

间歇灌溉下不同生育时期施硅对水稻生长发育的影响

邱菁华¹, 孙书洪^{1,2}, 薛铸^{1,2*}, 彭劲舟¹, 衣若晨¹, 董建舒¹

(1.天津农学院 水利工程学院, 天津 300384; 2.天津市农业水利技术工程中心, 天津 300384)

摘要:【目的】探究间歇灌溉模式下不同生育时期施硅肥对水稻生长发育及产量的影响并确定适宜的施硅肥时期。

【方法】选取“津原85”为研究对象,采用田间小区试验,在间歇灌溉模式下设6个施硅肥处理(不施硅肥(CK)、分蘖期施硅肥(F1)、拔节期施硅肥(F2)、孕穗期施硅肥(F3)、抽穗期施硅肥(F4)、扬花灌浆期施硅肥(F5))。研究间歇灌溉下不同处理对水稻生长性状及产量的影响。【结果】间歇灌溉下增施硅肥对水稻生长发育、产量及灌溉水分利用效率均具有促进作用,使水稻叶面积指数增长1.15%~11.36%,干物质量增长9.17%~24.24%,产量增长2.05%~8.63%,灌溉水分利用效率增长2.16%~8.63%。不同生育时期施硅肥对水稻的影响也不同,其中分蘖期施硅肥效果最佳。【结论】间歇灌溉模式下,通过增施硅肥可促进水稻生长发育,提高产量及灌溉水分利用效率;可将分蘖期作为间歇灌溉下“津原85”水稻适宜的施硅肥时期。

关键词: 间歇灌溉; 水稻; 硅肥; 生长性状; 产量; 灌溉水分利用效率

中图分类号: S275.8

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2022197

OSID:



邱菁华, 孙书洪, 薛铸, 等. 间歇灌溉下不同生育时期施硅对水稻生长发育的影响[J]. 灌溉排水学报, 2023, 42(4): 45-50.
QIU Jinghua, SUN Shuhong, XUE Zhu, et al. The Combined Effect of Silicon Fertilization and Intermittent Irrigation on Rice Growth and Development[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2023, 42(4): 45-50.

0 引言

【研究意义】随着全球气候变暖与经济的迅速发展,水资源短缺问题日益严重,2020年全国用水量减少208.3亿m³,其中农业用水减少69.9亿m³,制约了农业的发展^[1]。水稻是世界三大粮食作物之一,全球超过75%的水稻采用淹灌种植,消耗了大量淡水资源^[2]。间歇灌溉(干湿交替灌溉)是水稻节水灌溉技术模式的一种^[3],而施硅肥可以通过调节植株体内多种生理代谢途径,增强抗旱性,进而提升产量^[4]。因此,研究间歇灌溉模式下水稻适宜的施硅肥时期对水稻的节水增产具有重大意义。【研究进展】水稻作为典型的喜硅植物,增施硅肥对其生长发育、产量及品质的形成以及减轻生物及非生物胁迫方面具有重要作用^[5]。苏庆旺等^[6]对直接播种且以雨养为主的旱作水稻增施硅肥,结果表明适量施硅肥有利于减缓水稻叶片衰老,增强根系活力并提高产量。Emam等^[7]研究表明,与不施硅肥相比,水稻增施硅肥可增强籽粒中酚类和黄酮的产生,同时还能提高总碳水化合物、蛋白质水平,从而改善了稻米品质。Fatmah等^[8]研究表明,硅肥施用与间歇灌溉相结合可增强水稻对稻瘟

病的抗性,增加水稻籽粒中铜、锰和锌的量,促进水稻产量和水分利用效率的提高。不同生育时期施硅肥对水稻产量影响的研究也有一些报道,但结果不尽一致。王振华^[9]采用盆栽的方式在水稻分蘖期、孕穗期施硅,结果表明分蘖期喷施硅肥可使水稻的有效穗数提高1.96%~65.56%,增产最为显著,而朱薇等^[10]研究表明,毯状苗机插水稻的推荐施硅肥时期为拔节期和抽穗期。【切入点】间歇灌溉是实现水稻节水的灌溉模式,硅肥施用有利于水稻抗旱,促进水稻生长发育。目前,水稻适宜的施硅肥时期尚无统一标准,且间歇灌溉模式下,水稻适宜的施硅肥时期研究甚少。本试验结合间歇灌溉与硅肥施用开展田间小区试验,旨在揭示间歇灌溉下不同生育时期施硅肥对水稻生长发育及产量的影响。【拟解决的关键问题】本研究将深入了解间歇灌溉模式下不同生育时期施硅肥对水稻生长性状及产量产生的影响,探寻间歇灌溉下使水稻生长发育与产量达到最佳的施硅肥时期。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验区位于天津农学院西校区试验基地(39°16'N, 116°97'E),地处华北平原东北部,地势平坦。该地所属气候为暖温带半湿润大陆性季风气候,最热月主要出现在7月,月平均气温为27℃,最冷月主要出现在1月,平均气温为-3.4℃。多年来平均

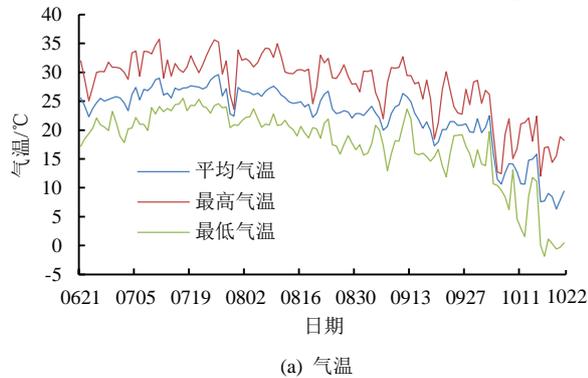
收稿日期: 2022-04-11

基金项目: 现代都市农业智慧灌溉技术项目(XB202016)

作者简介: 邱菁华(1995-),女,硕士研究生,主要从事农业节水方面研究。E-mail: 861572655@qq.com

通信作者: 薛铸(1978-),男,博士,主要从事农业水土资源高效利用研究。E-mail: xuezhu_nmnd@sina.com

降水量为 510.8 mm, 夏季降水量最多, 占全年降水量的 68.2%。多年平均日照时间约为 2 338 h, 春季日照时间最多, 占全年日照时间的 29.6%。试区土壤为砂质土壤, 土壤 pH 值为 7.91, 有机质量为 0.91%, 水解氮量 61.08 mg/kg, 速效磷量 62.28 mg/kg, 速效钾量 216.5 mg/kg, 有效硅量 133.14 mg/kg。插秧前测得试验基地 0~30 cm 土层体积质量为 1.49 g/cm³,



土壤饱和体积含水率为 41.49%。基地内布设气象站, 全年对各项气象指标进行监测, 试验地水稻生育期内 (2021 年 6 月 21 日—10 月 22 日) 总降水量为 442.3 mm, 最大 1 次降水量出现在 7 月为 67.7 mm。生育期内平均气温为 22.4 °C, 7 月出现最高气温为 35.8 °C, 10 月出现最低气温为 -1.9 °C。水稻生育期内气象状况见图 1。

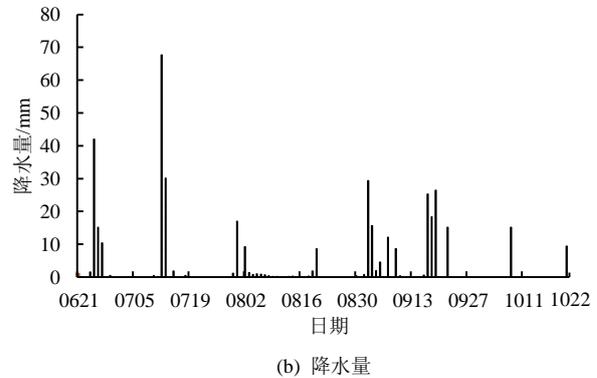


图 1 水稻生育期内气象状况

Fig.1 Meteorological conditions during the rice growing period

1.2 试验设计

本试验以“津原 85”水稻为研究对象, 采用田间测坑随机布置进行试验。测坑有底能避免水肥串流, 尺寸为 2 m×2 m×1.5 m (长×宽×高)。每个测坑栽插 6 行、每行 9 穴、每穴 6 苗、行距 30 cm、株距 20 cm。于 6 月 21 日栽插, 10 月 22 日收获。试验将水溶性硅肥 (SiO₂≥290 g/L) 作为供试肥, 根据硅肥品牌的推荐施硅肥方式并参考金正勋等^[11]的研究结果设置硅肥施用量为 6 kg/hm², 采用叶面喷施, 稀释 1 000 倍。试验设置 6 个处理, 即不施硅肥 (CK)、分蘖期施硅肥 (F1)、拔节期施硅肥 (F2)、孕穗期施硅肥 (F3)、抽穗期施硅肥 (F4) 和扬花灌浆期施硅肥 (F5), 每个处理设置 3 个重复。施肥采用当地常用模式, 即复合肥 (15-15-15, N15%, P₂O₅15%, K₂O15%) 600 kg/hm², 作为基肥。尿素 (含 N≥46%) 作为追肥, 插秧后 7 d 施返青肥, 追肥 37.5 kg/hm², 分蘖期追施 45 kg/hm², 孕穗期追施 45 kg/hm², 抽穗期追施 45 kg/hm²。灌水采用间歇灌溉模式, 即在返青期维持 30~50 mm 的水层, 分蘖后期晒田, 黄熟期停止灌溉, 自然落干即可。其他时间采取间歇淹水每 4~6 d 灌水 1 次, 每次灌水 30~50 mm, 使田面保持 15~20 mm 水层, 有水层和无水层各 2~3 d, 灌水前下限为土壤饱和含水率的 90%^[3]。

1.3 指标测定及方法

1.3.1 水稻生长指标

水稻的株高、叶面积指数、根系性状、干物质量等 4 个生长指标在 6 个生育时期后期 (分蘖期、拔节期、孕穗期、抽穗期、扬花灌浆期、成熟期) 进行测定。

1) 株高测定

1 个试验测坑定点标记 5 个测点, 抽穗前测量土面至每穴最高叶尖的高度, 抽穗后测量土面至最高穗顶 (不计芒) 的高度。

2) 叶面积指数测定

单株叶面积 (cm²) = $\sum_{i=1}^n L_i \times D_i \times K$, (1)
叶面积指数 (LAI) = (单株叶面积 × N) / 10 000, (2)
式中: n 为叶片数; L_i 为水稻叶面长度 (cm); D_i 为水稻叶片最大宽度 (cm); K 为校正系数, 取为 0.75; N 为 1 m² 的株数。

3) 根数及根粗测定

每个测坑选取长势一致的 3 穴, 每穴以植株为中心, 取长 30 cm、宽 20 cm、深 30 cm 的土块, 用清水冲洗后, 将水稻植株以单茎为单位分开。在平整桌面上倒少量水保持浅水层, 将样品置于上, 数其不定根根数。随机选取 10 个根, 在有少量水的桌面上紧密排成一排, 并用小刀修齐顶端, 用小尺测量 10 个根的粗度, 最终得出平均单根根粗。

4) 地上部分干物质量测定

每个测坑选取长势一致的 3 个样品, 分为茎、叶、穗放入 105 °C 的烘箱中杀青 30 min, 然后在 75 °C 下烘干到恒质量, 其干质量为水稻地上部分干物质量。

1.3.2 水稻产量

水稻成熟时, 每测坑取 5 穴带回室内测定其穗长、有效穗数、每穗总粒数、每穗实粒数、千粒质量然后求出结实率和理论产量。

1.3.3 灌溉水分利用效率

灌溉水分利用效率

$$WUE=Y/s, \quad (3)$$

式中： WUE 为灌溉水分利用效率 (kg/m^3)； Y 为水稻产量 (kg/hm^2)； s 为灌水量 (m^3/hm^2)。

1.4 数据处理分析

所有数据均测定至少 3 个平行样, 利用 SPSS 22.0 对数据进行单因素方差分析和相关性分析, 再利用 Microsoft Excel 2019 绘图。

2 结果与分析

2.1 不同处理对水稻株高和叶面积指数的影响

不同处理对水稻株高和叶面积指数的影响由表 1 所示。由表 1 可知, 水稻株高从分蘖期到抽穗期增长

迅速, 抽穗期到成熟期水稻株高趋于稳定。不同处理下各生育期的水稻株高无显著性差异, 这表明间歇灌溉下不同生育时期施硅肥对水稻株高影响不大。 LAI 从分蘖期到拔节期增长迅速, 拔节期到扬花灌浆期间缓慢增长, 扬花灌浆期后由于叶片的衰老, 开始逐渐降低。间歇灌溉下施硅肥有利于叶面积指数的增长, 与 CK 相比, 分蘖期 F1 处理下 LAI 最大为 2.68, 差异显著; 孕穗期 F3 处理下 LAI 最大为 4.99, F1 处理次之为 4.81, 差异显著; 成熟期各处理的 LAI 均高于 CK, 增幅为 1.15%~11.36%, 且在 F1 处理下达到最大值, 差异显著。

表 1 不同处理对水稻株高和叶面积指数的影响

Table 1 Effects of different treatments on rice plant height and leaf area index

生长指标	处理	分蘖期	拔节期	孕穗期	抽穗期	扬花灌浆期	成熟期
株高/cm	CK	59.19±1.98a	78.46±2.74a	89.91±1.73a	105.19±2.34a	106.32±1.06a	106.25±1.18a
	F1	58.93±2.39a	78.51±2.02a	92.25±2.53a	105.66±2.85a	107.33±2.63a	106.50±1.31a
	F2	58.28±2.73a	77.00±1.14a	90.80±1.63a	105.27±2.37a	107.12±2.93a	107.92±1.00a
	F3	60.01±1.97a	76.95±1.41a	92.31±1.62a	103.48±2.12a	104.67±0.16a	105.33±2.49a
	F4	58.98±2.36a	77.41±1.30a	89.54±2.98a	103.79±1.97a	104.69±1.70a	105.23±1.43a
	F5	57.31±0.58a	77.06±2.88a	91.28±1.65a	104.03±1.33a	106.46±2.02a	106.27±1.89a
叶面积指数	CK	2.12±0.24b	4.19±0.41a	4.45±0.21b	4.56±0.42a	4.94±0.16a	4.29±0.24b
	F1	2.68±0.36a	4.52±0.36a	4.81±0.33ab	4.94±0.47a	5.32±0.36a	4.84±0.31a
	F2	2.12±0.25b	4.29±0.25a	4.50±0.08b	4.77±0.32a	5.03±0.30a	4.40±0.23ab
	F3	2.19±0.30b	4.13±0.31a	4.99±0.13a	5.14±0.26a	5.38±0.34a	4.70±0.10ab
	F4	2.19±0.10b	4.14±0.29a	4.54±0.08b	4.65±0.10a	4.93±0.50a	4.40±0.27ab
	F5	2.17±0.13b	4.20±0.49a	4.46±0.31b	4.72±0.38a	4.89±0.22a	4.34±0.18ab

注 同列用不同小写字母表示同一生育期不同处理在 0.05 水平上差异显著, 下同。

2.2 不同处理对水稻根系形态特征的影响

不同处理对水稻根数及根粗的影响由图 2 所示。由图 2 (a) 可知, 水稻根数从分蘖期到孕穗期增长迅速, 抽穗期到成熟期趋于稳定。间歇灌溉下分蘖期施硅肥可促进根的生长提高水稻根数, F1 处理下全生育期的水稻根数均高于 CK, 增幅为

3.95%~9.67%, 与全生育期的其他处理相比差异显著。由图 2 (b) 可知, 间歇灌溉下分蘖期、拔节期施硅肥对根粗有促进作用, F1、F2 处理下全生育期的水稻根粗与 CK 相比都有增加, 增幅为 11.81%~20.33%、2.17%~12.50%, F1 处理与全生育期的其他处理相比, 差异显著。

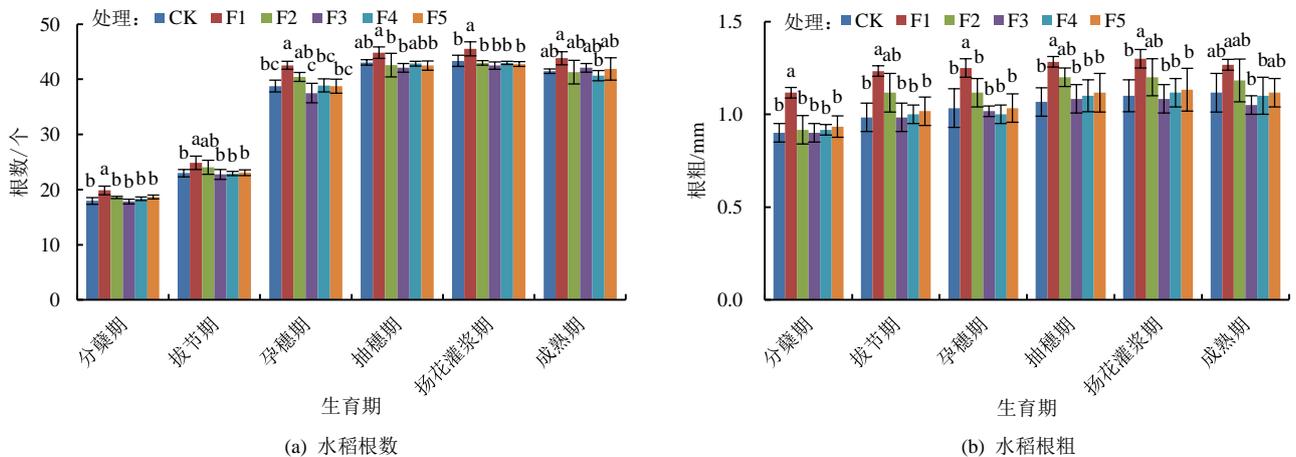


图 2 不同处理对水稻根系形态特征的影响

Fig.2 Effects of different treatments on morphological characteristics of rice roots

2.3 不同处理对水稻干物质的影响

不同处理对水稻干物质的影响由表 2 所示。由表 2 可知, 水稻从分蘖期到成熟期, 各处理的干物质

量均呈增长趋势。从分蘖期到抽穗期, 各生育期 F1 处理的干物质质量最大, 且在分蘖期和抽穗期 F1 处理和其他处理相比差异显著。从孕穗期开始, F3 处理

与 F1 处理的干物质量差距缩小, 在扬花灌浆期 F3 处理与其他处理相比差异显著, 为干物质量最大的处理。与 CK 相比, 成熟期水稻增施硅肥的干物质量显著增加, 增长量为 9.17%~24.24%, 成熟期水稻干物质量表现为 F1 处理 > F3 处理 > F5 处理 > F4 处理 > F2 处理 > CK。

表 2 不同处理对水稻干物质量的影响

Table 2 Effects of different treatments on rice dry matter

处理	分蘖期	拔节期	孕穗期	抽穗期	扬花灌浆期	成熟期
CK	0.48±0.01b	1.40±0.12a	3.78±0.12bc	4.64±0.15a	5.93±0.07b	6.86±0.12b
F1	0.57±0.03a	1.66±0.06a	4.26±0.07a	5.02±0.11a	6.41±0.64ab	7.37±0.22a
F2	0.48±0.02b	1.38±0.13a	3.67±0.10b	4.71±0.11a	6.04±0.16ab	6.95±0.15ab
F3	0.48±0.04b	1.30±0.16a	4.07±0.12ab	4.93±0.31a	6.56±0.15a	7.35±0.20ab
F4	0.47±0.02b	1.33±0.17a	3.51±0.15b	4.68±0.15a	6.00±0.13ab	6.95±0.47ab
F5	0.49±0.03b	1.38±0.58a	3.76±0.36bc	4.71±0.47a	6.30±0.16ab	7.15±0.18ab

2.4 不同处理对水稻产量构成因素及灌水利用效率的影响

水稻产量可分解为不同产量构成因素, 不同处理对水稻产量构成因素及灌溉水分利用效率的影响由表 3 所示。由表 3 可知, 间歇灌溉下不同生育时期施硅肥对穗长和千粒质量有一定的影响, 但差异不显著。与 CK 相比, 其中 F4、F5 处理较大, 穗长分别增加了 1.95%、1.24%, 千粒质量分别增加了 2.43%、0.44%。水稻穗数在 F1 处理下为 362.96 穗/m², 与其他处理相比差异达到显著水平。水稻实穗粒数在 F5 处理下最

大为 111.89 粒, 与其他处理相比差异显著。F3 处理的结实率最高为 90.72%, 与其他处理相比差异显著。与 CK 相比其他各处理的产量均有增长, 增幅为 2.05%~8.63%, 其中 F1 处理产量最大为 9 825.20 kg/hm², F3 处理次之为 9 752.90 kg/hm², 差异显著。各处理的灌溉水分利用效率与 CK 相比均有不同程度的提高, 增幅为 2.16%~8.63%, 其中 F1 处理灌溉水分利用效率最大为 1.51 kg/m³, F3 处理次之为 1.50 kg/m³, 与 CK 相比差异显著。

表 3 不同处理对水稻产量构成因素及灌溉水分利用效率的影响

Table 3 Effects of different treatments on rice yield components and irrigation use efficiency

处理	穗长/cm	穗数/(穗 m ⁻²)	实穗粒数/粒	结实率/%	千粒质量/g	产量/(kg hm ⁻²)	灌水量/(m ³ hm ⁻²)	灌溉水分利用效率/(kg m ⁻³)
CK	21.01±0.39a	338.89±5.56b	106.44±0.19b	89.04±0.18b	25.10±0.73a	9 044.41±191.41b		1.39±0.03b
F1	20.70±0.79a	362.96±3.21a	108.11±1.95ab	89.39±0.14b	25.05±0.30a	9 825.20±81.85a		1.51±0.01a
F2	21.10±0.52a	338.89±5.56b	109.44±1.90ab	89.18±0.51b	24.92±0.33a	9 230.02±31.58ab	6 488.92	1.42±0.02ab
F3	20.64±0.38a	350.00±1.11b	111.78±2.34a	90.72±0.24a	25.00±0.25a	9 752.90±269.71a		1.50±0.04a
F4	21.42±0.29a	342.59±8.49b	107.89±2.46ab	89.42±0.37b	25.71±0.30a	9 506.18±294.01ab		1.46±0.05ab
F5	21.27±0.99a	337.04±3.21b	111.89±4.86a	89.53±0.18b	25.21±0.69a	9 488.01±736.62ab		1.46±0.11ab

2.5 水稻生长性状及产量相关性分析

水稻各生长性状及产量之间存在不同程度的相关性, 相关性分析结果见表 4。

表 4 水稻生长性状及产量的相关性分析

Table 4 Correlation analysis of growth traits and yield of rice

指标	株高	叶面积指数	根数	根粗	干物质量	理论产量
株高	1					
叶面积指数	0.032	1				
根数	0.291	0.516*	1			
根粗	0.062	0.334	0.239	1		
干物质量	-0.066	0.426	0.183	0.153	1	
理论产量	-0.127	0.520*	0.284	0.097	0.494*	1

注 用*表示在 0.05 水平显著相关。

由表 4 可知, 叶面积指数与根数显著正相关。水稻产量与生长性状之间存在不同程度的相关性, 除株高与产量负相关 (-0.127) 外, 其他 4 个指标均与理论产量正相关。相关系数大小依次为叶面积指数 (0.520) > 干物质量 (0.494) > 根数 (0.284) > 根粗 (0.097), 其中叶面积指数和干物质量与产量显著相关。

3 讨论

3.1 间歇灌溉下不同生育时期施硅对水稻生长发育的影响

株高是水稻重要的农艺性状, 合适的株高对水稻的高产至关重要。Panahi 等^[12]在伊朗北部的田间试验结果表明, 硅肥的施用可显著提高水稻株高, 但本试验增施硅肥对水稻株高无显著影响。水稻株高受遗传和环境因素调控且调控机制复杂, 这可能是造成结论差异的原因, 需进一步验证^[13]。叶面积指数与作物长势及产量密切相关, 试验发现, 间歇灌溉下增施硅肥有利于水稻的叶面积指数增长, 这与杨秀霞等^[14]的研究结果相同。硅肥施用可上调植物水通道蛋白的表达, 还可在叶片中形成硅-角质层双层结构, 有利于提高根系水力传导、减少蒸腾作用失水, 缓解干旱胁迫从而促进植物生长^[15]。值得注意的是, 本研究中分蘖期施硅肥对分蘖期的叶面积指数影响显著, 孕穗期施硅肥对孕穗期的叶面积指数影响最为显著, 原因可能是

水稻施硅肥能提高分蘖数和功能叶的叶长、叶宽, 从而促使叶面积指数的提高, 而分蘖期和孕穗期对水稻分蘖和功能叶生长影响较大^[16]。张冰等^[17]研究表明, 与不施硅肥相比, 增施硅肥可使根系的形态指标显著提高。本试验也发现间歇灌溉下分蘖期增施硅肥显著提高水稻根数及根粗。硅肥施用可以通过分子信号途径诱导植物产生新根, 抵抗非生物胁迫, 有利于根系吸收水肥, 实现高产^[18]。

3.2 间歇灌溉下不同生育时期施硅对水稻干物质及产量的影响

增施硅肥有利于缓解水稻的非生物胁迫, 促进干物质积累^[4]。本试验发现间歇灌溉下施硅肥有利于增加水稻干物质质量, 其中分蘖期施硅肥对水稻干物质质量影响最为显著。间歇灌溉下水稻施硅肥有利于实穗粒数、结实率及产量提高, 这与王圣毅等^[19]研究结果一致, 但硅肥施用对穗长和千粒质量影响小, 原因尚不明确。今后可针对间歇灌溉下增施硅肥对穗长和千粒质量的影响进一步研究。硅肥施用有利于提高作物抗逆性, 韩晓楠等^[20]研究表明, 增施硅可缓解盐分胁迫提高水稻产量和水分利用效率。本研究发现在间歇灌溉下增施硅肥有利于提高水稻产量及灌溉水分利用效率。不同生育时期施硅肥对水稻产量的提高程度有所不同, 具体表现为分蘖期>孕穗期>抽穗期>扬花灌浆期>拔节期。可能原因是水稻不同生长阶段所需主要营养元素不同, 但各营养元素共同作用才能促进水稻生长。水稻分蘖及稻穗的形成主要受磷素的影响, 孕穗到抽穗阶段则受钾素的影响较大, 生育后期主要受氮素的影响, 而硅肥可促进水稻在各生育阶段对其他营养元素的吸收, 进而提高水稻产量^[21]。拔节期对各营养元素的需求小于其他生育阶段, 因而拔节期施硅肥的增产幅度最小。通过水稻生长性状及产量相关性分析可知, 叶面积指数和干物质质量与产量显著正相关, 这与陈健晓等^[22]研究发现施硅肥提高叶面积指数和干物质积累量是水稻增产的主要原因结果相似。

3.3 间歇灌溉下水稻的硅肥施用量及施用时期

目前, 水稻施硅肥用量及施用时期尚无统一标准。金正勋等^[11]研究表明, 寒地水稻在最高分蘖期至幼穗分化初期施用 6 kg/hm^2 的“农爱丰”硅肥可提高水稻单产和稻米蒸煮食味品质。吕健飞等^[23]研究发现, 水稻“甬优 6760”硅肥用量最佳为 3 kg/hm^2 , 可使产量增幅达 9.6%。本试验虽设置硅肥施用量为 6 kg/hm^2 , 但未来关于间歇灌溉下硅肥适宜施用量还需进一步验证。本试验表明, 间歇灌溉下分蘖期施硅肥 6 kg/hm^2 时, “津原 85”水稻的产量与灌溉水分利用效率最佳, 有利于水稻节水、稳产。但结果仅为 1 a 试验所得, 探究间歇灌溉下施硅肥对水稻的生长发育及产量的

影响, 还需在不同的水稻品种及灌溉间歇时间下进行长期研究。

4 结论

1) 间歇灌溉下, 增施硅肥对“津原 85”水稻的叶面积指数、干物质质量有促进作用, 且分蘖期施硅肥有利于根数及根粗的增加, 但施硅肥对株高无显著影响。增施硅肥还有利于水稻产量和灌溉水分利用效率的提高, 分别可增长 2.05%~8.63%、2.16%~8.63%。且分蘖期施硅肥产量和灌溉水分利用效率取得最大, 为 $9\ 825.20 \text{ kg/hm}^2$ 和 1.51 kg/m^3 , 孕穗期施硅肥次之。

2) 分蘖期可作为间歇灌溉下“津原 85”水稻适宜的施硅肥时期。

参考文献:

- [1] 水利部水资源管理司. 2020 年度《中国水资源公报》[J]. 水资源开发与管理, 2021, 19(8): 2.
Department of Water Resources Management, Ministry of Water Resources. China Water Resources Bulletin in 2020[J]. Water Resources Development and Management, 2021, 19(8): 2.
- [2] NAWAZ A, REHMAN A U, REHMAN A, et al. Increasing sustainability for rice production systems[J]. Journal of Cereal Science, 2022, 103: 103-400.
- [3] 马世浩, 杨丞, 王贵兵, 等. 水稻节水灌溉技术模式研究进展[J]. 节水灌溉, 2021(8): 19-24.
MA Shihao, YANG Cheng, WANG Guibing, et al. Research progress of rice water-saving irrigation technology mode[J]. Water Saving Irrigation, 2021(8): 19-24.
- [4] KHAN M I R, ASHFAQUE F, CHHILLAR H, et al. The intricacy of silicon, plant growth regulators and other signaling molecules for abiotic stress tolerance: An entrancing crosstalk between stress alleviators[J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2021, 162: 36-47.
- [5] 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 Wanyang, LI Xiaokun. Research progress on silicon nutrition and efficient application of silicon fertilizer in rice[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2020(4): 231-239.
- [6] 苏庆旺, 苍柏峰, 白晨阳, 等. 施硅量对旱作水稻产量和干物质积累的影响[J]. 中国水稻科学, 2022, 36(1): 87-95.
SU Qingwang, CANG Baifeng, BAI Chenyang, et al. Effect of silicon application rate on yield and dry matter accumulation of rice under dry cultivation[J]. Chinese Journal of Rice Science, 2022, 36(1): 87-95.
- [7] EMAM M, KHATTAB H, HELAL N, et al. Effect of selenium and silicon on yield quality of rice plant grown under drought stress[J]. Australian Journal of Crop Science, 2014, 8: 596-605.
- [8] FATMAH SIREGAR A, SIPAHUTAR I A, HUSNAIN, et al. Beneficial effect of silicon application and intermittent irrigation on improving rice productivity in Indonesia[J]. Jurnal Agronomi Indonesia (Indonesian Journal of Agronomy), 2020, 48(1): 15-21.
- [9] 王振华. 不同时期喷施硅制剂对水稻硅素吸收和产量的影响[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2019.
WANG Zhenhua. Effects of spraying silicon preparations on silicon absorption and yield of rice in different growth stages[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2019.
- [10] 朱薇, 全坚宇, 陈豪, 等. 叶面喷施水溶性硅肥对水稻产量及其物质生产的影响[J]. 农业开发与装备, 2019(3): 108-109.
ZHU Wei, QUAN Jianyu, CHEN Hao, et al. Effect of foliar spraying

- water-soluble silicon fertilizer on rice yield and material production[J]. *Agricultural Development & Equipments*, 2019(3): 108-109.
- [11] 金正勋, LUGO Oke, 朱方旭, 等. 硅肥施用量及时期对寒地水稻产量和品质性状及抗倒性的影响[J]. *黑龙江农业科学*, 2015(10): 49-54.
JIN Zhengxun, OKE L, ZHU Fangxu, et al. Effect of silicon application rate and stage on yield, quality and lodging resistance of rice in cold region[J]. *Heilongjiang Agricultural Sciences*, 2015(10): 49-54.
- [12] PANAH A, AMINPANAH H, SHARIFI P. Effect of nitrogen, bio-fertilizer, and silicon application on yield and yield components of rice (*Oryza sativa* L.)[J]. *Philippine Journal of Crop Science*, 2015, 40: 76-81.
- [13] YAN Y, WEI M X, LI Y, et al. MiR529a controls plant height, tiller number, panicle architecture and grain size by regulating SPL target genes in rice (*Oryza sativa* L.)[J]. *Plant Science*, 2021, 302: 110-128.
- [14] 杨秀霞, 燕辉, 陈仁辉, 等. 硅锌硼配施对红壤区双季稻产量和群体发育特征的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2016(6): 121-128.
YANG Xiuxia, YAN Hui, CHEN Renhui, et al. Effect of combined use of silicon, zinc and boron fertilizers on grain yield and population development of double-cropping rice in the red soil region of China[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2016(6): 121-128.
- [15] 何静, 朱婷, 黄雪玲, 等. 硅提高植物抗旱性的生理机制研究进展[J]. *热带亚热带植物学报*, 2022, 30(6): 813-822.
HE Jing, ZHU Ting, HUANG Xuelling, et al. Research progress on physiological mechanism of silicon on enhancing plant drought resistance[J]. *Journal of Tropical and Subtropical Botany*, 2022, 30(6): 813-822.
- [16] 韦还和, 孟天瑶, 李超, 等. 施硅量对甬优系列籼粳交超级稻产量及相关形态生理性状的影响[J]. *作物学报*, 2016, 42(3): 437-445.
WEI Huanhe, MENG Tianyao, LI Chao, et al. Effects of silicon fertilizer rate on grain yield and related morphological and physiological characteristics in super rice of yongyou japonica/indica hybrids series[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2016, 42(3): 437-445.
- [17] 张冰, 吴云艳. DA-6 与硅肥对水稻苗期根系形态和生理特性的影响[J]. *辽东学院学报(自然科学版)*, 2019, 26(4): 270-273.
ZHANG Bing, WU Yunyan. Effects of mixture DA-6 and silicon fertilizer on root morphology and physiological characteristics of rice at seedling stage[J]. *Journal of Eastern Liaoning University (Natural Science Edition)*, 2019, 26(4): 270-273.
- [18] TRIPATHI D K, VISHWAKARMA K, SINGH V P, et al. Silicon crosstalk with reactive oxygen species, phytohormones and other signaling molecules[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, 408: 124-130.
- [19] 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 Shengyi, CHEN Lin, LI Li, et al. Effect of silicon fertilizer on growth and yield of rice under drip irrigation with film mulch[J]. *China Rice*, 2016, 22(5): 85-88.
- [20] 韩晓楠, 孙书洪, 马文慧, 等. 微咸水灌溉下硅肥对水稻生长性状的影响研究[J]. *节水灌溉*, 2022(1): 74-79, 84.
HAN Xiaonan, SUN Shuhong, MA Wenhui, et al. Effect of silicon fertilizer on rice yield under brackish water irrigation[J]. *Water Saving Irrigation*, 2022(1): 74-79, 84.
- [21] 李爽. 硅制剂对土壤养分有效性和水稻养分吸收及产量的影响[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2016.
LI Shuang. Effects of silica Sol on soil nutrient availability and nutrient absorption and production of rice[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2016.
- [22] 陈健晓, 屠乃美, 易镇邪, 等. 硅肥对超级早稻产量形成和部分生理特性的影响[J]. *作物研究*, 2011, 25(6): 544-549.
CHEN Jianxiao, TU Naimei, YI Zhenxie, et al. Effects of silicon fertilizer on yield formation and some physiological characteristics of super early rice[J]. *Crop Research*, 2011, 25(6): 544-549.
- [23] 吕健飞, 赖国纲, 吴春艳. 水稻甬优 6760 喷施水溶性硅肥试验[J]. *浙江农业科学*, 2021, 62(8): 1484-1485.
LYU Jianfei, LAI Guogang, WU Chunyan. Water-soluble silicate fertilizer application on rice variety Yongyou 6760[J]. *Journal of Zhejiang Agricultural Sciences*, 2021, 62(8): 1484-1485.

The Combined Effect of Silicon Fertilization and Intermittent Irrigation on Rice Growth and Development

QIU Jinghua¹, SUN Shuhong^{1,2}, XUE Zhu^{1,2*}, PENG Jinzhou¹, YI Ruochen¹, DONG Jianshu¹

(1. Department of Hydraulic Engineering, Tianjin Agricultural University, Tianjin 300384, China;

2. Tianjin Agricultural Hydraulic Engineering Center, Tianjin 300384, China)

Abstract: **【Objective】** Intermittent irrigation has become an important water-saving irrigation method to conserve water and improve rice yield in southern China. This paper presents the results of an experimental study of the combined effect of intermittent irrigation and silicon fertilization at different stages on rice growth and yield, to find the optimal timing for silicon fertilization. **【Method】** The experiment was conducted in a field with the Jinyuan 85 variety used as the experimental plant. There were six silicon applications: no silicon fertilizer (CK), applying silicon fertilizer at tillering stage (F1), jointing stage (F2), booting stage (F3), heading stage (F4), or blooming and filling period (F5). Growth traits and yield of the rice in each treatment were measured. **【Result】** Silicon fertilizer application combined with intermittent irrigation not only promoted rice growth and development, but also improved its yield and water use efficiency. Compared with CK, silicon fertilization increased leaf area index, dry matter, yield, and irrigation water use efficiency of the rice by 1.15% to 11.36%, 9.17% to 24.24%, 2.05% to 8.63%, and 2.16% to 8.63%, respectively, depending on fertilization timing. The best effect was observed when the silicon fertilizer was applied at the tillering stage. **【Conclusion】** Combining intermittent irrigation with silicon fertilization can promote rice growth and development, thereby improving yield and irrigation water use efficiency of the rice. For the Jinyuan 85 variety studied in this paper, the optimal timing for silicon fertilization is at the tillering stage.

Key words: intermittent irrigation; rice; silicon fertilizer; growth traits; yield; irrigation water use efficiency

责任编辑: 赵宇龙