

研究报告 Original Papers

施钙对‘台农17号’菠萝裂柄的生理影响及效果

卢明^{1,2}, 洪珊¹, 剧虹伶¹, 杨越¹, 赵艳¹, 耿建建³, 邓燕^{1,*}, 阮云泽^{1,*}¹海南大学热带农林学院/海南省热带生物资源可持续利用重点实验室, 海口570228²西南大学资源环境学院, 重庆400715³海南万钟实业有限公司, 海口 570228

摘要: 了解菠萝中钙素营养与其裂柄的关系及其生理机制, 本文以‘台农17号’菠萝为试验材料, 研究施钙处理对其产量、裂柄率、D叶和果柄中Ca含量及果柄中相关酶活性的影响, 同时分析裂柄率与其Ca含量及相关酶活性的相关关系。研究结果表明, 施钙可以使菠萝增产, 且降低菠萝裂柄率; 催花期施钙的效果最好。相关分析表明, 叶片和果柄的Ca含量与裂柄率均呈极显著负相关关系。钙肥施用后, 果柄中原果胶(PP)含量显著增加; 超氧化歧化酶(SOD)与过氧化氢酶(CAT)活性增强, 且在催花10 d施钙处理活性表现最强; 多酚氧化酶(PPO)和细胞壁水解酶(CX和PG)活性降低。菠萝裂柄率与果柄中的PP含量及CAT活性呈显著负相关关系, 与其PPO活性成极显著正相关。以上结果表明, 施用钙肥是减少‘台农17号’菠萝裂柄的重要措施, 其适宜施用量为300 kg·hm⁻², 适宜施用时期为快速生长II期至催花后10 d之间。

关键词: ‘台农17号’菠萝; 裂柄; 钙; 产量; 生理影响

中国是全球菠萝产业10大主产区之一。2014年, 我国菠萝总产量为188.89万吨, 占世界菠萝总产量的7%左右, 位居第五; 菠萝收获面积达8.16万hm², 占世界菠萝总收获面积的7.39%, 位列第三(FAO)。当前, 我国大陆地区菠萝生产面临品种单一老化、结构简单的问题, 引种优良品种成为解决这一问题快速有效的途径。‘台农17号’菠萝(以下简称‘TN17’)是台湾农业试验所嘉义分所选育的优良菠萝杂交品种, 近几年陆续引进到海南、广东和广西等菠萝主产区。由于其产量高、口感好, 经济效益高, 农民种植的积极性很高。但因为环境、施肥及种植管理等因素, 导致其裂柄现象严重, 影响了菠萝产量和品质的提升, 限制了‘TN17’菠萝的种植推广。研究抑制菠萝裂柄发生的最适施钙量、施钙时期及钙对其果柄细胞壁水解酶和活性氧清除酶的影响, 对揭示菠萝裂柄发生的机制和提出综合防治措施具有重要的指导意义。

在其他作物上的研究表明, 钙与细胞壁结构及细胞功能维持具有重要作用(刘英翠2008; Yoruk和Marshall 2003)。钙素营养失调会导致细胞壁结构破坏和细胞功能失衡, 影响细胞发育和生长, 引起器官(果实)开裂的生理性病害, 如樱桃(张阁等2008)、葡萄(卜庆雁2007)、李(黎德荣2006)、锦橙(温明霞和石孝均2012)、红枣(杨俊强等2009)、

荔枝(李建国等1999)等果实的裂果, 及苹果皮孔败坏病(刘小勇等2008)。目前对‘TN17’菠萝的研究主要有种苗的组培快繁(张瑛等2010)、地区适应性栽培(苏伟强等2011)、营养生长管理(刘亚男等2016; 李映辉等2013; Liu和Chen 2011; Alessandra等2013)和催花问题(Maruthasalam等2010; Tsai和Kuan 2013)等, 对其生理性病害裂柄的相关研究报道较少。卢明等(2017)的研究表明, 品种、养分状况和全生育期活动积温是影响菠萝裂柄的重要因素; 外源钾钙的添加可极显著降低菠萝裂柄率, 且加钙效果高于加钾。但其对裂柄的防控生理尚不明确。

本文以‘TN17’菠萝为试验材料, 研究施钙对菠萝产量和裂柄率的影响, 菠萝D叶和果柄中Ca含量的差异, 以及果柄中多酚氧化酶(polyphenol oxidase, PPO)、活性氧清除酶[过氧化物酶(peroxidase, POD)、超氧化物歧化酶(superoxide dismutase, SOD)、过氧化氢酶(catalase, CAT)]、细胞壁水解酶[(多聚半乳糖醛酸酶(polygalacturonase, PG)、纤

收稿 2017-08-17 修定 2018-03-05

资助 国家自然科学基金(31760605)和海南大学科研团队培育资助项目(hdkytg201703)。

* 共同通讯作者: 邓燕(dengyancau@163.com)、阮云泽(yunzeruan@163.com)。

纤维素酶(cellulase, CX)]活性和果胶[(原果胶(protopectin, PP)、可溶性果胶(soluble pectin, SP)]、丙二醛(malonaldehyde, MDA)含量的变化,旨在阐明外源Ca对菠萝裂柄的生理代谢影响以及探寻有效降低菠萝裂柄发生的最适施钙量和施钙时期,为‘TN17’菠萝的高效栽培和裂柄调控机制研究提供技术支持和基本理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地(东经108°46′22″,北纬18°39′6″)位于海南省乐东黎族自治县尖峰镇海南万钟实业有限公司农场,地处海南岛西南部,热带雨林尖峰岭南面山脚,属热带季风气候和海洋气候,年降雨量为1 279.10 mm,年蒸发量约为年降雨量的2.0~2.5倍(梁继兴1988)。土壤为发育于滨海沉积物上的燥红土,土壤年均温为24~25°C,容重为1.32 g·cm⁻³,pH为5.01,有机质为8.56 g·kg⁻¹,碱解氮含量83.24 mg·kg⁻¹,有效磷含量121.33 mg·kg⁻¹,速效钾171.72 mg·kg⁻¹,有效钙262.48 mg·kg⁻¹,有效镁56.59 mg·kg⁻¹。

1.2 试验材料

试材选用万钟农场的菠萝优良品种‘台农17号’ [*Ananas comosus* (Linn.) Merr. cv. ‘Tainon 17’, 简写‘TN17’]。

1.3 试验设计

1.3.1 钙肥施用量试验

菠萝苗于2014年8月11日种植,2015年11月13日收获。综合菠萝对钙的吸收累积特性、硝酸铵钙含钙量及试验田供钙能力,试验设4个钙处理:不施钙处理(CK)、T1 (1 000 kg·hm⁻²硝酸铵钙,即CaO 250 kg·hm⁻²)、T2 (1 200 kg·hm⁻²硝酸铵钙,即CaO 300 kg·hm⁻²)和T3 (1 500 kg·hm⁻²硝酸铵钙,即CaO 375 kg·hm⁻²)。钙肥在快速生长期(RGP-II, 2015年4月8日)、催花期(FFP, 2015年6月3日)、现红期(SPP, 2015年7月11日) 3个时期分3次叶片喷施,施入比例为2:1:1。除CK,其余处理各有3个重复,合计10个小区,各小区面积2.70 m×10 m,随机排列。

1.3.2 钙肥施用时期试验

菠萝苗于2015年10月17日定植,2016年9月8日催花,于2017年2月10日收获。试验按施钙时期设8个处理:全生育期不施钙处理(CK)、缓慢生长期施钙(SGP, 2016年1月22日)、快速生长I期施钙

(RGP-I, 2016年4月3日)、快速生长II期施钙(RGP-II, 2016年6月9日)、催花期施钙(FFP, 2016年8月25日)、催花后10 d施钙(AFP-10, 2016年9月21日)、催花后20 d施钙(AFP-20, 2016年10月1日)和现红期施钙(果柄抽生期, SPP, 2016年10月23日)。除CK,其余处理各有3个重复,每重复区面积为2.70 m×10 m,合计22个小区,各小区随机排列。钙肥为硝酸铵钙,施用量为1 200 kg·hm⁻²,即CaO 300 kg·hm⁻²,施用浓度为0.5%,叶面浇施。

试验地菠萝日常施肥及园艺管理与农场日常管理一致,全生育期施肥量分别为: N 772.95 kg·hm⁻²、P₂O₅ 497.26 kg·hm⁻²、K₂O 972.5 kg·hm⁻²、MgO 75 kg·hm⁻²,水肥一体施入,同时规律间隔7~10 d向菠萝供水。

1.3.3 指标测定

于成熟期(2015年11月13日)统计各小区内菠萝整株数和裂柄植株数量,计算裂柄率[裂柄率(%)=(裂柄株数/菠萝总株数)×100]。每小区随机摘取15个菠萝,过磅称重,再根据单位面积菠萝株数来换算每公顷的菠萝产量。

于裂柄多发期(2016年10月20日),每小区选取5株果柄正常菠萝植株,采集果柄混合样2份,一份用液氮迅速冷冻带回实验室,以备测定果柄中的POD、SOD、PPO、PG、CX、CAT酶活性及PP、SP、MDA的含量;一份用于农化分析测定。同时采集其D叶(菠萝最长叶片,一般为倒3轮叶片)混合样一份,带回实验室,清洗干净后,105°C杀青30 min,75°C烘至恒重,粉碎,装袋备测。于成熟期(2017年2月11日)统计各小区内菠萝裂柄率;并于每小区随机摘取15个菠萝,过磅称重,统计产量。CK处理内均分成3个小块。

试剂盒微量法测定POD、PPO、SOD、PG、CX、CAT活性以及MDA、SP、PP含量,以上各指标的测定试剂盒均由苏州科铭生物技术有限公司提供,测定参照《果蔬采后生理生化实验指导》(曹健康等2007)。所有计算单位以鲜重来表示。

植物样品中Ca含量的测定采用常规方法分析(鲍士旦2000)。计算单位以干重表示。

1.4 数据处理

采用Microsoft Excel 2016软件进行数据处理和作图,IBM SPSS Statistics 21进行数据差异显著性分析。不同处理之间多重比较及其显著性水平

($P<0.05$)通过最小显著差数法LSD进行检测, 图标中的数值为平均值 \pm 标准误。

2 实验结果

2.1 不同施钙量对菠萝产量和裂柄率的影响

如图1-A所示, 随着钙肥用量的增加, 菠萝的产量也增加, 但T2与T3之间差异不显著, T2的产量最高($53.18 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$), 比CK增产36.92%。菠萝裂柄率随着钙肥用量的增加而降低, T2处理的裂柄率最低, 为8.70%, 比CK降低54.19%, T2与T3之间差异不显著(图1-B)。菠萝产量随其果柄裂柄率的降低而增加, 外源添加钙肥对于菠萝抑制裂柄以及增产有重要作用。

2.2 不同时期施钙对菠萝产量的影响

在‘TN17’不同生长时期施入等量钙肥, 对菠萝产量影响如图2所示。不施钙肥处理(CK)的菠

萝产量显著低于各施钙处理, 说明施钙有显著的增产效果, 这与2.1节结果一致。而除CK外, 其余施钙处理间产量数据无显著性差异, 说明调整施钙时期并不能有效提高‘TN17’产量。

2.3 不同时期施钙对菠萝裂柄率的影响

由图3可知, 与前期施用钙肥相比, 在菠萝快速生长期(RGP)及以后施用钙肥可显著降低菠萝的裂柄率, 而在菠萝快速生长II期后施用钙肥的菠萝裂柄率最低, 快速生长II期(RPG-II)、催花后10 d (AFP-10)、催花后20 d (AFP-20)和现红期(SPP)各时期的菠萝裂柄率无显著差异。

2.4 不同时期施钙对菠萝D叶和果柄中Ca含量的影响

如图4所示, 施钙能显著提高菠萝D叶与果柄中Ca含量, 不同时期施钙对‘TN17’的D叶和果柄中Ca含量有显著影响。CK处理的叶片和果柄Ca含

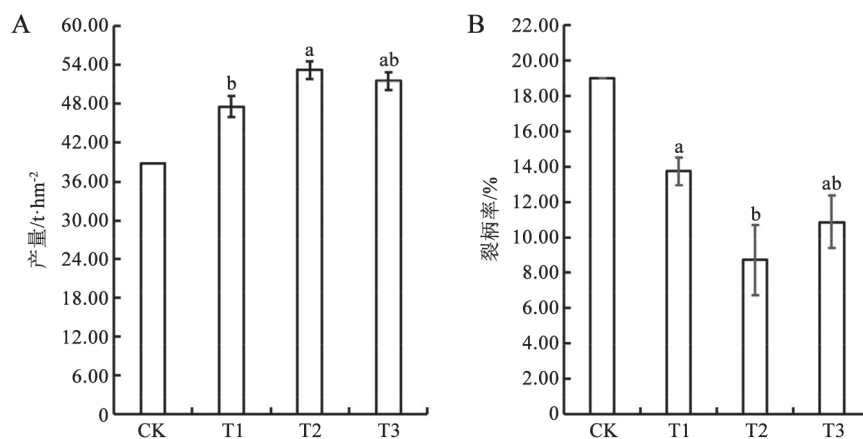


图1 不同施钙量对‘台农17号’菠萝裂柄率和产量的影响

Fig.1 Effects of different Ca application on peduncle cracking rate and yield in ‘TN17’ pineapple

不同小写字母表示不同处理间差异显著水平($P<0.05$)。下图(表)同此。

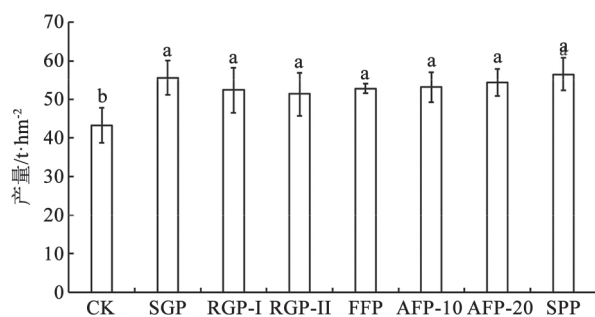


图2 施钙时期对‘台农17号’菠萝产量的影响

Fig.2 Effects of Ca application period on yield of ‘TN17’ pineapple

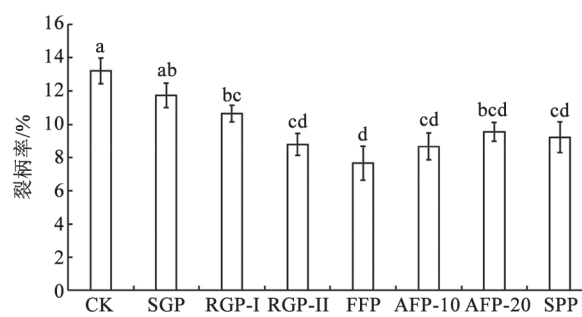


图3 施钙时期对‘台农17号’菠萝裂柄率的影响

Fig.3 Effects of Ca application period on peduncle cracking rate of ‘TN17’ pineapple

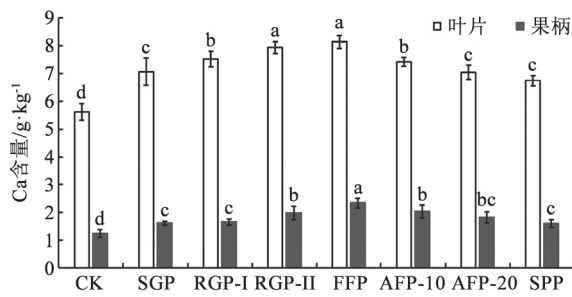


图4 不同施钙时期‘台农17号’菠萝D叶和果柄中Ca含量的差异

Fig.4 Differences of Ca concentrations in ‘TN17’ pineapple D-leaf and peduncle of different Ca application periods

量最低,分别为5.62和1.24 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$;催花期施钙处理的Ca含量均为最高,分别达8.14和2.34 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。营养生长期(苗期至催花期)中,菠萝D叶和果柄中钙含量均随着施钙时期的后移逐渐增加,催花期施钙处理的最高;而与之相反的是,生殖生长期(催花至收获期)中施钙,菠萝D叶和果柄中钙含量随着施钙时期的后移而逐渐降低。不同时期的D叶Ca含量高低表现为: FFP>RGP-II>RGP-I>AFP-10>SGP>AFP-20>SPP>CK;果柄中Ca含量高低表现为: FFP>AFP-10>RGP-II>AFP-20>RGP-I>SGP>SPP>CK。

对菠萝D叶和果柄中Ca含量与其对应处理的裂柄率进行相关性分析。拟合结果显示(图5),叶片Ca含量、果柄Ca含量与裂柄率均呈极显著负相关关系,拟合方程分别是: $y=-0.2288x+9.4593$ ($R^2=0.3636^{**}$, $n=24$), $y=-0.1215x+2.9978$ ($R^2=0.5264^{**}$, $n=24$)。说明菠萝裂柄与其D叶和果柄中Ca含量的丰富程度密切相关。

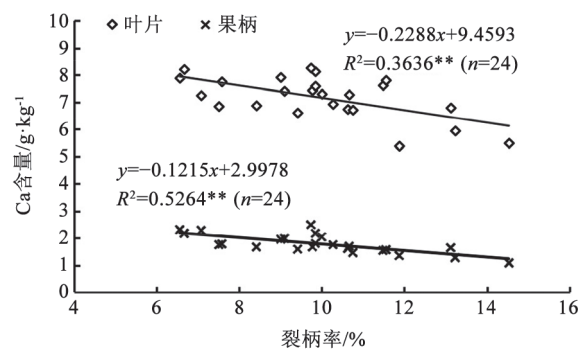


图5 ‘台农17号’菠萝 D叶和果柄中Ca含量与裂柄率的相关关系

Fig.5 The correlation of peduncle cracking rate and Ca concentration of D-leaf and peduncle in ‘TN17’ pineapple *表示线性模型呈显著相关关系, **表示极显著相关。下同此。

2.5 不同时期施钙对菠萝果柄生理指标的影响

从表1可以看出,催花后20 d (AFP-20)施钙处理的MDA含量最大,高达4.25 $\text{nmol}\cdot\text{g}^{-1}$,较最低水平处理[催花后10 d (AFP-10), 3.20 $\text{nmol}\cdot\text{g}^{-1}$]提高了32.81%;但不同施钙时期的MDA含量无显著性差异。随着施钙时期后移,果柄中原果胶(PP)含量呈先上升后下降的规律;催花期(FFP)处理果柄的原果胶(PP)含量处于高水平,比CK和AFP-20处理分别高出26.51%和30.65%。菠萝的裂柄率与其果柄中PP含量呈显著负相关(图6-A),拟合方程为: $y=-1.232x+14.755$ ($R^2=0.1985^*$, $n=24$)。现红期(SPP)处理的可溶性果胶(SP)含量最低,其他处理间无显著差异。催花期施入钙肥显著降低了果胶酶(PG)活性,还极大降低了纤维素酶(CX)活性。说明降低PG与CX活性,减弱对果柄细胞壁的水解作用,是增强果柄强度、降低菠萝裂柄率的重要生理机理。

表1 不同施钙时期‘台农17号’菠萝果柄MDA含量、果胶含量及水解酶活性的差异
Table 1 Differences of MDA, pectin concentrations and hydrolytic enzyme activities in ‘TN17’ pineapple peduncle of different Ca application periods

施钙时期	MDA含量/ $\text{nmol}\cdot\text{g}^{-1}$	PP含量/ $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$	SP含量/ $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$	PG活性/ $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$	CX活性/ $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$
不施钙(CK)	3.75±0.11 ^a	3.47±0.33 ^b	2.23±0.10 ^a	408.05±17.63 ^a	221.71±17.74 ^{ab}
缓慢生长期(SGP)	3.80±0.50 ^a	3.57±0.42 ^{ab}	1.94±0.07 ^a	425.04±26.35 ^a	192.87±15.27 ^{ab}
快速生长期(RGP-I)	3.71±0.47 ^a	3.71±0.31 ^{ab}	2.05±0.14 ^a	390.75±39.15 ^a	148.79±19.57 ^b
快速生长期II期(RGP-II)	3.51±0.24 ^a	4.82±0.43 ^a	2.00±0.10 ^a	342.29±24.29 ^{ab}	249.00±49.00 ^a
催花期(FFP)	3.35±0.25 ^a	4.39±0.61 ^{ab}	1.97±0.27 ^a	282.30±12.14 ^b	164.52±27.06 ^{ab}
催花后10 d (AFP-10)	3.20±0.07 ^a	4.05±0.29 ^{ab}	2.05±0.10 ^a	331.27±13.83 ^{ab}	199.34±18.13 ^{ab}
催花后20 d (AFP-20)	4.25±1.06 ^a	3.36±0.32 ^b	2.00±0.02 ^a	352.87±47.78 ^{ab}	185.58±27.34 ^{ab}
现红期(SPP)	3.53±0.16 ^a	3.93±0.38 ^{ab}	1.18±0.04 ^b	381.13±31.83 ^a	243.73±25.73 ^a

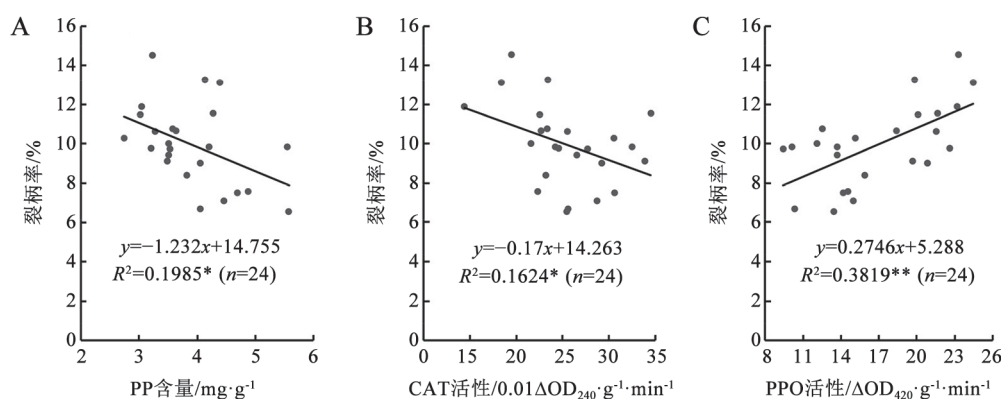


图6 ‘台农17号’菠萝裂柄率与果柄中PP含量、CAT和PPO活性的相关关系

Fig.6 The correlation of peduncle cracking rate with PP content, CAT and PPO activity in ‘TN17’ pineapple peduncle

SOD和CAT是作物在逆境中产生的活性氧清除剂,对稳定细胞膜结构,平衡细胞代谢有重要意义。表2结果显示, SOD与CAT活性在各处理中呈现出的一致规律为: 两者酶活性在不施钙处理(CK)最低,分别为 $28.50 \text{ U}\cdot\text{g}^{-1}$ 和 $20.41 \text{ } 0.01\Delta\text{OD}_{240}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$;而在催花后10 d施钙处理(AFP-10)最大,分别高达 $48.54 \text{ U}\cdot\text{g}^{-1}$ 和 $28.94 \text{ } 0.01\Delta\text{OD}_{240}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$,分别比CK高出70.32%和41.79%。对各处理果柄CAT活性与其对应裂柄率数据进行线性拟合,结果(图6-B)表明,‘TN17’裂柄率和其果柄中CAT活性呈显著的负相关关系。

在逆境胁迫下,植物体内过氧化物酶(POD)和多酚氧化酶(PPO)活性增强,它可通过催化植物体内木质素和醌类物质的形成、降低果皮细胞壁的延展性,提高植物抗病性,与菠萝裂柄的发生关系密切。表2表明,催花期(FFP)施钙处理中PPO活性最低,仅有 $11.08 \Delta\text{OD}_{420}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$;对比CK,活性降低了49.93%;之后施钙,处理的PPO活性与FFP处

理无显著性差异。说明催花期或催花期后施用钙肥, PPO活性维持在较低水平,‘TN17’果柄内生理环境较为稳定。而随着施钙时期的后移,菠萝果柄的POD活性呈显著上升规律,催花后10 d (AFP-10)处理为显著变化拐点,说明在此之前施用钙肥对于维持果柄细胞壁稳定性效果显著。菠萝裂柄率与其果柄中的PPO活性呈极显著的正相关关系(图6-C),拟合方程为: $y=0.2746x+5.288$ ($R^2=0.3819^{**}$, $n=24$)。

3 讨论

大田生产中, $300 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 的CaO施用量,‘TN17’可以获得最大产量($53.18 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$),且裂柄率最低(仅为8.70%)。相比不施钙处理,施钙能显著提高‘TN17’产量,与前人在水稻(汪洪祥1993;楼守炳等2013)、玉米(肖德全2005)、小麦(贺立源和江世文1999;李欢欢等2010)、花生(张佳蕾等2015)、甘草(张青云等2015)等作物上研究结果一致。在一

表2 不同施钙时期‘台农17号’菠萝果柄SOD、CAT、PPO和POD酶活性的差异

Table 2 Differences of SOD, CAT, POD and PPO activities in ‘TN17’ pineapple peduncle of different Ca application periods

施钙时期	SOD活性/ $\text{U}\cdot\text{g}^{-1}$	CAT活性/ $0.01\Delta\text{OD}_{240}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$	POD活性/ $\Delta\text{OD}_{470}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$	PPO活性/ $\Delta\text{OD}_{420}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$
不施钙(CK)	28.50 ± 3.65^b	20.41 ± 3.78^b	5.14 ± 0.41^b	22.13 ± 1.13^a
缓慢生长期(SGP)	34.34 ± 2.58^{ab}	22.48 ± 3.05^{ab}	6.38 ± 0.05^b	22.04 ± 1.29^a
快速生长I期(RGP-I)	38.31 ± 1.91^{ab}	26.60 ± 5.24^{ab}	6.28 ± 0.66^b	20.90 ± 1.28^{ab}
快速生长II期(RGP-II)	38.55 ± 6.93^{ab}	28.03 ± 3.02^a	5.91 ± 0.53^b	16.37 ± 2.26^{bc}
催花期(FFP)	39.51 ± 4.66^{ab}	26.26 ± 0.73^{ab}	6.27 ± 0.22^b	11.08 ± 1.20^d
催花后10 d (AFP-10)	48.54 ± 5.25^a	28.94 ± 2.79^a	7.64 ± 1.43^{ab}	14.93 ± 2.76^{cd}
催花后20 d (AFP-20)	34.90 ± 4.39^{ab}	25.09 ± 2.76^{ab}	9.79 ± 1.85^a	14.39 ± 1.15^{cd}
现红期(SPP)	40.54 ± 3.07^{ab}	26.83 ± 5.01^{ab}	10.12 ± 0.63^a	13.49 ± 0.49^{cd}

定范围内,产量随着Ca肥施用量的增加而增加;本研究中施钙对菠萝的增产最大可达36.92%。但在施钙时期试验中发现,调整施钙时期,并未显著影响菠萝产量,分析原因可能为:(1)试验中各处理的N、K供应充足,菠萝果实的建成对各养分的需求规律表现为K>N>Ca>P>Mg(马海洋等2013;张文等2008),除了植株的Ca积累量是限制菠萝产量的一个因素外,菠萝对大中量营养元素K、N的吸收累积是限制其产量的主要影响因素;(2)试验地土壤速效钙储量丰富,以20 cm耕作层来换算,土壤中速效钙储量达604.85 kg·hm⁻²,土壤基础地力对菠萝产量的贡献率远高于肥料贡献率。但土壤中充足的Ca并不能完全地保障‘TN17’对Ca元素营养的需求,具体原因有待进一步研究。

施钙可以显著降低‘TN17’菠萝裂柄的发生,且以催花期施钙对菠萝裂柄的预防效果最好,该处理下的裂柄率仅有7.65%,相比不施钙处理的13.20%,降低了42.04%。分析原因可能为:菠萝对养分的吸收有3个高峰期,分别是快速生长I期、催花期和小果期,其中在催花期的阶段吸收量最大(周柳强等1994);加上叶面喷施钙肥,心叶处肥料供应充足,催花期施钙后,钙养分的难移动性(胡霁堂2003)驱使钙素主要向生长点(心叶及果柄)移动;相比不施钙处理,施钙直接增加了菠萝D叶和果柄中的Ca含量,而Ca是细胞壁的重要组成物质,增强了果柄的抗张力,并增加其机械强度(Alessandra等2013),从而降低菠萝裂柄率;且随着D叶和果柄中钙含量的增加,菠萝的裂柄率下降。相关关系分析表明,叶片Ca含量、果柄Ca含量与裂柄率均呈极显著负相关关系。

果胶是构成组织细胞壁的重要组分,高含量原果胶对于维持细胞壁的破裂应变力,及维持细胞的完整性作用重大(陈辉煌等2012)。本研究结果表明‘TN17’裂柄率与其果柄中的原果胶(PP)含量成显著负相关。前人研究(许建楷等1994)证实,正常果皮中原果胶含量显著高于裂果果皮,本研究结果也证实了这一点。其次,菠萝裂柄率与果柄中的过氧化氢酶(CAT)呈显著负相关关系,与果柄中的多酚氧化酶(PPO)活性成极显著正相关,与前人对枣(王保明等,2013)、荔枝(钟伟良等2006)、锦橙(温明霞和石孝均2012)、李(张林静和桂明珠

2006)等裂果研究中的结果一致。施钙后,菠萝果柄中的PP含量显著提高,PG酶和PPO酶活性显著下降,CAT酶活性显著上升。钙是细胞壁的结构物质,它能与果胶至结合形成钙盐,增加原生质弹性,增强细胞的耐压力和延伸性,从而增强果皮的抗裂能力(刘英翠2008)。于快速生长II期施用钙肥,果柄中PP含量最为丰富;同时钙抑制PG水解细胞壁中多聚半乳糖醛酸,减缓细胞壁结构解体(陈辉煌等2012),于催花期施钙,抑制效果最好;PPO常见于衰老组织中,易与细胞壁成分酚类物质发生酶促反应(曹永庆等2008),减小果皮细胞壁的延伸性(Yoruk和Marshall 2003);CAT为自由基清除酶,施钙显著提高其活性(Gong等1997),原因为CAT可能是Ca²⁺-CaM的靶酶,而CaM可能参与CAT酶活性的调节作用(李德红等1998;孙大业等2010;唐军等1995)。

施钙可使‘台农17号’菠萝显著增产,且显著降低其裂柄率;当Ca肥用量为300 kg·hm⁻²,菠萝裂柄率最低;于快速生长II期至催花后10 d期间施用钙肥可维持果柄细胞壁较高稳定性,显著降低菠萝裂柄率。施钙后,果柄中维持果柄强度和抗应力的原果胶含量显著提高,自由基清除酶系中的过氧化氢酶和超氧化歧化酶活性增强,同时降低多酚氧化酶和细胞壁水解酶(CX和PG)活性,调控逆境下果柄细胞的衰老与细胞壁的水解,从而增加果柄的机械强度,降低裂柄的发生。

参考文献(References)

- Alessandra RA, Rejane MNM, Alexandre PDS, et al (2013). Mineral nutrition and yield of pineapple plant cv. Pérola as a function of the K/N relationships in fertilization. *Rev Bras Frutic*, 35 (2): 625–633
- Bao SD (2000). *Analysis of Agricultural Chemistry in Soil*. Beijing: China Agriculture Press (in Chinese) [鲍士旦 (2000). 土壤农化分析. 北京: 中国农业出版社]
- Bu QY, Zhou YQ, Zhao TL, et al (2007). Analysis on the reasons of fruit cracking on Xiangfei grape in Yingkou, Liaoning. *China Fruits*, (2): 59–60 (in Chinese with English abstract) [卜庆雁, 周晏起, 赵铁良等(2007). 香妃葡萄在辽宁营口裂果原因解析. *中国果树*, (2): 59–60]
- Cao JK, Jiang WB, Zhao YM (2007). *Guidance on Postharvest Physiology and Biochemistry of Fruits and Vegetables*. Beijing: China Light Industry Press, 84–155 (in Chinese) [曹建康, 姜微波, 赵玉梅(2007). 果蔬采后生理生化实验指导. 北京: 中国轻工业出版社, 84–155]

- Cao YQ, Cao YP, Li Z, et al (2008). Effect of pre-harvest calcium sprays on fruit quality and softening during storage of melting flesh peach. *J China Agr Univ*, 13 (6): 31–36 (in Chinese with English abstract) [曹永庆, 曹艳平, 李壮等(2008). 采前喷钙对溶质桃采后贮藏品质及后熟软化的影响. *中国农业大学学报*, 13 (6): 31–36]
- Chen HH, Li JG, Zhang J, et al (2012). Research progress in mechanism of Chinese jujube (*Ziziphus jujuba* Mill.) fruit cracking in Xinjiang. *Xinjiang Agr Sci*, 49 (6): 1066–1072 (in Chinese with English abstract) [陈辉煌, 李建贵, 张俊等(2012). 新疆红枣裂果机理研究进展. *新疆农业科学*, 49 (6): 1066–1072]
- FAO [DB/OL]. <http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC.html>
- Gong M, Chen SN, Song YQ, et al (1997). Effect of calcium and calmodulin on intrinsic heat tolerance in relation to antioxidant system in maize seedlings. *Austra J Plant Physiol*, 24 (3): 371–379
- He LY, Jiang SW (1999). Study on the effect of silicon and calcium fertilizer on wheat. *Soil Fert Sci China*, (3): 8–11 (in Chinese with English abstract) [贺立源, 江世文(1999). 小麦施用硅钙肥效应的研究. *中国土壤与肥料*, (3): 8–11]
- Hu AT (2003). Plant nutrition. China Agriculture University Press (in Chinese) [胡霁堂(2003). 植物营养学. 中国农业大学出版社]
- Li DH, Wang XJ, Pan RC (1998). Calcium messenger and plant hormone signaling. *J Biol*, 15 (4): 1–4 (in Chinese with English abstract) [李德红, 王小菁, 潘瑞焱(1998). 钙信使与植物激素信号传递. *生物学杂志*, 15 (4): 1–4]
- Li DR (2006). Factors Analysis and comprehensive control measures of fruit cracking on plum trees. *Guangxi Tropic Agr*, (2): 10–11 (in Chinese) [黎德荣(2006). 李树裂果的原因分析及综合防治措施. *广西热带农业*, (2): 10–11]
- Li HH, Bai B, Shang YF, et al (2010). Study on the application effect of boron, molybdenum and calcium fertilizer on high yield wheat. *Agr Sci Technol News*, (3): 33–35 (in Chinese) [李欢欢, 白波, 尚云峰等(2010). 硼钼钙肥在高产小麦上的应用效果研究. *农业科技通讯*, (3): 33–35]
- Li JG, Gao FF, Huang HB, et al (1999). Preliminary studies on the relationship between calcium and fruit-cracking in Litchi fruit. *J South China Agr Univ*, 20 (3): 47–48 (in Chinese with English abstract) [李建国, 高飞飞, 黄辉白等(1999). 钙与荔枝裂果关系初探. *华南农业大学学报*, 20 (3): 47–48]
- Li YH, Li RT, Wu D, et al (2013). Studies on relationship between stomata and cold resistance of 3 pineapple cultivars. *Anhui Agr Sci*, 41 (1): 1–3 (in Chinese with English abstract) [李映晖, 李润唐, 吴钿等(2013). 3个菠萝品种叶片气孔特征及其与抗寒性的关系. *安徽农业科学*, 41 (1): 1–3]
- Liang JX (1988). Major soil types of Hainan island. *Chin J Tropic Crops*, 9 (01): 53–72 (in Chinese with English abstract) [梁继兴(1988). 海南岛主要土壤类型概要. *热带作物学报*, 9 (01): 53–72]
- Liu XY, Zhang HY, Dong T, et al (2008). Advances in research on nondestructive detection method for apple water-core disease and its control. *J Fruit Sci*. 25 (5): 721–726 (in Chinese with English abstract) [刘小勇, 张辉元, 董铁等(2008). 苹果水心病无损检测与防治研究进展. *果树学报*, 25 (5): 721–726]
- Liu YC (2008). The progress of the relativity between calcium and fruit cracking. *Shanxi Forest Sci Technol*, (3): 31–33 (in Chinese) [刘英翠(2008). 钙与裂果相关性研究进展. *山西林业科技*, (3): 31–33]
- Liu YH, Chen JH (2011). Effects of aluminum on nutrient uptake in different parts of four pineapple cultivars. *Afr J Agr Res*, 6 (6): 1438–1446
- Liu YN, Ma HY, Zhang JZ, et al (2016). Nutritional uptake characteristics and difference of yield and quality in different pineapple varieties under drip fertigation. *South China Fruit*, 45 (1): 62–65 (in Chinese with English abstract) [刘亚男, 马海洋, 张江周等(2016). 不同菠萝品种滴灌施肥养分吸收特性和产量品质差异. *中国南方果树*, 45 (1): 62–65]
- Lou SB, Chen GA, Luo JY, et al (2013). Effect of different calcium fertilizer on rice. *Zhejiang Agr Sci*, (6): 650–651 (in Chinese) [楼守炳, 陈国安, 骆江英等(2013). 水稻施用不同钙肥的效果试验. *浙江农业科学*, (6): 650–651]
- Lu M, Jü HL, Hong S, et al (2017). Investigation and factors analysis of peduncle cracking on 'Tainong No.17' pineapple plants. *South China Fruit*, 46 (2): 119–123 (in Chinese with English abstract) [卢明, 剧虹伶, 洪珊等(2017). 台农17号菠萝裂柄调查及影响因素分析. *中国南方果树*, 46 (2): 119–123]
- Ma HY, Shi WQ, Liu YN, et al (2013). Influence of N, P, K fertilization on yield and quality of smooth cayenne pineapple. *J Plant Nutri Fert*, 19 (4): 901–907 (in Chinese with English abstract) [马海洋, 石伟琦, 刘亚男等(2013). 氮、磷、钾肥对卡因菠萝产量和品质的影响. *植物营养与肥料学报*, 19 (4): 901–907]
- Maruthasalam S, Ling YS, Loganathan M (2010). Forced flowering of pineapple (*Ananas comosus* cv. Tainon 17) in response to cold stress, ethephon and calcium carbide with or without activated charcoal. *Plant Growth Regul*, 60 (2): 83–90
- Su WQ, Liu YQ, Ren H, et al (2011). The introducing expressions of a new variety pineapple of 'Tainong No.17' in Nanning, Guangxi. *China Fruits*, (5): 46–48 (in Chinese with English abstract) [苏伟强, 刘业强, 任惠等(2011). 菠萝新品种台农17号在广西南宁的引种表现. *中国果树*, (5): 46–48]
- Sun DY, Cui SJ, Sun Y (2010). Cell Signal Transduction. Bei-

- jing: Science Press (in Chinese) [孙大业, 崔素娟, 孙颖 (2010). 细胞信号转导. 北京: 科学出版社]
- Tang J, Guo Y, Sun DY (1995). A Survey of plant calmodulin-binding proteins (CaMBPs). *Chin J Cell Biol*, 17 (3): 129–134 (in Chinese with English abstract) [唐军, 郭毅, 孙大业(1995). 植物钙调素结合蛋白(CaMBPs)的研究概况. *中国细胞生物学学报*, 17 (3): 129–134]
- Tsai HW, Kuan CS (2013). Effect of aminoethoxyvinylglycine application on delaying natural flowering and fruit quality in ‘Tainung No.17’ pineapple. *J Taiwan Socie Hort Sci*, 59 (3): 183–190
- Wang BM, Ding GX, Wang XY, et al (2013). Changes of histological structure and water potential of Huping jujube fruit cracking. *Sci Agr Sin*, 46 (21): 4558–4568 (in Chinese with English abstract) [王保明, 丁改秀, 王小原等 (2013). 枣果实裂果的组织结构及水势变化的原因. *中国农业科学*, 46 (21): 4558–4568]
- Wang HX (1993). Study on fertilizer efficiency of silicon, phosphorus and calcium fertilizer on rice. *Hebei Agr Sci*, (3): 5 (in Chinese) [汪洪祥(1993). 水稻硅磷钙肥肥效的研究. *河北农业科学*, (3): 5]
- Wen MX, Shi XJ (2012). Influence of calcium on fruit cracking of Jincheng orange and its physiological mechanism. *Sci Agr Sin*, 45 (6): 1127–1134 (in Chinese with English abstract) [温明霞, 石孝均(2012). 锦橙裂果的钙素营养生理及施钙效果研究. *中国农业科学*, 45 (6): 1127–1134]
- Xiao DQ, Sun JW, Shao ZH (2005). Analysis of silicon and calcium fertilizer on maize. *New Agr Technol*, (6): 8–9 (in Chinese) [肖德全, 孙继文, 邵振海(2005). 玉米施硅钙肥效果分析. *农业新技术*, (6): 8–9]
- Xu JK, Chen JZ, Zou HQ, et al (1994). Studies on the relation between calcium and fruit-cracking in “Hong Jiang” sweet orange. *J South China Agr Univ*, 15 (3): 77–81 (in Chinese with English abstract) [许建楷, 陈杰忠, 邹河清等(1994). 钙与红江橙裂果的关系研究. *华南农业大学学报*, 15 (3): 77–81]
- Yang JQ, Wang BM, Wang XY (2009). Research progress of fruit cracking in Chinese Jujube. *Shanxi Agr Sci*, 37 (3): 86–89 (in Chinese) [杨俊强, 王宝明, 王小原(2009). 枣裂果研究进展. *山西农业科学*, 37 (3): 86–89]
- Yoruk R, Marshall MR (2003). Physicochemical properties and function of plant polyphenol oxidase: a review. *J Food Biochem*, 27 (5): 361–422
- Zhang G, Zhu GY, Liu CL, et al (2008). Change of Ca²⁺ concentration in sweet cherry (*Prunus avium* L.) fruit and its relationship with fruit cracking. *J Fruit Sci*, 25 (5): 646–649 (in Chinese with English abstract) [张阁, 朱国英, 刘成连等(2008). 甜樱桃果实果肉Ca²⁺质量浓度变化规律及其与裂果的关系. *果树学报*, 25 (5): 646–649]
- Zhang JL, Guo F, Meng JJ, et al (2015). Effects of calcium fertilizer on yield, quality and related enzyme activities of peanut in acidic soil. *Chin J Plant Ecol*, 39 (11): 1101–1109 (in Chinese with English abstract) [张佳蕾, 郭峰, 孟静静等(2015). 酸性土施用钙肥对花生产量和品质及相关代谢酶活性的影响. *植物生态学报*, 39 (11): 1101–1109]
- Zhang LJ, Gui MZ (2006). Cracking mechanism of *Prunus salicina* and related preventions. *Acta Hort Sin*, 33 (4): 699–704 (in Chinese with English abstract) [张林静, 桂明珠(2006). 李的裂果机制及防止措施. *园艺学报*, 33 (4): 699–704]
- Zhang QY, Wang NG, Yang ZX, et al (2015). Effects of different calcium fertilizers application amount on yield and quality of Ural Licorice *Glycyrrhiza Uralensis*. *Bul Soil Water Cons*, 35 (1): 107–110, 117 (in Chinese with English abstract) [张清云, 王宁庚, 杨朝霞等(2015). 不同钙肥施用量对乌拉尔甘草产量及品质的影响. *水土保持通报*, 35 (1): 107–110, 117]
- Zhang W, Xie LS, Fu CL, et al (2008). Nutrient management for pineapple on tropical regions. *International Symposium on Plant Nutrient Management in Agricultural Sustainable Development* (in Chinese) [张文, 谢良商, 符传良等(2008). 热带地区菠萝养分管理研究. 农业持续发展中的植物养分管理国际学术研讨会]
- Zhang Y, Liu YQ, Su WQ (2010). Tissue culture and rapid propagation technology for pineapple variety Tainong 17. *Guangxi Agric Sci*, 41 (4): 310–312 (in Chinese) [张瑛, 刘业强, 苏伟强(2010). “台农17号”菠萝组培快繁技术研究. *广西农业科学*, 41 (4): 310–312]
- Zhong WL, Yuan WQ, Huang XM, et al (2006). A study on the absorption of exogenous calcium and sucrose and their deposit onto the cell walls in litchi pericarp. *J Fruit Sci*, 23 (3): 350–354 (in Chinese with English abstract) [钟伟良, 袁炜群, 黄旭明等(2006). 荔枝果皮对外源钙和蔗糖吸收及向细胞壁沉着的研究. *果树学报*, 23 (3): 350–354]
- Zhou LQ, Zhang ZY, Huang MF, et al (1994). The study on the nutritive characteristics and balanced fertilization on pineapple. *Soils*, (1): 43–47 (in Chinese with English abstract) [周柳强, 张肇元, 黄美福等(1994). 菠萝的营养特性及平衡施肥研究. *土壤*, (1): 43–47]

Influence of calcium on peduncle cracking of pineapple (*Ananas comosus* cv. ‘Tainon 17’) and its physiological mechanism

LU Ming^{1,2}, HONG Shan¹, JU Hong-Ling¹, YANG Yue¹, ZHAO Yan¹, GENG Jian-Jian³,
DENG Yan^{1,*}, RUAN Yun-Ze^{1,*}

¹College of Tropical Agriculture and Forestry, Hainan University/Tropical Biological Resources Sustainable Utilization of Hainan Province Key Laboratory, Haikou 570228, China

²College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400715, China

³Hainan WanZhong Industrial Co., Ltd., Haikou 570228, China

Abstract: This study was conducted to understand the effects and influencing mechanisms of calcium (Ca) application on peduncle cracking in ‘Tainon 17’ pineapple. Under different Ca application treatments, the yield, peduncle cracking rate, Ca concentrations in D-leaf and peduncle, and related enzyme activities were measured, and relationships between peduncle cracking rate, Ca concentration and enzyme activities were analyzed. The results showed that Ca application increased pineapple yield while reduced peduncle cracking rate, and the optimum Ca application period was the flower forcing period. Correlation analysis indicated a significant negative relationship between Ca concentration in peduncle and peduncle cracking rate. With Ca application, protopectin (PP) content significantly increased; the activities of superoxide dismutase (SOD) and catalase (CAT) also increased, especially when Ca application was conducted 10 d after flower forcing period. Meanwhile the activities of polyphenol oxidase (PPO) and cell wall hydrolase (CX and PG) reduced. Significant negative correlations were found between peduncle cracking rate and PP content and CAT activity, while a significant positive relationship existed between peduncle cracking rate and PPO activity. These results indicated that Ca application could be an important measure to reduce peduncle cracking, the optimal Ca application was 300 kg·hm⁻², and the optimum application period was between rapid growth period II and 10 d after flower forcing period.

Key words: pineapple (*Ananas comosus* cv. ‘Tainon 17’); peduncle cracking; calcium; yield; physiological effect

Received 2017-08-17 Accepted 2018-03-05

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (31760605), and Scientific Research Team Cultivated Projects of Hainan University (hdkytg201703).

*Co-corresponding authors: Deng Y (dengyancau@163.com), Ruan YZ (yunzeruan@163.com).