

李东霞,符海泉,杨伟波,等. 不同钙处理对2份海南花生种质资源农艺性状和防御酶系统的影响[J]. 江苏农业科学,2019,47(10):117-121.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2019.10.025

# 不同钙处理对2份海南花生种质资源农艺性状和防御酶系统的影响

李东霞<sup>1,2,3</sup>, 符海泉<sup>1,2,3</sup>, 杨伟波<sup>1,2,3</sup>, 徐中亮<sup>1,2</sup>

(1. 中国热带农业科学院椰子研究所,海南文昌 571339; 2. 海南省热带油料作物生物学重点实验室,海南文昌 571339;  
3. 国家花生工程技术研究中心海南花生科研工作站,海南文昌 571339)

**摘要:**研究施钙和未施钙处理对2份海南花生种质资源 WC1 和 WC9 的农艺性状和活性氧防御酶系统的影响,初步解析花生表现耐低钙的原因,为今后选育适宜海南种植的耐低钙花生新品种奠定基础。以在海南收集的花生种质资源为材料,采用土壤盆栽的培养方法,设置施钙和未施钙2个处理,研究2份海南花生种质资源的株体性状、生产性能性状、果实不同发育时期活性氧防御酶系统的差异性。结果表明,未施钙处理下,WC9 的主茎高、总分枝数、结果枝数显著大于施钙处理下的主茎高、总分枝数、结果枝数。在未施钙处理下,WC9 的干果质量、饱果干质量、百果质量和出仁率均大于 WC1。在未施钙处理下,幼果2期 WC1 样品中 CAT、SOD 活性显著高于 WC9,WC9 样品中的 POD 活性显著高于 WC1。可见2个钙处理对 WC1 和 WC9 的株体性状、生产性能性状和活性氧防御酶系统影响不同,在未施钙处理下,WC1 的株体性状表现优于 WC9,WC9 的生产性能性状表现优于 WC1,相对来说 WC1 具有较强的 SOD、CAT 活性,而 WC9 具有较强的 POD 活性,分析认为 WC1 和 WC9 在应对未施钙处理所产生的反应机制可能会不同。

**关键词:**花生;钙;农艺性状;防御酶系统

**中图分类号:** S311;S565.201 **文献标志码:** A **文章编号:**1002-1302(2019)10-0117-05

花生 (*Arachis hypogaea* L.) 是我国主要的油料作物和经济作物之一,也是海南省的重要油料作物<sup>[1]</sup>。花生作为豆科一年生草本植物,是调整农业种植业结构的优势作物<sup>[2]</sup>,周期短,高度低,适宜农作物及经济林间套种。海南省一直有种植花生的传统习惯,近几年来由于海南省的花生相对于岛外上市早,鲜花生价格较高,大大提高了海南省东方市村民种植的积极性。海南当地的花生种质资源创新利用还处于起步阶段,种植的花生多为从岛外引进的优良品种,以及农户自己留存的农家种。海南岛是一个典型的热带土壤分布区,成土过程中钙淋失严重,土壤交换性钙含量低,并且盐基高度不饱和,肥料施入后易遭损失<sup>[3-4]</sup>,而花生是喜钙作物,对缺钙非常敏感<sup>[5]</sup>,因土壤缺钙造成花生大幅减产降质的问题尤为突出。因此在生产成本降低和环境保护双重压力下筛选耐低钙花生品种对提高海南花生产量至关重要,而开展不同钙处理对海南花生种质资源农艺性状和生理特性的影响获得的研究结果能够为选育海南耐低钙花生新品种奠定基础。

钙是植物生长发育过程必需的营养元素之一,参与植物从种子萌发、生长分化、形态建成到开花结果的全过程<sup>[6-7]</sup>。钙元素是花生生长需求量较大的营养元素之一,已有一些研

究分别通过水培、沙培试验发现,缺钙时花生植株矮小,主茎细弱,分枝数、结果数、饱果数少、果小且不饱满,烂果和空果增多,根系影响尤甚,表现为根系短小,新生根系少,呈黑褐色;而且不同的花生品种间主茎高、干物质质量、单株果数、主根长等的降低幅度具有明显差异<sup>[8-13]</sup>。Caires 等研究认为,大田花生的根密度与土壤钙含量具有显著的相关性<sup>[14]</sup>。大田土壤轻度缺钙时,花生的总花数减少,荚果发育减退,造成烂果、空果、饱果增多,种仁不饱满<sup>[15]</sup>。可见钙素对维持花生正常的生长发育过程,保证花生高产优质栽培具有不可替代的作用。缺钙会破坏花生的抗氧化保护体系,张海平等通过水培方法研究发现,泉花10号高钙处理下比低钙处理下的过氧化氢酶(CAT)活性、过氧化物酶(POD)活性高,而脂质过氧化产物丙二醛(MDA)含量、O<sub>2</sub><sup>-</sup>产生速率、电导率值则低<sup>[8]</sup>。而增施钙肥会增加叶片SOD、POD、CAT酶活性和可溶性蛋白的含量<sup>[16]</sup>。

海南土壤交换性钙含量低,因缺钙导致花生产量下降的问题严重,而海南花生种质资源丰富,适应性好,但是缺少深入挖掘海南本地的花生种质资源特性的研究,更未见有针对性地研究海南花生种质资源耐土壤低钙胁迫的相关研究报告。因此,笔者考虑以海南花生种质资源为主要研究材料,以海南低钙土壤为培养条件,在前期耐低钙花生种质资源筛选的基础上,重点对2份表现出潜在耐低钙花生种质资源进行研究。

以前期筛选出的2份海南花生种质资源为试验材料,分析不同钙处理对其株体性状、生产性能性状、活性氧防御酶系统的差异性,为进一步选育适宜海南种植的耐低钙花生种质

收稿日期:2018-02-06

基金项目:海南省自然科学基金(编号:20163144,317285);海南省重点研发计划(编号:ZDYF2018100);中国热带农业科学院基本科研业务费专项资金(编号:1630022016018)。

作者简介:李东霞(1987—),女,内蒙古乌兰察布人,硕士,助理研究员,主要从事热带经济作物资源评价与营养研究。E-mail:lixia.311@163.com。

资源提供理论依据,以及初步解析低钙环境会造成花生减产降质的原因。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

供试材料为2份在海南省文昌收集的花生种质资源WC1和WC9,株型为直立型,WC1种皮颜色为红色,WC9种皮颜色为粉红色。

### 1.2 试验方法

盆栽试验在海南省文昌市中国热带农业科学院椰子研究所试验基地进行,每盆播种2株,供试土壤采自中国热带农业科学院椰子研究所,土壤类型为红壤沙土,具体理化性质为有机质含量为0.67%、碱解氮含量为35.3 mg/kg、有效磷含量为4.2 mg/kg、速效钾含量为38.7 mg/kg、土壤交换性钙含量为73.4 mg/kg、土壤交换性镁含量为7.5 mg/kg, pH值为4.63。试验设置2个钙水平:未施钙肥和施钙肥( $\text{CaCO}_3$ 含量为1 g/kg)2个处理,肥底为每1 kg土施 $\text{NH}_4\text{SO}_4$  1.05 g、 $\text{KH}_2\text{PO}_4$  0.288 g、 $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  0.252 g、 $\text{KCl}$  0.16 g,开花下针前每1 kg土浇灌Anon微量营养液1 mL,其中施钙肥处理追施钙肥( $\text{CaCO}_3$ 含量为0.28 g/kg),所用的肥料均为化学纯试剂。

在花生饱果期中期的时候,将全株收获的花生果在自来水下清洗干净,按照花生果的成熟度(图1),将花生果划分为3个发育时期,分别命名为幼果1期、幼果2期、幼果3期,分别取样,测定活性氧防御酶系统。幼果1期,也就是花生饱果初期,第1个发育时期,由于种仁很小,连同果皮称取1 g,后面2个发育时期只称取果仁1 g,3次重复,保存于 $-80\text{ }^\circ\text{C}$ 超低温冰箱备用。酶活性测定均采用购于南京建成生物工程研究所的测试盒,综合参考酶活性测试盒说明书,按照组织质量(g):体积(mL)=1:9的比例加入9倍体积的磷酸缓冲溶液(pH值=7.2),冰水浴条件机械匀浆,10 000 r/min,4  $^\circ\text{C}$ 离心10 min,取上清液用于各项酶活性的测定。花生样品蛋白质含量的测定方法参考蛋白定量测试盒说明书(货号:A045-2考马斯亮蓝法),花生样品中 $\text{H}_2\text{O}_2$ 含量的测定方法参考过氧化氢( $\text{H}_2\text{O}_2$ )测试盒说明书(货号:A064-1钼酸显色法),花生样品中过氧化氢酶(CAT)活性测定方法参考过

氧化氢酶(CAT)测试盒说明书(货号:A007-1可见光法),花生样品中谷胱甘肽还原酶(GR)活性的测试方法参考谷胱甘肽还原酶(GR)测试盒说明书(货号:A062 50T/48样),花生样品中过氧化物酶(POD)活性的测试方法参考过氧化物酶(POD)测试盒说明书(货号:A084-3测植物),花生样品中总超氧化物歧化酶(T-SOD)活性的测试方法参考总超氧化物歧化酶(T-SOD)测试盒说明书(货号:A001-1羟胺法)。

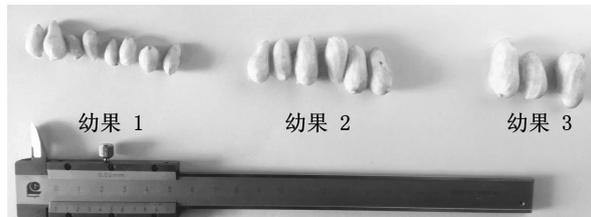


图1 花生果实的不同发育时期

2017年3月上旬播种,6月下旬收获。花生饱果期末期全株收获,收获后按照《中国花生品种及其系谱》附录一“花生种质特征术语解释及观察记载标准”说明考察主茎高、侧枝长、总分枝数、结果枝数、单株饱果数、单株秕果数、芽果数、烂果数、百果质量、出仁率。每盆干果质量和每盆饱果干质量的测定需先在烘箱中烘干后再用天平称质量考察。

采用Microsoft Excel软件进行数据的整理与分析,方差分析和相关性分析采用SAS 9.1统计软件进行。

## 2 结果与分析

### 2.1 2个钙肥处理对2份海南花生种质资源主要株体性状的影响

从表1可以看出,2个钙处理对2份海南花生种质资源株体性状的影响不同,在未施钙处理下,未施钙的减少率和减少量为负值或零,主茎高、侧枝长、结果枝数均有所增加,WC1的总分枝数没有增加,而WC9的总分枝数有所增加。WC1在2个钙处理下,花生的株体性状指标没有显著性差异;而未施钙处理下WC9的主茎高、总分枝数、结果枝数显著大于施钙处理下的主茎高、总分枝数、结果枝数。

表1 不同钙处理对2份海南花生种质资源株体性状的影响

处理	材料	主茎高 (cm)	侧枝长 (cm)	总分枝数 (个)	结果枝数 (个)
施钙	WC1	79.83 ± 3.33a	92.33 ± 4.19ab	5.00 ± 0.00ab	4.68 ± 0.58a
未施钙	WC1	96.92 ± 19.17a	100.00 ± 21.02a	5.00 ± 0.76ab	4.83 ± 0.29a
施钙	WC9	52.83 ± 6.29b	65.17 ± 6.71b	4.33 ± 0.50b	3.83 ± 0.58b
未施钙	WC9	81.92 ± 18.13a	97.67 ± 28.92ab	5.50 ± 0.50a	5.00 ± 0.00a
未施钙减少量	WC1	-17.09	-7.67	0	-0.15
未施钙减少量	WC9	-29.09	-32.50	-1.17	-1.17
未施钙减少率(%)	WC1	-21.41	-8.31	0	-3.21
未施钙减少率(%)	WC9	-55.06	-49.87	-27.02	-30.55

注:同一材料不同处理数据后不同小写字母表示在0.05水平上差异显著。表2同。

### 2.2 2个钙肥处理对2份海南花生种质资源主要生产性能性状的影响

从表2可以看出,2个钙处理对2份海南花生种质资源

生产性能性状的影响不同,相对于施钙处理,未施钙处理下,2份海南花生种质资源的干果质量、饱果干质量、单株饱果数、百果质量、出仁率均减少;秕果数和烂果数均增加;WC1的芽

果数减少,WC9的芽果数增加。未施钙处理下,WC1的干果质量、饱果干质量显著小于施钙处理,WC9的干果质量、饱果干质量小于施钙处理,但是没有达到显著水平。在未施钙处理下,WC9的干果质量、饱果干质量、百果质量和出仁率均大于WC1。相对于施钙处理,未施钙处理下,WC1和WC9的含油量都有所减少,减少量分别为5.84%和1.61%,但是均未达到显著水平。

表2 2个钙处理对2份海南花生种质资源主要生产性能性状的影响

处理	材料	干果质量 (g/盆)	饱果干质量 (g/盆)	单株饱果数 (个)	秕果数 (个)	芽果数 (个)	烂果数 (个)	百果质量 (g)	出仁率 (%)	含油量 (%)
施钙	WC1	15.70 ± 6.75a	12.90 ± 6.17a	6.83 ± 2.84	3.33 ± 2.02	0.33 ± 0.29	1.17 ± 1.26ab	103.59	66.55	49.94 ± 0.03
未施钙	WC1	7.60 ± 2.02b	3.72 ± 2.40b	6.33 ± 2.02	13.17 ± 4.25	0.00 ± 0.00	2.17 ± 1.04ab	60.52	45.21	44.10 ± 0.00
施钙	WC9	12.79 ± 3.59ab	11.58 ± 3.14a	7.50 ± 2.50	4.00 ± 1.00	0.00 ± 0.00	0.17 ± 0.29b	102.21	72.37	48.19 ± 0.06
未施钙	WC9	12.57 ± 2.94ab	6.72 ± 3.03ab	5.83 ± 2.93	14.67 ± 12.22	0.67 ± 1.15	3.50 ± 2.29a	89.09	56.06	46.58 ± 0.04
未施钙减少量	WC1	8.10	9.18	0.50	-9.84	0.33	-1.00	43.07	21.34	5.84
未施钙减少量	WC9	0.22	4.86	1.67	-0.67	-0.67	-3.33	13.12	16.31	1.61
未施钙减少率(%)	WC1	51.59	71.16	7.32	-295.50	100.00	-85.47	41.58	32.07	11.69
未施钙减少率(%)	WC9	1.72	41.97	22.27	-16.75		-19.59	12.84	22.58	3.34

表3 2个钙处理下2份海南花生种质资源主要农艺性状的相关性分析

性状	相关系数											
	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>4</sub>	X <sub>5</sub>	X <sub>6</sub>	X <sub>7</sub>	X <sub>8</sub>	X <sub>9</sub>	X <sub>10</sub>	X <sub>11</sub>	X <sub>12</sub>
X <sub>1</sub>	1.000 00											
X <sub>2</sub>	0.958 32 *	1.000 00										
X <sub>3</sub>	0.711 34	0.875 34	1.000 00									
X <sub>4</sub>	0.888 64	0.981 13 *	0.952 27 *	1.000 00								
X <sub>5</sub>	-0.508 28	-0.307 45	-0.044 70	-0.207 00	1.000 00							
X <sub>6</sub>	-0.709 79	-0.615 00	-0.474 00	-0.573 00	0.896 40	1.000 00						
X <sub>7</sub>	-0.772 79	-0.881 15	-0.957 70 *	-0.937 00	0.319 20	0.703 34	1.000 00					
X <sub>8</sub>	0.660 00	0.679 16	0.716 47	0.711 20	-0.664 00	-0.919 9	-0.884 40	1.000 00				
X <sub>9</sub>	0.190 28	0.460 70	0.818 15	0.619 20	0.445 20	0.007 17	-0.674 70	0.372 90	1.000 00			
X <sub>10</sub>	0.683 33	0.809 31	0.943 75	0.886 20	-0.296 00	-0.688 6	-0.990 80 **	0.899 10	0.716 00	1.000 00		
X <sub>11</sub>	-0.767 42	-0.600 64	-0.306 70	-0.498 00	0.942 20	0.941 67	0.534 87	-0.748 00	0.262 00	-0.482 00	1.000 00	
X <sub>12</sub>	-0.889 13	-0.797 20	-0.579 50	-0.732 00	0.817 10	0.951 76 *	0.759 11	-0.860 00	-0.030 00	-0.708 00	0.953 28 *	1.000 00

注: \*表示显著相关( $P < 0.05$ ); \*\*表示极显著相关( $P < 0.01$ )。X<sub>1</sub>表示主茎高, X<sub>2</sub>表示侧枝长, X<sub>3</sub>表示总分枝数, X<sub>4</sub>表示结果枝数, X<sub>5</sub>表示每盆干果质量, X<sub>6</sub>表示每盆饱果干质量, X<sub>7</sub>表示单株饱果数, X<sub>8</sub>表示秕果数, X<sub>9</sub>表示芽果数, X<sub>10</sub>表示烂果数, X<sub>11</sub>表示百果质量, X<sub>12</sub>表示出仁率。

#### 2.4 2个钙处理对2份海南花生种质资源活性氧防御酶系统的影响

在2个钙处理下,随着果实发育的逐渐成熟,相对于幼果1期,其他2个时期下WC1和WC9籽仁中蛋白质含量都表现出急剧上升,WC1和WC9果实发育到幼果2期和幼果3期下籽仁中蛋白质含量都显著大于幼果1期。施钙处理下,幼果1期WC9样品中的蛋白质含量显著低于WC1,幼果2期WC9样品中的蛋白质含量显著高于WC1;未施钙处理下,果实发育的3个时期中,WC1和WC9的样品中的蛋白质含量没有显著性差异(图2)。在2个钙处理下,幼果1期WC1和WC9样品中H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>的含量显著高于幼果2期和幼果3期;在施钙处理下,幼果1期WC9样品中H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>的含量显著高于WC1,其余条件下,WC1和WC9样品中H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>的含量没有显著性差异(图3)。在2个钙处理下,随着果实发育的逐渐成熟,WC1和WC9样品中CAT活性逐渐增强,在施钙处理下,幼果2期和幼果3期下WC9样品中CAT活性显著低于WC1;在未施钙处理下,WC9样品中CAT活性低于WC1,但是只有在幼果

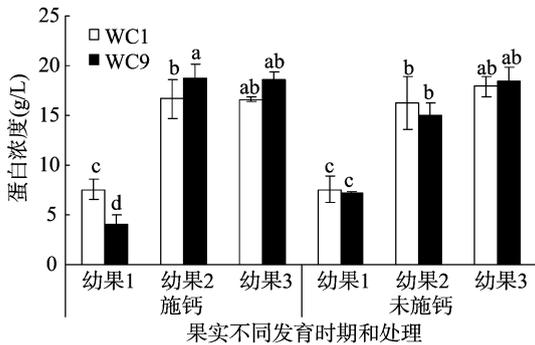
#### 2.3 供试海南花生种质资源在2个钙处理下主要农艺性状的相关性

不同钙肥处理下,2份海南花生种质资源主要农艺性状见表3,主茎高与侧枝长,侧枝长与结果枝数、总分枝数与结果枝数、饱果干质量与出仁率、百果质量与出仁率呈显著相关。总分枝数与单株饱果数呈显著负相关,单株饱果数与烂果数呈极显著负相关。

2期时才达到显著水平(图4)。在施钙处理下,幼果1期WC9果实中GR活性显著大于WC1。幼果1期WC9样品中GR活性显著高于其他2个时期,WC1样品中GR活性均没有显著性差异。在未施钙处理下,WC1幼果1期样品中GR活性显著高于其他2个时期(图5)。在施钙处理下,幼果1期WC9样品中SOD活性显著高于WC1,幼果2期和幼果3期WC1和WC9这2个样品中SOD活性没有显著性差异;在未施钙处理下,幼果2期WC1样品中SOD活性显著高于WC9,幼果1期和幼果2期没有显著性差异(图6)。在2个钙处理下,WC1和WC9样品中POD活性随着果实发育的成熟逐渐呈下降趋势,在施钙处理下,幼果1期WC9样品中的POD活性显著高于WC1,在未施钙处理下,WC1样品中POD活性显著高于WC9,然而幼果2期WC9样品中POD活性显著高于WC1(图7)。

### 3 讨论与结论

花生是喜钙作物,钙素对维持花生正常的生长发育过程、



柱上不同小写字母表示不同发育时期和处理间差异显著 ( $P>0.05$ )。下图同

图2 不同钙水平下花生果实不同发育时期蛋白质含量

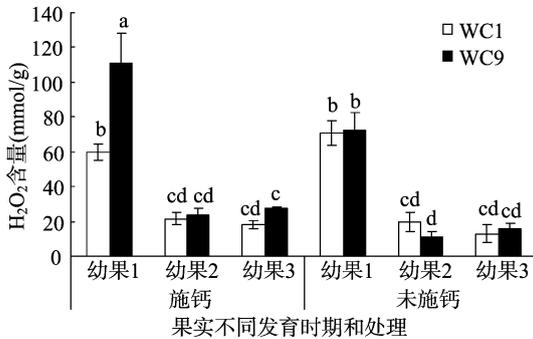


图3 不同钙水平下花生果实不同发育时期过氧化氢含量

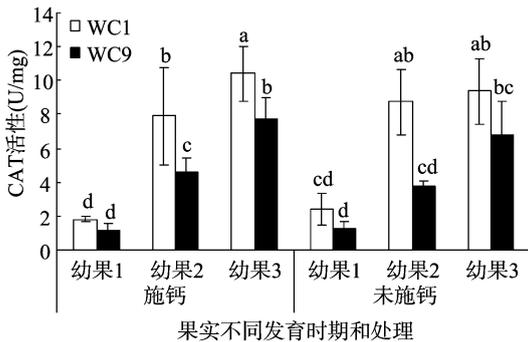


图4 不同钙水平下花生果实不同发育时期 CAT 活性

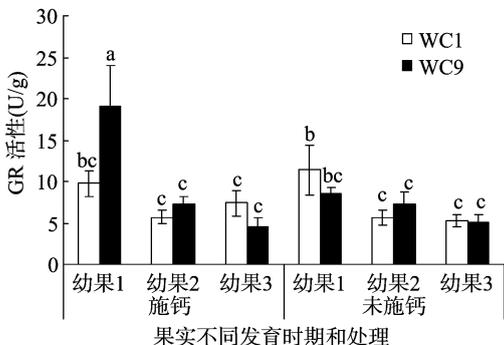


图5 不同钙水平下花生果实不同发育时期 GR 活性

保证花生高产优质栽培具有不可替代的作用。张君诚等通过在平潭典型缺钙大田种植泉花 10 号研究发现,因土壤钙含量不足使花生荚果空秕和种子发育受阻而导致产量降低的现象很明显<sup>[17]</sup>;随后采用套盆分层组合水培方法,分析泉花 10 号在不同钙水平处理下花生相关生物学性状和结果情况,发现

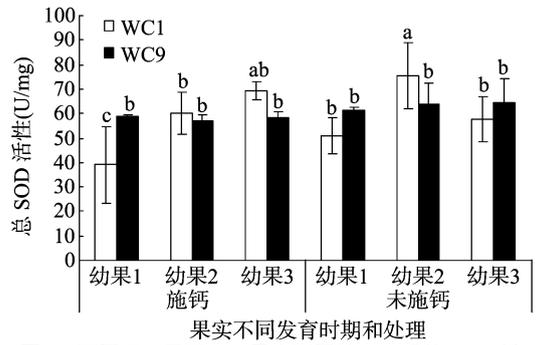


图6 不同钙水平下花生果实不同发育时期总 SOD 活性

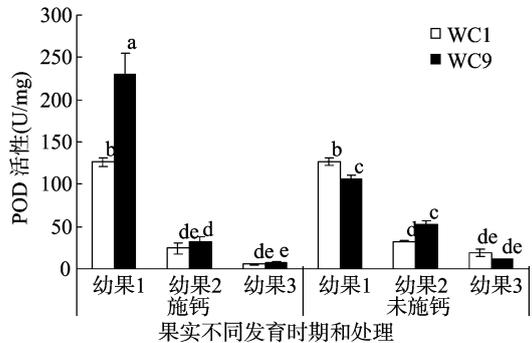


图7 不同钙水平下花生果实不同发育时期 POD 活性

高低钙水平下,植物营养体差异明显,饱果率差异显著。套盆分层组合水培方法虽然总体结果基本正常,但仍然存在结荚总数比同浓度的大田少,部分荚果异常现象<sup>[18]</sup>。李忠等通过砂培方法,在高钙(钙含量 200 mg/L)和低钙(钙含量 40 mg/L)处理条件下对 12 个不同基因型花生品种进行研究,发现不同花生品种耐低钙能力不同,认为花生荚果产量、植株地上部干物质量和根干质量可以作为鉴别砂培条件下花生品种耐低钙能力的有效指标<sup>[10]</sup>。杨运萍采用田间试验对广东省 4 个主栽的花生品种在 Ca<sub>0</sub>、Ca<sub>1</sub>、Ca<sub>2</sub> 和 Ca<sub>3</sub> 4 个钙水平下花生植株地上部含钙量和钙积累量、种子含钙量、生理性状、农艺性状和产量构成因素的差异并进行研究,发现不同花生品种对低钙的适应性具有差异性,百仁质量对 4 个花生品种钙效率的影响最大<sup>[19]</sup>。赵秀芬等采用砂培桶栽的方式对 10 个主栽花生品种的研究发现,它们荚果产量和籽粒产量均表现为正常供钙显著高于低钙胁迫,而植株生物量恰好相反,表现为低钙处理显著高于正常供钙处理<sup>[20]</sup>。本研究通过土壤盆栽的方法研究发现,2 个钙处理对 WC1 和 WC9 的株体性状影响不同,WC9 的主茎高、总分枝数、结果枝数表现为未施钙处理显著大于施钙处理。2 个钙处理下 2 份海南花生种质资源的生产性能性状差异较大,相对于施钙处理,未施钙处理下,2 份海南花生种质资源中有助于提高生产性能的干果质量、饱果干质量、单株饱果数、百果质量、出仁率均减少;而有助于降低生产性的秕果数和烂果数均增加;但是 WC1 和 WC9 在施钙和未施钙处理下表现仍不相同。在未施钙处理下,WC9 的干果质量、饱果干质量、百果质量和出仁率均大于 WC1。花生施用钙肥可以提高籽仁脂肪含量<sup>[16]</sup>,本研究发现,相对于未施钙肥,在施钙肥处理下,2 份海南花生种质资源

源的含油量均有所增加。

唐兆秀等采用凯氏定氮法研究发现,花生籽仁蛋白质含量随生育进程,在开花 40~50 d 急剧增加,后平缓上升。花生蛋白质合成积累一直伴随花生籽仁发育的全过程。南方珍珠豆型不同基因型花生可溶性蛋白质相对含量存在差异。蛋白质合成和积累速度不同,可溶性总蛋白质相对浓度的峰值出现在 70~80 d<sup>[21]</sup>。但是唐兆秀等的研究结果中蛋白质积累曲线和峰值出现时间与戴良香等研究的结果<sup>[22]</sup>不同,其认为是南北方的气候特点和基因型差异所致。本研究采用 Bradford 法研究发现,花生在幼果 1 期时的蛋白质含量最低,随后总体呈一个逐渐增加的趋势,与花生籽仁蛋白质含量随生育进程逐渐增加的趋势相同。

缺钙环境也是一种逆境环境,许多逆境都会导致过量的 ROS 产生,而对逆境耐性强的植物往往其氧化系统也较强,包括抗氧化的化合物含量和抗氧化酶的活性<sup>[23]</sup>。 $O_2^-$  产生于氧还原的第 1 步,随后能很快地被 SOD 转化为  $H_2O_2$ ,过量的  $O_2^-$  会转化为其他的 ROS,如羟基自由基或过羟基自由基等,从而导致膜脂过氧化。SOD 把  $O_2^-$  转化为  $H_2O_2$  后,高浓度的  $H_2O_2$  仍会引起氧化胁迫损伤。在植物中 CAT、APX、GPX 被认为是清除  $H_2O_2$  最普遍的酶。GR 参与抗坏血酸-谷胱甘肽的循环,在抗氧化系统中起着重要作用<sup>[24]</sup>。2 个钙处理下,随着果实发育的逐渐成熟,WC1 和 WC9 的  $H_2O_2$  含量逐渐降低,而 WC1 和 WC9 样品中 CAT 活性逐渐增强,由于 CAT 是清除  $H_2O_2$  最普遍的酶,随着果实发育的逐渐成熟,伴随着 CAT 活性的增加,清除了样品中  $H_2O_2$  含量,使得样品中  $H_2O_2$  含量下降。在未施钙处理下,WC9 样品中 CAT 活性低于 WC1,并且在幼果 2 期达到显著水平,而 WC9 样品中  $H_2O_2$  含量并没有比 WC1 高,也没有达到显著水平。未施钙肥处理下,在幼果 2 期 WC1 样品中 SOD 活性显著高于 WC9;在幼果 1 期和幼果 2 期未施钙肥处理下 WC1 样品中的 SOD 活性显著高于施钙肥处理。产生此现象的原因可能是,在不施钙肥处理下,果实 2 时期下,WC1 相对于 WC9 在逆境环境下产生更多  $O_2^-$ ,因此也需要更强酶活性的 SOD 将  $O_2^-$  转化为  $H_2O_2$ ,同时也有强酶活性的 CAT 清除了  $H_2O_2$ ,最终使得 WC1 和 WC9 的  $H_2O_2$  含量没有显著性差异。在施钙处理下,幼果 1 期 WC9 的 GR 活性显著大于 WC1。POD 也是活性氧防御酶系统中重要的一员,能够避免活性氧的毒害作用。在 2 个钙处理下,随着果实发育的逐渐成熟,样品中 POD 活性呈一个逐渐下降趋势,幼果 2 期下,未施钙肥处理下,WC9 的 POD 活性显著高于 WC1;未施钙肥处理下的 WC9 样品中 POD 活性显著高于施钙肥处理。

2 个钙处理对 WC1 和 WC9 的株体性状、生产性能性状和活性氧防御酶系统影响不同,在未施钙处理下,WC1 的株体性状优于 WC9,WC9 的生产性能性状优于 WC1,在应对未施钙处理的逆境环境,WC1 和 WC9 表现出的活性氧防御酶系统不同,相对来说 WC1 具有较强的 SOD 和 CAT 活性,而 WC9 具有较强的 POD 活性,整体来说 WC1 和 WC9 在应对未施钙处理所产生的反应不同,其更深层次的不同的耐低钙机制还需进一步研究。

## 参考文献:

- [1] 杨伟波,付登强,刘立云,等. 海南花生研究现状及展望[J]. 热带农业科学,2013,33(5):73-75.
- [2] 郑奕雄. 南方花生生产技术学[M]. 广州:中山大学出版社,2009.
- [3] 龚子同,张甘霖,赵文君,等. 海南岛土壤中铝钙的地球化学特征及其对生态环境的影响[J]. 地理科学,2003,23(2):200-207.
- [4] 魏玉云. 热带地区砖红壤上不同土壤 pH 和含水量对尿素挥发的影响研究[D]. 海口:华南热带农业大学,2006.
- [5] 周恩生,陈家驹,王飞,等. 钙胁迫下花生荚果微区特征及植株生理生化反应变化[J]. 福建农业学报,2008,23(3):318-321.
- [6] 李新国,万书波. 钙对花生生长发育调控的研究进展[J]. 山东农业科学,2011(8):65-67,74.
- [7] Gao L L, Wang S F, Liu Z F, et al. Two cultivars of peanut (*Arachis hypogaea*) seedlings show different tolerance to calcium deficiency [J]. Journal of Plant Nutrition, 2016, 39(7):1016-1025.
- [8] 张海平,单世华,蔡来龙,等. 钙对花生植株生长和叶片活性氧防御系统的影响[J]. 中国油料作物学报,2004,26(3):33-36.
- [9] 周卫,林葆. 受钙影响的花生生殖生长及种子素质研究[J]. 植物营养与肥料学报,2001,7(2):205-210.
- [10] 李忠,周翠球,钟瑞春,等. 钙胁迫对不同基因型花生品种生长发育的影响[J]. 广西农业科学,2007,38(5):519-521.
- [11] 李东霞,杨伟波,付登强,等. 钙对两种基因型花生苗期生物量和叶片气孔数目的影响[J]. 热带农业科学,2014(6):27-30.
- [12] 吴晶华,李林,尹月皓,等. 不同钙肥施用量对花生产量及经济效益的影响[J]. 山东农业科学,2017,49(3):97-99.
- [13] 王芳,杨莎,郭峰,等. 钙对花生幼苗生长、活性氧积累和光抑制程度的影响[J]. 生态学报,2015,35(5):1496-1504.
- [14] Caires E F, Rosolem C A. Lime effects on soil acidity and root growth of peanut[J]. Bragantia, 1998, 57(1):175-184.
- [15] 张君诚. 受钙影响花生 (*Arachis hypogaea* L.) 胚胎败育的分子机理研究[D]. 福州:福建农林大学,2004:5-6.
- [16] 周录英,李向东,王丽丽,等. 钙肥不同用量对花生生理特性及产量和品质的影响[J]. 作物学报,2008,34(5):879-885.
- [17] 张君诚,周恩生,张海平,等. 南方沙质旱地花生空秕的田间表现及其防治措施[J]. 种子,2004,23(5):51-54.
- [18] 张君诚,张海平,官德义,等. 不同钙水平水培花生的生长表现及研究方法探讨[J]. 种子,2006,25(10):51-52.
- [19] 杨运萍. 不同基因型花生钙营养差异性研究[D]. 湛江:广东海洋大学,2014.
- [20] 赵秀芬,房增国. 低钙胁迫对不同品种花生钙素吸收分配特性的影响[J]. 华北农学报,2017,32(2):194-199.
- [21] 唐兆秀,徐日荣,蓝新隆. 南方珍珠豆型花生籽仁蛋白质积累及亚基组分分析[J]. 中国农学通报,2012,28(36):96-101.
- [22] 戴良香,张岱,闫彩霞,等. 不同花生品种籽仁发育过程中蛋白质组分分析[J]. 中国粮油学报,2011,26(4):42-46,80.
- [23] Ahmad P, Jaleel C A, Salem M A, et al. Roles of enzymatic and nonenzymatic antioxidants in plants during abiotic stress [J]. Critical Reviews in Biotechnology, 2010, 30(3):161-175.
- [24] 陈水森. 甘蓝型油菜磷高效的蛋白组学与比较基因组学研究[D]. 武汉:华中农业大学,2015:75-76.