

外源钙对谷子农艺性状、品质及 籽粒钙含量的影响

杜冰,杨馥熔,郭浩杰,王成,张富厚,孟超敏

(河南科技大学农学院/河南省旱地作物种质资源利用工程研究中心,河南 洛阳 471000)

摘要:以2个高钙谷子品种‘金谷5号’、‘豫谷47’和2个低钙谷子品种‘济谷20’、‘冀谷38’为试验材料,设置5个钙肥梯度(CK: 0 mg · L⁻¹, C1: 0.05 mg · L⁻¹, C2: 0.10 mg · L⁻¹, C3: 0.15 mg · L⁻¹, C4: 0.20 mg · L⁻¹),探究拔节期、抽穗期和灌浆期叶面喷施不同浓度钙肥对谷子生长发育及籽粒钙含量的影响。结果表明:与对照相比,处理组(C1、C2、C3)提高了不同品种谷子的株高、茎粗、叶面积、穗粗和千粒重,同时改善了其品质,其中C3处理对株高的提高作用最显著,4个品种分别提高9.65%、6.00%、5.63%和9.12%;‘金谷5号’和‘豫谷47’在C3处理下的茎粗较CK分别提高11.74%和4.21%,‘济谷20’在C4处理下的茎粗较CK提高11.82%,‘冀谷38’在C2处理下的茎粗较CK提高3.21%;4个谷子品种在C2处理下的叶面积较CK分别提高3.31%、11.25%、3.74%和6.08%,在C3处理下的穗粗较CK分别提高2.20%、16.48%、11.77%和4.50%;喷施外源钙对4个谷子品种千粒重的最大增幅范围为3.46%~7.75%。同时,增施钙肥能显著提高谷子籽粒钙含量,其中‘金谷5号’、‘豫谷47’和‘济谷20’籽粒钙含量在C3处理下达到最大值,较CK分别增加25.41%、29.18%和20.14%,‘冀谷38’籽粒钙含量在C2浓度处理下达到最大值,较CK增加36.12%。施钙浓度为0.10~0.15 mg · L⁻¹时,谷子的表型农艺性状、品质指标及籽粒钙含量综合表现最优,是豫西地区谷子生产中的最佳施钙浓度。

关键词:谷子;外源钙;农艺性状;品质性状;籽粒钙含量

中图分类号:S515; S365 **文献标志码:**A

Effects of exogenous calcium on agronomic traits, quality and grain calcium content of millet

DU Bing, YANG Furong, GUO Haojie, WANG Cheng, Zhang Fuhou, MENG Chaomin

(College of Agriculture, Henan University of Science and Technology, Henan Dryland Crop Germplasm
Resources Utilization Engineering Research Center, Luoyang, Henan 471000, China)

Abstract: Five calcium fertilizer gradients (CK: 0 mg · L⁻¹, C1: 0.05 mg · L⁻¹, C2: 0.10 mg · L⁻¹, C3: 0.15 mg · L⁻¹, C4: 0.20 mg · L⁻¹) were established using two high-calcium millet varieties, ‘Jingu 5’ and ‘Yugu 47’, and two low-calcium millet varieties, ‘Jigu 20’ and ‘Jigu 38’, as experimental materials. The effects of different concentrations of calcium fertilizer on grain growth and grain calcium content at jointing stage, heading stage and filling stage were studied, and the optimal concentration of exogenous calcium was determined. The results showed that compared with the control group, the plant height, stem diameter, leaf area, ear diameter and 1000-grain weight of ‘Jingu 5’, ‘Yugu 47’, ‘Jigu 20’ and ‘Jigu 38’ were increased in the treatment group (C1, C2, C3), and the quality was improved. C3 concentration treatment had the most significant effect on plant height, which was 9.65%, 6.00%, 5.63% and 9.12% higher than CK, respectively. Stem diameter of ‘Jingu 5’ and ‘Yugu 47’ under C3 treatment was 11.74% and 4.21% higher than CK, stem diameter of ‘Jigu 20’ under C4 treatment was 11.82% higher than CK, stem diameter of ‘Jigu 38’ under C2 treatment was 3.21% higher than CK. The leaf area of four millet varieties under C2 treatment was 3.31%, 11.25%, 3.74% and 6.08% higher than that

收稿日期:2024-03-27

修回日期:2024-05-11

基金项目:河南省科技攻关项目(242102110278);河南省产业科技特派员项目(2018HNCYTPY01);河南省旱地绿色智慧农业特色骨干学科群建设项目(17100001)

作者简介:杜冰(1999-),女,河南济源人,硕士研究生,研究方向为谷子遗传育种与栽培。E-mail:dubing7335@163.com

通信作者:孟超敏(1977-),男,陕西咸阳市人,副教授,主要从事旱地特色作物遗传育种与栽培研究。E-mail:chaominm@haust.edu.cn

of CK, respectively. Ear diameter under C3 treatment was 2.20%, 16.48%, 11.77% and 4.50% higher than CK, respectively. The maximum increase range of 1000-grain weight of four millet varieties by applying exogenous calcium was 3.46%~7.75%. Furthermore, the application of calcium fertilizer can significantly increase the calcium content of grain seeds, among which the calcium content of grain seeds of 'Jingu 5', 'Yugu 47' and 'Jigu 20' reached the maximum value under C3 treatment, and increased by 25.41%, 29.18% and 20.14%, respectively, compared with that of CK, the calcium content of grain seeds of 'Jigu 38' reached the maximum value under C2 treatment, and increased by 36.12% compared with that of CK. The calcium concentration of 0.10~0.15 mg · L⁻¹, the phenotypic agronomic trait, quality indexes and grain calcium content of millet were optimized, which was the best calcium application concentration for grain production in west Henan region.

Keywords: millet; exogenous calcium; agronomic trait; quality character; grain calcium content

钙是人类生命活动不可或缺的矿物质元素^[1]。目前,全球大约有 35 亿人缺乏钙,我国民众人均钙摄入量仅为 366.1 mg · d⁻¹,与中国营养协会建议的钙摄入水平相差较大,钙缺乏已经对人类健康构成严重威胁^[2-4]。钙也是植物所必需的微量营养元素之一,在植物的生长发育、品质改良及应对逆境胁迫过程中发挥着关键作用^[5-6],植物钙是人类摄取钙元素的重要途径。谷子(*Setaria italica*)是我国干旱和半干旱区的优势农作物^[7-8],不仅具有生长周期短、适应性广、抗逆性强的优良特性^[9-10],而且营养丰富,其钙含量高于稻米和玉米。关于谷子钙生物强化的研究和应用已逐渐受到研究人员的关注和重视。

施用微量元素肥料可以显著提高谷子的产量、品质及营养成分含量。郭美俊等^[10]研究指出,喷施不同浓度的钼肥可提高谷子的株高、叶面积、叶片 SPAD 和净光合速率,且不同时期喷施均对穗质量和穗粒质量有改善作用,0.08% 浓度钼肥处理下谷子产量最高。穆婷婷等^[11]研究表明,叶面喷施硒肥可提高谷子叶酸、粗蛋白、粗脂肪和赖氨酸等营养品质指标的含量。董健京^[12]研究发现,增施锌肥能够增强植株的光合性能,增强谷子抗逆能力,提高品质;施用硼肥能提高谷粒充实率,增加籽粒的饱满度,降低秕谷数量,提高谷子产量和品质。陈向阳等^[13]研究表明,灌浆期叶面喷施铁肥对谷子茎秆、顶三叶、籽粒及谷糠中铁元素含量均有明显的提高作用。目前施用钙肥对谷子产量和品质影响的研究较少,尤其是施钙对谷子籽粒钙含量的调控研究鲜有报道。谷子是豫西地区的重要作物,主要集中于洛阳市,其种植面积占河南省总种植面积的 70% 以上,但具有高附加值的小米产品较少,因此开发特色谷子对于区域谷子产业发展有重要意义。本研究以前期筛选的高钙品种'金谷 5 号'、'豫谷 47' 和低钙品种'济谷 20'、'冀谷 38' 为试验材料,通过拔节期、抽穗期、灌浆期叶面喷施不同浓度钙

肥对谷子形态、品质、籽粒钙含量等指标的影响,探明适合在谷子生产中应用的最佳钙肥喷施浓度,以期为优质富钙谷子的合理施肥提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试谷子为高钙品种'金谷 5 号'和'豫谷 47' 以及低钙品种'济谷 20'和'冀谷 38',4 个品种谷子初始含钙量分别为 29.88、29.60、21.50、21.07 mg · 100g⁻¹。

1.2 试验区概况

试验于 2023 年 6—10 月在河南科技大学农场(112°5'E,34°6'N)进行。该地区属于暖温带大陆性季风气候,全年无霜期 210 d,平均气温 14℃,年平均降水量 582.9 mm。该地区地势平坦,肥力均匀,土壤类型为褐土,土壤疏松且熟化程度高,有机质和矿物质含量丰富,适宜谷子种植生长。

1.3 试验设计

试验采用随机区组设计,共 4 个品种,每个品种设置 5 个 CaCl₂ 喷施浓度处理,分别为 0(CK)、0.05(C1)、0.1(C2)、0.15(C3)、0.2 mg · L⁻¹(C4),每个品种 3 次重复,共 60 个小区,小区面积为 0.78 m²(0.65 m×1.20 m),各小区四周设置 1 m 的保护行。CaCl₂ 喷施时期为拔节期、抽穗期和灌浆期,于 16:00 以后叶面喷施。供试 CaCl₂ 为浓度 ≥96% 的分析纯,用于叶面喷施配置的 CaCl₂ 溶液的最适兑水量为 375 kg · hm⁻²,对照组用清水代替。

谷子播种时间为 2023 年 6 月中下旬,播种量为 0.63 kg · 667m⁻²,株行距 0.08 m×0.40 m,收获时间为 10 月初。出苗前结合降水情况进行浇水,7 月上旬出苗后进行除草,在 5~6 叶期进行间苗定苗,拔除弱苗和枯心苗;定苗后进行深耕,清除病苗、弱苗、杂草,并及时培土;全生育期未额外施肥。其余田间管理按照常规大田管理措施进行。

1.4 测定指标及方法

1.4.1 农艺性状 农艺性状调查测定参照《谷子种质资源描述规范和数据标准》^[14]进行,在谷子拔节期、抽穗期、灌浆期和成熟期,每个小区随机选取10株长势一致、生长健壮且无病虫害的植株,进行农艺性状(株高、茎粗、叶面积、穗长、穗粗和千粒重)调查。

1.4.2 品质性状 于成熟期在每个小区随机选取10株长势均匀的谷子,收获经自然风干后脱粒、脱壳,参照田翔等^[15]方法利用近红外分析仪进行水分(MC)、碳水化合物(CHO)、粗脂肪(EE)、粗蛋白(CP)、粗灰分(Ash)、粗纤维(CF)、8种必需氨基酸(赖氨酸 Lys, 苯丙氨酸 Phe, 蛋氨酸 Met, 亮氨酸 Leu, 色氨酸 Trp, 苏氨酸 Thr, 异亮氨酸 Ile, 缬氨酸 Val)含量等籽粒品质性状的测定。

1.4.3 籽粒钙含量 参照卫学青等^[16]方法,采用微波消解-电感耦合等离子体发射光谱法进行谷子籽粒钙含量的测定。

1.5 数据统计分析

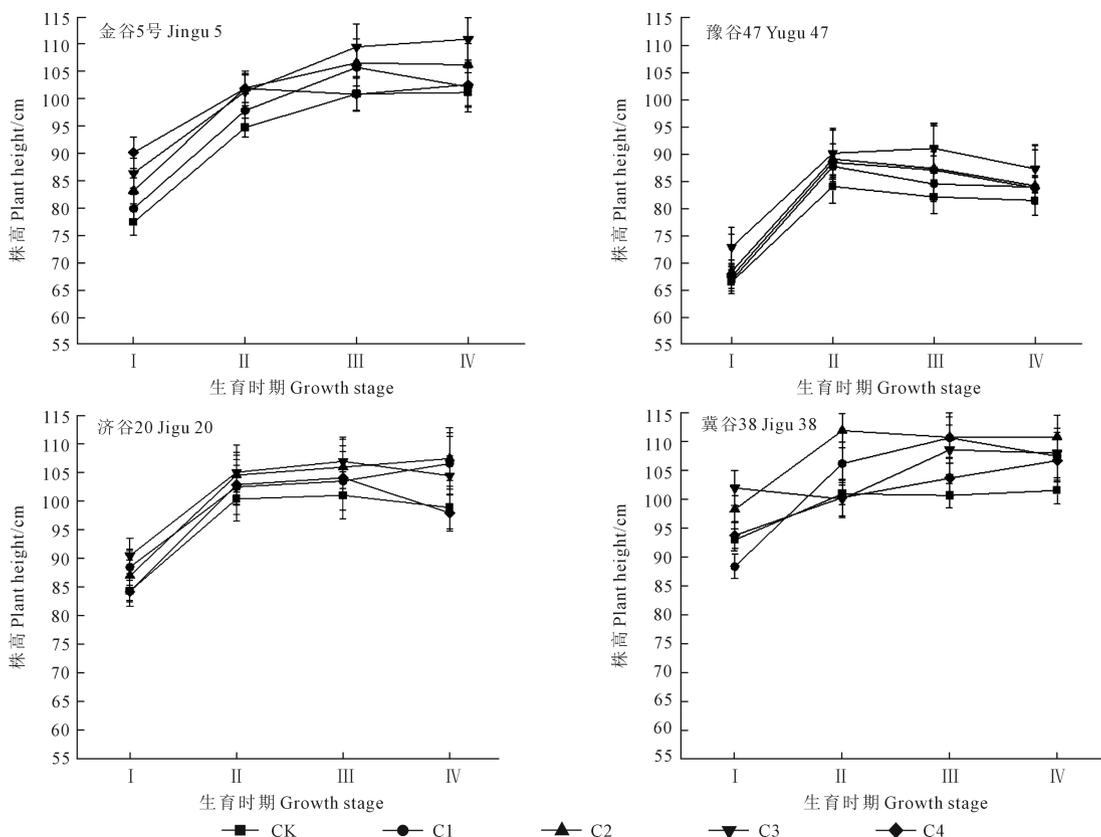
采用 Excel 2019 整理试验数据,利用 SPSS 26.0 软件对试验数据进行处理和分析,采用 Origin 2022 软件作图。

2 结果与分析

2.1 不同浓度钙处理对谷子农艺性状的影响

叶面喷施钙肥可提高不同品种谷子株高、茎粗、叶面积、穗长、穗粗和千粒重(图1~6)。0~0.2 mg·L⁻¹的浓度范围内,各农艺指标随生育期推进大致呈先升高后降低趋势,且各处理均高于CK,其中C2和C3处理始终高于其他处理;0.15~0.2 mg·L⁻¹浓度范围内,各农艺指标值呈不同程度降低趋势。

2.1.1 不同浓度钙处理对谷子株高的影响 叶面喷施不同浓度钙肥后,拔节期、抽穗期、灌浆期和成熟期的谷子株高动态变化如图1所示。全生育期内,除‘冀谷38’的株高在C2浓度下达到最大值外,其余3个品种的株高均在C3浓度处理下达到最大值,且均与其他浓度处理差异显著。C2处理下,‘冀谷38’4个时期的株高分别比CK增加5.70%、10.82%、10.00%和9.12%;与CK相比,C3处理下‘金谷5号’、‘豫谷47’、‘济谷20’的拔节期株高分别增加11.61%、9.67%、7.35%,抽穗期株高分别增加6.93%、7.29%、4.65%,灌浆期株高分别增加8.51%、10.86%、5.87%,成熟期株高分别增加9.65%、



注: I:拔节期; II:抽穗期; III:灌浆期; IV:成熟期。下同。

Note: I:Jointing stage; II:Heading period; III:Grouting period; IV:Maturity stage. The same below.

图1 不同浓度钙处理对谷子株高的影响

Fig.1 Effects of different calcium concentrations on plant height of millet

6.00%、5.63%; C1 处理对谷子的株高同样有促进作用,但效果不及 C2 和 C3 处理。

2.1.2 不同浓度钙处理对谷子茎粗的影响 图 2 为叶面喷施不同浓度钙肥后,拔节期、抽穗期、灌浆期和成熟期的谷子茎粗的动态变化。全生育期内,‘金谷 5 号’和‘豫谷 47’的茎粗在 C3 处理下达到最大值,且与其他浓度处理间差异均达到显著水平;‘济谷 20’和‘冀谷 38’的茎粗分别在 C4 和 C2 处理下达到最大值。C3 处理下,‘金谷 5 号’各生育时期茎粗分别较 CK 增加 7.69%、15.20%、12.16% 和 11.74%,‘豫谷 47’茎粗分别较 CK 增加 19.82%、19.76%、9.45% 和 4.21%; C4 处理下,‘济谷 20’各生育时期茎粗分别较 CK 显著增加 7.66%、14.17%、16.86% 和 11.82%; C2 处理下,‘冀谷 38’各生育时期茎粗分别较 CK 增加 7.58%、5.05%、4.43% 和 3.21%。综上,叶面喷施钙肥对谷子茎粗有明显提高作用,且对高钙谷子的提高作用更显著。

2.1.3 不同浓度钙处理对谷子叶面积的影响 叶面喷施不同浓度钙肥后,各品种谷子叶长生育期动态变化如图 3 所示。全生育期内,4 个品种谷子的叶面积均在 C2 处理下达到最大值且与其他浓度处

理差异显著。C2 处理下,‘金谷 5 号’、‘豫谷 47’、‘济谷 20’、‘冀谷 38’的拔节期叶面积分别较 CK 增加 4.69%、9.96%、4.45%、1.18%,抽穗期叶面积分别较 CK 增加 4.58%、9.34%、4.33%、2.16%,灌浆期叶面积分别较 CK 增加 4.28%、8.26%、3.07%、4.36%; 成熟期叶面积分别较 CK 增加 3.31%、11.25%、3.74%、6.08%。以上结果表明,叶片喷施钙肥对高钙品种叶面积的促进作用显著高于低钙品种。

2.1.4 不同浓度钙处理对谷子穗长的影响 叶面喷施不同浓度钙肥后,各品种谷子生育期穗长的动态变化如图 4 所示。4 个品种谷子抽穗期、灌浆期和成熟期的穗长始终低于 CK,表明叶面喷施钙肥对谷子的穗长产生抑制作用,且无明显规律。‘金谷 5 号’的穗长在 C4 处理下最小,其在抽穗期、灌浆期和成熟期的穗长分别较 CK 降低 12.25%、8.29% 和 6.02%; ‘豫谷 47’的穗长在 C2 处理下最小,3 个生育时期分别较 CK 降低 10.01%、7.40% 和 2.91%; ‘济谷 20’的穗长在 C1 处理下最小,3 个生育时期分别较 CK 降低 7.52%、8.61% 和 6.39%; ‘冀谷 38’的穗长在 C3 处理下最小,3 个生育时期分别较 CK 降低 5.61%、9.47% 和 8.49%。

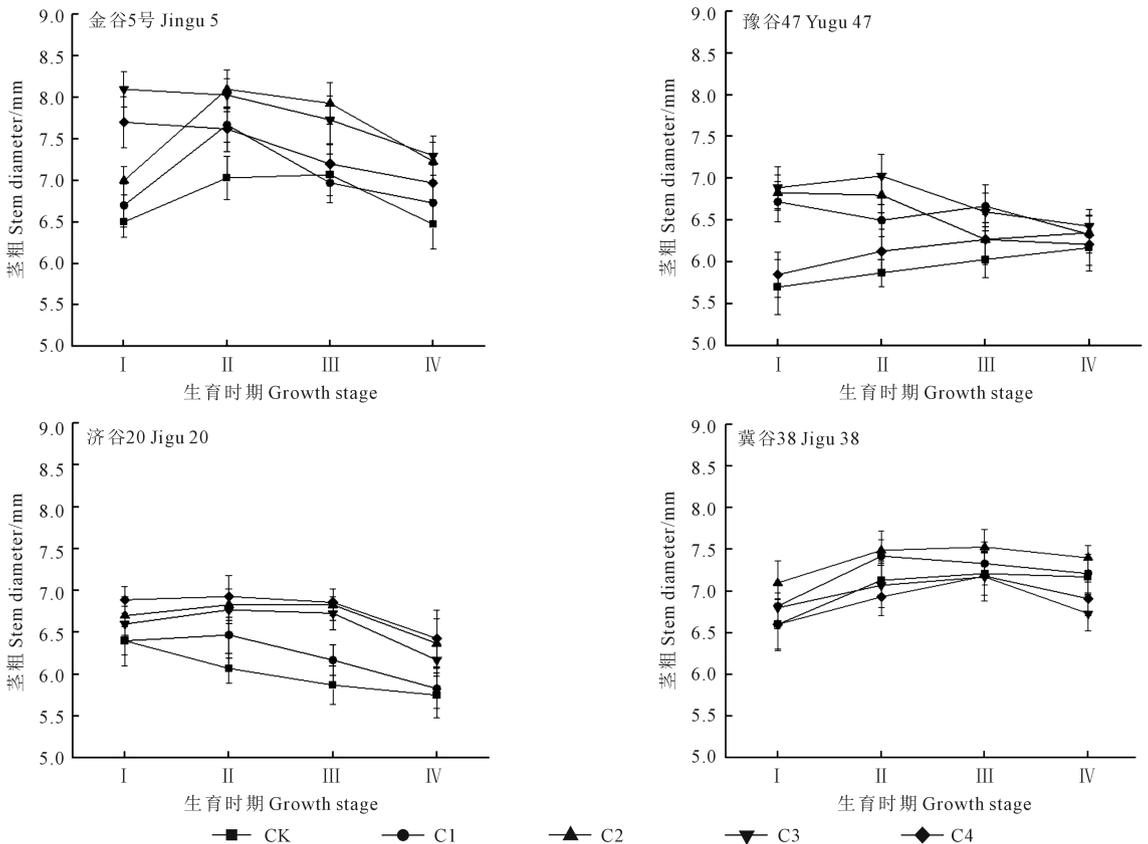


图 2 不同浓度钙处理对谷子茎粗的影响

Fig.2 Effects of different concentrations of calcium on stem diameter of millet

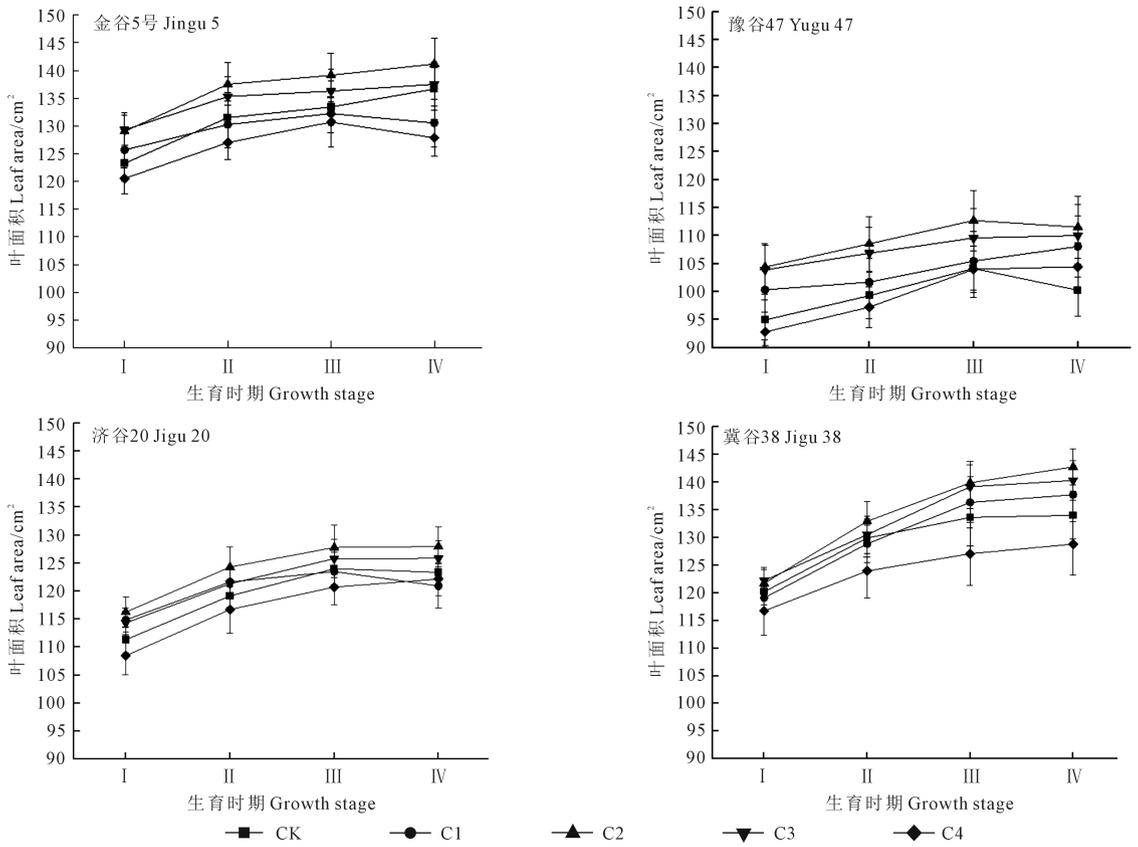


图 3 不同浓度钙处理对谷子叶面积的影响

Fig.3 Effects of different concentrations of calcium on leaf area of millet

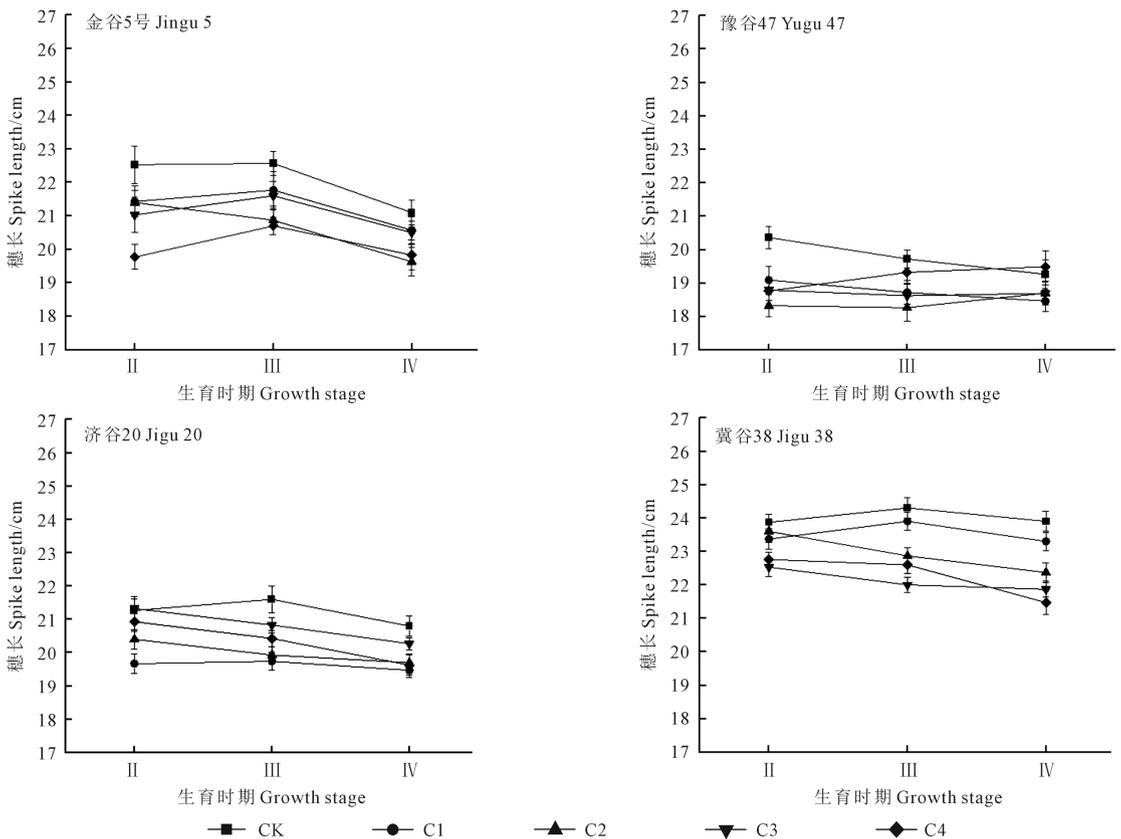


图 4 不同浓度钙处理对谷子穗长的影响

Fig.4 Effects of different concentrations of calcium on spike length of millet

2.1.5 不同浓度钙处理对谷子穗粗的影响 由图 5 可以看出,全生育期 4 个品种谷子的穗粗均在 C3 处理下达到最大值。C3 处理下,‘金谷 5 号’抽穗期、灌浆期和成熟期的穗粗较 CK 分别增加 3.30%、3.69%和 2.20%,‘豫谷 47’的穗粗较 CK 分别显著

增加 14.38%、9.24%和 16.48%,‘济谷 20’的穗粗较 CK 分别显著增加 12.61%、6.37%和 11.77%,‘冀谷 38’的穗粗较 CK 分别增加 3.48%、5.27%和 4.50%。由此可知,叶面喷施钙肥对‘豫谷 47’和‘济谷 20’穗粗的改良作用较好。

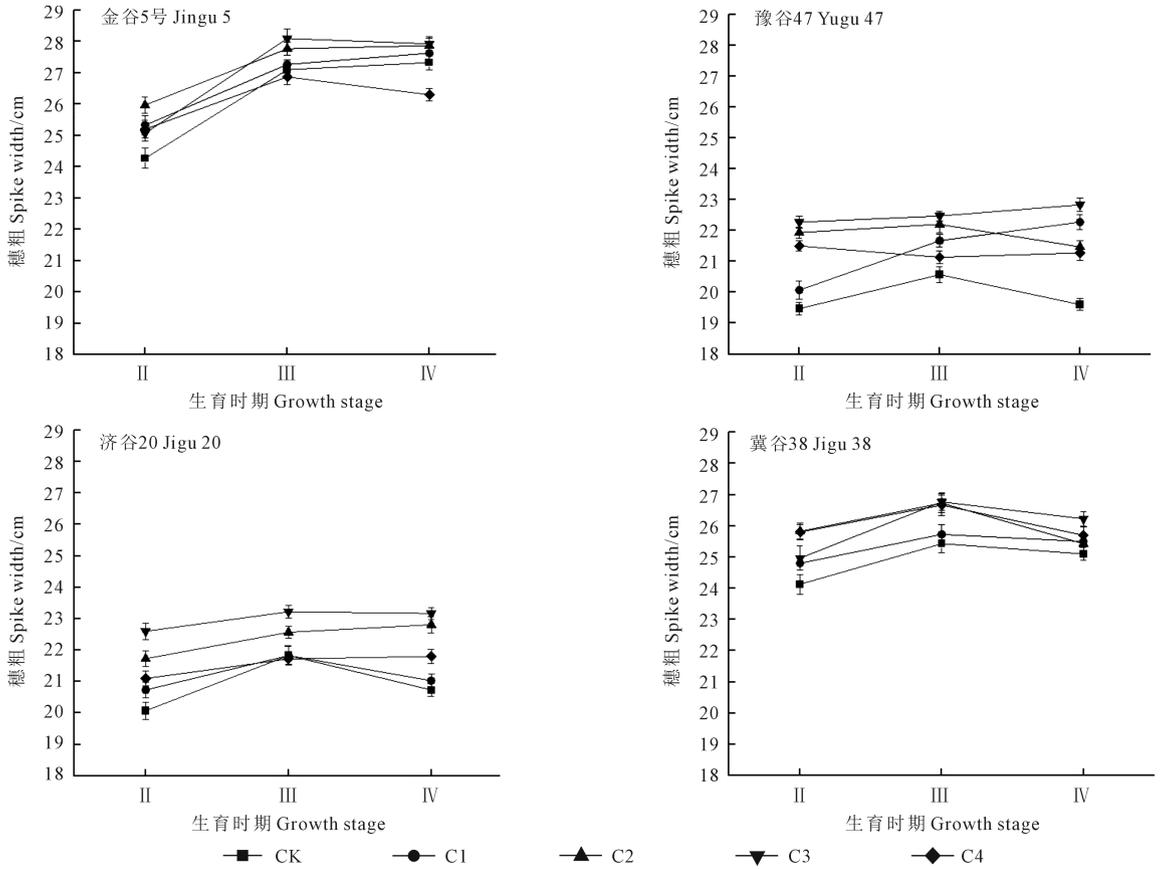
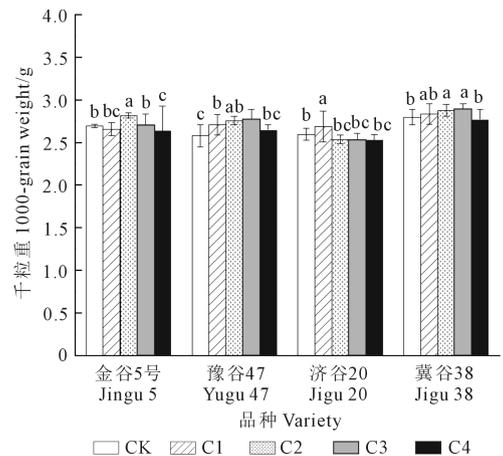


图 5 不同浓度钙处理对谷子穗粗的影响

Fig.5 Effects of different concentrations of calcium on spike width of millet

2.1.6 不同浓度钙处理对谷子千粒重的影响 由图 6 可知,0.1~0.2 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 浓度范围内,4 个谷子品种的千粒重均呈先升高后降低趋势。‘金谷 5 号’的千粒重在 C2 处理下最高,较 CK 增加 4.44%;‘豫谷 47’和‘冀谷 38’的千粒重均在 C3 处理下达到最大值,分别较 CK 增加 7.75%和 3.57%;‘济谷 20’的千粒重在 C1 处理下最大,较 CK 增加 3.46%。C4 处理下 4 个品种的千粒重均低于 CK,表明 0.05~0.15 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的浓度范围内,施用钙肥可提高谷子千粒重,且对高钙谷子千粒重的提高效果优于低钙谷子,而施钙浓度高于 0.15 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 则会对谷子千粒重产生不同程度的抑制作用,从而降低谷子产量。

综合不同浓度钙处理对谷子农艺性状的影响可知,0.10~0.15 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 是谷子钙肥喷施的最优浓度范围,可促进谷子的生长发育,浓度过高则会对谷子生长产生抑制作用。



注:不同小写字母表示相同品种下处理间差异显著 ($P < 0.05$)。下同。

Note: Different lowercase letters indicate significant difference among treatments of the same variety ($P < 0.05$). The same below.

图 6 不同浓度钙处理对谷子千粒重的影响

Fig.6 Effects of different concentrations of calcium on 1000-grain weight of millet

2.2 不同浓度钙处理对谷子品质性状的影响

由表1可知,4个品种谷子水分、碳水化合物、粗蛋白、粗脂肪、粗纤维、粗灰分含量均随施钙量的增加呈先增加后降低趋势。蛋白质含量是评价食物营养品质优劣的重要标准,粗纤维作为膳食纤维,能够改善人体胃肠道功能和血糖反应,而灰分含量能够体现作物中无机营养元素的含量^[17]。叶面喷施钙肥后,在适宜浓度下4个品种的谷子粗蛋白、粗脂肪、粗纤维和粗灰分含量均有不同程度的增加,较CK分别增加0.20%~5.00%、6.38%~16.56%、1.12%~6.67%和0%~5.68%。其中,施钙肥对高钙品种粗蛋白和粗脂肪含量的提升作用优

于低钙品种,尤其是‘金谷5号’和‘豫谷47’的粗脂肪含量较CK分别增加16.56%和13.77%;低钙品种的粗纤维和粗灰分含量的增加幅度显著高于高钙品种,尤其是‘济谷20’和‘冀谷38’的粗纤维含量较CK分别增加3.45%和6.67%。以上结果表明,叶面喷施钙肥对谷子品质的改善有一定作用。

由表1可知,4个谷子品种的各氨基酸组分含量一定程度上受外源钙的消极影响。叶面喷施外源钙后,4个品种的赖氨酸含量降幅为0%~3.70%,苯丙氨酸含量降幅为2.77%~4.55%,蛋氨酸含量降幅为2.77%~10.53%,亮氨酸含量降幅为6.06%~12.96%,色氨酸含量降幅为2.86%~7.69%,苏氨酸

表1 不同浓度钙处理对谷子品质性状的影响/%

Table 1 Effects of different calcium concentrations on quality traits of millet

品种 Variety	处理 Treatment	水分 MC	碳水化合物 CHO	粗蛋白 CP	粗脂肪 EE	粗纤维 CF	粗灰分 Ash	赖氨酸 Lys
金谷5号 Jingu 5	CK	14.33±0.56ab	73.29±1.49b	10.96±1.79a	1.63±0.13b	11.59±0.79a	3.55±0.41a	0.54±0.01a
	C1	14.39±1.05a	73.47±1.21ab	11.12±0.21a	1.89±0.39a	10.94±0.11b	3.24±0.20b	0.52±0.02b
	C2	13.59±0.43b	74.29±0.75b	9.69±0.55bc	1.90±0.23a	11.72±0.16a	3.26±0.01b	0.54±0.01a
	C3	13.58±0.37b	74.23±0.34b	10.26±0.46b	1.74±0.55ab	11.22±0.66ab	3.57±0.30a	0.52±0.01b
豫谷47 Yugu 47	C4	14.22±0.51ab	73.89±0.88a	9.92±0.75bc	1.83±0.20ab	10.96±0.07b	3.25±0.09b	0.53±0.01ab
	CK	14.05±0.79bc	73.18±1.17a	11.31±1.37ab	1.67±0.07c	12.04±0.72bc	3.74±0.33ab	0.55±0.01a
	C1	14.43±0.69ab	72.75±0.53ab	11.86±0.71a	1.69±0.21c	12.41±0.33a	3.87±0.18a	0.54±0.01a
	C2	14.21±0.41b	72.70±0.58b	11.69±0.27a	1.90±0.23a	12.03±0.53bc	3.77±0.12ab	0.55±0.02a
济谷20 Jigu 20	C3	14.76±0.35a	72.40±0.46b	11.65±0.50a	1.81±0.20b	12.15±0.39b	3.72±0.14ab	0.54±0.01a
	C4	14.37±0.49ab	72.98±0.26a	11.06±0.80b	1.86±0.06a	11.76±0.60c	3.60±0.29c	0.55±0.01a
	CK	13.95±0.30bc	73.19±0.22a	10.22±0.34a	2.35±0.23ab	10.43±0.10bc	3.14±0.14a	0.55±0.01ab
	C1	14.63±0.38a	72.78±0.56b	10.24±0.42a	2.50±0.07a	10.79±0.37a	3.08±0.15b	0.56±0.01a
冀谷38 Jigu38	C2	14.42±0.18ab	72.98±0.43ab	10.17±0.24ab	2.34±0.12ab	10.62±0.10ab	3.13±0.05a	0.55±0.01ab
	C3	14.18±0.29bc	73.34±0.50a	9.91±0.36b	2.31±0.09ab	10.66±0.18a	3.14±0.07a	0.55±0.00ab
	C4	14.34±0.55ab	73.01±0.70ab	10.14±0.15ab	2.41±0.21ab	10.63±0.13ab	3.12±0.13a	0.55±0.01ab
	CK	14.65±0.60b	72.53±0.30b	10.59±0.05ab	2.50±0.12a	10.64±0.32b	3.17±0.08ab	0.54±0.02a
冀谷38 Jigu38	C1	14.64±0.17b	73.26±0.47a	10.00±0.48b	2.24±0.25b	10.79±0.18b	3.20±0.11ab	0.53±0.01a
	C2	15.04±0.67a	72.43±0.66b	10.71±0.52ab	2.15±0.23bc	11.35±0.15a	3.35±0.16a	0.54±0.01a
	C3	14.72±0.51ab	72.75±0.01ab	10.45±0.45ab	2.28±0.14ab	10.86±0.39ab	3.25±0.07a	0.53±0.01a
	C4	14.76±0.11ab	72.57±0.53b	11.12±0.74a	2.12±0.25bc	10.84±0.26ab	3.32±0.15a	0.53±0.01a
品种 Variety	处理 Treatment	苯丙氨酸 Phe	蛋氨酸 Met	亮氨酸 Leu	色氨酸 Trp	苏氨酸 Thr	异亮氨酸 Ile	缬氨酸 Val
金谷5号 Jingu 5	CK	0.67±0.08a	0.38±0.02a	1.08±0.22a	0.35±0.04ab	0.39±0.05a	0.31±0.07a	0.37±0.06ab
	C1	0.64±0.02ab	0.34±0.02b	0.99±0.04ab	0.34±0.02b	0.37±0.01b	0.31±0.01a	0.38±0.02a
	C2	0.64±0.03ab	0.35±0.02b	0.94±0.06b	0.35±0.02ab	0.37±0.02b	0.29±0.01ab	0.37±0.02ab
	C3	0.66±0.03a	0.37±0.05a	1.02±0.09ab	0.36±0.03a	0.38±0.01ab	0.31±0.01a	0.38±0.01a
豫谷47 Yugu47	C4	0.63±0.03ab	0.35±0.03b	0.95±0.09b	0.34±0.01b	0.36±0.02b	0.29±0.02ab	0.37±0.02ab
	CK	0.72±0.07ab	0.38±0.04a	1.14±0.17ab	0.39±0.05a	0.41±0.04ab	0.35±0.04ab	0.40±0.04ab
	C1	0.73±0.02a	0.37±0.02ab	1.17±0.07a	0.37±0.02b	0.42±0.02a	0.36±0.03a	0.40±0.03ab
	C2	0.73±0.02a	0.37±0.02ab	1.16±0.02a	0.38±0.01ab	0.42±0.01a	0.36±0.02a	0.41±0.02a
济谷20 Jigu 20	C3	0.71±0.03b	0.36±0.02b	1.14±0.06ab	0.36±0.02b	0.41±0.01ab	0.35±0.01ab	0.40±0.01ab
	C4	0.70±0.06b	0.37±0.02ab	1.08±0.11b	0.37±0.04b	0.40±0.03b	0.33±0.04b	0.38±0.04b
	CK	0.66±0.02a	0.37±0.02a	0.98±0.05a	0.36±0.01a	0.37±0.01a	0.30±0.01a	0.37±0.01a
	C1	0.64±0.03b	0.34±0.01b	0.92±0.05b	0.34±0.02b	0.37±0.02a	0.30±0.02a	0.36±0.02a
冀谷38 Jigu38	C2	0.65±0.02ab	0.35±0.02ab	0.96±0.03ab	0.34±0.01b	0.37±0.01a	0.30±0.01a	0.36±0.01a
	C3	0.64±0.01b	0.35±0.02ab	0.94±0.03b	0.35±0.01ab	0.36±0.01a	0.29±0.01a	0.36±0.02a
	C4	0.65±0.01ab	0.35±0.01ab	0.95±0.02ab	0.35±0.02ab	0.37±0.00a	0.30±0.01a	0.36±0.01a
	CK	0.66±0.02ab	0.36±0.00ab	0.99±0.03ab	0.33±0.02a	0.38±0.01a	0.31±0.01ab	0.36±0.02a
冀谷38 Jigu38	C1	0.63±0.02b	0.35±0.02b	0.93±0.06b	0.32±0.02a	0.36±0.02ab	0.29±0.03b	0.33±0.03ab
	C2	0.67±0.02a	0.36±0.02ab	1.01±0.08ab	0.33±0.03a	0.38±0.02a	0.31±0.02ab	0.35±0.03ab
	C3	0.64±0.03b	0.35±0.01b	0.99±0.07ab	0.33±0.03a	0.37±0.02a	0.31±0.02ab	0.36±0.03a
	C4	0.68±0.04a	0.37±0.03a	1.07±0.09a	0.33±0.02a	0.38±0.02a	0.32±0.02a	0.36±0.02a

注:同列不同小写字母表示相同品种下处理间差异显著($P<0.05$)。

Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant differences among treatments of the same variety ($P<0.05$).

含量降幅为 2.44%~7.69%，异亮氨酸含量降幅为 3.33%~6.45%，缬氨酸含量降幅为 0%~8.33%。除‘金谷 5 号’的蛋氨酸、亮氨酸、苏氨酸和‘豫谷 47’的色氨酸含量与 CK 相比差异显著外，其余各氨基酸组分含量均与对照处理差异不显著。

2.3 不同浓度钙处理对谷子籽粒钙含量的影响

由图 7 可知，随钙肥喷施浓度的不断增加，4 个品种谷子的籽粒钙含量呈先升高后降低趋势，各处理均较 CK 有所增加。‘金谷 5 号’、‘豫谷 47’、‘济谷 20’的籽粒钙含量均在 C3 处理下最大，分别较 CK 增加 25.41%、29.18%、20.14%，‘冀谷 38’的钙含量在 C2 处理下最大，较 CK 增加 36.12%。与施钙肥对农艺性状及品质影响不同的是，4 个品种谷子在 C4 处理下籽粒钙含量也显著高于 CK，尤其低钙品种‘冀谷 38’籽粒钙含量较 CK 增加 22.92%。C2 和 C3 处理与对照间差异显著，表明叶面喷施适量钙肥可有效提高谷子籽粒钙含量。

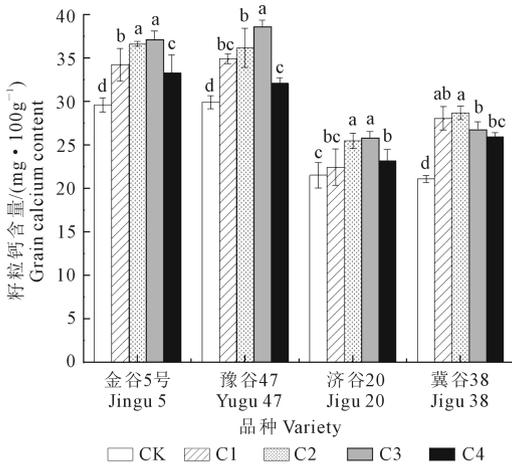


图 7 不同浓度钙处理对谷子籽粒钙含量的影响

Fig.7 Effects of different calcium concentrations on grain calcium content of millet

3 讨论

3.1 外源钙对谷子农艺性状的影响

钙肥是发展绿色生态农业的优质肥料，作为作物生长的重要微量元素肥之一，其不仅能为作物提供营养，还能充当土壤调节剂对土壤进行改良。赵晶^[17]在黑龙江探究不同浓度钙肥对‘张杂谷 3 号’的表型性状和产量的影响表明，CaO 喷施浓度为 0.7% 时，谷子的穗长、穗重、穗粒重、千粒重、出谷率和产量均达到最大值。周录英等^[18]在山东对花生进行田间富钙（施钙浓度为 450 kg · hm⁻²）试验发现，钙肥能够促进花生籽实营养物质的运输与转化，增加单株结实率和出仁率，从而达到增产目的。张慧敏^[19]研究表明，叶面喷施 0.1 mg · L⁻¹ CaCl₂ 能

有效促进常规品种‘晋谷 21’的生长发育和叶绿素的合成，从而提高谷子的产量；但喷施浓度过高时，谷子叶片发育和叶绿素合成受阻，叶片无法正常完成光合作用，导致果穗长势不良甚至减产。张钰琇^[20]研究发现，叶面喷施 1.0 mL · L⁻¹ 浓度的调环酸钙对谷子生长发育有显著促进作用，同时能增加产量，提高谷子茎秆的抗折力。本研究结果表明，除拔节期施用中、低剂量的外源钙对产量因子无显著影响及对谷子穗长有抑制作用外，其余生育时期各处理谷子的农艺形态指标均随施钙浓度的增加呈先升高后下降趋势，一定浓度（0.05~0.15 mg · L⁻¹）范围内，施钙能促进谷子生长发育；这与前人在马铃薯^[21]、水稻^[22]、花生^[23]等作物上的研究结论一致。本研究还发现，抽穗期施钙对谷子农艺性状的改善作用优于拔节和灌浆期。

3.2 外源钙对谷子品质性状的影响

有研究表明，果实发育期喷施钙肥能明显提高单果重和果实产量，减少病害发生，从而改善苹果品质^[24]。刘立军等^[22]研究结果显示，结实期钙亏缺会显著降低水稻的胶稠度和消减值，严重影响稻米的食味品质；同时会显著增加水稻的垩白米率、垩白度、直链淀粉含量和崩解指数，影响稻米的感官品质。陈会鲜等^[25]研究发现，适当浓度外源钙施用能增加可食用木薯产量、根长、根粗、淀粉和蛋白质含量，提高其耐储性。同样，叶面喷施钙肥能使大豆开花期叶片的可溶性糖和蛋白质含量增加^[26]。本研究也发现，谷子各项品质性状指标在施钙后均有所上升，说明外源钙处理可以改良谷子品质。谷子的粗蛋白、粗脂肪、粗纤维、粗灰分含量相比对照均有不同程度的增加。氨基酸作为构成蛋白质的基础物质，在作物生长发育及品质形成过程中发挥重要作用^[17]。但本研究中谷子多数氨基酸组分含量受到外源钙的消极影响，除‘金谷 5 号’的蛋氨酸、亮氨酸、苏氨酸和‘豫谷 47’的色氨酸含量与对照相比差异显著外，其余氨基酸组分含量与对照差异均未达到显著性水平，这一结果与赵晶^[17]的喷施钙肥能提高谷子蛋白质、赖氨酸、脂肪、粗灰分含量的结果有差异，究其原因可能是谷子品种来源地不同，也可能与谷子种植区域不同有关。

3.3 外源钙对谷子籽粒钙含量的影响

研究表明，土壤中的钙易被钾、钠、铵、镁拮抗，不易进入植物根内^[17]。此外，由于植物体内钙的长距离运输主要动力是蒸腾作用，即钙通过蒸腾水流移动，而幼嫩部分以及果实的蒸腾作用较小，对钙的竞争弱于叶片，因此容易发生缺钙现象^[27]。有研

究表明,叶面喷肥具有肥效快而直接的优势。因此本试验通过叶面喷施钙肥探究钙肥对谷子籽粒钙含量的影响,结果表明,叶面喷施钙肥可以有效提高谷子籽粒的钙含量,且钙含量随喷施钙肥浓度的增加而增加,这一结果与史晓龙等^[28]、李华东等^[29]和巩磊等^[30]关于喷钙提高作物钙含量的研究结果一致。

4 结 论

(1)叶面喷施外源钙对不同谷子品种的农艺性状均有积极影响(穗长除外),各指标值在0~0.2 mg·L⁻¹喷施浓度范围内呈先升高后降低趋势,且对高钙谷子表型农艺形状的改良效果更佳,但钙肥浓度过高会对谷子的生长产生抑制作用;而外源钙对谷子多数氨基酸组分含量有消极作用,且对低钙谷子品种的影响更为显著。

(2)叶面喷施外源钙能显著提高谷子籽粒钙含量,4个谷子品种籽粒钙含量均在外源钙浓度为0.10~0.15 mg·L⁻¹时达到最大值,较不施钙处理增加20.14%~36.12%。

综上,0.10~0.15 mg·L⁻¹是豫西地区谷子生产中外源钙最佳喷施浓度范围,能够有效提高谷子综合性状,增加其种植效益与商品价值。

参 考 文 献:

- [1] WEAVER C M, MARTIN B R, JACKSON G S, et al. Calcium-41: a technology for monitoring changes in bone mineral[J]. *Osteoporosis International*, 2017, 28(4): 1215-1223.
- [2] GOMEZ-CORONADO F, ALMEIDA S A, SANTAMARIA O, et al. Potential of advanced breeding lines of bread-making wheat to accumulate grain minerals(Ca,Fe,Mg and Zn)and low phytates under Mediterranean conditions[J]. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 2021, 205(3): 341-352.
- [3] 顾景范.《中国居民营养与慢性病状况报告(2015)》解读[J]. *营养学报*, 2016, 38(6): 525-529.
GU J F. Interpretation of the report on nutrition and chronic diseases of Chinese residents (2015) [J]. *Acta Nutrimenta Sinica*, 2016, 38(6): 525-529.
- [4] HEPLER P K. Calcium: a central regulator of plant growth and development[J]. *The Plant Cell*, 2005, 17(8): 2142-2155.
- [5] 张佳琳. 补钙增氧对苹果根际微生物和养分吸收及大树生产性能的影响[D]. 泰安: 山东农业大学, 2022.
ZHANG J L. Effects of calcium supplementation and oxygen increase on rhizosphere microorganisms and nutrient uptake and performance of large trees[D]. Tyan: Shandong Agricultural University, 2022.
- [6] 李瑜辉, 郭二虎, 范惠萍, 等. 山西谷子产业发展十年(2009-2019年)变迁[J]. *中国种业*, 2019, (11): 22-24.
LI Y H, GUO E H, FAN H P, et al. Changes of millet industry in Shanxi Province in the decade of development (2009-2019) [J]. *China Seed Industry*, 2019, (11): 22-24.
- [7] 刁现民, 程汝宏. 十五年区试数据分析展示谷子糜子育种现状[J]. *中国农业科学*, 2017, 50(23): 4469-4474.
DIAO X M, CHENG R H. Current breeding situation of foxtail millet and

- common millet in China as revealed by exploitation of 15 years regional adaptation test data [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2017, 50(23): 4469-4474.
- [8] 智慧, 牛振刚, 贾冠清, 等. 谷子干草饲用品质性状变异及相关性分析[J]. *作物学报*, 2012, 38(5): 800-807.
ZHI H, NIU Z G, JIA G Q, et al. Variation and correlation analysis of hay forage quality traits of foxtail millet [*Setaria italica* (L.) Beauv.] [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2012, 38(5): 800-807.
- [9] 李顺国, 刘斐, 刘猛, 等. 中国谷子产业和种业发展现状与未来展望[J]. *中国农业科学*, 2021, 54(3): 459-470.
LI S G, LIU F, LIU M, et al. Current status and future prospective of foxtail millet production and seed industry in China [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2021, 54(3): 459-470.
- [10] 郭美俊, 白亚青, 杨艳君, 等. 钼肥喷施对谷子生长生理及干物质积累分配的影响[J]. *江苏农业科学*, 2023, 51(9): 103-111.
GUO M J, BAI Y Q, YANG Y J, et al. Effects of molybdenum fertilizer spraying on grain growth physiology and dry matter accumulation and distribution [J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2023, 51(9): 103-111.
- [11] 穆婷婷, 杜慧玲, 张福耀, 等. 外源硒对谷子生理特性、硒含量及其产量和品质的影响[J]. *中国农业科学*, 2017, 50(1): 51-63.
MU T T, DU H L, ZHANG F Y, et al. Effects of exogenous selenium on the physiological activity, grain selenium content, yield and quality of foxtail millet [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2017, 50(1): 51-63.
- [12] 董健京. 山西沁州黄小米基地土壤养分现状及施肥建议[J]. *山西农业科学*, 2011, 39(5): 441-442, 470.
DONG J J. Present situation of soil nutrition in qin-zhou-huang millet base in Shanxi and fertilization suggestion [J]. *Journal of Shanxi Agricultural Sciences*, 2011, 39(5): 441-442, 470.
- [13] 陈向阳, 夏杜非, 李香宇, 等. 喷施铁肥对谷子不同器官铁元素分配的影响[J]. *山西农业科学*, 2022, 50(8): 1124-1130.
CHEN X Y, XIA D F, LI X Y, et al. Effect of foliar application of iron fertilizer on distribution of iron in different organs of millet [J]. *Journal of Shanxi Agricultural Sciences*, 2022, 50(8): 1124-1130.
- [14] 陆平. 谷子种质资源描述规范和数据标准[M]. 北京: 中国农业出版社, 2006.
LU P. Descriptors and data standard for foxtail millet [*Setaria italica* (L.) Beauv.] [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2006.
- [15] 田翔, 秦慧彬, 王君杰, 等. 近红外光谱法快速测定小米品质[J]. *粮食与油脂*, 2021, 34(10): 145-148.
TIAN X, QIN H B, WANG J J, et al. Rapid determination of millet quality by near infrared reflectance spectrometry [J]. *Cereals & Oils*, 2021, 34(10): 145-148.
- [16] 卫学青, 黄晓书, 李鹏坤, 等. 不同谷子品种中微量元素的 ICP-OES 法测定[J]. *贵州农业科学*, 2009, 37(6): 73-75.
WEI X Q, HUANG X S, LI P K, et al. Determination of trace elements of different millet varieties by ICP-OES [J]. *Guizhou Agricultural Sciences*, 2009, 37(6): 73-75.
- [17] 赵晶. 筛选高产优质谷子品种及喷施钙肥对米质影响的研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2014.
ZHAO J. Screening of high-yield and high-quality millet varieties and effects of calcium fertilizer on rice quality [D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2014.
- [18] 周录英, 李向东, 王丽丽. 氮、磷、钾、钙肥不同用量对花生光合性能及产量品质的影响[J]. *花生学报*, 2006, 35(2): 11-16.
ZHOU L Y, LI X D, WANG L L. Effects of different application rates of N, P, K, Ca fertilizer on photosynthesis properties, yield and kernel quality of peanut [J]. *Journal of Peanut Science*, 2006, 35(2): 11-16.
- [19] 张慧敏. 叶面喷施氯化钙对晋谷 21 号农艺性状和产量的影响[D]. 晋中: 山西农业大学, 2019.

- ZHANG H M. Effects of leaf spraying with calcium chloride on agronomic traits and yield of Jingu 21 [D]. Jinzhong: Shanxi Agricultural University, 2019.
- [20] 张钰琇. 调环酸钙对谷子株高和抗倒伏性的影响[D]. 晋中: 山西农业大学, 2022.
- ZHANG Y X. Effects of calcium cyclate on plant height and lodging resistance of millet [D]. Jinzhong: Shanxi Agricultural University, 2022.
- [21] 孙磊, 汤金融, 符强, 等. 外源钙对马铃薯产量和贮藏品质的影响[J]. 东北农业大学学报, 2023, 54(7): 1-13, 40.
- SUN L, TANG J R, FU Q, et al. Effects of exogenous calcium on potato yield and storage quality [J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2023, 54(7): 1-13, 40.
- [22] 刘立军, 常二华, 范苗苗, 等. 结实期钾、钙对水稻根系分泌物与稻米品质的影响[J]. 作物学报, 2011, 37(4): 661-669.
- LIU L J, CHANG E H, FAN M M, et al. Effects of potassium and calcium on root exudates and grain quality during grain filling [J]. Acta Agronomica Sinica, 2011, 37(4): 661-669.
- [23] 顾学花, 孙逢强, 高波, 等. 施钙对于旱胁迫下花生生理特性、产量和品质的影响[J]. 应用生态学报, 2015, 26(5): 1433-1439.
- GU X H, SUN L Q, GAO B, et al. Effects of calcium fertilizer application on peanut growth, physiological characteristics, yield and quality under drought stress [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015, 26(5): 1433-1439.
- [24] 周卫, 李书田, 林葆, 等. 喷钙对苹果果实生理特性的影响[J]. 土壤肥料, 2000, (6): 25-28.
- ZHOU W, LI S T, LIN B, et al. Effect of calcium spraying on physiological characteristics of apples [J]. Soils and Fertilizers, 2000, (6): 25-28.
- [25] 陈会鲜, 朱涵钰, 李恒锐, 等. 外源钙对食用木薯产量及其品质的影响研究[J]. 中国土壤与肥料, 2022, (7): 121-125.
- CHEN H X, ZHU H Y, LI H R, et al. Effects of exogenous calcium on the yield and quality of edible cassava [J]. Soils and Fertilizers Sciences in China, 2022, (7): 121-125.
- [26] GALERIANI T M, NEVES G O, SANTOS FERREIRA J H, et al. Calcium and boron fertilization improves soybean photosynthetic efficiency and grain yield [J]. Plants, 2022, 11(21): 2937.
- [27] WHITE P J, BROADLEY M R. Calcium in plants [J]. Annals of Botany, 2003, 92(4): 487-511.
- [28] 史晓龙, 张智猛, 戴良香, 等. 外源施钙对盐胁迫下花生营养元素吸收与分配的影响[J]. 应用生态学报, 2018, 29(10): 3302-3310.
- SHI X L, ZHANG Z M, DAI L X, et al. Effects of calcium fertilizer application on absorption and distribution of nutrients in peanut under salt stress [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2018, 29(10): 3302-3310.
- [29] 李华东, 白亭玉, 郑妍, 等. 叶施硝酸钙对芒果钾、钙、镁含量及品质的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2016, 44(3): 63-68.
- LI H D, BAI T Y, ZHENG Y, et al. Effects of spraying calcium nitrate on potassium, calcium and magnesium contents and quality of mango [J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2016, 44(3): 63-68.
- [30] 巩磊, 夏杜菲, 王文娇, 等. 光钙耦合对黄瓜植株生长、叶片叶绿素荧光特性和果实品质的影响[J]. 北方园艺, 2022, (5): 1-7.
- GONG L, XIA D F, WANG W J, et al. Effects of combined light and Ca on growth, leaf chlorophyll fluorescence characteristics and fruit quality in cucumber plant [J]. Northern Horticulture, 2022, (5): 1-7.
-
- (上接第 284 页)
- [27] 冯婧, 任月梅, 杨忠, 等. 晋北地区谷子适应性分析[J]. 安徽农学通报, 2020, 26(6): 59-60, 80.
- FENG J, REN Y M, YANG Z, et al. Analysis of millet adaptability in North Shanxi province [J]. Anhui Agricultural Science Bulletin, 2020, 26(6): 59-60, 80.
- [28] 李涛, 高志军, 杨文耀. 37 份谷子农艺性状多样性与相关性分析[J]. 安徽农学通报, 2021, 27(11): 96-100.
- LI T, GAO Z J, YANG W Y. Diversity and correlation analysis of 37 millet agronomic traits [J]. Anhui Agricultural Science Bulletin, 2021, 27(11): 96-100.
- [29] 陈家敬, 鞠乐, 强学杰, 等. 南阳地区 5 个谷子品种主要农艺性状比较分析[J]. 大麦与谷类科学, 2018, 35(1): 30-32.
- CHEN J J, JU L, QIANG X J, et al. A comparative analysis of the main agronomic traits of five millet varieties grown in Nanyang city [J]. Barley and Cereal Sciences, 2018, 35(1): 30-32.
- [30] 程汝宏, 刘正理. 谷子育种中几个主要性状选育方法的探讨[J]. 华北农学报, 2003, 18(增刊 1): 145-149.
- CHENG R H, LIU Z L. Study on selection methods of main characters in millet breeding [J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2003, 18(S1): 145-149.
- [31] 要燕杰, 高翔, 吴丹, 等. 小麦农艺性状与品质特性的多元分析与评价[J]. 植物遗传资源学报, 2014, 15(1): 38-47.
- YAO Y J, GAO X, WU D, et al. Multivariate analysis and evaluation of wheat agronomic traits and quality characteristics [J]. Journal of Plant Genetic Resources, 2014, 15(1): 38-47.
- [32] 许兰杰, 侯起岭, 侯春雨, 等. 不同抗蚜性小麦品种(系)的遗传多样性 SSR 标记分析[J]. 华北农学报, 2014, (5): 119-124.
- XU L J, HOU Q L, HOU C Y, et al. Genetic diversity analysis of wheat varieties with different aphids-resistant by simple sequence repeat (SSR) markers [J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2014, (5): 119-124.
- [33] 薛亚鹏, 辛旭霞, 王若楠, 等. 国内外谷子资源农艺、品质性状差异分析以及遗传多样性研究[J]. 作物学报, 2024, 50(10): 2468-2482.
- XUE Y P, XIN X X, WANG R N, et al. Analysis of agronomic and quality traits differences and genetic diversity of millet resources at home and abroad [J]. Acta Agronomica Sinica, 2024, 50(10): 2468-2482.
- [34] 饶庆琳, 姜敏, 刘选轶, 等. 贵州 296 份花生种质资源遗传多样性及综合评价[J]. 植物遗传资源学报, 2024, 25(3): 373-385.
- RAO Q L, JIANG M, LIU X Y, et al. Genetic diversity and comprehensive evaluation of 296 peanuts germplasm resources in Guizhou [J]. Journal of Plant Genetic Resources, 2024, 25(3): 373-385.
- [35] 李国瑞, 李朝芬, 吴春, 等. 西南地区小麦品种萌发期抗旱性分析[J]. 干旱地区农业研究, 2015, 33(4): 212-219.
- LI G R, LI C S, WU C, et al. Analysis on drought resistance of wheat varieties at germination stage in Southwest China [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2015, 33(4): 212-219.
- [36] 张士龙, 贺正华, 黄益勤, 等. 主成分分析和隶属函数法对含非洲种质青贮玉米的评价[J]. 湖北农业科学, 2016, 55(15): 3824-3828, 3837.
- ZHANG S L, HE Z H, HUANG Y Q, et al. Evaluation of African germplasm silage maize by principal component analysis and membership function method [J]. Hubei Agricultural Sciences, 2016, 55(15): 3824-3828, 3837.