

周 欣, 姜运生, 杜泽云, 等. 夜间增温下生物炭配施硅肥对水稻产量和品质的影响[J]. 江苏农业科学, 2023, 51(11): 80–87.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2023.11.011

夜间增温下生物炭配施硅肥对水稻产量和品质的影响

周 欣^{1,2}, 姜运生^{1,2}, 杜泽云², 高安妮², 郭峻泓², 潘德丰²

(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, 江苏南京 210044;

2. 南京信息工程大学江苏省农业气象重点实验室, 江苏南京 210044)

摘要:通过田间模拟增温试验, 研究生物炭配施硅肥对夜间增温下江苏沿江地区单季稻产量和品质的影响。采用 3 因素 3 水平正交试验设计, 用铝箔反光膜夜间覆盖水稻植株冠层模拟夜间增温(19:00 至次日 06:00), 增温设 3 水平, 即 W0(常温对照, 不覆盖铝箔膜)、W1(覆盖 5 mm 铝箔膜)和 W2(覆盖 11 mm 铝箔膜); 生物炭施用量设 3 水平, 即 B0(对照, 不施生物炭)、B1(施 10 t/hm² 生物炭)和 B2(施 25 t/hm² 生物炭); 硅肥施用量设 3 水平, 即 Si0(对照, 不施硅)、Si1(钢渣粉, 200 kg/hm² SiO₂)和 Si2(矿粉, 200 kg/hm² SiO₂)。结果表明, 夜间增温明显降低水稻株高, 提高叶面积指数(LAI)和叶绿素含量(SPAD 值), 显著降低水稻有效穗数、每穗粒数和产量, 减产率 19.66%~28.73%。施生物炭显著提高有效穗数, 结实率和产量, 提高蛋白质含量。施硅明显提高水稻每穗粒数和蛋白质含量。从产量和营养效益综合来看, 试验最佳处理组合为 W1B2Si2, 即夜间增温下稻田施用 25 t/hm² 生物炭和 200 kg/hm² 矿粉, 可明显提高产量、改善品质。

关键词:夜间增温; 生物炭; 硅肥; 水稻; 产量; 品质

中图分类号:S511.06 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2023)11-0080-07

气候变暖是气候变化的显著特征之一, 将加剧粮食生产的不确定性, 威胁国家粮食安全^[1]。气候变暖表现为昼夜不对称增温, 即夜间气温增幅大于白天^[2-3]。气候变暖引起土壤湿度、温度及养分状况等变化, 使作物生育期缩短, 干物质积累量下降, 影响作物产量及品质^[4-7]。通过模拟增温试验发现能降低水稻植株叶片净光合速率, 提高灌浆期荧光耗散量, 增强呼吸作用, 降低干物质积累和产量^[8-9]。模拟增温对水稻产量和品质的不同影响, 可能与不同种植制度、区域气候条件、供试品种及增温方式等有关^[10-12]。

优化调整种植结构和制度、改良土壤和合理施肥, 是农业生产应对和适应气候变化的重要措施^[13]。硅是水稻、小麦等禾谷类作物生长有益元素^[14-15]。长江中下游地区稻麦轮作农田土壤有效硅含量普遍较低^[16]。施硅可促进水稻植株叶片增厚, 降低蒸腾失水, 促进养分吸收, 提高光合和抗逆

能力, 增加产量, 改善品质^[17-20]。生物炭是一种富含稳定有机碳、具有多孔结构的土壤改良剂。施生物炭可提高土壤有机质含量, 增加土壤含水量, 降低容重, 改善通气性, 提高土壤肥力, 优化根系形态结构, 促进生长发育, 增加干物质积累和收获指数, 提高产量, 改善品质^[21-27]。

气候变暖影响水稻生产, 施生物炭或硅肥可改良土壤, 促进水稻生长, 但能否缓解增温对长江下游地区水稻生产不利影响, 鲜见相关报道。本研究通过大田模拟增温试验, 探析夜间增温下生物炭配施硅对水稻产量和品质的影响, 为区域水稻生产应对气候变化及保障粮食安全提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

田间模拟增温试验于 2021 年 6—10 月在南京市浦口区教学科研试验站(32.0°N, 118.8°E)进行。该站地处亚热带季风气候区, 年均气温 15.6℃, 年均降水量 1 100 mm。供试土壤为灰马肝土, 属潴育型水稻土, 土壤有机碳含量 19.5 g/kg, 全氮含量 1.5 g/kg, 土壤质地为壤质黏土, 黏粒含量 26.1 g/kg, pH 值 6.2(1:1 土水比)。供试水稻品种为南粳 5055, 适宜在江苏省沿江及苏南地区种

收稿日期:2022-09-01

基金项目:国家自然科学基金(编号:41875177)。

作者简介:周 欣(1998—), 男, 江苏泰州人, 硕士研究生, 主要从事农业气象与气候变化研究。E-mail:20211234016@nuist.edu.cn。

通信作者:姜运生, 博士, 教授, 主要从事气候变化影响及应对研究。

E-mail:yslou@nuist.edu.cn。

植。供试氮磷钾肥料为高浓度复合肥(15% - 15% - 15%)。供试硅肥为钢渣和矿粉,其有效硅(SiO₂)含量分别为 14.2% 和 32.3%。供试生物炭为稻壳生物炭,有机碳含量 50%。

1.2 试验设计

采用 3 因素 3 水平正交试验设计,3 因素为夜间增温(A)、生物炭施用量(B)和硅肥施用量(C)。夜间增温设 3 水平,即 W0(常温对照,不覆盖铝箔膜)、W1(覆盖 5 mm 铝箔膜)和 W2(覆盖 11 mm 铝箔膜)。生物炭设 3 水平,即 B0(不施生物炭)、B1(10 t/hm² 生物炭)和 B2(25 t/hm² 生物炭)。硅肥设 3 水平,即 Si0(不施硅)、Si1(钢渣硅肥)和 Si2(矿粉硅肥),用量均为 200 kg/hm²。夜间增温采用开放式被动增温方法,即在水稻生育期内于小区四周架设高度可调的钢架以固定铝箔反光膜,夜间(19:00 至 06:00)用铝箔膜覆盖植株冠层,根据水稻生育进程及时调整铝箔膜高度,使铝箔膜与冠层间距保持 30 cm 左右。在恶劣天气如降雨或大风天气时不覆盖铝箔膜,以避免覆盖铝箔膜阻挡降雨及大风造成增温设施破坏(风速 > 10 m/s)。采用温度记录仪自动记载水稻冠层温度。

供试水稻种子经消毒、浸种处理,2021 年 5 月 10 日播入苗床育苗,6 月 12 日大田移栽。水稻移栽前试验田耕作整地,每小区施入氮磷钾复合肥(N、P₂O₅、K₂O 含量均为 15%)315 g 作为基肥,按照试验设计将生物炭和硅肥随基肥施入土壤。小区面积为 2 m × 2 m = 4 m²,随机排列。除晒田和成熟后期外,通过自动灌溉使田间水层保持 5 cm 左右。田间病虫害防治和除草采用常规田间管理。

1.3 测定指标与方法

1.3.1 水稻植株生长、生理指标测定 在水稻主要生育期每周测定植株生长、生理指标,包括株高、叶绿素含量及叶面积指数等。各小区选取 3 株代表性植株分别测量株高。叶片叶绿素含量(SPAD 值)用叶绿素仪测定。叶面积指数用植物冠层分析仪(LP-80)测定,各小区选取 3 个分散位点,分别测定叶面积指数并取平均值。

1.3.2 水稻产量和品质测定 水稻成熟时,在各小区中间选取 0.25 m²(0.5 m × 0.5 m)长势均匀区域进行收割,测定有效穗数、每穗粒数、空秕饱数和结实率。常规风干晾晒后,用脱粒机进行脱粒,测定千粒质量和产量。

参照 GB/T 17891—2017《优质稻谷》国家标准

测定稻米加工品质,采用垄谷机脱壳得到糙米,将糙米用全智能精米机进行抛光处理,用孔径 2.5 mm 不锈钢筛网去除不完整精米,得到整精米,分别计算糙米率、精米率和整精米率。参照 GB/T 15683—2008《大米 直链淀粉含量的测定》《双波长测定支链淀粉、直链淀粉含量》、GB 5009.5—2016《食品中蛋白质的测定》测定稻米直链淀粉含量、支链淀粉含量、总淀粉含量及蛋白质含量。

1.3.3 环境因子测定 温度、降水和日照时数等气象数据,由试验田气象观测系统自动记录。

1.4 数据处理

采用 Microsoft Excel 2019 处理试验数据和极差分析,采用 SPSS 22.0 软件进行方差分析和多重比较,利用 Origin 2020 软件进行绘图。

2 结果与分析

2.1 夜间增温效果

与对照(W0)相比,夜间增温(W1、W2)下,夜间植株冠层平均温度分别升高 0.12、0.04 ℃,最大值分别升高 0.55、0.46 ℃,最小值分别升高 0.09、0.05 ℃(表 1)。

表 1 水稻生育期内植株冠层夜间增温效果			
处理	冠层温度(℃)		
	均值	最大值	最小值
W0	21.15	23.13	20.12
W1	21.27	23.68	20.21
W2	21.19	23.59	20.17

2.2 不同处理对水稻生长、生理指标的影响

2.2.1 株高 方差分析结果(表 2)表明,在水稻关键生育期(拔节期、抽穗期、灌浆期、成熟期)中,夜间增温在灌浆期对水稻株高有显著影响($P < 0.05$),在成熟期对株高有极显著影响($P < 0.01$);生物炭施用量在灌浆期和成熟期对株高有显著影响($P < 0.05$);硅肥施用量在成熟期有显著影响($P < 0.05$)。极差分析结果(表 3)表明,与 W0 相比,W1 和 W2 分别降低 5.11% 和 4.28%;与 B0 相比,B1 和 B2 分别增加 3.89% 和 4.51%;与 Si0 相比,Si1 和 Si2 分别增加 1.65% 和 3.83%。3 因素对水稻株高的影响程度为夜间增温 > 生物炭施用量 > 硅肥施用量。其中,W0B2Si2 处理的水稻株高均值最大,即夜间不增温、施用 25 t/hm² 生物炭 200 kg/hm² 和矿粉可明显增加株高(图 1)。

2.2.2 叶面积指数(LAI) 方差分析结果(表 2)

表 2 水稻关键生育期生长指标方差分析结果 (*F* 值)

生长指标	因素	各生育期的 <i>F</i> 值			
		拔节期	抽穗期	灌浆期	成熟期
株高	A	6.64	4.60	48.00 *	170.36 **
	B	3.84	10.74	35.62 *	28.68 *
	C	5.81	7.29	6.08	59.45 *
叶面积指数	A	0.35	0.55	67.26 *	0.23
	B	3.06	0.45	1 049.19 **	1.58
	C	0.03	2.13	251.44 **	1.02
叶绿素含量	A	19.98 *	1.51	3.06	0.17
	B	2.86	0.04	0.95	1.61
	C	1.07	0.72	3.59	1.75

注：*、** 分别表示影响显著 ($P < 0.05$)、极显著 ($P < 0.01$)。下同。

表明,在水稻关键生育期中,夜间增温在灌浆期对水稻 LAI 有显著影响 ($P < 0.05$),生物炭施用量在灌浆期对水稻 LAI 有极显著影响 ($P < 0.01$),硅肥施用量在灌浆期对水稻也有极显著影响 ($P < 0.01$)。极差分析结果(表 3)表明,与 W0 相比,W1 和 W2 分别增加 0.58% 和 0.29%;与 B0 相比,B1 和 B2 分别增加 8.64% 和 12.96%;与 Si0 相比,Si1 增加 0.85%,Si2 降低 6.78%。3 因素对水稻 LAI 影响程度为生物炭施用量 > 硅肥施用量 > 夜间增温。其中,W1B2Si1 处理的叶面积指数均值最大,即夜间覆盖 5 mm 膜、施 25 t/hm² 生物炭和 200 kg/hm² 钢渣粉,可明显提高水稻叶面积指数(图 1)。

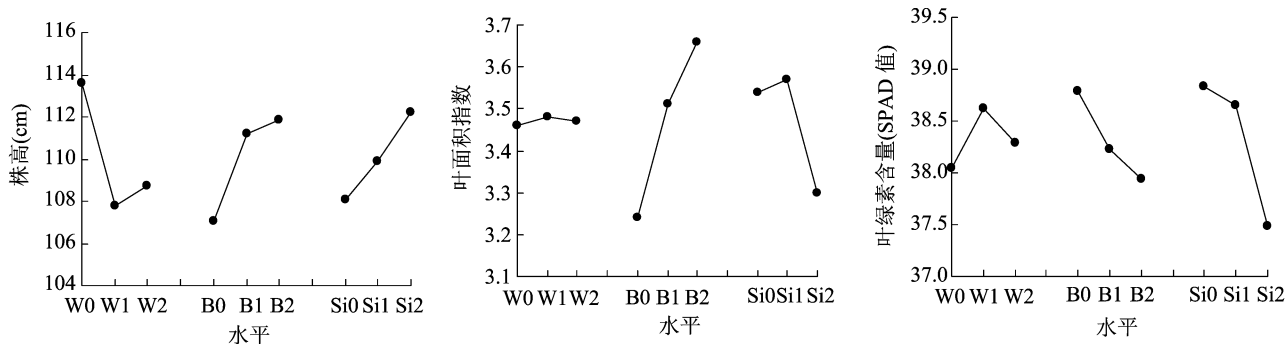


图 1 水稻生长指标因素水平均值趋势

2.2.3 叶绿素含量 (SPAD) 方差分析结果(表 2)表明,夜间增温在拔节期对水稻 SPAD 有显著影响 ($P < 0.05$),生物炭和硅肥施用量对水稻 SPAD 影响不显著 ($P > 0.05$)。极差分析结果(表 3)表明,与 W0 相比,W1 和 W2 分别增加 1.52% 和 0.66%;与 B0 相比,B1 和 B2 分别降低 1.49% 和 2.22%;与 Si0 相比,Si1 和 Si2 分别降低 0.46% 和 3.48%。3

表 3 水稻关键生育期生长指标均值极差分析结果

试验号	A	B	C	株高 (cm)	叶面积指数	叶绿素含量 (SPAD 值)
1	W0	B0	Si0	109.25	3.4	39.11
2	W0	B1	Si1	114.33	3.45	38.08
3	W0	B2	Si2	117.25	3.54	36.94
4	W1	B0	Si1	104.25	3.40	39.55
5	W1	B1	Si2	111.75	3.45	37.76
6	W1	B2	Si0	107.42	3.58	38.56
7	W2	B0	Si2	107.67	2.91	37.73
8	W2	B1	Si0	107.58	3.65	38.82
9	W2	B2	Si1	111.00	3.85	38.33

株高 (cm)			
<i>k</i> ₁	113.61	107.06	108.08
<i>k</i> ₂	107.81	111.22	109.86
<i>k</i> ₃	108.75	111.89	112.22
<i>R</i>	5.80	4.83	4.14

叶面积指数			
<i>k</i> ₁	3.46	3.24	3.54
<i>k</i> ₂	3.48	3.52	3.57
<i>k</i> ₃	3.47	3.66	3.30
<i>R</i>	0.02	0.42	0.27

叶绿素含量 (SPAD 值)			
<i>k</i> ₁	38.04	38.80	38.83
<i>k</i> ₂	38.62	38.22	38.65
<i>k</i> ₃	38.29	37.94	37.48
<i>R</i>	0.58	0.86	1.35

因素对水稻 SPAD 影响程度为硅肥施用量 > 生物炭施用量 > 夜间增温。其中,W1B0Si0 处理的叶绿素含量均值最高,即夜间覆盖 5 mm 反光膜、不施生物炭和硅肥条件下,水稻叶绿素含量最高(图 1)。

2.3 不同处理对水稻产量及其构成因素的影响

表 4 表明,水稻有效穗数最大的处理为 W1B2Si0,最小的为 W1B0Si1,2 个处理相差 101 个。

每穗粒数和千粒质量最大的处理均为 W1B1Si2,最小的处理为 W1B0Si1 和 W0B2Si2,分别相差 69 粒和 3.04 g。结实率最高的处理为 W2B1Si0,最低的处理为 W1B2Si0,两者分别为 94.44%、82.25%,相差 12.19 百分点。产量最高的处理为 W1B2Si0,最低的处理为 W2B1Si0,两者相差 13.69 t/hm²。

水稻产量和产量构成方差分析结果(表5)表

表 4 不同处理对水稻产量和产量构成因素的影响

处理	有效穗数 (个)	每穗粒数 (粒)	千粒质量 (g)	结实率 (%)	产量 (t/hm ²)
W0B0Si0	112	157	25.10	86.58	12.29
W0B1Si1	124	172	24.73	86.13	14.96
W0B2Si2	123	155	23.23	84.43	10.60
W1B0Si1	82	114	25.50	89.23	5.51
W1B1Si2	100	183	26.27	89.45	14.11
W1B2Si0	183	169	25.77	82.25	19.20
W2B0Si2	101	157	26.27	93.69	12.74
W2B1Si0	99	151	25.87	94.44	9.54
W2B2Si1	113	161	25.73	90.05	14.07

明,夜间增温对水稻结实率的影响极显著($P < 0.01$),生物炭施用量对水稻有效穗数、结实率和产量的影响均达显著水平($P < 0.05$),硅肥施用量对水稻产量及产量构成无显著影响($P > 0.05$)。

表 5 不同处理对水稻产量和产量构成因素的方差分析结果

处理	F 值				
	有效穗数	每穗粒数	千粒质量	结实率	产量
夜间增温	3.268	0.044	3.914	228.351 **	0.013
生物炭施用量	21.398 *	0.772	0.828	36.015 *	19.380 *
硅肥施用量	3.581	0.279	0.143	6.015	0.089

3 因素对有效穗数、每穗粒数和产量的影响程度均为生物炭施用量 > 硅肥施用量 > 夜间增温;对千粒质量和结实率的影响程度为夜间增温 > 生物炭施用量 > 硅肥施用量(图2)。

2.4 不同处理对稻米品质的影响

由表6可见,与常温对照相比,夜间增温可改善水稻糙米率、精米率和整精米率,提高支链淀粉含量,降低直链淀粉和蛋白质含量。加工品质(糙米

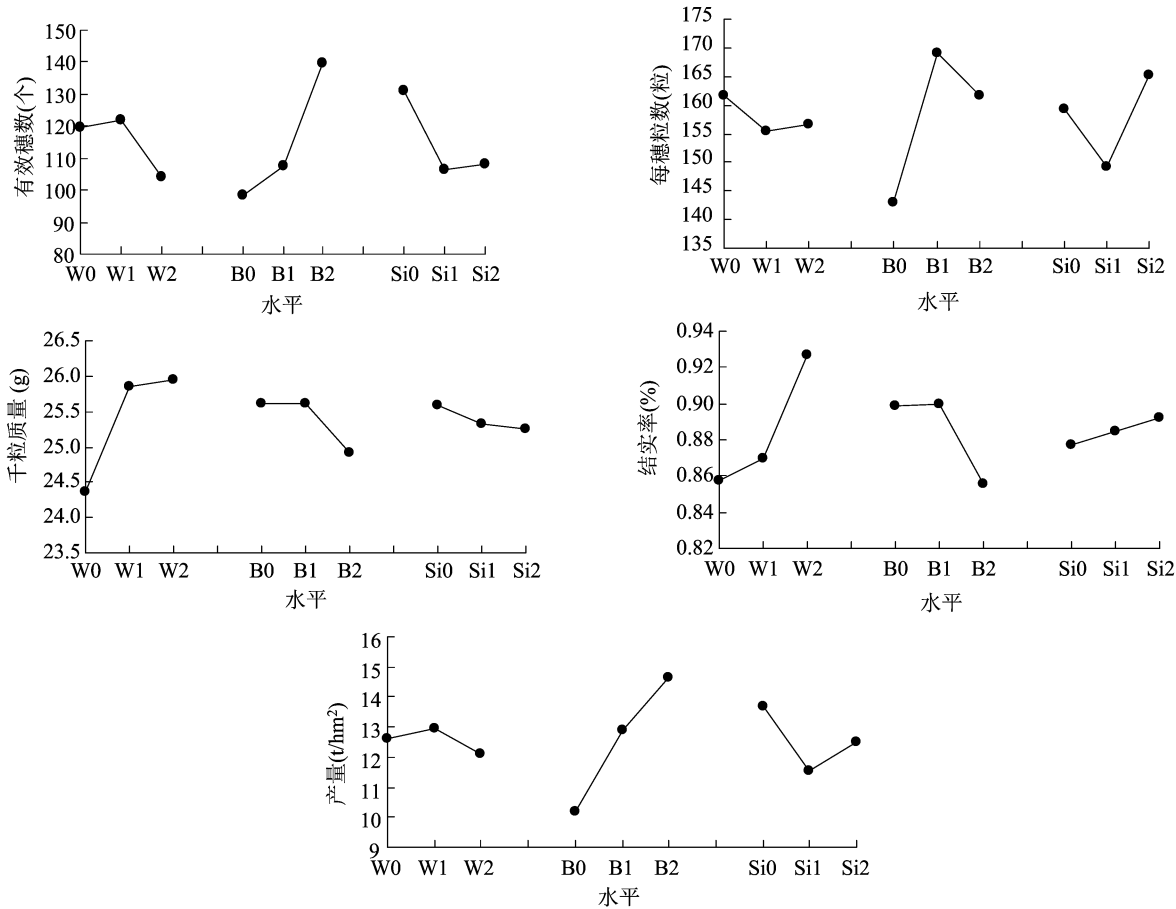


图2 不同处理对水稻产量和产量构成因素的极差分析结果

率、精米率和整精米)最好的处理是 W2B0Si2,但直链淀粉含量最低;加工品质(糙米率、精米率、整精米)最差的处理是 W0B2Si2,但蛋白质含量却最高。加工品质(糙米率、精米率和整精米率)最大值和最小值分别相差 4.40、8.36、8.32 百分点,营养品质

(直链淀粉、支链淀粉、蛋白质含量)最大值和最小值分别相差 9.61、15.69、1.75 百分点。夜间增温、生物炭施用量和硅肥施用量对加工品质和营养品质均无显著影响($P>0.05$)(表 7)。

表 6 不同处理对稻米品质的影响

处理	加工品质			食味品质		
	糙米率(%)	精米率(%)	整精米率(%)	直链淀粉含量(%)	支链淀粉含量(%)	蛋白质含量(%)
W0B0Si0	82.76	78.20	77.84	18.30	67.89	6.86
W0B1Si1	82.08	77.60	77.52	10.55	83.58	6.76
W0B2Si2	79.56	75.32	75.24	10.89	80.96	7.78
W1B0Si1	83.16	79.80	79.12	17.31	70.67	6.03
W1B1Si2	83.00	77.88	77.36	17.97	71.22	6.88
W1B2Si0	83.04	79.16	78.84	18.96	71.22	7.02
W2B0Si2	83.96	83.68	83.56	9.35	83.55	6.68
W2B1Si0	82.92	77.16	76.88	11.42	81.56	6.90
W2B2Si1	81.52	76.60	76.48	10.20	82.10	6.99

表 7 不同处理对稻米品质的方差分析

因素	加工品质的 F 值			营养品质的 F 值		
	糙米率	精米率	整精米率	直链淀粉含量	支链淀粉含量	蛋白质含量
夜间增温	2.23	0.58	0.45	7.86	3.78	0.21
生物炭施用量	2.91	1.55	1.24	0.47	0.77	3.15
硅肥施用量	0.49	0.11	0.11	2.11	1.02	3.42

由极差分析结果可知,3 因素对糙米率、精米率和整精米率的影响程度均为生物炭施用量>夜间增温>硅肥施用量。对直链淀粉含量的影响程度为夜间增温>硅肥施用量>生物炭施用量,对支链淀粉含量的影响程度为夜间增温>硅肥施用量>生物炭施用量,对蛋白质含量的影响程度为生物炭施用量>硅肥施用量>夜间增温(图 3)。

3 讨论

3.1 不同处理对水稻生长、生理指标的影响

水稻植株生长状况、叶面积指数(LAI)和叶绿素含量(SPAD)是产量形成的基础^[28]。夜间增温、硅肥施用量和生物炭施用量对水稻株高和 LAI 均有明显影响(表 2)。夜间增温显著降低水稻灌浆期、成熟期株高,显著提高灌浆期 LAI 和拔节期 SPAD(表 2)。增温加快水稻生长发育进程,提高 LAI 和 SPAD 值,但株高降低,进而对产量产生不利影响。原因可能在于夜间增温降低了水稻植株叶片光合

速率,而促进夜间呼吸作用,不利于光合产物的积累^[29-30]。生物炭施用量明显提高水稻株高,增加叶面积指数。原因在于,施用生物炭可提高土壤胶体吸附固持能力,减少养分损失,提高土壤酶活性,改善土壤肥力,促进植株生长^[31-34]。硅肥施用量显著提高水稻灌浆-成熟期 LAI 和株高,可能在于水稻对硅的吸收大部分发生于孕穗-成熟期^[35]。

3.2 不同处理对水稻产量及其构成因素的影响

水稻产量是由单位面积穗数、每穗粒数、成粒率和粒质量 4 个基本因素构成。抽穗前有效穗的形成,抽穗后籽粒灌浆及灌浆饱满度,是决定水稻产量的 3 个关键过程。夜间增温虽然提高水稻千粒质量和结实率,但降低有效穗数、穗粒数,所以处理间产量差异不显著(图 2),可能是夜间温度升高促进植株呼吸作用,消耗较多的光合产物,导致水稻成穗率及有效穗数降低。此外,水稻分化颖花数与植株茎秆健壮程度密切相关,夜间增温使日最低气温升高,植株生长加快,茎秆细弱,叶片易早衰,光合速率下降,导致产量降低^[36]。夜间增温提高水稻结实率,原因在于,结实率对温度较敏感,温度升高可能促进柱头花粉萌发率,进而提高结实率^[37]。增温提高土壤酶活性和有机氮释放,促进氮素吸收。植株氮含量与光合作用及物质生产密切相关,影响结实率及千粒质量^[38]。生物炭施用量显著提高水稻有效穗数(表 5、图 2),原因可能在于施生物炭可改善土壤热性质,调节土壤温度^[39]。生物炭还可增加

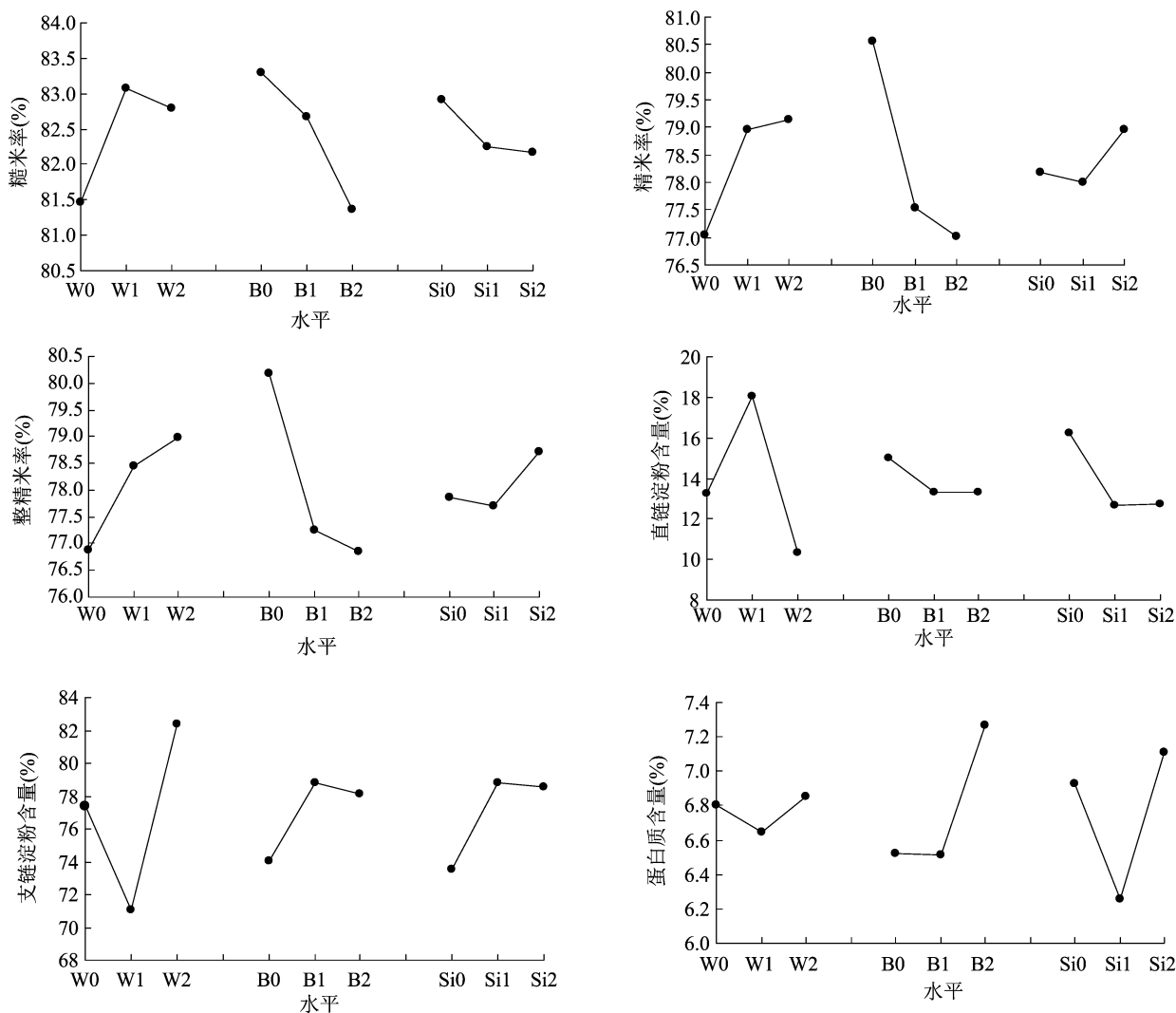


图3 不同处理对水稻加工品质与食味品质的极差分析结果

土壤孔隙度,降低土壤容重,提高土壤有机碳含量和土壤微生物活性,促进地下部生长,提高养分吸收能力。施硅可促进水稻氮素吸收,提高穗长和小穗数,增加产量^[40-42]。

3.3 不同处理对稻米品质的影响

与对照相比,夜间增温对稻米加工品质(糙米率、精米率和整精米率)有一定促进作用(图3),这与前人研究^[43]不同,原因可能与模拟增温方法及增温幅度有关。本试验采用开放式被动增温方法,增温幅度1℃左右,而后者采用开放式主动增温方法,增温幅度5℃左右。水稻灌浆-成熟期温度变化对稻米直链淀粉、支链淀粉含量及比率有显著影响^[44-45]。施用稻壳生物炭降低稻米的糙米率、精米率^[46]。本试验中,施用稻壳生物炭降低水稻加工品质,随生物炭用量增加,降低效果越明显(图3),原因可能在于施用生物炭影响土壤理化性质,如土壤

热性质及养分有效性,进而影响植株植株营养和生殖生长^[47-48]。施硅可调控水稻产量和品质,但施用不同硅肥的效果有差异(图3)。施用硅肥可改善稻米加工品质(精米率和整精米率)、增加支链淀粉和蛋白质含量,但矿粉效果优于钢渣,可能在于矿粉有效硅含量较高,有利于水稻吸收利用^[49]。

总体上,生物炭配施硅肥可改善夜间增温对水稻生长及产量形成的不利影响。稻米品质与水稻品种及田间管理等有关,本研究供试品种只有1个,同时受天气、气候及土壤等因素综合影响,还有待深入研究。

4 结论

夜间增温降低水稻株高和LAI,减少水稻有效穗数、每穗粒数和产量。夜间增温对水稻加工品质和营养品质有促进作用。施生物炭和硅肥可促进

水稻每穗粒数和结实率,增加产量。生物炭可缓解增温对水稻产量及营养品质的不利影响。施硅可提高水稻加工品质、支链淀粉和蛋白质含量。综合考虑产量和品质,试验最佳处理组合为 W1B2Si2,即施用 25 t/hm² 生物炭和 200 kg/hm² 矿粉,可明显减缓夜间增温对水稻产量和品质造成的不利影响。

参考文献:

- [1] 郑沃林,胡新艳. 应对气候变化的农业经济研究前沿与政策实践[J]. 北京理工大学学报(社会科学版),2021,23(6):50-57.
- [2] 谭凯炎,房世波,任三学,等. 非对称性增温对农业生态系统影响研究进展[J]. 应用气象学报,2009,20(5):634-641.
- [3] 张鑫,陈金,江瑜,等. 夜间增温对江苏不同年代水稻主栽品种生育期和产量的影响[J]. 应用生态学报,2014,25(5):1349-1356.
- [4] 肖国举,张强,王静. 全球气候变化对农业生态系统的影响研究进展[J]. 应用生态学报,2007,18(8):1877-1885.
- [5] Peiris D R, Crawford J W, Grashoff C, et al. A simulation study of crop growth and development under climate change[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 1996,79(4):271-287.
- [6] DaMatta F M, Grandis A, Arenque B C, et al. Impacts of climate changes on crop physiology and food quality[J]. Food Research International, 2010,43(7):1814-1823.
- [7] 丁乐乐,程浩,刘增富,等. 环境增温对稻麦轮作生态系统中作物产量的影响[J]. 植物科学学报,2013,31(1):49-56.
- [8] 王小宁,申双和,王志明,等. 白天和夜间增温对水稻光合作用的影响[J]. 江苏农业学报,2008,24(3):237-240.
- [9] Mohammed A R, Tarpley L. Impact of high nighttime temperature on respiration, membrane stability, antioxidant capacity, and yield of rice plants[J]. Crop Science, 2009,49(1):313-322.
- [10] Hatfield J L, Boote K J, Kimball B A, et al. Climate impacts on agriculture: implications for crop production[J]. Agronomy Journal, 2011,103(2):351-370.
- [11] 张建平,赵艳霞,王春乙,等. 气候变化对我国南方双季稻发育和产量的影响[J]. 气候变化研究进展,2005,1(4):151-156.
- [12] Easterling D R, Horton B, Jones P D, et al. Maximum and minimum temperature trends for the globe[J]. Science, 1997,277(5324):364-367.
- [13] Kanno K, Makino A. Increased grain yield and biomass allocation in rice under cool night temperature[J]. Soil Science and Plant Nutrition, 2010,56(3):412-417.
- [14] 王馥棠. 近十年来我国气候变暖影响研究的若干进展[J]. 应用气象学报,2002,13(6):755-766.
- [15] 邓艾兴,刘猷红,孟英,等. 田间增温 1.5℃ 对高纬度粳稻产量和品质的影响[J]. 中国农业科学,2022,55(1):51-60.
- [16] 农业农村部耕地质量监测保护中心. 长江中下游区耕地质量主要性状数据集[M]. 北京:中国农业出版社,2021:100-120.
- [17] 宫海军,陈坤明,王锁民,等. 植物硅营养的研究进展[J]. 西北植物学报,2004,24(12):2385-2392.
- [18] Chen C Q, van Groenigen K J, Yang H Y, et al. Global warming and shifts in cropping systems together reduce China's rice production[J]. Global Food Security, 2020,24:100359.
- [19] 方至萍. 硅对长江中下游双季稻区化肥农药协同增效减施技术的研究[D]. 杭州:浙江大学,2019:1-3.
- [20] 夏石头,萧浪涛,彭克勤. 高等植物中硅元素的生理效应及其在农业生产中的应用[J]. 植物生理学通讯,2001,37(4):356-360.
- [21] 武玉,徐刚,吕迎春,等. 生物炭对土壤理化性质影响的研究进展[J]. 地球科学进展,2014,29(1):68-79.
- [22] 陈温福,张伟明,孟军. 农用生物炭研究进展与前景[J]. 中国农业科学,2013,46(16):3324-3333.
- [23] 张伟明,孟军,王嘉宇,等. 生物炭对水稻根系形态与生理特性及产量的影响[J]. 作物学报,2013,39(8):1445-1451.
- [24] 陈红霞,杜章留,郭伟,等. 施用生物炭对华北平原农田土壤容重、阳离子交换量和颗粒有机质含量的影响[J]. 应用生态学报,2011,22(11):2930-2934.
- [25] 李力,刘娅,陆宇超,等. 生物炭的环境效应及其应用的研究进展[J]. 环境化学,2011,30(8):1411-1421.
- [26] 何绪生,耿增超,余雕,等. 生物炭生产与农用的意义及国内外动态[J]. 农业工程学报,2011,27(2):1-7.
- [27] 张晗芝,黄云,刘钢,等. 生物炭对玉米苗期生长、养分吸收及土壤化学性状的影响[J]. 生态环境学报,2010,19(11):2713-2717.
- [28] 杨峰,范亚民,李建龙,等. 高光谱数据估测稻麦叶面积指数和叶绿素密度[J]. 农业工程学报,2010,26(2):237-243.
- [29] 唐甫林,胡石海,侯秀芳,等. 水稻株高对经济系数及产量影响的初探[J]. 上海农业科技,2000(5):9.
- [30] Dong W J, Chen J, Zhang B, et al. Responses of biomass growth and grain yield of midseason rice to the anticipated warming with FATH facility in East China[J]. Field Crops Research, 2011,123(3):259-265.
- [31] Liang B, Lehmann J, Solomon D, et al. Black carbon increases cation exchange capacity in soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 2006,70(5):1719-1730.
- [32] Kimetu J M, Lehmann J. Stability and stabilisation of biochar and green manure in soil with different organic carbon contents[J]. Soil Research, 2010,48(7):577.
- [33] Laird D, Fleming P, Wang B Q, et al. Biochar impact on nutrient leaching from a Midwestern agricultural soil[J]. Geoderma, 2010,158(3/4):436-442.
- [34] Kolb S E, Fermanich K J, Dornbush M E. Effect of charcoal quantity on microbial biomass and activity in temperate soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 2009,73(4):1173-1181.
- [35] 杨建堂,高尔明,霍晓婷,等. 沿黄稻区水稻硅素吸收、分配特点研究[J]. 河南农业大学学报,2000,34(1):37-39,42.
- [36] 杨文钰,屠乃美. 作物栽培学各论:南方本[M]. 北京:中国农业出版社,2003:22.
- [37] 郑建初,张彬,陈留根,等. 抽穗期高温对水稻产量构成要素和稻米品质的影响及其基因型差异[J]. 江苏农业学报,2005,21(4):249-254.
- [38] 王琪,徐程扬. 氮磷对植物光合作用及碳分配的影响[J]. 山东林业科技,2005,35(5):59-62.

许有斌,吉冰璇,王林叶,等. 水稻稀穗突变体 lax3 的遗传分析及基因定位[J]. 江苏农业科学,2023,51(11):87-91.

doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2023.11.012

水稻稀穗突变体 lax3 的遗传分析及基因定位

许有斌¹, 吉冰璇², 王林叶², 张启军^{1,2}

(1. 西华师范大学生命科学学院, 四川南充 637009; 2. 江苏省农业科学院粮食作物研究所, 江苏南京 210014)

摘要:穗粒数是构成作物产量的三大要素之一,与作物产量具有显著的正相关关系,定位、克隆与穗粒数有关的新基因为解析作物产量构成具有十分重要的意义。利用穗颈注射法将高粱基因组 DNA 导入水稻品种 9311 中,在后代筛选到 1 个稀穗突变体,暂定名为 lax3。研究了该突变体的主要农艺性状和稀穗的遗传方式,并对该稀穗突变基因进行了精细定位。研究表明,该稀穗突变体 lax3 在株高、分蘖、枝梗和穗粒数上与受体 9311 相比存在显著的差异。遗传分析表明该突变体的稀穗性状受 1 对隐性核基因控制,用 lax3/O2428 F₂ 群体将该基因初步定位在水稻第 4 染色体上,位于 SSR 标记 RM16335 和 RM16424 之间,交换单株分别为 5 株和 3 株。通过扩大遗传群体和进一步开发标记,最后将该基因定位在 RM16349 和 Indel 标记 In4-8 之间,两者之间的物理距离约为 96.9 kb。本研究结果为进一步克隆该基因、解析水稻穗粒结构调控机制和分子辅助选育奠定一定的基础。

关键词:水稻;稀穗;lax3(*t*)基因;精细定位

中图分类号:S511.032

文献标志码:A

文章编号:1002-1302(2023)11-0087-05

水稻作为全世界一半以上人口的主粮,其产量对保障全球粮食安全和维持世界社会稳定具有十分重要的作用。作物产量是由分蘖数、每穗粒数和粒质量三因素共同决定的^[1],水稻的穗分枝数则直接决定着穗粒数,因此,研究调控水稻穗分枝形成

机制不仅能解决植物发育相关的基本问题,还对作物产量的提高有着重要作用^[2-3]。水稻属于圆锥花序,包含一个主穗轴、螺旋状环绕在主轴上的一级枝梗、以两行交错方式着生在一级枝梗上的二级枝梗,以及一、二级枝梗末端着生的小花,每个小花则由退化颖壳、护颖、内稃和外稃、雌蕊和雄蕊构成^[3-5],任何一个影响水稻花序的因子都可能影响其最终产量。

参与水稻幼穗发育的基因可分为调控枝梗分生组织的形成、枝梗分生组织的大小、小穗分生组织的转变时间以及枝梗的伸长这 4 类^[3,5-6],而枝梗分生组织的形成过程是整个水稻幼穗发育的基础,后期水稻枝梗的有无、多少、空间布局都是由枝梗

收稿日期:2022-06-30

基金项目:国家转基因生物新品种培育重大专项(编号:2016ZX08001004)。

作者简介:许有斌(1990—),女,贵州修文人,博士,主要从事植物病理研究, E-mail: xuyoupinwk@163.com; 共同第一作者,吉冰璇

(1995—),女,山西定襄人,硕士研究生,主要从事植物遗传研究。

E-mail: 154325150@qq.com。

通信作者:张启军,博士,副研究员,主要从事水稻遗传与分子育种研究。 E-mail: zhangqijun75@163.com。

[39] 田冬,高明,黄容,等. 油菜/玉米轮作农田土壤呼吸和异养呼吸对秸秆与生物炭还田的响应[J]. 环境科学,2017,38(7):2988-2999.

[40] 郭彬,娄运生,梁永超,等. 氮硅肥配施对水稻生长、产量及土壤肥力的影响[J]. 生态学杂志,2004,23(6):33-36.

[41] Van Zwieten L, Kimber S, Morris S, et al. Effects of biochar from slow pyrolysis of papermill waste on agronomic performance and soil fertility[J]. Plant and Soil, 2010, 327(1):235-246.

[42] 周青,潘国庆,施作家. 硅肥对小麦群体质量和产量的影响[J]. 江苏农业科学,2001,29(3):47-52.

[43] 戴云云,丁艳锋,刘正辉,等. 花后水稻穗部夜间远红外增温处理对稻米品质的影响[J]. 中国水稻科学,2009,23(4):414-420.

[44] 程方民,蒋德安,吴平,等. 早籼稻籽粒灌浆过程中淀粉合成

酶的变化及温度效应特征[J]. 作物学报,2001,27(2):201-206.

[45] 董文军,田云录,张彬,等. 非对称性增温对水稻品种南粳44米质及关键酶活性的影响[J]. 作物学报,2011,37(5):832-841.

[46] 李姝航. 不同材质生物炭对水稻产量和品质的影响[D]. 沈阳:沈阳农业大学,2017:62.

[47] 戴平安,周坤炉,黎用朝,等. 土壤条件对优质食用稻品质及产量的影响[J]. 中国水稻科学,1998,12(S1):51-57.

[48] 环爱华. 浅谈稻米品质及其影响因素[J]. 中国稻米,2001,7(4):8-10.

[49] 曾仁杰. 硅肥对水稻产量、品质及抗倒伏特性的影响[J]. 中国农学通报,2021,37(22):1-4.