

钙肥对豇豆种皮开裂及花色苷、纤维素和钙含量的影响

方贯娜¹, 庞淑敏¹, 李甜瑞¹, 梁 峥¹, 李冬彪²

(1. 郑州市农业科技研究院 郑州 450015; 2. 河南欧兰德种业有限公司 郑州 450000)

摘要: 豇豆种皮开裂在生产中较为常见, 对种子活力和发芽影响较大。为探讨增施钙肥对抑制种皮开裂的可行性, 以 6 个豇豆品种为试验材料, 采用基肥或结荚期叶面追肥的方式增施钙肥, 调查裂籽率, 测定种皮中花色苷、纤维素和钙含量。结果表明, 不同钙肥增施方式, 均能提高纤维素含量和钙含量, 显著降低花色苷含量, 豇豆裂籽率降低 3.1~12.7 百分点。相关性分析结果表明, 豇豆裂籽率与花色苷含量呈极显著正相关, 与纤维素含量呈显著负相关。综上, 增施钙肥可作为降低豇豆裂籽率的重要措施在生产中推广应用。

关键词: 豇豆; 裂籽; 钙肥; 花色苷含量; 纤维素含量; 钙含量

中图分类号: S643.4

文献标志码: A

文章编号: 1673-2871(2026)02-163-07

Effects of calcium fertilizer on seed coat cracking and anthocyanins, cellulose and calcium content of cowpea

FANG Guanna¹, PANG Shumin¹, LI Tianrui¹, LIANG Zheng¹, LI Dongbiao²

(1. Zhengzhou Academy of Agricultural Science and Technology, Zhengzhou 450015, Henan, China; 2. Henan Ouland Seed Industry Co., Ltd., Zhengzhou 450000, Henan, China)

Abstract: Seed coat cracking is a prevalent agronomic defect in cowpea production, which severely impairs seed vigor and germination performance. To evaluate the feasibility of mitigating seed coat cracking through calcium fertilization, a field experiment was conducted using six cowpea varieties as test materials. Calcium fertilizer was administered via two approaches: As a base fertilizer during sowing and as a foliar spray at the podding stage. Subsequently, the seed coat cracking rate was investigated, and the content of anthocyanin, cellulose, and calcium in the seed coat were determined. The results demonstrated that both calcium application methods significantly increased the cellulose and calcium content in the cowpea seed coat, while markedly reducing the anthocyanin content. Correspondingly, the seed coat cracking rate was decreased by 3.1-12.7 percent points compared with the control group. Correlation analysis revealed that the cracking rate of cowpea seeds is extremely significantly positively correlated with the anthocyanin content and significantly negatively correlated with the cellulose content. Collectively, these findings indicate that enhanced calcium fertilization can serve as an effective agronomic measure to alleviate seed coat cracking in cowpea production.

Key words: Cowpea; Seed cracking; Calcium fertilizer; Anthocyanin content; Cellulose content; Calcium content

种皮在植物的生命周期中起至关重要的作用^[1], 但豇豆繁种过程中时常出现种皮开裂现象, 尤其是白色种子种皮开裂现象更为严重。种皮开裂导致子叶暴露在外, 容易受到外界生物因素和非生物因素的破坏, 造成种子结构破损, 严重影响种子的活力和商品性^[2], 且种皮开裂的种子播种后容易烂种, 常造成田间缺苗断垄的现象。因此种皮开裂成为困扰豇豆繁种基地和推广企业面临的主要问题, 也是影响豇豆产业发展亟待解决的关键问题之一。

纤维素是细胞初生细胞壁和次生细胞壁基本骨架的主要成分, 在植物细胞壁中扮演承重者的角色^[3]。花色苷是花色素与糖以糖苷键结合而成的一类化合物, 广泛存在于植物的花、果实、茎、叶等器官的细胞液中, 使其呈现不同的颜色^[4]。研究表明, 豆类花色苷在表皮细胞内积累, 种皮开裂的遗传调控与种皮的色素含量密切相关^[5]。Qutob 等^[6]和续曲等^[7]研究发现, 种皮色素含量与种皮开裂存在密切关系, Radchuk 等^[8]也发现, 种皮中酚类化合物含量

收稿日期: 2025-07-03; 修回日期: 2025-09-26

基金项目: 河南省国际联合实验室“以色列蔬菜品种引进和配套技术研究”

作者简介: 方贯娜, 女, 副研究员, 研究方向为豇豆育种与栽培。E-mail: fgna2007@163.com

会影响种皮开裂。关于豇豆种皮开裂的原因及预防措施鲜有报道,但预防果实开裂的报道却很多。钙是细胞壁的重要组成成分,在细胞壁的胞间层积累^[9]。大量研究表明,裂果与果实中钙含量相关^[10-13],增施外源钙肥,可以提高果实中钙含量,高含量的钙会增强果皮的力学强度,从而降低裂果发生概率^[14-18]。鉴于此,笔者选取 6 份豇豆材料,连续两年进行增施钙肥对豇豆种皮开裂影响的研究,探讨增施钙肥对降低豇豆裂籽率的可行性,以期为生产中降低豇豆种皮开裂概率提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料

2023 年 4—7 月在郑州市农业科技学院蔬菜园区进行第一年试验。分别选取种皮易裂白籽品种青美丽 1 号、18Z2 和种皮不易裂麻籽品种荚荚乐 3 号作为试验材料。为进一步研究钙肥对豇豆种皮开裂的影响,在前期研究结果的基础上,2024 年 4—7 月在河南欧兰德种业科技园进行第二次试验,以荚荚乐 2 号(红籽)、荚荚乐 3 号(麻籽)、青山 2 号(白籽)、青山 5 号(白籽)为试验材料。以上品种均由河南欧兰德种业有限公司提供。糖醇钙来源于郑州凯瑞斯农业科技有限公司,过磷酸钙来源于湖北省宜城市钟宜肥业有限公司。

1.2 试验设计

采取两因素完全随机设计。2023 年参试品种 3 个,每个品种设 4 个处理,每个处理 3 次重复,随机区组排列。处理 1(T1)为基肥增施过磷酸钙(25 kg·667 m⁻²),结荚后不喷施钙肥;处理 2(T2)为基肥增施过磷酸钙(25 kg·667 m⁻²),结荚后每周喷施糖醇钙(钙含量 180 g·L⁻¹,糖醇含量 90 g·L⁻¹)1500 倍液,共喷施 4 次;处理 3(T3)为基肥不增施钙肥,结荚后每周喷施糖醇钙,共喷施 4 次;处理 4 为对照(CK),基肥和结荚后均不增施钙肥。2023 年 3 月 24 日育苗,4 月 14 日定植于露地,垄距 1.3 m,一垄双行,穴距 30 cm,每穴定苗 2 株,每次重复种植 18 穴即 36 株,田间管理同常规。

2024 年根据前期研究结果,参试品种 4 个,减少钙肥增施方式,仅保留 T3 处理和对照(CK),每个处理 3 次重复,随机区组排列。2024 年 4 月 8 日育苗,4 月 24 日定植于露地,垄距 1.8 m,一垄双行,穴距 30 cm,每穴定苗 2 株,每次重复种植 30 穴即 60 株,田间管理同常规。

1.3 测定指标与方法

种子采收后,各处理随机各取 3 份 100 粒种子,测定种子百粒质量,记录种皮开裂数,计算裂籽率。然后将种子在水中浸泡 4 h 后剥下种皮,完全风干后测量百粒种皮质量,计算种子种皮质量与种子总质量的比值(种皮质量比)。种皮质量比/%=百粒种皮质量/百粒质量×100。

种皮纤维素、花色苷和钙含量委托农业农村部农产品质量检验测试中心(郑州)检测,钙含量检测依据 GB 5009.92—2016 第三法^[19];纤维素含量检测依据 GB/T 5009.10—2003^[20];采用 pH 示差法测定花色苷含量。

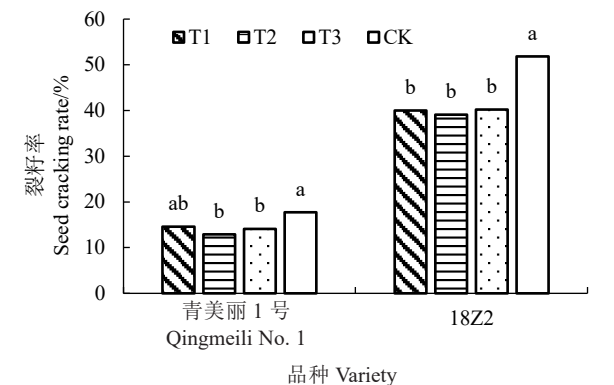
1.4 数据分析

采用 Excel 2021 和 IBM SPSS Statistics 27 软件对试验数据进行处理和统计分析,采用多因素方差分析 LSD 方法进行多重比较,采用 Pearson 相关系数进行线性相关分析。

2 结果与分析

2.1 钙肥对豇豆种子裂籽率的影响

豇豆因品种不同、种皮颜色不同导致裂籽率有较大差别。试验中麻籽品种荚荚乐 3 号和红籽品种荚荚乐 2 号均未发生裂籽现象,而其余白籽品种均发生不同程度的裂籽。从图 1、图 2 可以看出,相同种植水平下不同白籽品种的裂籽率也不同,以各品种 CK 的裂籽率为例,2023 年青美丽 1 号裂籽率为 17.7%,而 18Z2 裂籽率达到了 51.8%(图 1),2024 年青山 2 号和青山 5 号裂籽率分别为 34.8%和 32.1%(图 2)。2023 年钙肥试验中,T1、T2、T3 处



注:不同小写字母表示同一品种的不同处理在 0.05 水平差异显著。下同。

Note: Different small letters indicate significant difference between treatments of the same variety at 0.05 level. The same below.

图 1 钙肥增施方式对豇豆裂籽率的影响(2023)
Fig. 1 Effects of calcium fertilizer application methods on seed cracking rate of cowpea(2023)

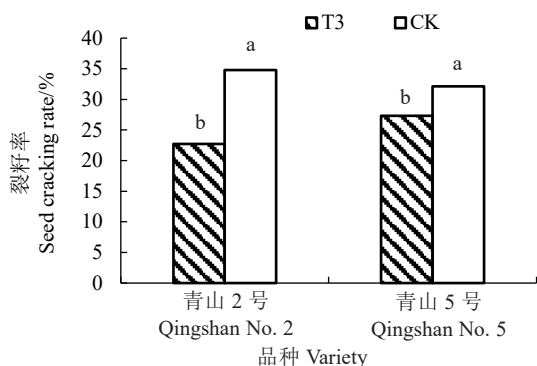


图2 钙肥对豇豆裂籽率的影响(2024)

Fig. 2 Effects of calcium fertilizer on seed crackping rate of cowpea (2024)

理的 18Z2 品种裂籽率较 CK 均显著下降,其中 T2 处理的裂籽率降低幅度最大,较 CK 显著降低 12.7 百分点;T2、T3 处理的青美丽 1 号裂籽率较 CK 显著下降,T1 处理与 CK 相比虽有下降,但差异不显著(图 1)。2024 年钙肥试验中,与 CK 相比,青山 2 号和青山 5 号增施钙肥后,裂籽率均显著下降。上述试验结果表明,增施外源钙可以有效降低豇豆种子裂籽率(图 2)。

2.2 钙肥对豇豆百粒质量及种皮质量比的影响

由图 3、图 4 可以看出,荚蒾乐 2 号和荚蒾乐 3 号的百粒质量明显高于青山 2 号、青山 5 号、18Z2 和青美丽 1 号。两年试验中,不同品种增施钙肥后,除青美丽 1 号和青山 5 号百粒质量低于 CK 外,其他品种均高于 CK,但与 CK 相比,差异均不显著。

因生产上易裂籽的种子多数为白色种子,推测白籽种皮较薄或者种皮质地疏松而导致裂籽率明显高于其他颜色的种子。因此本试验在前期预备试验的基础上,最终通过比较种皮质量比来研究白

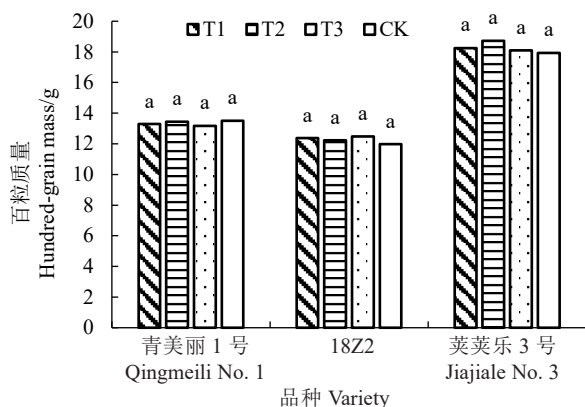


图3 钙肥增施方式对豇豆百粒质量的影响(2023)

Fig. 3 Effects of calcium fertilizer application methods on hundred-seed mass of cowpea (2023)

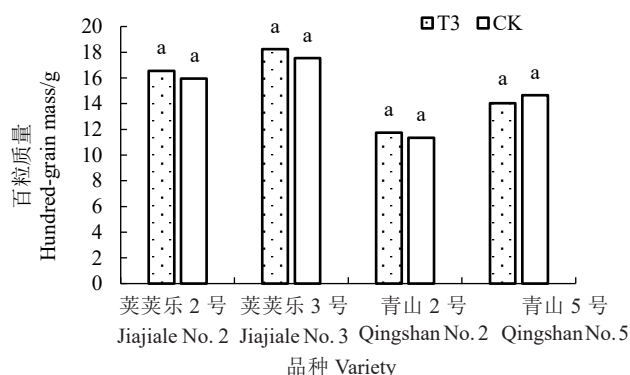


图4 钙肥对豇豆百粒质量的影响(2024)

Fig. 4 Effects of calcium fertilizer on hundred-seed mass of cowpea (2024)

色种皮厚度或者质地及其他种皮的差异以及钙肥对种皮质量比的影响。由图 5 可知,荚蒾乐 3 号的种皮质量比明显高于青美丽 1 号和 18Z2。T1、T2、T3 处理的荚蒾乐 3 号种皮质量比显著高于 CK,而 18Z2 和青美丽 1 号与各自的 CK 相比均无显著差异。从图 6 可以看出,荚蒾乐 2 号、荚蒾乐 3 号 CK 的种皮质量比分别为 10.62% 和 10.99%,而青山 2

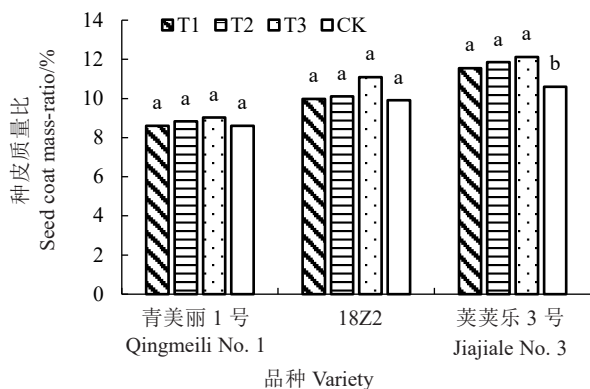


图5 钙肥增施方式对豇豆种皮质量比的影响(2023)

Fig. 5 Effects of calcium fertilizer application methods on seed coat mass-ratio of cowpea (2023)

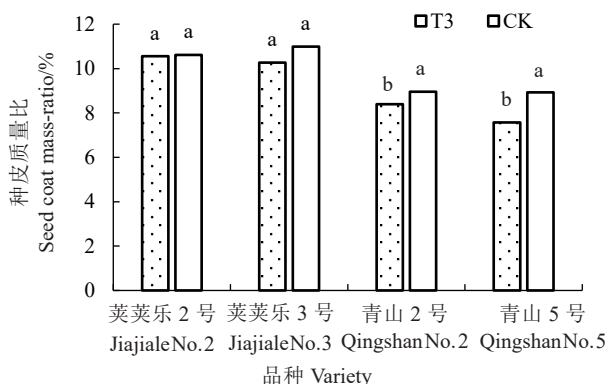


图6 钙肥对豇豆种皮质量比的影响(2024)

Fig. 6 Effects of calcium fertilizer on seed coat mass-ratio of cowpea (2024)

号、青山5号的种皮质量比仅有8.96%和8.92%，说明白色种子种皮质量比与红籽和麻籽相比普遍较低。所有品种增施钙肥后，其种皮质量比均低于CK，其中青山5号和青山2号与各自的CK相比显著降低。两年试验结果表明，增施钙肥与种皮质量比没有明显相关性。

2.3 钙肥对豇豆种子花色苷含量的影响

2023年试验中对所有品种各处理种子花色苷含量进行测定，结果显示，麻籽品种荚荚乐3号的花色苷含量全部低于方法定量限，检测结果全部显示为<2.4，无具体测量值，鉴于此，本试验仅对白籽品种进行了数据分析。从图7可以看出，T1、T2和T3处理的青美丽1号花色苷含量较CK分别显著降低12.1%、14.5%和12.1%；T1、T2和T3处理的18Z2花色苷含量较CK分别显著降低22.0%、23.5%和21.6%。以上数据表明，增施钙肥能够显著降低白色豇豆种子花色苷含量，但不同增施方式之间差异不显著。

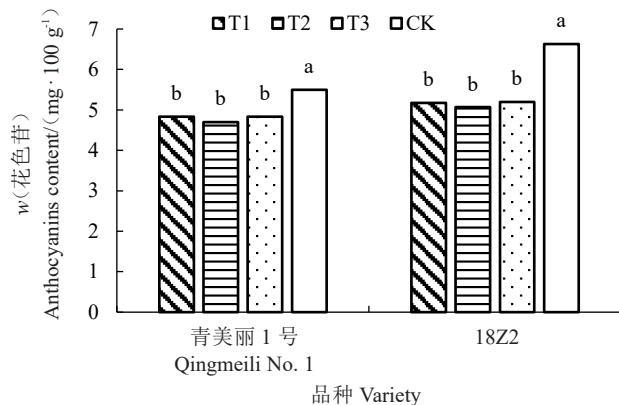


图7 钙肥增施方式对豇豆花色苷含量的影响(2023)

Fig. 7 Effects of calcium fertilizer application methods on anthocyanins content of cowpea (2023)

2.4 钙肥对豇豆种子纤维素含量的影响

如图8所示，2023年T1、T2、T3处理的青美丽1号纤维素含量较CK分别显著提高19.8%、17.2%和19.8%；T2处理的18Z2纤维素含量较CK显著提高24.2%，T1和T3处理与CK无显著差异；荚荚乐3号增施钙肥后纤维素含量均显著高于对照，以T3处理效果最佳，较CK显著提高49.4%，且显著高于T2和T1处理。由图9可知，2024年参试4个品种增施钙肥后，纤维素含量较各自的CK均显著提高。以上数据表明，增施外源钙可以提高豇豆种子纤维素含量，增加种皮细胞壁的机械强度和抗

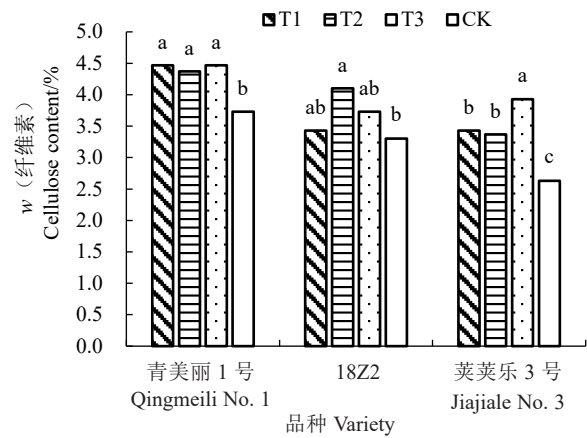


图8 钙肥增施方式对豇豆纤维素含量的影响(2023)

Fig. 8 Effects of calcium fertilizer application methods on cellulose content of cowpea (2023)

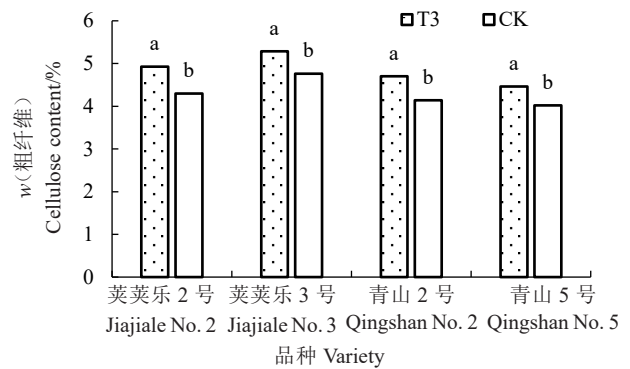


图9 钙肥对豇豆纤维素含量的影响(2024)

Fig. 9 Effects of calcium fertilizer on cellulose content of cowpea (2024)

张性能。

2.5 钙肥对豇豆种子钙含量的影响

从图10可以看出，2023年增施钙肥后，青美丽1号、18Z2和荚荚乐3号种子钙含量均不同程度高

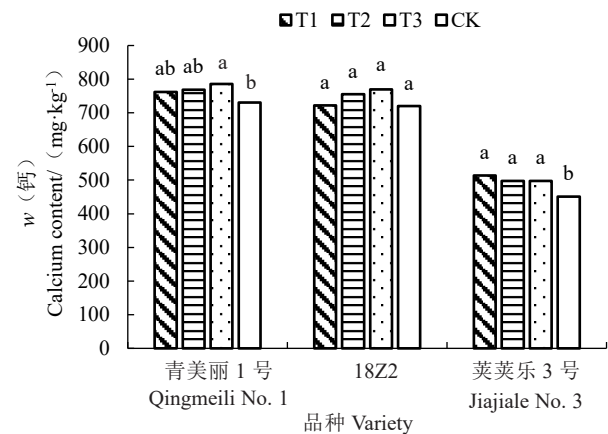


图10 钙肥增施方式对豇豆钙含量的影响(2023)

Fig. 10 Effects of calcium fertilizer application methods on calcium content of cowpea (2023)

于CK,其中T3处理的青美丽1号较CK显著提高7.4%,T2、T1处理与CK相比差异不显著;18Z2各处理与CK相比差异不显著;T1、T2、T3处理的荚荚乐3号钙含量较CK分别显著提高14.0%、10.3%和10.5%。由图11可知,2024年除T3处理荚荚乐2号的钙含量与CK相比差异不显著外,荚荚乐3号、青山2号和青山5号的钙含量均显著高于各自的CK。以上数据表明,增施钙肥能够提高豇豆种子的钙含量。

2.6 豇豆种子裂籽率与花色苷含量、粗纤维含量、钙含量相关性分析

为分析豇豆种子裂籽率与花色苷、纤维素和钙含量的相关密切程度,本试验针对易裂白籽品种青美丽1号和18Z2的试验数据进行相关性分析。由

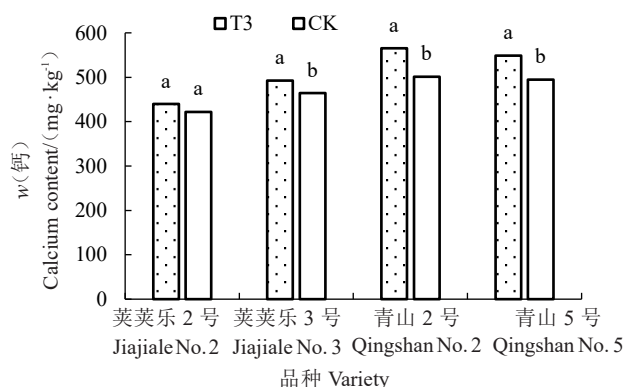


图 11 钙肥对豇豆钙含量的影响(2024)

Fig. 11 Effects of calcium fertilizer on calcium content of cowpea (2024)

表1可以看出,白籽品种青美丽1号和18Z2裂籽率均和花色苷含量呈极显著正相关,与纤维素含量

表 1 豇豆裂籽率与花色苷含量、纤维素含量、钙含量的相关性分析

Table 1 Correlation analysis between cowpea seed cracking rate and anthocyanin content, cellulose content, and calcium content

品种 Variety	指标 Index	花色苷含量 Anthocyanins content	纤维素含量 Cellulose content	钙含量 Calcium content
青美丽 1 号 Qingmeili No. 1	裂籽率 Seed cracking rate	0.925**	-0.614*	0.247
18Z2	裂籽率 Seed cracking rate	0.867**	-0.676*	0.244

注:*表示在 0.05 水平显著相关;**表示在 0.01 水平极显著相关。

Note: * represents significant correlation at 0.05 level; ** represents extremely significant correlation at 0.01 level.

呈显著负相关,与钙含量相关性不显著。

3 讨 论

3.1 钙肥对豇豆种子裂籽率的影响

研究认为,钙能增加表皮细胞的韧性和厚度^[21],但钙肥在植物体内移动性差,主要通过蒸腾作用运输到指定部位^[22],土壤中缺钙或阴雨天气叶片蒸腾速率下降,很容易造成植株缺钙。豇豆春季生产其种子成熟时期,正值高温季节,干旱使土壤溶液浓缩,减少根系吸水,从而抑制钙的吸收^[23]。如遇连续降雨天气,叶片蒸腾速率下降,也会降低钙的移动性,造成植株缺钙。由此分析,春季生产的豇豆种子裂籽率较高可能与植株缺钙有关,为此笔者在豇豆生长期进行了增施钙肥试验,结果表明,在豇豆生长期增施钙肥,对降低豇豆裂籽率有显著效果。这与彭佃亮等^[24]、寸丽芳等^[25]研究中得出的增施钙制剂能够降低蔬菜、水果裂果率的结果一致。

3.2 钙肥对豇豆种子百粒质量以及种皮质量比的影响

关于豇豆种皮开裂的研究目前尚未见报道,但

关于大豆种皮开裂的研究较多。Nakamura 等^[26]研究表明,种子质量与平均开裂指数呈正相关,控制种子质量有关的基因对种皮开裂程度也有影响,但随后 Yamaguchi 等^[27]在研究中发现,种子质量与品种的种皮开裂率差异并不显著。有学者研究认为,种皮开裂的种子表面积和体积显著大于正常种子^[1],但王亚琪等^[28]研究发现,种皮开裂突变体的种子宽度、厚度、长度均比正常种子小,差异显著,并且粒形也不规则,种皮均皱缩,这种表现和生产中观察到的大部分豇豆种皮开裂的情况一致,种皮开裂主要是从脐部开裂,开裂情况比较严重,如 18Z2;但也有部分轻微横裂的种子比较饱满,如青山 5 号。本试验结果表明,增施钙肥虽然能够显著降低豇豆裂籽率,但不能提高所有品种的百粒质量,这可能与裂籽类型相关,也可能因百粒质量是一个复杂的数量性状,也是一个对外界环境比较敏感的性状^[29]。

关于种皮厚度、种皮质地对种皮开裂影响的报道较少。本试验采用种皮质量与种子总质量的比值(种皮质量比)来反映种皮的厚度和质地。试验结果表明,白色种子种皮质量比低于红籽和麻籽,说明白籽种皮可能薄于麻籽和红籽种皮,但增施钙

肥与种皮质量比没有明显相关性。种皮质量比是根据试验需要设计的一个指标,只能简单反映种皮厚度和种皮质地,今后还需要通过精准测量、成分分析以及结构观察等来详细研究豇豆种皮厚度和种皮质地对裂籽率的影响。

3.3 钙肥对豇豆种子成分含量的影响

大量关于裂果的研究表明,钙处理能够抑制细胞壁降解酶活性,增加原果胶和纤维素含量,从而提高果皮机械强度^[30-32]。本研究结果表明,增施钙肥能提高豇豆种皮中钙和纤维素含量,降低裂籽率,这与前人的研究结果一致。王曼等^[33]研究发现,胞外 Ca^{2+} 参与蓝光诱导的花色苷积累和查尔酮合成酶表达,本研究发现,增施钙肥显著降低了豇豆种皮中花色苷含量,但周开兵等^[34]通过喷施 0.2% 的 CaCl_2 能够提高荔枝中花色苷含量,不同的研究结果可能与花色苷的合成机制复杂有关,除受自身遗传特性影响外,还受环境、外源物质等多种因素的调控^[35-36]。根据大豆种皮开裂的研究报道,花色苷积累导致种皮开裂与种皮颜色调控的基因相关,这些基因互作影响色素比例与空间分布^[37-40],也可能导致控制色素合成途径中的某个或多种酶活性丧失^[6],从而诱导或抑制种皮开裂。

4 结 论

综上所述,豇豆种皮中纤维素和花色苷含量与裂籽有着紧密联系,种皮中花色苷含量越低,纤维素含量越高,则裂籽率越低。多种方式增施钙肥均可提高豇豆种皮中钙和纤维素含量,显著降低花色苷含量,裂籽率降低 3.1~12.7 百分点,表明增施钙肥可作为降低豇豆裂籽率的重要措施,而最适钙肥增施方式还需要进一步研究。

参考文献

- [1] 崔晓培,郑金焕,胡冬梅.大豆种皮裂纹的研究进展[J].大豆科学,2019,38(4):656-663.
- [2] 安普南,杨晓旭,刘畅,等.菜豆种皮开裂过程中木质素含量及相关酶活变化[J].黑龙江大学工程学报,2021,12(2):90-96.
- [3] 却枫,查若飞,魏强.植物纤维素合成酶研究进展[J].南京林业大学学报,2022,46(6):207-241.
- [4] 刘漾伦,徐文泐,李政.天然植物花色苷研究进展[J].食品安全导刊,2024(6):151-153.
- [5] 李兴军.豆类种皮的成分与功能[J].粮食科技与经济,2010,35(2):39-42.
- [6] QUTOB D, MA F, PETERSON C A, et al. Structural and permeability properties of the soybean seed coat[J]. Botany, 2008(3): 219-227.
- [7] 续曲,郭勇,邱丽娟.褐色种皮大豆与其黄色种皮衍生亲本的表型及基因型比较[J].植物遗传资源学报,2013,14(2): 284-288.
- [8] RADCHUK V, BORISJUKA L. Physical metabolic and developmental functions of the seed coat[J]. Frontiers in Plant Science, 2014, 5: 1-17.
- [9] WHITE P J, BROADLEY M R. Calcium in plants[J]. Annals of Botany, 2003, 92(4): 487-511.
- [10] 李建国,高飞飞,黄辉白,等.钙与荔枝裂果关系初探[J].华南农业大学学报,1999,20(3):45-49.
- [11] 黄旭明,袁炜群,王惠聪,等.抗裂性不同的荔枝品种果皮发育过程中钙的分布动态研究[J].园艺学报,2005,32(4):578-583.
- [12] FERNANDEZ R T, FLOREZ J A. Interittent application of CaCl_2 to control rain cracking of sweet cherry[J]. Acta Horticulturae, 1998, 468(3): 683-689.
- [13] HUANG X, WANG H C, LI J G, et al. An overview of calcium's role in lychee fruit cracking[J]. Acta Horticulturae, 2005, 665: 231-240.
- [14] 陈桂芬,黄玉溢,熊柳梅,等.不同柑橘品种裂果比较及施钙对柑橘的影响效应[J].中国园艺文摘,2013,29(1):1-2.
- [15] 陆静.三种钙肥对贡柑裂果、果皮钙含量和品质的影响研究[J].广西农学报,2021,36(2):28-32.
- [16] 曲日涛,于凯,王奎良.增施钙素营养防治大樱桃裂果试验[J].北方果树,2014(5):12-13.
- [17] HUANG J S, SNAPP S S. A bioassay investigation of calcium nutrition and tomato shoulder check cracking defect[J]. Communication in Soil Science and Plant Analysis, 2004, 35(19/20): 2771-2787.
- [18] 吴建阳,何冰,陈妹,等.果实裂果机理研究进展与展望[J].广东农业科学,2017,44(4):38-45.
- [19] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会,国家食品药品监督管理总局.食品安全国家标准 食品中钙的测定:GB 5009.92-2016[S].北京:中国标准出版社,2016.
- [20] 中华人民共和国卫生部,中国国家标准化管理委员会.植物类食品中粗纤维的测定:GB/T 5009.10-2003[S].北京:中国标准出版社,2004.
- [21] 刘亚林,吴秀文,闫磊,等.植物硼钙效应及其在细胞壁中互作机制的研究[J].植物科学学报,2018,36(5):767-773.
- [22] 李彩侠.钙对植物生长的影响研究进展[J].河北农业,2024(4):86-87.
- [23] 于洋.农作物缺素症的发生与防治[J].农民致富之友,2016(19):32.
- [24] 彭佃亮,张敬敏,王兴翠,等.叶面增施钙与吡啶乙酸对番茄果皮生理特征及果实裂果的影响[J].江苏农业科学,2024,52(17):135-139.
- [25] 寸丽芳,房立媛,林敏娟,等.增施外源钙对骏枣裂果和相关生理特性及显微结构的影响[J].果树学报,2023,40(9): 1894-1903.
- [26] NAKAMURA T, YANG D, KALAISELVI S, et al. Genetic analysis of netlike cracking in soybean seed coats[J]. Euphytica, 2003, 133(2): 179-184.
- [27] YAMAGUCHI N, YAMAZAKI H, OHNISHI S, et al. Method

- for selection of soybeans tolerant to seed cracking under chilling temperatures[J]. *Breeding Science*, 2014, 64(1): 103-108.
- [28] 王亚琪, 简朴, 费云燕, 等. 大豆 2 个种皮不完整突变体的形态特点与遗传分析[J]. *核农学报*, 2017, 31(4): 621-626.
- [29] 吴贵生. 不同种植密度和采收时间对芸豆种子产量和质量的影响[D]. 黑龙江齐齐哈尔: 黑龙江八一农垦大学, 2025.
- [30] 张泽中. 番茄裂果的原因及防治措施[J]. *河南农业*, 2021(10): 35.
- [31] 龙鹏, 段铸轩, 朱明涛. 外源钙肥对瑞都早红葡萄裂果和果实品质的影响[J]. *农业科技通讯*, 2022(4): 199-201.
- [32] 代琳, 张伦德, 周志扬, 等. 外源赤霉素、氨基酸钙处理对‘明日见’柑橘裂果的影响[J]. *中国农学通报*, 2024, 40(7): 49-55.
- [33] 王曼, 张玉进, 王小菁. 胞外钙离子以及细胞膜组分参与蓝光诱导拟南芥叶片花色素苷的积累[J]. *生物物理学报*, 2008, 24(6): 451-459.
- [34] 周开兵, 苏举, 徐远锋. 磷、钾和钙元素对三月红荔枝果皮着色的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2007(6): 54-57.
- [35] BRENDA W S. It takes a garden. How work on diverse plant species has contributed to an understanding of flavonoid metabolism[J]. *Plant Physiology*, 2001, 127(4): 1399-1404.
- [36] 姜卫兵, 徐莉莉, 翁忙玲, 等. 环境因子及外源化学物质对植物花色素苷的影响[J]. *生态环境学报*, 2009, 18(4): 1546-1552.
- [37] SONG J, GUO Y, YU L J, et al. Progress in genes related to seed-coat color in soybean[J]. *Hereditas*, 2012, 34(6): 687-694.
- [38] SENDA M, KURAUCHI T, KASAI A, et al. Suppressive mechanism of seed coat pigmentation in yellow soybean[J]. *Breeding Science*, 2012, 61(5): 523-530.
- [39] HYTEN D L, CHOI Y, SONG Q, et al. A high density integrated ge-netic linkage map of soybean and the development of a 1536 universal soy linkage panel for quantitative trait locus mapping[J]. *Crop Science*, 2010, 50(3): 960-968.
- [40] SENDA M, KASAI A, YUMOTO S, et al. Sequence divergence at chalcone synthase gene in pigmented seed coat soybean mutants of the inhibitor locus[J]. *Genes and Genetic Systems*, 2002, 77(5): 341-350.