⁻²)
	A	B	C	
1	S0	F1	R0	12.25
2	S0	F2	R1	13.79
3	S0	F3	R2	12.81
4	S1	F1	R1	8.75
5	S1	F2	R2	6.39
6	S1	F3	R0	6.61
7	S2	F1	R2	7.00
8	S2	F2	R0	4.11
9	S2	F3	R1	6.67
产量 K ₁	38.85	28.00	22.97	
K ₂	21.75	24.28	29.21	
K ₃	17.77	26.09	26.19	
$\bar{K}_1$	12.95	9.33	7.66	
$\bar{K}_2$	7.25	8.09	9.74	
$\bar{K}_3$	5.92	8.70	8.73	
R	5.70	0.64	2.08	

表6 水稻产量方差分析(F值)

Table 6 Variance analysis of rice yield(F value)

因素 Factor	产量 Yield
遮阴	100.27
施复合肥	2.77
施硅肥	7.80

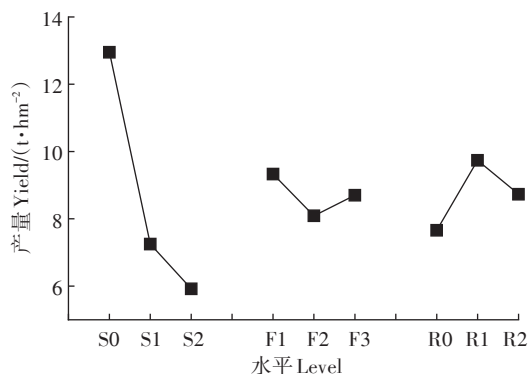


图3 产量因素水平均值趋势图

Figure 3 Factors level trend diagram of yield

期,因此对水稻生长影响更大。本研究中,分蘖-成熟期遮阴(遮阴率64%)条件下,水稻分蘖数明显降低,且施肥处理并未显著改善这一现象,原因在于全生育期遮阴作用于水稻营养生长关键时期,对水稻形态发育影响较大^[22]。光照与水稻叶绿素含量密切相关,但遮阴对叶绿素含量的影响结果不一致^[23-24]。本研究中,开花-成熟期遮阴与对照(不遮阴)相比SPAD值降低,但分蘖-成熟期遮阴SPAD值增加。可见,SPAD值增减与遮阴程度有关^[4],遮阴持续时间长,叶片衰老速度慢,叶片颜色较深,叶绿素含量较高。尽管分蘖-成熟期遮阴条件下SPAD值增加,但Pn降低也最多,因此,光合能力并未增强。本研究发现,施硅肥对SPAD值无显著影响,这与前人研究结果一致^[25],施用复合肥可增加水稻SPAD值,且随着施肥量增加,SPAD值明显增加,这是由于氮素营养与叶绿素含量显著正相关^[24],施加复合肥可显著提高氮素水平,从而增加SPAD值。

光照条件的改变可显著影响植物叶片光合作用以及植株对营养物质的吸收分配过程,进而影响作物产量及品质^[26-28]。本研究中,与不遮阴相比,分蘖-成熟期遮阴降低Pn和Gs,而开花-成熟期遮阴提高Pn、Gs和Tr。原因在于全生育期遮阴影响水稻营养生长和生殖生长,稻株长期光照不足,不利于光合作用^[29],因此Pn降低,而Gs的功能在于保证光合碳同化能力,且最小化水分散失,其与光合速率通常表现为显著正相关^[30],随着Pn的降低也表现为减小的趋势;此外,水稻开花-成熟期处于夏季高温期,遮阴处理降低冠层温度,优化光合条件,使叶绿体中的类囊体形成密集捕获光能的结构,增强光能在类囊体的传输能力^[22],从而提高了Pn、Gs和Tr。本研究发现施用复合肥和施用硅肥均能增加Pn和Tr,施用硅肥可增加Gs,

表明遮阴处理下,施加适量复合肥和硅肥可改善稻株光合性状,一定程度上缓解遮阴带来的不利影响。本研究中,遮阴、施用复合肥(与F1相比)和施用硅肥均会降低Ci。这是由于Ci大小取决于周围空气CO₂浓度、叶片气孔导度、叶肉导度和叶肉细胞光合活性,受环境影响较大^[31]。

本研究发现,遮阴、施用复合肥和硅肥对水稻生长及生理特性有显著影响,分蘖-成熟期遮阴对水稻生长及生理特性影响较大,该处理下产量降幅更大,而施复合肥和硅肥可使产量增加。开花-成熟期遮阴处理下少量配施复合肥和硅肥利于产量形成,这是由于配施硅肥能促进稻株对复合肥中氮磷钾元素的吸收利用^[17],提高复合肥利用率,从而促进产量形成。全生育期遮阴处理下则需要配施较多复合肥和硅肥,可适当缓解遮阴对产量的影响。

综上,本研究发现,施用适量复合肥和硅肥可改善遮阴对水稻生长发育及产量形成的不利影响,开花-成熟期遮阴(遮阴率64%)处理下改善效果较好。因此,施肥在一定程度上可缓解太阳辐射减弱对水稻生长及光合生理的不利影响,保持较高产量。

4 结论

(1)遮阴在水稻关键生育期显著影响株高、LAI、SPAD值、Pn、Gs和Ci。分蘖-成熟期遮阴(遮阴率64%)降低株高、分蘖数、LAI、Pn、Gs和Ci,提高SPAD值;开花-成熟期遮阴(遮阴率64%)提高Pn、Gs和Tr。

(2)施用复合肥可提高水稻株高、分蘖数、LAI、SPAD值、Pn、Tr和Gs;施用硅肥可增加LAI、Pn、Gs和Tr,降低SPAD值。株高、分蘖数、LAI、Pn和Tr均随施肥量的增加而增加,遮阴处理下(遮阴率64%)施复合肥和硅肥可保证产量。

(3)综合平衡法结果显示,影响水稻生长及生理特性的因素依次为:遮阴>施复合肥>施硅肥。太阳辐射减弱背景下,施用复合肥300 kg·hm⁻²和钢渣硅肥400 kg·hm⁻²可促进水稻生长发育,保证较高产量。未来将进一步研究施肥种类和施肥量在太阳辐射减弱条件下对水稻生产的影响。

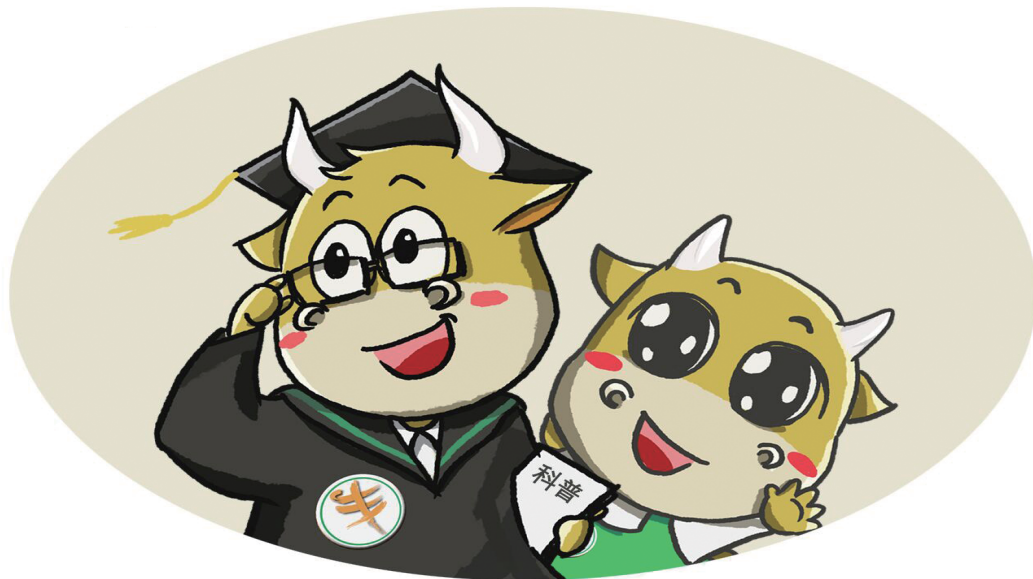
参考文献:

- [1] 国家统计局. 2020年中国统计年鉴[M]. 北京:中国统计出版社, 2020. National Bureau of Statistics. China statistical yearbook 2020 [M]. Beijing: China Statistics Press, 2020.
- [2] CHEN H, LI Q P, ZENG Y L, et al. Effect of different shading materi-

- als on grain yield and quality of rice[J]. *Scientific Reports*, 2019, 9(1): 9992.
- [3] LI X, WAGNER F, PENG W, et al. Reduction of solar photovoltaic resources due to air pollution in China[J]. *PNAS*, 2017, 114(45): 11867–11872.
- [4] 王惠哲, 庞金安, 李淑菊, 等. 弱光对春季温室黄瓜生长发育的影响[J]. 华北农学报, 2005, 20(1): 55–58. WANG H Z, PANG J A, LI S J, et al. Effect of weak light on growth and development of cucumber in greenhouse in spring[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2005, 20(1): 55–58.
- [5] 任万军, 杨文钊, 徐精文, 等. 始穗弱光对不同基因型水稻叶片特性的影响[J]. 四川农业大学学报, 2002, 20(3): 205–208. REN W J, YANG W N, XU J W, et al. Effects of low light intensity on leaf characteristics of different rice genotypes[J]. *Journal of Sichuan Agricultural University*, 2002, 20(3): 205–208.
- [6] 刘奇华, 周学标, 杨连群, 等. 生育前期遮光对水稻灌浆期剑叶生理特性及籽粒生长的影响[J]. 应用生态学报, 2009, 20(9): 2135–2141. LIU Q H, ZHOU X B, YANG L Q, et al. Effects of shading at early growth stage on physiological characteristics of flag leaf and grain growth of rice at grain filling stage[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2009, 20(9): 2135–2141.
- [7] 李汶珊, 曾发梁, 王雪莹, 等. 分蘖期遮光对水稻气体交换和叶绿素荧光参数的影响[J]. 西南农业学报, 2018, 31(2): 289–295. LI W S, ZENG F L, WANG X Y, et al. Effects of shading at tillering stage on gas exchange and chlorophyll fluorescence parameters of rice[J]. *Journal of Southwest Agriculture*, 2018, 31(2): 289–295.
- [8] 刘博, 韩勇, 解文孝, 等. 灌浆结实期弱光对水稻产量、生理及品质的影响[J]. 中国稻米, 2008(5): 36–40. LIU B, HAN Y, XIE W X, et al. Effects of weak light on yield, physiology and quality of rice during grain filling and setting[J]. *China Rice*, 2008(5): 36–40.
- [9] 董明辉, 惠锋, 顾俊荣, 等. 灌浆期不同光强对水稻不同粒位籽粒品质的影响[J]. 中国生态农业学报, 2013, 21(2): 164–170. DONG M H, HUI F, GU J R, et al. Effects of different light intensities at grain filling stage on grain quality at different grain positions of rice[J]. *Chinese Journal of Ecological-Agriculture*, 2013, 21(2): 164–170.
- [10] THANGARAJ M, SIVASUBRAMANIAN V. Effect of low light intensity on growth and productivity of irrigated rice (*Oryza sativa* L.) grown in Cauvery delta region[J]. *Madras Agricultural Journal*, 1990, 77(5/6): 220–224.
- [11] 闫萌萌, 闫平, 吕守义, 等. 遮光对水稻生长发育及稻米品质的影响[J]. 农学报, 2019, 9(4): 22–25. YAN M M, YAN P, LÜ S Y, et al. Effects of shading on rice growth and quality[J]. *Journal of Agriculture*, 2019, 9(4): 22–25.
- [12] 杨东, 段留生, 谢华安, 等. 不同生育期弱光对超级稻Ⅱ优航2号产量及品质的影响[J]. 福建农业学报, 2013, 28(2): 107–112. YANG D, DUAN L S, XIE H A, et al. Effects of weak light at different growth stages on yield and quality of super rice Ⅱ Youhang 2[J]. *Fujian Journal of Agricultural Sciences*, 2013, 28(2): 107–112.
- [13] 杨东, 段留生, 谢华安, 等. 花前光照亏缺对水稻物质积累及生理特性的影响[J]. 中国生态农业学报, 2011, 19(2): 347–352. YANG D, DUAN L S, XIE H A, et al. Effects of pre anthesis light deficit on matter accumulation and physiological characteristics of rice[J]. *Chinese Journal of Ecological-Agriculture*, 2011, 19(2): 347–352.
- [14] 孙爱华, 朱士江, 张忠学. 不同灌溉模式下氮磷钾配比及追施比例对水稻生长特征及产量的影响[J]. 灌溉排水学报, 2016, 35(10): 31–35, 63. SUN A H, ZHU S J, ZHANG Z X. Effects of nitrogen, phosphorus and potassium ratio and topdressing ratio on growth characteristics and yield of rice under different irrigation modes[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2016, 35(10): 31–35, 63.
- [15] YE T H, LI Y W, ZHANG J L, et al. Nitrogen, phosphorus, and potassium fertilization affects the flowering time of rice (*Oryza sativa* L.)[J]. *Global Ecology and Conservation*, 2019, 20(753).
- [16] 邢钰媛, 姜运生, 王坤, 等. 施用生物炭和硅肥对增温水稻叶片光合及荧光特性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(2): 451–463. XING Y Y, LOU Y S, WANG K, et al. Effects of biochar and silicon fertilizer on photosynthetic and fluorescence characteristics of warming rice leaves[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2021, 40(2): 451–463.
- [17] LIU Q H, MA H, SUN Z W, et al. Translocation efficiencies and allocation of nitrogen, phosphorous and potassium in rice as affected by silicon fertilizer under high daytime temperature[J]. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 2019, 205(2): 188–201.
- [18] 王圣毅, 陈林, 李丽, 等. 硅肥对膜下滴灌水稻生长发育及产量的影响[J]. 中国稻米, 2016, 22(5): 85–88. WANG S Y, CHEN L, LI L, et al. Effect of silicon fertilizer on growth and yield of rice under drip irrigation under plastic film[J]. *China Rice*, 2016, 22(5): 85–88.
- [19] 何静雯, 明萌, 卢丹, 等. 弱光胁迫对植物生理特性影响的研究进展[J]. 中国农学通报, 2018, 34(6): 123–130. HE J W, MING M, LU D, et al. Research progress on effects of low light stress on plant physiological characteristics[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2018, 34(6): 123–130.
- [20] 戈长水, 应武, 陈慧哲, 等. 遮阴对2个水稻品种叶片生理生态学特征的影响[J]. 浙江农业科学, 2012, 7: 927–931, 935. GE C S, YING W, CHEN H Z, et al. Effects of shading on leaf physiological and ecological characteristics of two rice varieties[J]. *Journal of Zhejiang Agricultural Sciences*, 2012, 7: 927–931, 935.
- [21] 李睿, 姜运生, 张震, 等. 节水灌溉和遮光强度对水稻生长发育的耦合影响[J]. 中国农业气象, 2018, 39(11): 702–714. LI R, LOU Y S, ZHANG Z, et al. Coupling effects of water-saving irrigation and shading intensity on growth and development for rice[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2018, 39(11): 702–714.
- [22] 蔡昆争, 骆世明. 不同生育期遮光对水稻生长发育和产量形成影响应用[J]. 生态学报, 1999, 10(2): 193–196. CAI K Z, LUO S M. Effects of shading at different growth stages on growth and yield formation of rice[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 1999, 10(2): 193–196.
- [23] 姜楠, 陈温福. 遮光对不同穗型粳稻叶片光合特性和叶绿体超微结构的影响[J]. 沈阳农业大学学报, 2015, 46(1): 1–6. JIANG N, CHEN W F. Effects of shading on photosynthetic characteristics and chloroplast ultrastructure of different panicle types of japonica rice[J]. *Journal of Shenyang Agricultural University*, 2015, 46(1): 1–6.
- [24] 何俊俊, 杨京平, 杨虎, 等. 光照及氮素水平对水稻冠层叶片SPAD值动态变化的影响[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2014,

- 40(5):495-504. HE J J, YANG J P, YANG H, et al. Effects of light and nitrogen levels on dynamic changes of SPAD value in rice canopy leaves[J]. *Journal of Zhejiang University (Agriculture and Life Sciences Edition)*, 2014, 40(5):495-504.
- [25] 张万洋, 李小坤. 水稻硅营养及硅肥高效施用技术研究进展[J]. 中国土壤与肥料, 2020, 4:231-239. ZHANG W Y, LI X K. Research progress of silicon nutrition and silicon fertilizer efficient application technology in rice[J]. *Soils and Fertilizers Sciences in China*, 2020, 4: 231-239.
- [26] 郑泽华, 娄运生, 左慧婷, 等. 施硅对夜间增温条件下水稻生长和产量的影响[J]. 中国农业气象, 2018, 39(6):390-397. ZHENG Z H, LOU Y S, ZUO H T, et al. Effect of silicate application on rice physiological properties under nighttime warming[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2018, 39(6):390-397.
- [27] 杜彦修, 季新, 张静, 等. 弱光对水稻生长发育影响研究进展[J]. 中国生态农业学报, 2013, 21(11):5-15. DU Y X, JI X, ZHANG J, et al. Research progress on the impacts of low light intensity on rice growth and development[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2013, 21(11):5-15.
- [28] 王坤, 娄运生, 邢钰媛, 等. 不同遮阴处理下施肥对稻田 CH_4 和 N_2O 排放的影响[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(2):464-472. WANG K, LOU Y S, XING Y Y, et al. Effects of fertilization on CH_4 and N_2O emissions from rice yield under different shading treatments [J]. *Journal of Agricultural Environmental Sciences*, 2021, 40(2): 464-472.
- [29] 陶优生, 秦建权, 张运波, 等. 遮光或弱光对水稻生理特性、产量形成及品质的影响[J]. 农业科技通讯, 2012, 5:115-121. TAO Y S, QIN J Q, ZHANG Y B, et al. Effects of shading or weak light on physiological characteristics, yield formation and quality of rice[J]. *Bulletin of Agricultural Science and Technology*, 2012, 5:115-121.
- [30] MEDLYN B E, DUURSMA R A, EAMUS D, et al. Recording the optimal and empirical approaches to modelling stomatal conductance[J]. *Global Change Biology*, 2011, 17(6):2134-2144.
- [31] 袁嫚嫚, 朱建国, 刘钢, 等. 不同天气水稻光合日变化对大气 CO_2 浓度和温度升高的响应——FACE 研究[J]. 生态学报, 2018, 38(6):1897-1907. YUAN M M, ZHU J G, LIU G, et al. Response of diurnal variation of rice photosynthesis to atmospheric CO_2 concentration and temperature rise in different weather: FACE study[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(6):1897-1907.

畅享科技 倡响科学



农环科普将以温暖人心之力
传播科技之光

——农业环境科学微平台 小鱼