

DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2023.09.003

陶建波, 伍浩天, 王艺钢, 等. 硅肥和纳米土壤材料配施对苦荞倒伏的影响 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2023, 45(9): 25-35.

硅肥和纳米土壤材料配施对苦荞倒伏的影响

陶建波, 伍浩天, 王艺钢, 张瑞丰,
雷蕾, 方小梅, 易泽林

西南大学 农学与生物科技学院, 重庆 400715

摘要: 硅为地壳中含量第二丰富的元素, 其作为肥料施用, 对农作物增产具有十分显著的效果. 选取苦荞品种酉荞一号作为试验材料, 于 2019 年与 2020 年进行重复试验, 采用随机区组试验设计, 设置 4 个硅肥水平, 0(A1)、30 kg/hm²(A2)、60 kg/hm²(A3)和 90 kg/hm²(A4)以及 3 个纳米土壤材料水平, 0(B1)、75 kg/hm²(B2)和 150 kg/hm²(B3). 通过配施不同水平的硅肥和纳米土壤材料, 研究其对苦荞倒伏表现、产量及茎秆生理特性的影响, 结果表明: ① 合理配施硅肥和纳米土壤材料可以延后倒伏时期, 明显降低苦荞倒伏率和倒伏级别; ② 施用硅肥和纳米土壤材料可以显著提高苦荞的产量, 并且配施硅肥与纳米土壤材料的处理产量提升更为显著, 与对照 A1B1 相比, A3B2 处理产量提高了 109.82%; ③ 施用硅肥和纳米土壤材料可以提高苦荞茎秆抗折力, 显著降低倒伏指数, 提高茎秆强度, 并且配施硅肥与纳米土壤材料的效果更为显著且稳定; ④ 施用硅肥和纳米土壤材料一定程度上可以降低苦荞重心高、第二节间长度、株高和增加第二节间直径、茎壁厚度、节间充实度, 且配施硅肥与纳米土壤材料效果更优; ⑤ 硅肥和纳米土壤材料适当单施或者两者配施有利于苦荞茎秆中硅、木质素、纤维素、半纤维素的积累, 从而增强茎秆韧性, 降低倒伏的发生, 且配施硅肥与纳米土壤材料提升效果优于单施. 本试验条件下, 配施 60 kg/hm² 硅肥与 75 kg/hm² 纳米土壤材料效果最佳, 能够有效优化苦荞的茎秆结构, 降低倒伏的发生, 提高苦荞产量.

关键词: 苦荞; 倒伏; 硅肥; 纳米土壤材料

中图分类号: S517

文献标志码: A

文章编号: 1673-9868(2023)09-0025-11

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Effect of Silica Fertilizer and Nano Soil Moisture Material Application on Tartary Buckwheat Lodging

TAO Jianbo, WU Haotian, WANG Yigang, ZHANG Ruifeng,
LEI Lei, FANG Xiaomei, YI Zelin

College of Agronomy and Biotechnology, Southwest University, Chongqing 400715, China

收稿日期: 2023-05-31

基金项目: 重庆市自然科学基金项目(CSTB2022NSCQ-MSX1034); 重庆市委农委荞麦技术产业体系项目(202201).

作者简介: 陶建波, 硕士研究生, 主要从事荞麦栽培研究.

通信作者: 易泽林, 教授, 硕士研究生导师.

Abstract: Silicon is the second most abundant element in the earth's crust. Application of silicon as a fertilizer can have a significant effect on increasing crop yields. This trial was replicated in 2019 and 2020 using a randomized group trial design with four silica fertilizer levels, 0 (A1), 30 kg/hm² (A2), 60 kg/hm² (A3) and 90 kg/hm² (A4), and three levels of nano soil moisture material, 0 (B1), 75 kg/hm² (B2) and 150 kg/hm² (B3). The effect of different levels of silica and nano-fertilizers on buckwheat buckling performance, yield and physiological characteristics of stalks were studied. The results showed that ① Reasonable application of silica fertilizer and nano soil moisture material can delay the occurrence of collapse, significantly reducing the rate and level of buckwheat collapse. ② The application of silica fertilizer and nano soil moisture material can significantly increase the yield of buckwheat, and the treatment with silica fertilizer and nano soil moisture material increased the yield more significantly. Compared with the control A1B1, yield of A3B2 treatment was increased by 109.82%. ③ Application of silica fertilizer and nano soil moisture material can improve buckwheat stalk fracture resistance, significantly reduce the collapse index and improve stalk strength. The effect of the combination of silica fertilizer and nano soil moisture material was more significant and stable. ④ Application of silica fertilizer and nano soil moisture material can reduce the height of center of gravity, the length of the second internode, plant height, and increase the diameter of the second internode, stem wall thickness, internode fullness. The application of silica fertilizer and nano soil moisture material was more effective. ⑤ Proper application of silicon fertilizer and nano soil moisture material alone or in combination of the two was beneficial to buckwheat stems on accumulation of silicon, lignin, cellulose, hemicellulose, thereby enhancing stalk toughness and reducing the incidence of collapse. The combination of silicon fertilizer and nano soil moisture material was better than single application. Under the conditions of this trial, 60 kg/hm² of silica fertilizer with 75 kg/hm² of nano soil moisture material had the best effect, which could effectively optimize the stalk structure of buckwheat, reduce the incidence of collapse and improve buckwheat yields.

Key words: Tartary buckwheat; lodging; silicon fertilizer; nanoscale soil entropy materials

苦荞(*Fagopyrum tataricum* L. Gaertn)又名鞑靼荞麦,籽粒较小,种皮较厚,略带苦味^[1].苦荞抗逆性和适应性极强,能够生长在高寒、高海拔、低温、低肥地区,是我国高寒山区重要的经济作物和粮食作物^[2-3].苦荞虽是小杂粮作物,但经济价值和营养价值都极高^[4].耐贫瘠、适应性强、生育期短,这些特点使苦荞成为提高复种指数、抗灾救灾的重要作物,在调节农时与作物布局中起到重要的作用^[5-6].中国是苦荞的起源中心,荞麦资源丰富.在实际生产中,由于收获损失较大,我国苦荞的平均产量仅能达到 1 200~1 500 kg/hm²,严重制约苦荞生产的发展^[6].

作物生产中的倒伏是影响作物产量和质量的主要因素之一^[7].倒伏导致作物茎秆运输组织受损,同时茎伤引起的茎秆内含物外泄会破坏植物体内部的稳定性,降低作物对病虫害的抗性,造成虫害及多种病害^[8].硅存在于所有植物的地下部器官组织中,硅的沉积可以保护植物免受多种生物和非生物胁迫^[9].Jaleel 等^[10]对长春花的研究发现,随着植株硅含量的升高,叶片中角质层、栅栏层和海绵层厚度均显著增加,韧皮部分子直径显著增加.适当施用硅肥能够缩短茎秆基部一、二节间长度,增加茎粗,改善茎结构,提高抗倒伏能力^[11-12].研究表明,硅素与其他营养元素之间存在着协同作用,硅素的吸收会抑制植株对其他养分的吸收,但这种抑制并不会导致其他养分在植株内浓度的下降,反而会表现出更高的积累量^[13-14].纳米土壤生态修复材料作为全天然的有机无机复合新兴材料,含有经特殊工艺处理的复合硅酸盐成分,具有硅酸胶结特性,可以作为结构基质从本质上改善土壤团粒结构,提高土壤的蓄水保墒能力,增产效应显著^[15-16].Juhtery 等^[17]研究显示,纳米增效肥料可以使小麦增产 10%以上;水稻中的试验表明,施用纳米

土壤材料可以代替一部分化肥的施用, 在降低成本、提高品质与效益的同时还能有效恢复地力, 减轻环境污染^[18]。目前我国苦荞生产中面临的重大难题, 是苦荞在生长过程中极易发生倒伏。前人研究表明, 茎秆强度和苦荞的抗倒伏能力存在密切联系, 而施用硅肥和纳米土壤材料可以显著改善植株的各项农艺性状指标, 提高茎秆强度^[11-12, 18], 是提高苦荞抗倒伏能力的常见栽培措施。然而, 对纳米土壤材料及其与硅肥的合理配施在荞麦种植中的施用效果鲜见报道。本试验通过测定不同水平的纳米土壤材料和硅肥处理组合下苦荞的抗倒伏能力和产量等指标, 探索硅肥和纳米土壤材料的最佳配施方案, 以期为我国苦荞生产的高产高效提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试品种为西荞 1 号, 由重庆市荞麦产业体系创新团队提供, 发芽率可达 80% 以上。硅肥为含 SiO₂ ≥ 50% 的水溶性有机硅, 纳米土壤材料由成都正光生态科技有限公司提供。

1.2 试验设计

试验于 2019 年 8 月—2019 年 11 月和 2020 年 8 月—2020 年 11 月在西南大学合川农场(106°7′51″E, 30°0′16.4″N)进行, 试验地土壤为沙壤土, 地力均匀, 具体养分概况见表 1。试验采用随机区组试验设计, 硅肥设置 4 个水平, 0(A1)、30 kg/hm²(A2)、60 kg/hm²(A3)和 90 kg/hm²(A4); 纳米土壤材料设置 3 个水平, 0(B1)、75 kg/hm²(B2)以及 150 kg/hm²(B3)。试验共 12 个处理, 3 次重复。分别于 2019 年 8 月 26 日, 2020 年 8 月 25 日人工条播, 基本苗 90 万株/hm², 小区面积 6.67m²(行长 4 m, 行距 33 cm, 种植 5 行, 区组间隔 50 cm), 播种行与区组走向垂直, 肥料一次性施入作为种肥, 其它田间管理同常规。

表 1 试验地土壤养分概况

年份	酸碱度	有机质/ (g · kg ⁻¹)	碱解氮/ (mg · kg ⁻¹)	速效磷/ (mg · kg ⁻¹)	速效钾/ (mg · kg ⁻¹)	有效硅/ (mg · kg ⁻¹)
2019	6.53	6.69	57.50	49.57	155.67	98.39
2020	6.42	6.77	58.30	50.61	162.37	100.18

1.3 测定项目及方法

根据乔春贵^[19]的方法统计倒伏率、倒伏级别; 宋波等^[20]的方法计算倒伏指数; 参考余恒志等^[21]的方法测量株高、茎秆重心高度、基部第二节节间直径和长度、节间充实度等; 参照戴伟民等^[22]的方法进行茎秆硅含量测定; 参照陈晓光等^[23]、张文博等^[24]的方法, 进行木质素、纤维素、半纤维素含量的测定。

1.4 数据分析

两年试验结果差异无统计学意义($p > 0.05$), 用其平均值进行统计分析。用 Excel 2019 进行数据整理及作图, 用 DPS 7.05 和 SPSS 25.0 进行数据统计分析, 用一般线性模型进行分析, 用 LSD 法检测显著性, 利用 R 语言进行相关性分析和作图。

2 结果与分析

2.1 不同处理对苦荞倒伏习性和产量的影响

2.1.1 倒伏习性

由表 2 看出, 未使用硅肥和纳米土壤材料处理的苦荞, 发生倒伏的时期最早, 两年均在盛花期就出现倒伏, 同时该处理的倒伏级别和倒伏率也在所有处理组合中最高。随着硅肥施用量的增加, A2-A3 处理的荞麦倒伏时期呈现出后移的趋势, 倒伏指数和倒伏率下降, 到 A4 水平, 荞麦的倒伏时期提前, 倒伏指数和倒伏率上升, 但与前一水平处理相比差异无统计学意义。在硅肥水平一定时, 苦荞的倒伏时期也先随着纳米土壤材料用量的不断增加而推迟, 在 B2 处理水平下达到最晚(成熟期), 后随着纳米土壤材料用量的增加有所提前, 且倒伏级别及倒伏率也随着纳米土壤材料用量的不断增加先减少后增加, 并

在硅肥水平为 60 kg/hm²，纳米土壤材料施加量为 75 kg/hm² 时倒伏级别降至最低，同时倒伏率也达到了所有处理组合的最低值，为 11.57%(两年均值)。因此，纳米土壤材料和硅肥配施能够使倒伏时期后移，倒伏级别降低，倒伏率下降。

2.1.2 产量

硅肥和纳米土壤材料配施对苦荞产量有显著影响。随着硅肥用量增加，苦荞产量呈现先增加后减少的趋势，在 A3(60 kg/hm²)达到最大值。在硅肥水平一定时，产量也随着纳米土壤材料用量增加呈现先增加后减少的趋势，在 B2(75 kg/hm²)达到最大值(表 2)。在 A3B2 处理苦荞产量最高，相比于单独施最适硅肥处理(A3B1)和单独施最适纳米土壤材料(A1B2)处理分别提高了 47.1%，18.4%，较对照 A1B1 提高了 109.82%(两年均值，下同)。

表 2 不同纳米硅肥配施下苦荞倒伏表现和产量变化

处理	倒伏时期		倒伏级别		倒伏率/%		产量/(kg·hm ⁻²)	
	2019	2020	2019	2020	2019	2020	2019	2020
A1B1	AS	AS	3	4	20.57±2.98a	17.17±1.53ab	790.34±31.08g	840.11±25.67d
A1B2	AS	FS	3	3	19.27±0.64ab	13.50±1.80abc	1 396.40±48.72b	1 490.95±299.40abc
A1B3	FS	FS	3	3	19.97±0.64ab	17.50±2.78a	1 039.96±82.06def	1 104.13±65.26cd
A2B1	AS	AS	3	3	19.28±0.41ab	15.50±2.00ab	824.16±144.25fg	906.56±479.37d
A2B2	MS	MS	2	2	16.72±1.00bc	13.00±1.00bc	1 422.72±191.13b	1 497.30±33.25abc
A2B3	FS	FS	3	3	16.90±1.44bc	12.83±2.08bc	1 504.19±213.65b	1 612.59±355.98ab
A3B1	FS	FS	3	3	17.10±3.00bc	15.00±1.73abc	1 123.30±70.25cde	1 202.37±266.58bcd
A3B2	MS	MS	1	2	12.30±1.92d	10.83±1.53c	1 736.27±167.04a	1 683.73±70.69a
A3B3	MS	MS	2	2	15.03±1.88cd	13.17±3.51abc	1 285.39±143.82bc	1 362.22±126.46abc
A4B1	FS	AS	3	3	17.32±1.50abc	15.33±1.26ab	1 017.34±166.20efg	1 083.24±195.11cd
A4B2	MS	MS	2	2	15.72±1.65c	13.33±4.01abc	1 359.27±59.69bc	1 441.40±140.06abc
A4B3	MS	FS	2	3	17.05±1.26bc	14.33±1.26abc	1 259.76±90.13bcd	1 339.95±123.64abc

注：A1：0 kg/hm² 硅肥，A2：30 kg/hm² 硅肥，A3：60 kg/hm² 硅肥，A4：90 kg/hm² 硅肥；B1：0 kg/hm² 纳米土壤材料，B2：75 kg/hm² 纳米土壤材料，B3：150 kg/hm² 纳米土壤材料。AS：盛花期；FS：灌浆期；MS：成熟期；数据为 3 次重复的平均值±标准差，数据后不同小写字母表示处理间差异有统计学意义($p<0.05$)，下同。

2.2 不同处理对苦荞茎秆抗折力和倒伏指标的影响

2.2.1 茎秆抗折力

苦荞茎秆抗折力从盛花期到成熟期呈递增趋势(表 3)，成熟期达到最大。两种肥料单独施用情况下，随着施用量的增加各个时期苦荞茎秆抗折力呈先增后减的趋势，分别在 A3、B2 达到最大，并且配施硅肥和纳米土壤材料能显著提高茎秆抗折力，在 A3B2 处理达到最大，相较于 A3B1 和 A1B2 处理，在盛花期分别提高了 52.8%，29.7%，在灌浆期分别提高了 46.4%，23.0%，在成熟期分别提高了 17.6%，19.4%。表明单独施用硅肥或者纳米土壤材料可以提高苦荞茎秆抗折力，提高茎秆强度，并且配施硅肥与纳米土壤材料提高的幅度更为明显。

2.2.2 倒伏指数

从表 3 可以看出，单施肥料情况下，随硅肥施用量的增加，不同时期苦荞的倒伏指数逐渐降低；随纳米土壤材料施用量的增加，倒伏指数呈先减后增趋势。与 A1B1 相比，配施硅肥与纳米土壤材料均能显著降低倒伏指数，A3B2 处理对降低倒伏指数的效果最佳，各个时期分别降低了 58.7%，36.3%，42.7%。说明相较于单独施用硅肥或者纳米土壤材料，两种肥料配施对倒伏指数的降低效果更为显著，且更为稳定。

表 3 不同处理对苦荞茎秆抗折力和倒伏指数的影响

年份	处理	茎秆抗折力/g			倒伏指数/(cm·g·g ⁻¹)		
		盛花期	灌浆期	成熟期	盛花期	灌浆期	成熟期
2019	A1B1	208.93±16.54h	300.89±11.80e	447.58±31.02e	3.02±0.29a	3.30±0.17bc	4.96±0.26a
	A1B2	318.87±11.95cd	429.66±17.26b	496.43±49.21e	2.01±0.17cde	3.20±0.21bc	3.84±0.40cd
	A1B3	244.53±45.00gh	366.86±23.11cd	483.62±51.66e	2.86±0.93ab	3.24±0.19bc	4.01±0.49bc
	A2B1	246.93±2.02g	317.58±24.36e	469.72±9.02e	2.48±0.40abc	3.62±0.46ab	4.89±0.28a
	A2B2	346.13±30.17bc	380.39±8.25cd	647.60±42.88abc	1.80±0.15ef	3.13±0.12c	3.79±0.30cd
	A2B3	258.20±21.36fg	382.37±28.56cd	573.37±13.04d	2.33±0.21bcde	3.37±0.19bc	3.87±0.22cd
	A3B1	294.93±24.46def	338.64±25.68de	597.49±71.96cd	2.42±0.35abcd	3.90±0.26a	3.94±0.69bcd
	A3B2	389.13±7.04a	480.48±30.87a	713.39±31.65a	1.35±0.19f	3.12±0.09c	3.41±0.10d
	A3B3	302.00±30.82de	393.01±35.86bc	681.66±36.46ab	2.26±0.26bcde	3.86±0.46a	4.09±0.20bc
	A4B1	244.20±7.38gh	339.66±41.82de	577.37±22.87d	2.09±0.07cde	3.53±0.34abc	3.56±0.22cd
	A4B2	358.20±26.58ab	479.80±25.60a	635.60±9.98bcd	1.73±0.11ef	3.14±0.29c	4.42±0.13ab
	A4B3	277.33±16.08efg	392.84±12.23bc	600.43±46.5cd	1.83±0.16def	3.20±0.13bc	3.44±0.20d
2020	A1B1	156.05±12.62f	385.28±41.85f	460.39±34.85e	4.08±0.56a	3.97±0.90a	5.53±0.76a
	A1B2	273.42±10.10cd	508.54±43.32de	747.66±44.89abc	1.84±0.05ef	2.14±0.13bcde	2.65±0.29d
	A1B3	199.26±19.19e	436.89±33.08ef	634.25±98.43bcd	3.92±0.63ab	2.79±0.33b	3.94±0.70b
	A2B1	185.65±13.64ef	505.67±29.40de	578.91±47.36de	2.56±0.25cde	2.74±0.19b	3.84±0.32bc
	A2B2	297.42±14.9bcd	590.56±36.76bc	682.59±54.30abcd	1.86±0.12ef	1.67±0.19de	2.94±0.29d
	A2B3	260.09±17.65d	556.29±10.29cd	623.22±70.36cd	2.38±0.80def	2.24±0.56bcd	3.86±0.20bc
	A3B1	207.96±3.10e	449.30±53.46ef	666.31±90.21abcd	2.74±0.83cd	2.21±0.3bcd	3.04±0.30cd
	A3B2	379.23±20.16a	673.30±35.35a	772.23±55.28a	1.58±0.16f	1.51±0.20e	2.60±0.23d
	A3B3	320.64±34.67b	657.80±60.26ab	757.20±76.56ab	1.93±0.14ef	1.64±0.17de	2.91±0.38d
	A4B1	177.05±11.04ef	469.66±72.19e	672.63±68.83abcd	3.23±0.54bc	2.50±0.43bc	2.97±0.26d
	A4B2	365.78±53.49a	632.95±4.92abc	693.55±150.19abcd	1.77±0.65ef	1.67±0.46de	3.20±0.82bcd
	A4B3	304.14±16.53bcd	589.63±70.18bc	691.04±36.48abcd	1.67±0.27f	1.98±0.35cde	2.95±0.56d

2.3 不同处理对苦荞茎秆形态特征的影响

2.3.1 不同处理对株高、重心高、第二节间长的影响

株高、重心高、第二节间长从盛花期到成熟期逐渐增加(表 4)。各生育时期,施用硅肥可以降低株高、重心高、第二节间长,随硅肥施用量的增加,苦荞株高、重心高、第二节间长先减后增,在 A3 达到最低值。随纳米土壤材料施用量的增加,株高、重心高、第二节间长整体呈先减后增,综合表现 B2 处理低于 B3 处理,而不施用纳米土壤材料的处理最高。综合来看,在相同生育期内,A3B2 处理株高、重心高、第二节间长最低,均显著低于对照 A1B1 处理,与对照相比,盛花期分别降低了 25.91%,22.37%,2.31%,灌浆期分别降低了 23.81%,10.54%,29.40%,成熟期分别降低了 16.93%,8.43%,19.59%。说明硅肥和纳米土壤材料适当单施或者两者配施可以降低苦荞株高,提高基部茎秆重量占苦荞总体鲜重比例,降低重心高度,缩短基部第二节间的长度,起到类似缩节的功效,从而降低倒伏的发生,且配施硅肥与纳米土壤材料提升效果优于单施,但硅肥或纳米土壤材料施用过量,其株高、重心高、第二节间长反而增加。

2.3.2 不同处理对第二节间直径、茎壁厚度、节间充实度的影响

从表 5 可以看出,第二节间直径、茎壁厚度从盛花期到成熟期逐渐增加,而节间充实度无明显规律。各生育期,第二节间直径、茎壁厚度随施硅肥量增加整体呈先增后减,A3 处理最适,随纳米土壤材料施用量增加先增后减,在 B2 处理达到最大。节间充实度在盛花期和灌浆期随纳米土壤材料施用量呈先增后减,

在成熟期随纳米土壤材料施用量增加而增加，整体在 B2 达到最大；增施硅肥也会引起苦荞茎秆节间充实度上升，总体来看，A3 处理效果最佳. 3 个时期中 A3B2 处理下苦荞茎壁厚度、节间充实度都能达到最大值，且均显著高于对照 A1B1 处理；第二节间直径在 A3B2 处理下整体也有着较好的优化. 说明硅肥和纳米土壤材料适当单施或者两者配施可以提高苦荞基部第二节间的直径，提升其节间充实度，有效增加其茎壁厚度，从而增强基部茎秆的机械强度，且配施硅肥与纳米土壤材料的提升效果优于单施.

表 4 不同处理对株高、重心高、第二节间长的影响

处理	株高/cm			重心高度/cm			第二节间长度/cm		
	盛花期	灌浆期	成熟期	盛花期	灌浆期	成熟期	盛花期	灌浆期	成熟期
A1B1	88.59±1.71a	122.67±4.24a	133.75±3.58a	41.21±0.96a	59.99±1.60a	69.24±1.47a	2.60±0.16def	4.15±0.02b	4.39±0.22a
A1B2	86.72±0.26a	122.41±2.85ab	127.53±2.89b	35.90±1.02d	59.15±0.90ab	62.16±0.23f	3.48±0.10bc	3.78±0.03cd	4.15±0.38abc
A1B3	79.11±1.12bcd	118.31±4.87abc	131.68±1.65ab	39.56±1.24abc	56.91±1.3abcd	64.58±0.85def	3.72±0.34ab	3.90±0.16c	4.32±0.19a
A2B1	85.47±1.87a	119.35±10.6abc	131.59±4.20ab	41.11±1.63a	59.31±2.67ab	68.16±1.30ab	4.05±0.41ab	4.15±0.09b	4.22±0.43ab
A2B2	77.71±2.86cd	98.80±4.03de	114.79±2.62de	35.43±0.46d	51.88±1.76e	63.14±0.19ef	2.59±0.14ef	3.23±0.20gh	4.04±0.24abcd
A2B3	84.10±4.05ab	112.63±13.05abcd	128.69±5.17ab	39.06±2.49abc	54.98±2.47de	65.73±0.99bcd	3.13±0.34cd	3.52±0.15ef	4.02±0.54abcd
A3B1	78.34±2.02bcd	107.25±3.97cde	117.94±3.05cd	38.86±0.20abc	54.20±1.39de	65.79±1.20bcd	3.11±0.43cde	3.60±0.04de	3.71±0.14bcd
A3B2	65.64±0.61f	93.46±3.29e	111.11±2.12e	31.99±1.85e	53.67±2.16de	63.40±1.56def	2.54±0.08f	2.93±0.15i	3.53±0.29d
A3B3	69.74±4.50ef	103.13±15.05de	111.54±1.50e	35.95±0.91d	53.88±3.08de	63.05±1.18ef	2.95±0.15cdef	3.48±0.09ef	3.60±0.12cd
A4B1	83.20±7.25abc	111.21±12.70abcd	129.37±1.89ab	40.50±2.20ab	58.73±1.28abc	67.29±1.32abc	3.25±0.29bc	4.50±0.41a	4.40±0.53a
A4B2	67.34±2.94f	99.89±7.24de	118.89±4.47cd	38.03±1.80bcd	55.46±2.42cd	65.06±2.16cde	3.03±0.57cdef	3.00±0.15hi	3.58±0.27d
A4B3	74.36±6.02de	108.49±6.21bcd	120.79±5.32c	37.72±1.21cd	56.43±1.91bcd	64.16±3.10def	3.48±0.15bc	3.33±0.13fg	3.87±0.03abcd

表 5 不同处理对第二节间直径、茎壁厚度、节间充实度的影响

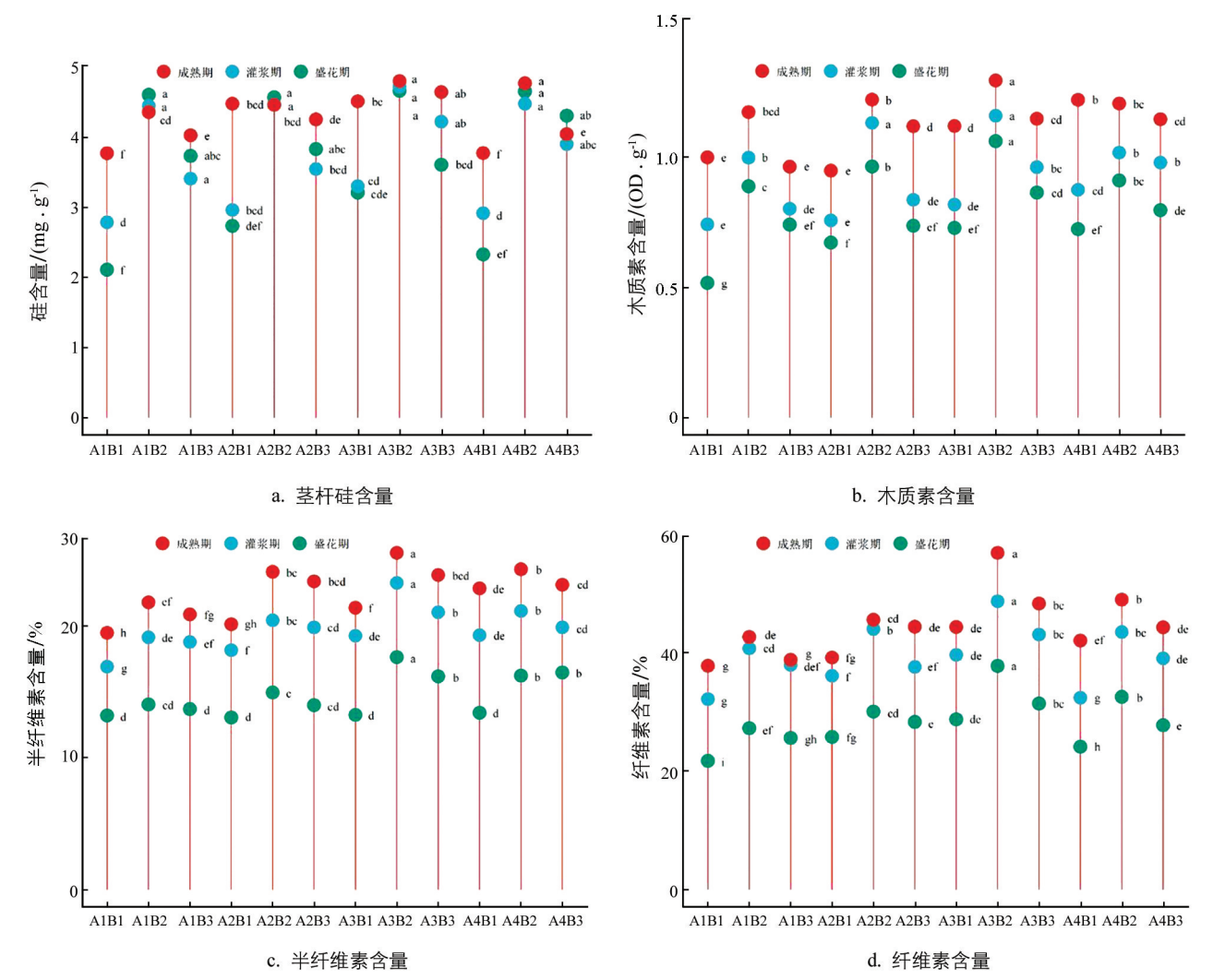
处理	第二节间直径/mm			茎壁厚度/mm			节间充实度/(mg·cm ⁻¹)		
	盛花期	灌浆期	成熟期	盛花期	灌浆期	成熟期	盛花期	灌浆期	成熟期
A1B1	3.53±0.44c	4.63±0.75bc	5.47±0.59ab	0.73±0.03f	1.17±0.05f	1.70±0.12ef	61.57±7.42de	58.80±9.28gh	63.85±10.80f
A1B2	4.79±0.97ab	4.73±0.18abc	6.12±0.53a	1.10±0.11bc	1.75±0.19bc	2.00±0.12c	64.55±3.97cde	113.46±11.18bcd	101.94±7.51d
A1B3	3.99±0.79abc	4.73±0.38abc	5.63±0.36ab	0.87±0.06def	1.38±0.08def	1.81±0.14de	61.68±8.53de	90.18±11.00ef	109.32±7.96cd
A2B1	4.46±0.18abc	4.42±0.23c	5.40±0.48ab	0.80±0.16ef	1.28±0.24ef	1.63±0.14f	46.34±6.61f	54.43±9.65gh	80.62±7.35e
A2B2	4.38±0.88abc	4.85±0.43abc	5.35±0.15ab	1.17±0.09b	1.88±0.19b	2.22±0.04b	105.16±6.01ab	102.90±7.88cde	123.42±8.35ab
A2B3	3.66±0.80bc	4.65±0.03abc	5.29±0.43ab	0.85±0.09ef	1.35±0.15ef	1.66±0.07ef	96.21±9.39b	93.66±20.43def	101.09±7.80d
A3B1	3.89±0.76bc	5.05±0.25abc	5.44±0.25ab	1.02±0.05cd	1.62±0.07cd	1.80±0.16de	75.33±4.91c	51.44±9.93h	108.51±16.03cd
A3B2	5.16±1.05a	4.85±0.52abc	5.14±0.48b	1.33±0.05a	2.13±0.07a	2.39±0.08a	113.60±19.38a	138.01±17.98a	132.62±11.27a
A3B3	4.70±0.91abc	4.70±0.31abc	5.13±0.76b	1.06±0.05bc	1.69±0.05bc	1.93±0.15cd	100.85±13.84ab	122.34±20.49abc	115.51±1.86bc
A4B1	3.54±0.23c	5.35±0.33a	5.31±0.48ab	0.89±0.02de	1.42±0.03de	1.61±0.13f	73.19±2.71cd	92.59±21.89def	87.20±5.58e
A4B2	4.71±0.84abc	4.36±0.52c	5.00±0.72b	1.11±0.13bc	1.78±0.25bc	2.32±0.12ab	92.31±4.37b	132.52±0.89ab	118.1±2.32bc
A4B3	4.90±0.99ab	5.24±0.47ab	5.50±0.07ab	1.06±0.07bc	1.69±0.1bc	1.86±0.07cd	56.22±7.02ef	74.31±6.63fg	111.3±5.78bcd

2.4 不同处理对苦荞茎秆生理生化特征的影响

2.4.1 茎秆硅含量

从图 1a 可以看出，苦荞茎秆中硅元素含量随生育期推进而增加，在成熟期达到最大值. 单独施用下，各生育时期中茎秆硅含量随施硅量的增加呈先增加后降低的趋势，在 A3 处理达到最大，并显著高于 A1；茎秆中硅含量随着纳米土壤材料施用量增加先增加后减少，在 B2 达到最大值，并显著高于 B1. 配施硅肥和纳米土壤材料可以显著提高茎秆中硅含量且优于单施硅肥(A3B1)和纳米土壤材料(A1B2)，在 A3B2 处

理达到最大值, 相较于 A1B1 处理, 盛花期提高 120.28%, 灌浆期提高 69.18%, 成熟期提高 27.25%。说明合理配施硅肥和纳米土壤材料可以有效增加苦荞茎秆中的硅含量, 从而增加茎秆机械强度, 减少倒伏的发生, 并且两者配施的效果要优于单施, 但当硅肥或纳米土壤材料过量, 其硅含量反而降低。



不同小写字母表示处理间在各个时期差异有统计学意义($p < 0.05$).

图 1 不同处理对苦荞茎秆生理生化特征的影响

2.4.2 木质素含量

木质素含量从盛花期到成熟期逐渐增加(图 1b). 相同生育时期, 木质素含量随着施硅肥量增加而增加; 而随着纳米土壤材料的施用量增加先增加后减少, 在 B2 达到最大值且显著高于 B1. 配施硅肥和纳米土壤材料能显著提高茎秆中木质素含量, 在 A3B2 处理达到最大值, 在各个时期均显著高于其他处理, 与 A1B1 相比, 盛花期提高 103.85%, 灌浆期提高 56.76%, 成熟期提高 30.00%. 说明硅肥和纳米土壤材料适当单施或者两者配施可以增加木质素含量, 从而提高茎秆木质化程度, 提高苦荞植株茎秆的机械强度, 降低倒伏现象的发生, 且配施硅肥与纳米土壤材料对木质素的积累要优于单施。

2.4.3 半纤维素含量

随生育期推进, 苦荞茎秆中半纤维素含量逐渐增高(图 1c). 相同生育时期, 半纤维素随施硅量的增加而增加, 但在盛花期变化趋势不明显; 随纳米土壤材料的施用量增加先增后减, 在 B2 达到最大值. 配施硅肥和纳米土壤材料能显著提高茎秆中半纤维素含量, 在 A3B2 处理达到最大值, 在各个时期均显著高于其他处理, 与 A1B1 相比, 盛花期提高 33.51%, 灌浆期提高 37.53%, 成熟期提高 31.09%. 说明硅肥和纳米土壤材料适当单施或者两者配施有利于苦荞茎秆半纤维素的积累, 从而提高茎秆的韧性, 且配施硅肥与纳

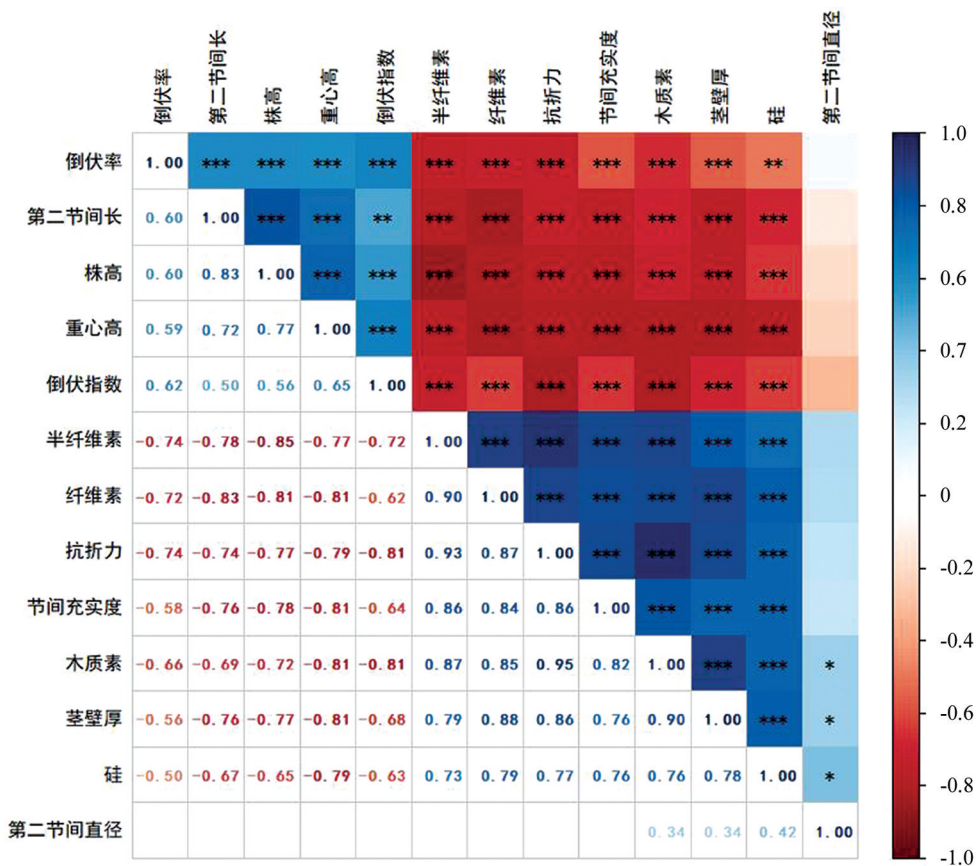
米土壤材料的提升效果优于单施,但纳米土壤材料过量会降低茎秆中半纤维素含量。

2.4.4 纤维素含量

纤维素从盛花期到成熟期逐渐增加(图 1d)。各生育时期,纤维素含量随施硅量增加先增后减,在 A3 达到最大值;随纳米土壤材料的施用量增加先增后减,在 B2 达到最大值。相同生育时期,A1B1 的纤维素含量均低于其他处理;A3B2 处理均显著高于其他处理。说明硅肥和纳米土壤材料适当单施或者两者配施有利于苦荞茎秆中纤维素的积累,从而增强茎秆韧性,降低倒伏的发生,且配施硅肥与纳米土壤材料的提升效果优于单施,但硅肥或纳米土壤材料过量会降低茎秆中纤维素含量。

2.5 苦荞茎秆特性与抗倒伏能力的关系

由图 2 可知,苦荞茎秆抗折力与苦荞第二节间长、株高、重心高度、倒伏指数和倒伏率呈极显著负相关,与节间充实度、茎壁厚度、茎秆中硅素、木质素、纤维素和半纤维素含量呈极显著正相关;倒伏指数与株高、重心高度和茎秆基部第二节间长以及倒伏率呈极显著正相关,与茎壁厚、节间充实度以及茎秆生理生化指标呈极显著负相关;倒伏率与株高、第二节间长、重心高呈极显著正相关,与茎壁厚、节间充实度以及茎秆生理生化指标呈极显著负相关。说明茎秆各项农艺和生理生化指标可以显著影响苦荞植株的抗倒伏能力,通过配施硅肥与纳米土壤材料来优化各项指标可以显著提高茎秆强度,降低倒伏率。



图中色块与数字对称,*, **, *** 分别表示在 $p<0.05$, $p<0.01$, $p<0.001$ 水平差异有统计学意义。

图 2 苦荞茎秆特性与抗倒伏能力的相关性分析

3 讨论

3.1 硅肥与纳米土壤材料配施优化苦荞倒伏习性提高产量

随着栽培技术的不断提升,苦荞的产量水平也在不断的提高,但在提高产量的过程中总会面临一个难以解决的问题——植株倒伏。倒伏会破坏作物空间排布,扰乱群体正常的通光通风,影响作物产量。倒伏不仅会导致荞麦产量和品质的下降,同时也会使得机械化和规模化的收割难以实现。前人在甜荞^[25]和苦

荞^[26]中研究发现,倒伏率与产量呈显著负相关,随倒伏率上升产量和品质显著下降。倒伏发生的越早,对产量的影响就越大。任高峰等^[27]研究发现,油菜发生倒伏的时期不同,对产量造成的损失差异较大。倒伏愈早,产量损失则愈严重:在油菜初花期发生倒伏,产量会减少 67.3%;盛花期发生倒伏,产量损失达 46.4%;在开花后期和成熟前期,减产则达到显著水平,而在成熟后期倒伏减产才不显著。本试验研究发现,硅肥与纳米土壤材料配施,可以在提高产量的同时显著降低苦荞倒伏率及倒伏级别,并延后倒伏发生时期,与前人研究结果一致。

3.2 硅肥与纳米土壤材料配施优化苦荞茎秆特性提高抗倒伏性能

作物群体获得高产的一个重要思路,是提高单株作物的生物量^[28];但单株生物量积累增加后会导致其基部茎秆承受的作用力变大,从而更易发生倒伏现象^[29]。所以,高产与抗倒伏间往往存在显著的负相关性。前人大量的研究表明,植株的形态指标,如株高、重心高度、茎秆抗折力等可以有效反应植株的抗倒伏性能^[29-30]。苦荞倒伏主要是由于基部节间伸长变细、茎秆强度变弱所致。要在保持苦荞单株产量提升的同时降低倒伏率,最有效的途径就是提高茎秆的机械强度,促使基部茎秆在弯曲力矩增大的同时仍能保持挺拔。在水稻的研究中发现,在生长期施用硅肥,可以增加水稻茎秆中硅的含量,大量形成角质硅层的双细胞结构,这种结构增强了细胞的厚度,增加了茎秆强度,从而降低倒伏的发生^[31]。本试验研究表明,茎长、茎粗和茎壁厚度等茎秆形态特性与苦荞倒伏率间存在显著联系;木质素、纤维素和半纤维素是作物细胞结构中细胞壁的主要成分,其对增强细胞壁强度有着重要作用^[32]。木质素、纤维素和半纤维素的含量越高,则植株茎秆的机械强度就越大,作物的抗倒伏能力也越大^[29]。前人在小麦^[33-34]、玉米^[35]的研究中发现纤维素、半纤维素和木质素含量与作物的倒伏存在显著相关,含量较高的处理抗倒伏性能较好。余恒志等^[21]认为施硅肥能提高甜荞茎秆中硅含量,增加茎秆基部第二节间直径、抗折力、木质素含量,促进甜荞植株抗倒伏能力增加。前人研究发现硅肥和纳米土壤材料可以改善水稻群体结构,增强茎秆机械强度,使植株挺拔,显著降低倒伏指数^[11, 18]。本试验研究表明,硅肥与纳米土壤材料配施可以显著增加苦荞茎秆的茎壁厚度和直径,促进茎秆中硅素、木质素、纤维素等结构性物质的积累,显著增加细胞壁强度,从而增强茎秆强度,提高苦荞的抗倒伏性能,降低倒伏发生,这与前人研究一致。

3.3 纳米土壤材料促进苦荞对硅的吸收利用

硅存在于所有植物的地下部器官组织中,硅的沉积可以保护植物免受多种生物和非生物胁迫^[9, 36]。硅的积累可以有效提高植物对倒伏、辐射、干旱、冻结等物理胁迫的抵抗力,并且对高盐、重金属等环境胁迫也有一定的抗性^[37-40]。冷一欣等^[41]的研究结果显示,高分子肥料增效剂可以与肥料养分中的离子结合起到养分富集效应,同时可以通过调节酶活性改善土壤理化性质,减少肥料造成的土壤板结等负面影响,在降低成本、提高品质与效益的同时还能有效回复地力,减轻环境污染。纳米材料处理可以增强种子的活力,提高植株体内各种酶的活性和对水分和肥料吸收,促进植株新陈代谢,进一步提高植株的抗逆性能力,从而达到改善品质和增产的效果^[42-43]。李贵莲等^[44]研究发现,纳米材料可以显著增加生菜对氮、磷、钾、锌、钙等元素的吸收积累。另外,纳米材料能促进燕麦苗中的苯丙氨酸氨裂解酶基因 *PAL* 和硅转运蛋白基因 *Lsi1* 的表达,导致硅元素和木质素含量增加^[45]。本试验发现,相对于单施硅肥,在保持施硅量不变的前提下,用纳米土壤材料可以显著提高苦荞植株对硅的吸收利用能力,进而优化各项生理生化与形态指标,提高植株抗倒伏能力,降低倒伏现象的发生,这与前人在燕麦中的研究一致^[45]。

4 结论

适量施用硅肥可以显著改良苦荞植株形态,增加茎秆内结构性物质的积累,提高茎秆机械强度,而适量施用纳米土壤材料代替部分硅肥可以增加苦荞对硅等养分的吸收积累,提高茎秆充实度,降低倒伏率并提高产量;两种肥料配施可以在有效降低苦荞倒伏的同时显著提高产量。在本试验条件下,配施 60 kg/hm² 硅肥与 75 kg/hm² 纳米土壤材料能够有效优化苦荞的茎秆结构,降低倒伏的发生,提高苦荞产量。研究结果为苦荞的抗倒伏栽培提供了理论依据和技术参考。

参考文献:

- [1] 魏益民. 荞麦品质与加工 [M]. 西安: 世界图书出版公司, 1995.
- [2] 赵霞, 韩一军, 姜利娜, 等. 我国苦荞市场与产业调查分析报告 [J]. 农产品市场, 2021(15): 42-44.
- [3] 黄凯丰, 李振宙, 王炎, 等. 我国荞麦高产栽培生理研究进展 [J]. 贵州师范大学学报(自然科学版), 2019, 37(1): 115-120.
- [4] BURGOS-MORON E, CALDERON-MONTANO J M, PEREZ-GUERRERO C, et al. A Review on the Dietary Flavonoid Kaempferol [J]. Mini Rev Med Chem, 2011, 11: 298-344.
- [5] 方小梅, 杨文娟, 王于栋, 等. 苦荞 EMS 突变体库的构建及 SCoT 标记筛选分析 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2023, 45(2): 54-65.
- [6] 赵钢, 陕方. 中国苦荞 [M]. 北京: 科学出版社, 2008.
- [7] 高芳. 喷施多效唑对植物生长、生理生化 and 形态结构影响的研究进展 [J]. 农业科技与信息, 2016(29): 77-78.
- [8] 王云泉. 寒地水稻倒伏的原因及防止措施 [J]. 现代农业科技, 2021(11): 49-50, 53.
- [9] SAKR N. Silicon-enhanced Resistance of Plants to Biotic Stresses Review Article [J]. Act-a Phytopathologica et Entomologica Hungarica, 2018, 53(2): 125-141.
- [10] JALEEL C A, MANIVANNAN P, SANKAR B, et al. Paclobutrazol Enhances Photosynthesis and Ajmalicine Production in Catharanthus roseus [J]. Process Biochemistry, 2007, 42(11): 1566-1570.
- [11] 王茂辉, 聂金泉, 任勇, 等. 不同硅肥用量对水稻生长的影响研究 [J]. 广东农业科学, 2020, 47(2): 61-67.
- [12] 王怀鹏, 张翼飞, 杨克军, 等. 硅肥不同喷施浓度对玉米抗倒伏性能及产量构成的调控效应 [J]. 玉米科学, 2020, 28(3): 111-118.
- [13] 吴桢, 徐嘉楠, 蔡振华, 等. 硅营养特性及硅肥使用技术 [J]. 湖北植保, 2017(2): 63-64.
- [14] 柯玉诗, 黄小红, 张壮塔, 等. 硅肥对水稻氮磷钾营养的影响及增产原因分析 [J]. 广东农业科学, 1997(5): 25-27.
- [15] 胡慧慧, 崔艳杰, 薛合伦, 等. 退化土地生态修复材料及技术 [J]. 安徽农业科学, 2011, 39(29): 18116-18120.
- [16] VERMA K K, SONG X P, JOSHI A, et al. Recent Trends in Nano-Fertilizers for Sustainable Agriculture under Climate Change for Global Food Security [J]. Nanomaterials, 2022, 12(1): 173.
- [17] JUHTERY H W A, HARDAN H M, SWEDI F G, et al. Effect of Foliar Nutrition of Nano-fertilizers and Amino Acids on Growth and Yield of Wheat [C] //IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, IOP Publishing, 2019, 388: 012046.
- [18] 郑仪薇, 张彩虹. 纳米土壤材料对郑稻 18 产量和品质的影响 [J]. 现代农业科技, 2013(19): 34, 39.
- [19] 乔春贵. 作物抗倒伏性的综合指标—倒伏指数 [J]. 吉林农业大学学报, 1988(1): 7-10, 100-101.
- [20] 宋波, 张杏燕, 李德富等. 不同密度和播期下陕油 28 和秦优 7 号产量及抗倒性的比较 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2020, 42(8): 66-73.
- [21] 余恒志, 聂蛟, 李英双, 等. 施硅量对甜荞倒伏及产量的影响 [J]. 中国农业科学, 2018, 51(14): 2664-2674.
- [22] 戴伟民, 张克勤, 段彬伍, 等. 测定水稻硅含量的一种简易方法 [J]. 中国水稻科学, 2005(5): 460-462.
- [23] 陈晓光, 史春余, 尹燕桦, 等. 小麦茎秆木质素代谢及其与抗倒性的关系 [J]. 作物学报, 2011, 37(9): 1616-1622.
- [24] 张文博, 贺建龙, 蒋浩, 等. 木质纤维物质中纤维素和半纤维素含量的测定 [J]. 江苏农业科学, 2017, 45(5): 281-284.
- [25] 刘星贝, 王灿, 胡丹, 等. 烯效唑干拌种对甜荞茎秆抗倒性能的影响 [J]. 作物学报, 2016, 42(1): 93-103.
- [26] 王允安. 苦荞抗倒伏特性的初步研究 [D]. 太原: 山西大学, 2016.
- [27] 任高峰, 吴宇平, 李海平. 不同时期倒伏对油菜经济性状及产量的影响 [J]. 作物研究, 2019, 33(4): 271-273.
- [28] ZHANG Y X, YU C S, LIN J Z, et al. OsMPH1 Regulates Plant Height and Improves Grain Yield in Rice [J]. PLoS one, 2017, 12(7): e0180825.
- [29] MIN H, ZUI T, TAO L, et al. Improving Lodging Resistance while Maintaining High Grain Yield by Promoting Pre-heading Growth in Rice [J]. Field Crops Research, 2021, 270: 108212.
- [30] XUE J, GAO S, FAN Y H, et al. Traits of Plant Morphology, Stalk Mechanical Strength, and Biomass Accumulation in the Selection of Lodging-resistant Maize Cultivars [J]. European Journal of Agronomy, 2020, 117(C): 126073.

[31] 周青, 潘国庆, 施作家, 等. 不同时期施用硅肥对水稻群体质量及产量的影响 [J]. 耕作与栽培, 2001(3): 25-27.

[32] JITENDRA K S, ANIL K P, MUKUND A, et al. Cellulase Adsorption on Lignin; a Roadblock fo-r Economic Hydroly-sis of Biomass [J]. Renewable Energy, 2016, 98: 29-42.

[33] 邵庆勤, 周琴, 王笑, 等. 种植密度对不同小麦品种茎秆形态特征、化学成分及抗倒伏性能的影响 [J]. 南京农业大学学报, 2018, 41(5): 808-816.

[34] 魏鹏, 邵庆勤, 闫素辉. 不同抗倒类型小麦植株节间性状与抗倒伏能力的氮肥调控 [J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2021, 47(6): 622-629.

[35] 樊海潮, 顾万荣, 杨德光, 等. 化控剂对东北春玉米茎秆理化特性及抗倒伏的影响 [J]. 作物学报, 2018, 44(6): 909-919.

[36] MA J F, MITANI N, NAGAO S, et al. Characterization of the Silicon Uptake System and Molecular Mapping of the Silicon Transporter Gene in Rice [J]. Plant physiology, 2004, 136(2): 3284-3289.

[37] AHMAD Z, BARUTCULAR C, ZIA U R M, et al. Pod Shattering in Canola Reduced by Mitigating Drought Stress Through Silicon Application and Molecular Approaches-A Review [J]. Journal of Plant Nutrition, 2022, 46(1) : 5835.

[38] BANSAL, KHUSHBOO, HOODA, et al. Stress Alleviation and Crop Improvement Using Silicon Nanoparticles in Ag-riculture; a Review [J]. Silicon, 2022: 1-14.

[39] MANZOOR N, ALI L, AHMED T, et al. Silicon Oxide Nanoparticles Alleviate Chromium Toxicity in Wheat Triticum Aestivum L [J]. Environmental pollution, 2022: 315.

[40] FEGHHENABI F, HADI H, KHODAVERDILOO H, et al. Improving Wheat (*Triticum aestivum* L.) Antioxidative Defense Mechanisms Against Salinity Stress by Exogenous Application of Potassium Silicate [J]. Journal of Plant Nutri-tion, 2022, 45(19) : 2887-2905.

[41] 冷一欣, 黄春香, 朱晓玉, 等. 聚天冬氨酸对肥料与农药的增效作用 [J]. 江苏农业科学, 2009(2): 263-264.

[42] 汪玉洁, 陈日远, 刘厚诚, 等. 纳米材料在农业上的应用及其对植物生长和发育的影响 [J]. 植物生理学报, 2017, 53(6): 933-942.

[43] 孙德权, 陆新华, 李伟明, 等. 介孔二氧化硅纳米粒在农业中的应用 [J]. 生物技术通报, 2022, 38(5): 228-239.

[44] 李贵莲, 陈日远, 刘厚诚, 等. 纳米胶片处理对生菜生长及元素吸收的影响 [J]. 江苏农业科学, 2015, 43(11): 237-238, 243.

[45] FARIDE A, AHMAD M, PARISSA J, et al. Effects of Silicon Nanoparticles on Molecular, Che-mical, Structural and Ultrastructural Characteristics of Oat [J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2018, 127: 152-160.

责任编辑 欧宾