

硅钾肥配施对水稻茎秆理化性状 及抗倒伏能力的影响

范永义, 杨国涛, 陈 敬, 蒋 芬, MUSLIM Qadir, 陈永军, 胡运高*

(西南科技大学水稻研究所, 四川绵阳 621010)

摘 要: 该研究以易倒伏品种‘B 优 827’为试验材料, 通过分析硅钾肥配合施用对水稻茎秆的弯曲力矩、抗折力以及倒伏指数的影响, 探索通过肥料调控提高水稻抗倒伏能力的方法与技术措施。结果显示: (1) 硅钾肥配施能显著增加水稻基部节间茎秆直径和壁厚, 缩短节间长度, 并在低硅中钾处理(T_2 , 硅肥 300 kg/hm²、钾肥 400 kg/hm²)下基部各节间长度缩短幅度最大(12.44%~20.80%), 直径和壁厚增加幅度分别为 2.82%~5.76%、22.95%~28.57%。(2) 硅钾肥配施处理后, 水稻基部各节间纤维素、木质素及灰分含量显著变化, 并以低硅中钾处理(T_2)差异较显著, 且基部节间木质素含量分别比对照显著提高 14.55%、8.67%、7.73%。(3) 硅钾肥配施处理能显著增加水稻基部节间抗折力, 降低倒伏指数, 同时仍以低硅中钾处理(T_2)的抗折力最大、倒伏指数最小, 对提高‘B 优 827’植株抗倒伏能力效果最好。研究表明, 合理的硅钾肥配比(硅肥 300 kg/hm²、钾肥 400 kg/hm²)能显著增加易倒伏水稻品种‘B 优 827’的茎秆壁厚和直径, 缩短基部节间长度, 提高抗折力, 还能增加其基部节间木质化程度, 最终增强植株抗倒伏能力; 硅钾肥配合施用可通过改善茎秆物理化学特性有效增强易倒伏水稻植株的抗倒伏能力。

关键词: 水稻; 硅钾配施; 茎秆; 抗倒伏性

中图分类号:

文献标志码: A

The Physical, Chemical Characters and Lodging Resistance of Rice Stem with Silicon Potassium Collocation Application

FAN Yongyi, YANG Guotao, CHEN Jing, JIANG Fen,
MUSLIM Qadir, CHEN Yongjun, HU Yungao*

(Rice Research Institute of Southwest University of Science and Technology, Mianyang, Sichuan 621010, China)

Abstract: We investigated the method and techniques of enhancing rice lodging resistance through the analysis influence on bending moment at breaking, bending force and lodging index of stalks in rice under silicon potassium collocation application by using lodging-susceptible variety ‘B You 827’. Results showed that: (1) silicon potassium collocation application could significantly increase the basal internode stem diameter and wall thickness, shortened internode length. In comparison with contrast, internode length decreased about 12.44%—20.80%, as well as, the diameter and wall thickness increased by 2.82%—5.76% and 22.95%—28.57%, respectively with low silicon middle potassium treatment (T_2 , silicon fertilizer 300 kg/hm², potash 400 kg/hm²). (2) The cellulose, lignin and ash contents of each basal internode signifi-

收稿日期: 2016-01-01; **修改稿收到日期:** 2016-01-17

基金项目: 国家科技支撑计划(2014BAD01B03-3); 国家重点研发计划: 七大农作物育种试点专项“西南水稻优质高产高效新品种培育”; 四川省‘十三五’水稻育种攻关项目(2016NYZ0028); 2016 年度四川省大学生创新创业训练计划项目(201610619018); 国家自然科学基金项目(31401347)

作者简介: 范永义(1990—), 男, 在读硕士研究生, 主要从事水稻抗倒伏研究。E-mail: 1415961824@qq.com

* 通信作者: 胡运高, 博士, 研究员, 主要从事水稻遗传育种研究。E-mail: swust.rri@163.com

cantly changed under silicon potassium collocation application and with low silicon middle potassium treatment (T_2). As a result, lignin content of basal internode increased by 14.55%, 8.67% and 7.73%, respectively in comparison with contrast. (3) Silicon potassium collocation application could significantly increase the flexural strength of each internode, and reduce lodging index, at the same time. The effect of improving lodging resistance was best with low silicon middle potassium treatment (T_2) in ‘B You 827’ (bending force was maximum and lodging index was minimum). Researches showed that reasonable ratio of silicon potassium fertilizer (silicon fertilizer 300 kg/hm², potash 400 kg/hm²) could not only significantly increase the basal internode stem diameter and wall thickness in lodging-susceptible variety ‘B You 827’, shortened internode length, improved the flexural strength, but also can increase the basal internode lignification degree, eventually improved lodging resistance; The results also showed that the silicon potassium collocation application by improving physical and chemistry property of stem, can effectively strengthen lodging resistance of rice plants, especially for lodging-susceptible varieties.

Key words: rice; silicon potassium collocation application; stem; lodging resistance

水稻为主要粮食作物和模式研究植物^[1]。近年来,随着氮肥用量的增加和产量进一步提高,水稻倒伏日益严重,带来许多不利影响,严重制约水稻生产^[2-3]。一方面,倒伏会降低产量^[4-6],中国每年因倒伏导致稻谷减产约 10%~30%^[7];另一方面,倒伏还会影响稻米的品质^[8],增加农民生产成本。

迄今,前人已在肥料处理对水稻抗倒伏的影响方面做了很多探索工作,也取得了许多有效的成果。首先,有关氮肥研究发现,水稻抗倒伏能力随用氮量的增加而减弱,株高、基部节间长度和基部节间充实度等形态性状,以及弯曲力矩、抗折力等力学性状是影响水稻茎秆抗倒伏能力的主要因素^[2-3,9]。其次,有关硅肥研究发现,施用 300 kg/hm² 的五水偏硅酸钠对水稻的抗倒伏效果最好^[10];施用硅肥能够显著地降低水稻基部节间的长度,同时还能增加水稻基部节间的壁厚^[11-12]和茎秆横截面积,显著提高水稻的抗折力^[12-15],从而有效提高水稻的抗倒伏能力。同时,也有研究发现钾肥也能提高植株抗倒伏能力,增加茎秆基部各节间壁厚,从而增加茎秆机械强度^[16]和抗折力^[14],减轻倒伏的发生^[17]。但上述研究都局限于单一硅肥或钾肥对水稻抗倒伏性的影响,而对于硅钾配合施用的研究未见报道。故本试验以产量高、适应性强、易倒伏的水稻品种 ‘B 优 827’^[18] 为材料,研究硅钾配合施用对水稻抗倒伏性的影响,并从茎秆物理性状、化学成分等方面分析倒伏机理,拟为目前高产或超高产水稻大面积推广前提下,通过施肥栽培技术提高水稻抗倒伏性提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 试验设计

本研究以四川常用杂交水稻品种 ‘B 优 827’

(产量高、适应性强但易倒伏)为试验材料,于西南科技大学水稻实验基地展开。供试土样土质为水稻土,养分含量分别为全氮 1.98 g/kg、速效氮 80.3 mg/kg、速效磷 43.3 mg/kg、速效钾 76.2 mg/kg、有效硅 43.3 mg/kg。依据国家标准 DB51/ T1358-2011,供试土壤钾水平较低,硅含量正常。基于前期单一硅、钾肥试验结果^[13-14],本次试验主要研究硅钾配施对水稻抗倒伏性的影响。因此,综合前期结果及土壤肥力综合考虑,试验设计硅肥(五水偏硅酸钠)用量为 300 kg/hm² (抗倒伏效果最好^[19])和 500 kg/hm² 2 个水平,钾肥(硫酸钾)用量为 350 kg/hm²、400 kg/hm² (抗倒伏效果最好^[20])和 450 kg/hm² 3 个水平,共组成硅肥钾肥配合用量处理 6 个(2×3),以施硅、钾肥均不施为对照(CK),共 7 个处理,具体详见表 1。试验采用完全随机区组设计,3 次重复,共计 21 个小区,小区面积为 10 m²,按照常规大田管理进行。为防止串肥串水,小区间用包有薄膜的隔板隔开。隔板总宽度为 60 cm,其中 50 cm 埋入地下。

1.2 测定指标及方法

1.2.1 田间取样 水稻成熟前 10 d,每处理、每小区随机选取代表性植株 20 株,带根取出后,用自来水冲洗干净(注意保持茎秆的完整性),保留叶鞘、叶片和穗并保持不失水。于实验室将主茎单独取出,10 根主茎用于抗倒伏指标测定,另外 10 根用于茎秆化学成分测定。

1.2.2 物理性状 用刻度尺分别测量株高,以及第 2 节(N2)、第 3 节(N3)、第 4 节(N4)节间(从基部伸长节间开始算起自下而上计算)和各节间基部至穗顶长度;用数显游标卡尺测量各基部节间的直径(外径)、壁厚;用百分之一天平称量各基部节间至穗顶

鲜重等茎秆物理性状。

1.2.3 抗倒伏力性状 基部节间抗折力的测定参照赖古秀生^[21]的方法并加以改进。具体操作为:田间取样,将待测定的节间茎秆置于自制简易测定器上,确保茎秆节间中点与测定器中心位置重合(支点间距 5 cm),于中点处挂一个托盘,逐渐加入砝码,直至茎秆折断,此时砝码及托盘的质量换算为重量即为该节间茎秆的抗折力。最后,按孙永健^[22]和赖古秀生^[21]的方法计算各节间的弯曲力矩和倒伏指数,计算公式如下:

弯曲力矩/(g·cm)=节间基部至穗顶长度(cm)×该节间基部至穗顶鲜重量(g);

倒伏指数=弯曲力矩/抗折力×100%;

1.2.4 基部节间化学成分 基部节间茎秆化学成分包括纤维素、木质素及灰分含量等。将主茎按各节间分别装袋,于 105℃下杀青 0.5 h,再于 80℃烘干 72 h 至恒重后用 PULVERISETTE14 型可变速高速旋转粉碎机粉碎,过孔径 80 目筛备用。纤维素和木质素含量的测定参照 FOSS 公司 FibeBt-ecTMM6 1020 /1021 型纤维素测定仪的操作手册进行;灰分含量的测定参照国标 GB /T2677.3-1993 方法进行。

1.3 数据处理与统计分析

试验数据用 Excel2003 进行数据整理,并用 DPS7.05 和 SPSS17 等分析软件进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 硅钾肥配合施用对水稻节间物理性状的影响

随着水稻植株基部节间节位的升高,其节间长呈增加趋势,而直径和壁厚则呈降低的相反变化趋势;硅钾配合施用能显著降低基部各节间长度,增加直径和壁厚(表 1)。首先,基部各节间长度经硅钾配施处理后均比对照(CK)显著缩短($P<0.05$),但幅度不同。其中,N2、N3 和 N4 节间长在 $T_1\sim T_3$ 处理下分别较 CK 缩短 2.72%~14.79%、0.52%~20.80%和 0.40%~2.44%,并均以 T_2 处理降幅最大, T_3 处理降幅最小;而 3 个节间长在 $T_4\sim T_6$ 处理下分别较 CK 缩短 2.38%~18.36%、6.31%~14.90%和 3.43%~4.46%。其次,基部各节间直径经硅钾处理后大多显著大于 CK,并均在 T_4 处理(高硅低钾,硅肥 500 kg/hm²,钾肥 350 kg/hm²)达到最大值, T_2 处理(低硅中钾,硅肥 300 kg/hm²,钾肥 400 kg/hm²)次之, T_4 处理下 N2、N3 和 N4 节间直径分别比相应 CK 显著增加 9.27%、9.70%和 4.83%。第三,基部节间壁厚随节位升高而减小,经硅钾处理后都显著大于 CK,其表现与节间直径相似, T_4 (高硅低钾)处理下 N2、N3 和 N4 节间壁厚分别比 CK 显著增厚 25.64%、34.43%、53.06%。另外,株高在各硅钾处理间差异不显著,说明硅钾配施主要影响基部各节间的直径和壁厚等性状。可见,

表 1 硅钾配合施用对‘B 优 827’茎秆物理性状的影响
Table 1 The influence of physical properties of stalks in ‘B You 827’ under the silicon potassium treatments

处理编号 Number of treatments	肥料 Fertilizer/(kg/hm ²)		节间长 Internode length/cm			茎秆直径(外径) Diameter/mm			壁厚 Wall thickness/mm			株高 Plant height/cm
	Si	K	N2	N3	N4	N2	N3	N4	N2	N3	N4	
CK	0	0	5.88a	9.66a	12.54a	7.44e	6.60e	5.80f	0.78e	0.61d	0.49f	122.48a
T ₁	300	350	5.12d	8.87d	11.46f	7.63c	6.75c	5.99c	0.95b	0.74b	0.59c	123.21a
T ₂	300	400	5.01e	7.65g	10.98g	7.65b	6.98b	6.01b	0.96b	0.75b	0.63b	122.16a
T ₃	300	450	5.72b	9.61b	12.49b	7.54d	6.65d	5.86e	0.83d	0.68c	0.57d	120.87a
T ₄	500	350	4.80f	8.22f	12.11c	8.13a	7.24a	6.08a	0.98a	0.82a	0.75a	121.88a
T ₅	500	400	5.61c	9.05c	12.08d	7.55d	6.66d	5.89d	0.85c	0.74b	0.57d	123.55a
T ₆	500	450	5.74b	8.61e	11.98e	7.54d	6.65d	5.81f	0.82d	0.67c	0.54e	121.81a

注:钾肥(K)肥源为硫酸钾(≥99.0%),硅肥(Si)肥源为五水偏硅酸钠(≥95%),药品均为分析纯;N2、N3、N4 分别代表水稻第 2 节、第 3 节、第 4 节节间(从基部伸长节间开始算起自下而上计算);同列数据后不同字母表示处理间差异达 5%显著水平,下同
Note: Potash fertilizer (K): potassium sulfate as fertilizer source (≥99.0%), silicon fertilizer (Si): fertilizer source for five water sodium metasilicate (≥95%), for the analysis of pure; N2, N3 and N4 represent the second internode, third internode and fourth internode, respectively (from the first internode (elongation internode) to the fourth internode); Values followed by different letters in a column are significant difference among treatments at the 5% level. The same as below

综合考虑茎秆各物理性状表现,低硅中钾处理水稻基部节间最短,茎秆直径、壁厚较大(尤其是高节位间 N3、N4),是比较适宜的硅钾配施组合。

2.2 硅钾肥配合施用对水稻节间化学成分的影响

硅钾配合施用能显著降低水稻节间纤维素含量,对木质素和灰分含量的影响因处理而异;节间纤维素和木质素含量变化幅度在处理间不同(表 2)。首先,经硅钾配施处理(除处理 T₁ 外)后,基部各节间纤维素含量显著低于 CK($P<0.05$)。基部 N2、N3、N4 节间纤维素含量在 T₁~T₃ 处理下分别低于对照 4.66%~10.09%、6.81%~10.78%、2.81%~10.32%,而在 T₄~T₆ 处理下分别较 CK 降低 1.84%~5.36%、2.85%~20.04%、2.25%~4.72%。其次,在施用硅钾肥后,基部节间木质素含量变化趋势不同。N2 节间木质素含量在 T₁~T₃ 处理下分别增加 4.22%、15.96%、14.55%,在 T₄~T₆ 处理下分别增加 6.36%、18.00%、34.32%;而 N3 节间木质素含量变化规律不明显,并以 T₁、T₂ 处理显著高于 CK,T₅ 处理与 CK 相近,其余处理均显著低于 CK(尤其以 T₃、T₆ 较低);对于 N4 节间,仅 T₂ 处理木质素显著高于对照 7.73%,T₅ 处理与 CK 相近,其余处理显著低于对照 8.00%~25.23%。另外,N2 节间灰分含量变化趋势不显著,N3、N4 节间灰分含量均显著高于对照 CK;N3

节间灰分含量在 T₁~T₆ 处理下分别较 CK 增加 2.86%~14.02%,N4 节间则分别较 CK 增加 3.26%~7.68%,并均以 T₂ 处理增幅最大且达到显著水平。以上分析结果表明,硅钾配合施用能显著调节基部各节间木质素、纤维素及灰分含量,且处理 T₂ 效果更显著。

2.3 硅钾肥配合施用对水稻抗倒伏能力的影响

倒伏指标方差分析表明(表 3),硅肥、钾肥及硅钾互作均能显著影响抗折力、倒伏指数,这也充分表明硅钾配施确实显著影响‘B 优 827’植株抗倒伏性。从基部节间 N2 到 N4,弯曲力矩逐渐增大,而抗折力和倒伏指数反而逐渐降低;不同浓度的硅钾组合处理(T₁~T₆)的弯曲力矩、抗折力及倒伏指数均与 CK 存在显著差异,且抗折力显著大于 CK,倒伏指数显著低于 CK(表 4)。首先,硅钾配施(除处理 T₃ 外)能显著增加基部各节间弯曲力矩。其次,硅钾配合施用对增加上部节间(N3、N4)抗折力效果更显著,如 N3、N4 节间抗折力在 T₁~T₆ 处理下分别较 CK 增加 16.18%~91.18%、4.88%~104.88%,并均以 T₂ 处理增幅最大,T₃ 处理增幅最小。最后,由于弯曲力矩和抗折力的显著增加,导致基部各节间倒伏指数显著低于 CK,如 N3、N4 节间的倒伏指数分别降低 10.61%~29.69%、7.56%~51.86%,仍以 T₂ 处理降幅最大,T₃ 处理降幅较低。

表 2 硅钾肥对基部不同节间化学成分的影响

Table 2 The effects of chemical components in different basal internode under the silicon potassium treatments

处理编号 Number of treatments	纤维素含量 Cellulose content/%			木质素含量 Lignin content/%			灰分含量 Ash content/%		
	N2	N3	N4	N2	N3	N4	N2	N3	N4
CK	41.94a	42.86a	42.66a	5.29c	7.24b	6.50b	52.77c	49.90f	50.84d
T ₁	42.08a	39.22cd	41.46b	5.51a	7.58a	5.85c	50.41d	53.21b	52.68c
T ₂	37.71d	38.24d	38.26c	6.13bc	7.86a	7.00a	56.16a	53.90a	54.74a
T ₃	39.99bc	39.94bcd	40.67b	6.06bc	6.22d	5.98c	53.96b	53.84a	53.35bc
T ₄	39.66c	41.64ab	40.65b	5.62c	7.03c	5.44d	54.68b	51.33e	53.91ab
T ₅	40.01abc	34.25e	41.21b	6.24b	7.19b	6.29b	51.76c	53.56bc	52.49c
T ₆	41.17ab	41.01abc	41.70ab	7.10a	6.48d	4.86e	51.73c	52.51d	53.43bc

表 3 倒伏指标方差分析(F 值)

Table 3 Analysis of variance of lodging resistance index (F value)

变异来源 Source of variation	自由度 DF	抗折力 Breaking-resistant strength			倒伏指数 Lodging index		
		N2	N3	N4	N2	N3	N4
钾肥 Silicon	2	891.08**	698.86**	1 095.41**	1 116.48**	7 916.75**	42 673.17**
硅肥 Potassium	1	2 176.97**	2 242.45**	881.93**	578.74**	6 406.25**	3 219.30**
钾肥×硅肥 Silicon×Potassium	5	1 018.03**	294.24**	730.50**	441.75**	3 000.08**	4 006.19**

表 4 硅钾配合施用对‘B 优 827’抗倒伏指标的影响

Table 4 Influence of lodging resistance index under the silicon potassium treatments

处理编号 Number of treatments	弯曲力矩 Bending moment/(g·cm)			抗折力 Breaking-resistant strength/g			倒伏指数 Lodging index		
	N2	N3	N4	N2	N3	N4	N2	N3	N4
CK	2 297.26f	2 022.61f	1 685.99f	0.98g	0.68g	0.41g	250.29a	310.72a	453.20a
T ₁	2 571.63c	2 217.67c	1 825.94d	1.43c	1.07d	0.75c	185.88d	218.48e	274.81e
T ₂	2 457.08e	2 157.25e	1 782.81e	1.63b	1.30a	0.84a	155.82g	170.12g	218.15g
T ₃	2 188.49g	1 864.22g	1 507.75g	1.33e	0.79f	0.43f	175.68f	277.76b	386.09c
T ₄	3 202.12a	2 787.63a	2 368.07a	1.82a	1.15b	0.65e	179.27e	256.08c	418.96b
T ₅	2 609.75b	2 274.81b	1 892.05b	1.36d	1.02e	0.69d	200.82b	249.95d	297.89d
T ₆	2 485.57d	2 199.24d	1 827.72c	1.33f	1.10c	0.80b	193.30c	206.77f	241.58f

表 5 水稻节间理化性状与水稻抗倒伏能力的相关性

Table 5 The correlation between physical chemical property of rice internodes and lodging resistance

指标 Index	节间长 Internode length	直径 Diameter	壁厚 Wall thickness	株高 Plant height	纤维素 Cellulose	木质素 Lignin	灰分 Ash
抗折力 Breaking-resistant strength	−0.70**	0.74**	0.45*	0.18	−0.37	0.31	0.17
倒伏指数 Lodging index	0.67**	−0.64**	−0.56**	0.14	0.37	−0.15	−0.29

注: * 和 ** 分别表示 0.05 和 0.01 水平显著性相关

Note: * and ** indicate significant correlation at the 0.05 and 0.01 probability levels, respectively

以上结果表明,硅钾配合施用能显著增加水稻上部节间(N3、N4)弯曲力矩和抗折力,降低倒伏指数;同时,低硅中钾处理(T₂)基部各节间倒伏指数最小,即此硅钾用量组合(硅肥 300 kg/hm²,钾肥 400 kg/hm²)可能是增强‘B 优 827’抗倒伏能力的最佳组合。

2.4 水稻节间理化性状与水稻抗倒伏能力的相关性

表 5 显示,水稻倒伏指数与茎秆节间长呈极显著正相关,而与节间直径、壁厚呈极显著负相关关系;茎秆抗折力与其直径、壁厚呈显著或极显著正相关关系,而与节间长呈极显著负相关;并且,茎秆倒伏指数、抗折力与其节间长、直径及壁厚的相关系数的绝对值较大,说明抗倒伏性的强弱主要由节间长度及粗度所决定,即茎秆短而粗壮、抗折力越大,植株抗倒伏性越好,这也暗示水稻植株抗倒伏性主要受自身条件决定。同时,水稻茎秆抗折力与其纤维素含量呈负相关,而与其木质素、灰分含量呈正相关,但均未达到显著水平。上述结果表明,经硅钾肥处理后,水稻茎秆木质素含量偏高,而纤维素和灰分含量低,可能导致其倒伏指数减小,抗折力增大,从而增强了植株抗倒伏性。

3 讨 论

3.1 硅钾肥配合施用与水稻节间物理性状的关系

施用硅肥能够显著降低水稻基部节间的长度,

同时还能增加水稻基部节间的壁厚^[11-15]。同时有研究表明,钾肥也能提高植株抗倒伏能力,增加茎秆基部各节间壁厚,从而增加茎秆机械强度^[16],减轻倒伏的发生^[17]。本研究研究得出,等硅或等钾条件下,硅肥或钾肥能显著降低基部节间长度,增加节间茎秆厚度,这些结果与前人研究结果基本一致^[11-15]。但更重要的是,本研究同时研究得出硅钾配合施用也能显著增加基部节间茎秆壁厚和直径,而显著减小基部节间长度。

3.2 硅钾肥配合施用与水稻节间化学成分的关系

马均等^[23]和林熊等^[24]研究表明施用硅肥后水稻节间纤维素的含量高于对照,且硅的含量与纤维素的含量呈正相关,但是范存留等^[14]研究发现,施用钾肥通过改变茎秆物理性状增加抗倒伏性。但本试验研究发现,硅钾肥配合施用不但能显著改善基部节间物理性状,而且还影响其节间化学组成。纤维素和木质素含量呈现此消彼长变化趋势,合理的硅钾配比能显著增加基部节间木质素含量,同时硅钾处理对 N2 节木质素含量的增加效果最优。因此硅钾配合施用可能是通过改善‘B 优 827’茎秆维管束发育程度(尤其是木质部的发育)来实现增强植株的抗倒伏能力,这一推论有待进一步试验研究论证。

3.3 硅钾肥配合施用与水稻抗倒伏能力的关系

有研究表明,钾肥还能提高植株抗倒伏能力,增加茎秆基部各节间壁厚,从而增加茎秆机械强

度^[16],减轻倒伏的发生^[24-25]。当然有研究表明,施用硅肥能显著提高 N4 节间的抗折力,降低茎秆折断率^[17]。充足的硅能使植株茎秆粗壮,机械性能改善,提高水稻植株抗倒伏能力^[26-28]。硅对倒伏指数的影响最大,其次是氮和钾,增施硅肥和钾肥能增强植株的抗倒伏能力^[29]。本试验研究发现,单一的硅肥或钾肥以及硅钾配合施用都能显著增加基部各节间的抗折力、壁厚,进而降低倒伏指数,提高植株的抗倒伏能力。虽然施用硅钾肥后植株的生物量增加,导致弯曲力矩显著增加,但是抗倒伏性也显著增加,这可能是施用硅钾肥后显著改良了节间的物理、化学性状,使得节间的抗折力显著提高所致。

但是水稻茎秆抗倒伏能力受多因素影响,主要因素有株高、重心高度、基部节间长度和基部节间充实度等形态性状,弯曲力矩、抗折力等力学性状^[2-3,9,30-31]以及栽培肥水管理条件^[32]、品种类型,并且抗倒性强的水稻其茎秆粗壮,机械组织充实,维管束数量多、面积大,木质化程度高且解剖结构合

理^[33],说明提高水稻抗倒伏性关键在于形态性状、力学性状以及解剖结构的再度优化。而本研究通过考察硅钾肥配合施用对抗倒伏性的影响,一方面弥补了硅钾配合施用研究抗倒伏性这一空白,另一方面得出硅钾配合施用能有效增强水稻品种(易倒伏类)的抗倒伏性,这对减轻倒伏发生具有重要实际意义。当然,至于单一的硅肥、钾肥以及硅钾配施三者间的优越性尚有待进一步研究,这将是我們下一步探讨的课题。

综上所述,硅钾配合施用是通过改善‘B 优 827’基部节间物理性状(缩短节间长度、增加壁厚和直径),影响节间化学组成(增加木质素含量),导致‘B 优 827’水稻植株的抗倒伏能力显著增强,结果说明适宜用量的硅钾肥(低硅中钾,硅肥浓度为 300 kg/hm² 左右,钾肥浓度为 400 kg/hm² 左右)能有效增强水稻品种(易倒伏类)的抗倒伏性,降低倒伏面积,减缓产量降低风险。

参考文献:

[1] BARKER N P, CLARK L G, DAVIS J I, *et al.* Phylogeny and subfamilial classification of the grasses (Poaceae)[J]. *Annals of the Missouri Botanical Garden*, 2001, **88**(3): 373-457.

[2] 雷小龙,刘 利,刘 波,等. 杂交籼稻 F 优 498 机械化种植的茎秆理化性质与抗倒伏性[J]. 中国水稻科学, 2014, **28**(6): 612-620.

LEI X L, LIU L, LIU B, *et al.* Physical and chemical characteristics and lodging resistance of culm of indica hybrid rice F You 498 under mechanical planting[J]. *Chin J Rice Sci*, 2014, **28**(6): 612-620.

[3] 陈晓光,石玉华,王成雨,等. 氮肥和多效唑对小麦茎秆木质素合成的影响及其与抗倒伏性的关系[J]. 中国农业科学, 2011, **44**(17): 3 529-3 536.

CHEN X G, SHI Y H, WANG C Y, *et al.* Effects of nitrogen and PP333 application on the lignin synthesis of stem in relation to lodging resistance of wheat[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2011, **44**(17): 3 529-3 536.

[4] HITAKA H. Studies on the lodging of rice plants[J]. *Jpn Agric Res*, 1969, **4**(3): 1-6.

[5] STAM P P. Root morphology of maize and its relationship to root lodging[J]. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 1992, **168**(2): 113-118.

[6] KASHIWAGI T, SASAKI H, ISHIMARU K. Factors responsible for decreasing sturdiness of the lower part in lodging of rice[J]. *Plant Production Science*, 2005, **8**(2): 166-172.

[7] 胡继松,彭伟正,庞伯良,等. 水稻抗倒伏性及评价指标体系研究进展[J]. 湖南农业科学, 2011, (13): 41-44.

HU J S, PENG W Z, PANG B L, *et al.* Research progress of evaluation index system of rice lodging resistance[J]. *Hunan Agricultural Science*, 2011, (13): 41-44.

[8] 郎有忠,杨晓东,王美娥,等. 结实阶段不同时期倒伏对水稻产量及稻米品质的影响[J]. 中国水稻科学, 2011, **25**(4): 407-412.

LANG Y Z, YANG X D, WANG M E, *et al.* Effects of lodging at different filling stages on rice grain yield and quality[J]. *Chin J Rice Sci*, 2011, **25**(4): 407-412.

[9] 李国辉,钟旭华,田 卡,等. 施氮对水稻茎秆抗倒伏能力的影响及其形态和力学机理[J]. 中国农业科学, 2013, **46**(7): 1 323-1 334.

LI G H, ZHONG X H, TIAN K, *et al.* Effect of nitrogen application on stem lodging resistance of rice and its morphological and mechanical mechanism[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2013, **46**(7): 1 323-1 334.

[10] 邓 文,青先国,马国辉,等. 水稻抗倒伏研究进展[J]. 杂交水稻, 2006, **21**(6): 6-10.

DENG W, QING X G, MA G H, *et al.* Research progress of lodging resistance of rice[J]. *Hybrid Rice*, 2006, **21**(6): 6-10.

[11] 刘红芳. 硅对水稻倒伏和白叶枯病抗性的影响[D]. 北京: 中国农业科学院, 2015.

[12] 吴海兵,申建宁,胡珊珊. 硅肥对寒地水稻植株性状及产量的影响[J]. 北方水稻, 2014, **44**(6): 12-15.

WU H B, SHEN J N, HU S S. Effect of silicon on plant traits and yield of cold region rice[J]. *The Northern Rice*, 2014, **44**(6): 12-15.

[13] 韦叶娜,杨国涛,范永义,等. 不同肥料处理对‘Ⅱ 优 725’茎秆物理性状的影响[J]. 中国农学通报, 2016, **32**(9): 15-19.

WEI Y N, YANG G T, FAN Y Y, *et al.* Stalk physical properties of hybrid rice ‘Ⅱ You 725’ under different fertilizer

- treatments[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2016, **32**(9):15-19.
- [14] 范存留,杨国涛,范永义,等. 钾、硅肥处理对杂交水稻Ⅱ优838抗倒伏性的作用研究[J]. 云南大学学报(自然科学版), 2015, **37**(4):623-631.
- FAN C L, YANG G T, FAN Y Y, *et al.* Action research of lodging resistance on hybrid rice Ⅱ You 838 under potassium, silicon fertilizer treatment[J]. *Journal of Yunnan University*, 2015, **37**(4):623-631.
- [15] 许文燕,龙继锐,马国辉,等. 液体硅钾肥对杂交晚稻抗倒伏性和物质生产的影响初探[J]. 中国农学通报, 2011, **27**(18):24-28.
- XU W Y, LONG J R, MA G H, *et al.* Preliminary study on effects of liquid silicon-potash fertilizer on lodging resistance and matter production of hybrid late rice[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2011, **27**(18):24-28.
- [16] 黄增奎. 小麦施钾的抗倒伏效应[J]. 土壤通报, 1989, (3):122-123.
- HUANG Z K. Effect of lodging resistance of application K in wheat[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 1989, (3):122-123.
- [17] J F MA, N YAMAJI. Silicon uptake and accumulation in higher plants[J]. *Trends in Plant Science*, 2006, **11**:392-397.
- [18] 谢崇华,陈永军. 优质高产杂交水稻新组合 B 优 827[J]. 杂交水稻, 2002, **17**(5):57.
- XIE C H, CHEN Y J. B You 827, a medium indica hybrid rice combination with fine quality and high yield [J]. *Hybrid Rice*, 2002, **17**(5):57.
- [19] 邓 文. 施硅、钙、氮、有机肥与覆膜旱作对水稻抗倒性及产量的影响[D],长沙: 湖南农业大学, 2009.
- [20] 陈书强,赵海新,杨丽敏,等. 寒地水稻高产抗倒伏调控技术的初步研究[J]. 华北农学报, 2013, **28**(6):159-165.
- CHEN S Q, ZHAO H X, YANG L M, *et al.* Preliminary study on regulate technique for resisting to lodging and high yielding cultivation of rice in cold region[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2013, **28**(6):159-165.
- [21] 濑古秀生. 水稻の倒伏に关する研究[J]. 九州农试学报, 1962, (7):419-425.
- SETO S. Research on lodging resistance in rice[J]. *Kyushu Journal of Agricultural Trial*, 1962, (7): 419-495.
- [22] 孙永健,陈 宇,孙圆圆,等. 不同施氮量和栽插密度下三角形强化栽培杂交稻抗倒伏性与群体质量的关系[J]. 中国水稻科学, 2012, **26**(2):198-196.
- SUN Y J, CHEN Y, SUN Y Y, *et al.* Relationship between culm lodging resistance and population quality of hybrids under triangle-planted system of rice intersification at different nitrogen application rates and planting densities[J]. *Chinese J Rice Sci*, 2012, **26**(2):198-196.
- [23] 马 均,马文波,田彦华,等. 重穗型水稻植株抗倒伏能力的研究[J]. 作物学报, 2004, **30**(2):143-148.
- MA J, MA W B, TIAN Y H, *et al.* The culm lodging resistance of heavy panicle type of rice[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2004, **30**(2):143-148.
- [24] 林 熊. 硅对水稻茎秆强度的影响[D]. 成都:四川农业大学, 2010.
- [25] 邓 文,青先国,蒲 熙,等. 硅肥和钙肥对超级杂交稻茎秆抗倒力学的影响[J]. 湖南农业大学学报, 2008, **34**(5):586-590.
- DENG W, QING X G, PU X, *et al.* Effects of silicon and calcium application on the material characteristics of super hybrid rice[J]. *Journal of Hunan Agricultural University (Natural Sciences)*, 2008, **34**(5):586-590.
- [26] HOSSAIN K A, HORIUCHI T, MIYAGAWA S. Effects of powdered rice chaff application on lodging resistance, Si and N contents and yield components of rice (*Oryza sativa* L.) under shaded conditions[J]. *Acta Agron Hungarica*, 1998, **46**(3):273-281.
- [27] 刘淑云. 硅钾肥在水稻上的应用效果试验[J]. 北方水稻, 2008, **39**(1):33-34.
- LIU S Y. Experiment on the application of silicon-potash fertilizer to rice[J]. *North Rice*, 2008, **39**(1):33-34.
- [28] 管恩太,赵凤兰,陈常友,等. 长效硅钾肥特点、营养机理与展望[J]. 地域研究与开发, 2000, **19**(4):72-74.
- GUAN E T, ZHAO F L, CHEN C Y, *et al.* Longterm characteristics of silicon-potash, nutrition mechanism and prospects[J]. *Areal Research and Development*, 2000, **19**(4):72-74.
- [29] 艾治勇,马国辉. 超级杂交稻抗倒高产肥料运筹技术的数学模型研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2011, **17**(4):803-808.
- AI Z Y, MA G H. Study on mathematical model of fertilizer management technique for resisting lodging and high yield of super hybrid rice[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2011, **17**(4):803-808.
- [30] 张丰转,金正勋,马国辉,等. 水稻抗倒性与茎秆形态性状和化学成分含量间相关分析[J]. 作物杂志, 2010, (4):15-19.
- ZHANG F Z, JIN Z X, MA G H, *et al.* Correlation analysis between lodging resistance and morphological characters of physical and chemical components in rice' culms[J]. *Crops*, 2010, (4):15-19.
- [31] KONG E, LIU D C, GUO X L, *et al.* Anatomical and chemical characteristics associated with lodging resistance in wheat [J]. *The Crop Journal*, 2013, **1**(1):43-49.
- [32] 唐拴虎,徐培智,张发宝,等. 一次性全层施用控释肥对水稻根系形态发育及抗倒伏能力的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2006, **12**(1):63-69.
- TANG S H, XU P Z, ZHANG F B, *et al.* Influence of single basal application controlled-release fertilizer on morphologic development of root system and lodging resistance of rice[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2006, **12**(1):63-69.
- [33] 陈恺林,刘 洋,张玉烛,等. 不同水分管理下覆膜旱植稻营养特性及其与光合生理的相关性研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, **19**(6):1287-1296.
- CHEN K L, LIU Y, ZHANG Y Z, *et al.* Relationships between nutrition uptake characteristics and photosynthetic physiology under different water managements of mulching upland rice [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2013, **19**(6):1287-1296.