

外源钙对‘黄金梨’叶片光合特性及果实品质的影响

周君, 肖伟, 陈修德, 高东升*, 李玲*

山东农业大学园艺科学与工程学院, 作物生物学国家重点实验室, 山东果蔬优质高效生产协同创新中心, 山东泰安 271018

摘要: 以12年生‘黄金梨’ (*Pyrus pyrifolia* cv. Whangkeumbae) 为试材, 研究采前喷氨基酸钙和硝酸钙对‘黄金梨’叶片光合特性及品质的影响, 为‘黄金梨’合理补充钙素营养和提高果实品质提供理论依据及技术途径。结果表明: (1) 在‘黄金梨’幼果期喷钙显著提高了叶片的光合效率, 其中氨基酸钙和硝酸钙处理的叶绿素相对含量 (SPAD值) 较对照提高了13.3%和8.3%, 净光合速率 (P_n) 提高了11.5%和7.3%, 蒸腾速率 (T_r) 提高了12.6%和7.8%, 气孔导度 (G_s) 提高了7.8%和6.2%, 光系统II (PSII) 实际光化学效率 (Φ_{PSII}) 提高了9.8%和7.2%, 光化学淬灭系数 (q_p) 提高了11.6%和6.4%, PSII的天线转换效率 (F_v'/F_m') 提高了4.6%和2.8%, PSII最大光化学效率 (F_v/F_m) 提高了5.0%和4.2%; 以氨基酸钙处理的效果最好。(2) 对于果实品质而言, 喷钙处理可以提高果实钙含量和硬度, 与对照相比, 氨基酸钙和硝酸钙处理的果实可溶性固形物含量提高了11.6%和6.2%, 糖酸比提高了49.9%和32.1%, 维生素C含量提高了25.7%和11.0%, 同时细胞壁水解酶(多聚半乳糖醛酸酶、纤维素酶和 β -半乳糖苷酶)的活性降低, 果实品质得到改善, 氨基酸钙处理效果优于硝酸钙。因此, 在幼果期喷钙(尤其是氨基酸钙)是‘黄金梨’果实补充钙素营养、提升叶片光合性能和改善果实品质的重要措施, 可在其生产中加以应用和推广。

关键词: 钙; ‘黄金梨’; 光合特性; 品质

钙是植物必需的营养元素, 在植物生长发育和应对环境胁迫中处于中心调控地位(Hepler 2005), 对细胞的结构及生理生化代谢过程具有重要作用(檀龙颜和马洪娜2017)。果实内的钙素营养状况与果实品质密切相关, 钙对果实品质的影响远超过镁、钾等。果实缺钙容易引发多种生理性病害, 外源钙可调节其基因表达、维持细胞功能和促进生长发育(Henriksson和Henriksson 2005), 通过外源补钙可以不同程度地提高其产量和品质。钙是典型的适于果面营养和利用果面非维管束吸收途径的养分, 因此有针对性地将钙直接施至幼果上是一种高效的补钙措施(周卫和汪洪2007)。研究表明, 增施适宜浓度的钙肥有利于番茄(*Solanum lycopersicum*)光合性能的提高(徐龙超等2013), 外源钙可以提高葡萄(*Vitis vinifera*)和甜椒(*Capsicum frutescens*)在高温胁迫下的净光合速率(P_n)和光系统II (PSII)最大光化学效率(郑秋玲等2010; 孙克香等2015), 喷施适当的硝酸钙有延长‘鸭梨’ (*Pyrus × bretschneideri*)的果实贮藏期和推迟腐烂的效果(Zhou和Feng 1991), 喷施氯化钙溶液能增加‘Anjou’梨中的钙含量和明显控制其栓斑病等(Raese和Drake 2006)。采后热和钙处理能不同程度地增加‘黄冠’梨果实钙含量, 抑制细胞壁组成成分果胶、纤维素的降解及相关酶活性, 维持果实硬度(王玲

利等2014)。增施钙还可以缓解盐胁迫、镉胁迫和干旱对植物造成的伤害, 提高植株抗氧化酶的活性(徐臣善2014; 李贺等2015; 陈露露等2016)。

‘黄金梨’ (‘Whangkeumbae’) 属于砂梨(*Pyrus pyrifolia*)系统, 是由韩国园艺试验场以‘新高’和‘二十世纪’为亲本杂交, 经多年选育而成, 我国于20世纪90年代中期引入。关于钙与‘黄金梨’的关系, 前人的研究多集中在果实的采后生理方面。李湘利(2005)研究发现氯化钙结合噻苯唑(thiabendazole, TBZ)浸果处理可以较好地减少‘黄金梨’果实采后的霉烂损失, 延长果实的保鲜期。王玉玲等(2016)认为采前氯化钙处理对‘黄金梨’果项硬化症具有良好的防治效果, 较好地保持了果实质地特性和外观品质, 提高了果实的贮藏品质。而关于‘黄金梨’外源补钙对其光合性能和成熟期品质影响的研究鲜有报道。因此, 本试验通过在‘黄金梨’幼果期进行喷氨基酸钙和硝酸钙处理, 研究喷钙对‘黄金梨’叶片光合荧光以及果实品质的影响, 为合理调控‘黄金梨’钙素营养提供科学依据。

收稿 2017-11-24 修定 2018-03-02

资助 梨优质高效生产关键技术集成示范与推广项目(2014-BAD16B03-4)和山东省现代农业产业技术体系果品创新团队项目(SDAIT-06-01)。

* 共同通讯作者: 高东升(dsgao@sdau.edu.cn)、李玲(lilingsdau@163.com)。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验于2016年4月在新泰市汶南镇北鲍村梨园进行, 园内土壤为棕壤, pH值6.67, 有机质含量 $14.62 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 碱解氮 $75.4 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 速效磷 $35.46 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 速效钾 $251.36 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 果树栽植密度为 $3 \text{ m}\times 3 \text{ m}$ 。供试品种为12年生‘黄金梨’ [*Pyrus pyrifolia* (Burm. f.) Nakai cv. Whangkeumbae], 选取生长状况良好、结果正常且树势基本一致的梨树进行试验。

试验共设3个处理: (1)喷施0.5%氨基酸钙溶液(T1); (2)喷施0.5%硝酸钙(T2); (3)喷清水(CK)。随机区组试验设计, 3次重复, 3棵为一小区。于花后2周左右开始进行第一次喷施处理, 以后每隔10 d喷施一次, 连续喷3次。喷施时间选在傍晚17:00以后; 着重喷施叶片和果实, 以叶片和果面滴水为限。

于6月上旬左右测定叶片的叶绿素含量、光合气体交换参数和叶绿素荧光参数, 到成熟期对果实进行采样, 挑选大小均匀、无机械损伤和无病虫害的果实带回实验室, 部分用去离子水洗净, 解析出果皮和果肉, 105°C 杀青, 75°C 烘干, 用于测定钙含量; 另取果样用于各项品质指标和酶活的测定。

1.2 测定指标及方法

1.2.1 叶绿素含量的测定

采用TYS-A型叶绿素测定仪测定, 各处理选取树冠外围新梢中部生长一致的功能叶10片, 测定叶绿素相对含量(soil and plant analyzer development, SPAD), 取平均值, 重复3次。

1.2.2 光合参数的测定

采用CIRAS-3型便携式光合仪(PP-Systems, 美国), 选择晴朗无云的天气, 各处理选取树冠外围新梢上生长一致、受光方向一致且完全展开的中部叶片, 于上午9:00~11:00, 测定 P_n 、蒸腾速率(T_r)、气孔导度(G_s)和胞间 CO_2 浓度(C_i)。测定时采用LED红蓝光源, 光强设为 $1\ 200 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$; 采用开放式气路系统, 叶室温度为 25°C 。

1.2.3 叶绿素荧光参数的测定

采用英国Hansatech公司的FMS-2型便携脉冲调制式荧光仪测定, 先测定光下稳态荧光(F_s)、最大荧光(F_m'), 然后叶片经暗适应20 min后测量初始荧光(F_0)、最大荧光(F_m)和PSII原初光能转化效率

(F_v/F_m), 经计算得到PSII实际光化学效率(Φ_{PSII})和光化学淬灭系数(q_p): $q_p=(F_m'-F_s)/(F_m'-F_0')$; $\Phi_{\text{PSII}}=(F_m'-F_s)/F_m'$; F_v/F_m' 代表PSII的天线转换效率。

1.2.4 钙含量的测定

果实钙含量先用 $\text{HNO}_3\text{-HClO}_4$ (4:1)消煮, 再用原子吸收分光光度计测定。

1.2.5 果实品质指标的测定

果实品质指标参照曹建康等(2007)的方法, 略有改动; 果实硬度采用GY-3型果实硬度计测定; 可溶性固形物(total soluble solids, TSS)用手持折光仪(LYT-330)测定; 总糖含量用蒽酮-硫酸比色法测定; 总酸采用酸碱中和滴定法测定; 糖酸比值用总糖和总酸结果进行计算; 维生素C采用2,6-二氯靛酚法测定。

1.2.6 细胞壁酶活的测定

果实中多聚半乳糖醛酸酶(polygalacturonase, PG)、纤维素酶(cellulase, CX)活性的测定方法参考曹建康等(2007), β -半乳糖苷酶(β -galactosidase, β -Gal)活性参照Wei等(2010)的方法进行测定。对于PG活性, 以1 h内产生 $1 \mu\text{g}$ 半乳糖醛酸表示一个酶活性单位(U); 对于CX活性, 以1 h内产生 $1 \mu\text{g}$ 还原糖来表示一个酶活性单位(U); 对于 β -Gal活性, 以1 h内产生 $1 \mu\text{mol}$ 硝基酚表示一个酶活性单位(U)。

1.3 数据处理

采用Excel 2007和SPSS 20.0进行数据处理与统计分析, 用Graphpad Prism 6作图。

2 实验结果

2.1 不同钙处理对‘黄金梨’叶片叶绿素含量的影响

叶绿素是植物进行光合作用的物质基础, 是果树高产的重要指标, 测定结果(图1)表明, 喷施氨基酸钙和硝酸钙的‘黄金梨’叶片的SPAD值与对照(CK)相比差异显著, 分别提高了13.3%和8.3%, 硝酸钙略低于氨基酸钙。

2.2 不同钙处理对‘黄金梨’叶片光合参数的影响

测定结果表明(表1), 喷施氨基酸钙的‘黄金梨’叶片 P_n 、 T_r 、 G_s 与对照相比差异显著, 分别提高了11.5%、12.6%、7.8%。喷施硝酸钙的处理效果明显, 略低于氨基酸钙, P_n 、 T_r 、 G_s 比对照提高了7.3%、7.8%、6.2%。各处理间的 C_i 差异并不显著。

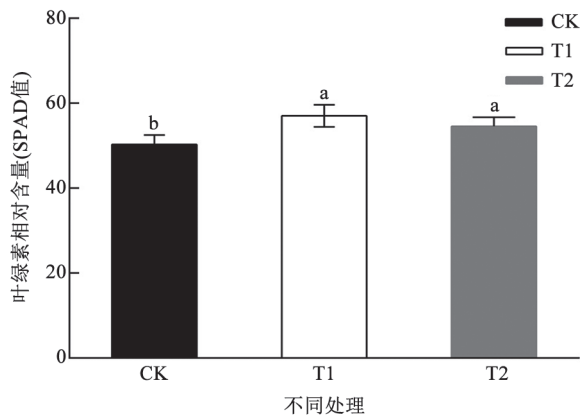


图1 喷施钙对‘黄金梨’叶片叶绿素相对含量的影响

Fig.1 Effect of spraying calcium on relative chlorophyll content of ‘Whangkeumbae’ pear

同一指标数据用不同小写字母标识表示数据间差异显著($P < 0.05$), 下同。

2.3 不同钙处理对‘黄金梨’叶片荧光参数的影响

从表2中可看出, 喷施氨基酸钙及硝酸钙处理的‘黄金梨’叶片的 Φ_{PSII} 都高于对照, 均达显著水平, 以氨基酸钙效果最好, 与对照相比提高了9.8%, 可能是增加了PSII的开放程度。喷施氨基酸钙的叶片

q_P 显著高于对照; 而喷施硝酸钙处理的略有提高, 与对照相比差异不显著, 两者分别比对照提高了4.6%和2.8%。喷施氨基酸钙的 F_v'/F_m' 比对照提高了5.0%, 比施硝酸钙高0.8%。氨基酸钙处理的叶片PSII最大光化学效率(F_v'/F_m')与对照相比差异显著, 硝酸钙也能提高PSII的 F_v'/F_m' 值, 二者分别比对照提高了11.6%和6.4%。

2.4 不同钙处理对‘黄金梨’果实总钙含量的影响

喷施氨基酸钙和硝酸钙均可显著增加成熟期果实钙含量(图2), 以氨基酸钙的增加作用效果最好, 果皮和果肉钙含量分别比对照高30.6%和23.4%; 硝酸钙处理的果皮、果肉钙含量分别比对照高23.8%和18.0%。此外可以看出, 果皮钙含量高于果肉。

2.5 不同钙处理对‘黄金梨’果实品质的影响

由表3可知, 喷施氨基酸钙和硝酸钙处理的‘黄金梨’果实硬度显著高于对照, 喷施氨基酸钙的果实硬度最高, 为 $5.63 \text{ kg} \cdot \text{cm}^{-2}$, 比对照提高14.9%, 比硝酸钙高2.9%。喷施氨基酸钙处理果实中TSS含量显著高于对照, 为11.6%, 与对照相比提高了7.1%, 施硝酸钙处理与对照相比差异并不显著。喷施氨

表1 喷施钙对‘黄金梨’叶片光合参数的影响

Table 1 Effect of spraying calcium on photosynthetic parameters of ‘Whangkeumbae’ pear leaves

处理	$P_n/\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$	$T_r/\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$	$G_p/\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$	$C_i/\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$
CK	10.97 ± 0.31^b	6.93 ± 0.15^b	429.33 ± 5.51^c	276.67 ± 5.51^a
T1	12.23 ± 0.35^a	7.80 ± 0.26^a	462.67 ± 7.09^a	285.00 ± 5.57^a
T2	11.77 ± 0.25^a	7.47 ± 0.45^{ab}	446.00 ± 7.00^b	281.33 ± 10.50^a

表2 喷施钙对‘黄金梨’叶片叶绿素荧光参数的影响

Table 2 Effect of spraying calcium on chlorophyll fluorescence parameters of ‘Whangkeumbae’ pear leaves

处理	Φ_{PSII}	F_v'/F_m'	q_P	F_v'/F_m'
CK	0.572 ± 0.021^b	0.638 ± 0.010^c	0.824 ± 0.019^b	0.694 ± 0.011^b
T1	0.628 ± 0.015^a	0.712 ± 0.010^a	0.862 ± 0.022^a	0.729 ± 0.014^a
T2	0.613 ± 0.011^a	0.679 ± 0.021^b	0.847 ± 0.005^{ab}	0.723 ± 0.012^a

表3 喷施钙对‘黄金梨’果实品质的影响

Table 3 Effect of spraying calcium on fruit quality of ‘Whangkeumbae’ pear

处理	硬度/ $\text{kg} \cdot \text{cm}^{-2}$	TSS含量/%	总糖含量/%	总酸含量/%	糖酸比	维生素C含量/ $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$
CK	4.90 ± 0.26^b	10.83 ± 0.35^b	8.12 ± 0.18^b	0.22 ± 0.02^a	37.06 ± 2.55^c	30.0 ± 1.0^c
T1	5.63 ± 0.35^a	11.60 ± 0.26^a	9.04 ± 0.19^a	0.16 ± 0.02^b	55.57 ± 3.94^a	37.7 ± 1.5^a
T2	5.47 ± 0.21^a	11.50 ± 0.44^{ab}	8.80 ± 0.18^a	0.18 ± 0.01^b	48.95 ± 1.75^b	33.3 ± 1.5^b

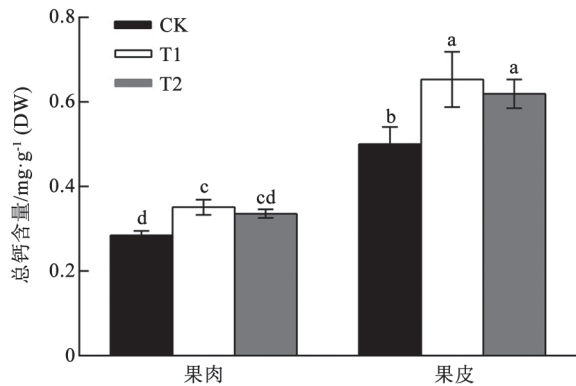


图2 喷施钙对‘黄金梨’果实总钙含量的影响

Fig.2 Effect of spraying calcium on total calcium content in ‘Whangkeumbae’ pear fruits

基酸钙与硝酸钙的总糖含量差异较小, 但均高于对照; ‘黄金梨’果实总酸含量以氨基酸钙处理最低, 为0.16%, 比对照降低了27.0%; 各处理间糖酸比差异显著, $T1 > T2 > CK$; 钙处理能显著提高果实维生素C含量, 氨基酸钙处理显著高于硝酸钙, 两者与对照相比分别提高了25.7%和11.0%。

2.6 不同钙处理对‘黄金梨’果实细胞壁水解酶活性的影响

如图3所示, 不同钙处理中果实的PG活性均低于对照, 各处理之间的差异显著, 氨基酸钙处理的PG活性最低。喷钙处理可以显著降低果实的CX和 β -Gal活性, 氨基酸钙处理的酶活低于硝酸钙, 但差异不显著, CX和 β -Gal活性分别比对照降低了24.2%和34.0%。说明幼果期喷钙对成熟期果实的细胞壁水解酶活性有降低作用, 从而对延长果实

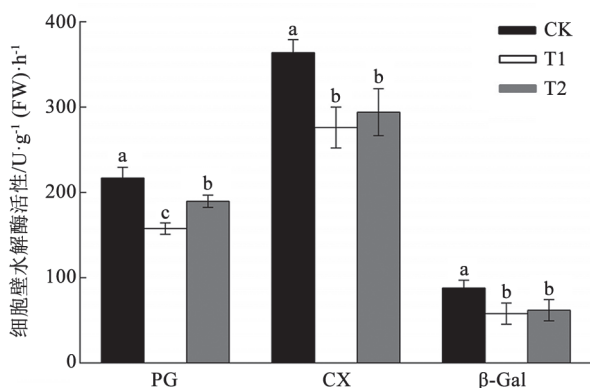


图3 喷施钙对‘黄金梨’果实细胞壁水解酶活性的影响

Fig.3 Effects of spraying calcium on activities of cell-wall hydrolases in ‘Whangkeumbae’ pear

贮藏期、提高果实品质起到了一定的作用, 喷施氨基酸钙效果最佳。

3 讨论

光合作用是植物生长发育和产量形成的基础, 钙作为信号物质参与植物的光合作用电子传递和光合磷酸化等生理生化过程, 对植物的光合作用有着重要的作用。一般认为, 外源钙可以增加叶片中的叶绿素含量(杜保伟等2014; 万庆等2014), 从而促进光合速率的提高。在本试验条件下, 喷钙可以提高‘黄金梨’叶片的SPAD、 P_n 、 T_r 和 G_s , 这与李贺等(2013)在大蒜(*Allium sativum*)上的研究结果相似。

荧光参数对研究植物光合作用过程中的光能吸收、传递等有重要意义(李中勇等2013), 当环境条件变化时, 叶绿素荧光的变化可以在一定程度上反映环境因子对植物光合的影响(Jiang等2003)。张振兴等(2011)证明 Ca^{2+} 可有效降低盐胁迫对西瓜(*Citrullus lanatus*)幼苗光合作用的气孔限制, 缓解盐胁迫对光合器官的伤害, 使叶片保持较高的光合性能。从本试验结果看, Φ_{PSII} 、 F_v/F_m' 、 q_p 和 F_v/F_m 都随 Ca^{2+} 的喷施而有显著提高, 表明在一定水平范围内, 钙含量的提高可增加光合电子传递和提高光化学速率, 使叶片吸收的光能充分地用于光合作用, 提高叶绿素荧光产额, 增加PSII的天线色素对光能的捕获量。氨基酸钙与硝酸钙相比, 可能通过参与碳代谢, 进一步促进树体的光合作用调节代谢。

钙营养对于果实品质的影响一直是研究的重点, 果实钙含量的高低是决定果实品质的重要因素之一(关军锋和Saure 2005)。赵晓梅等(2012)认为采前喷钙对抑制‘库尔勒香梨’果实质量损失, 防止果实内总酸、TSS以及维生素C含量变化, 保持果实硬度具有一定的积极作用。管雪强等(2014)则认为外源喷钙显著提高了‘红地球’葡萄叶柄和果实各部位的钙含量, 喷施糖醇钙在不同程度上降低了TSS含量, 而喷施硝酸钙在不同程度上提高了果实TSS含量。王雷等(2016)在研究喷施钙对‘肥城桃’(*Prunus persica*)果实活性钙含量及其在亚细胞分布的影响中发现, 氨基酸钙和硝酸钙能提高果实全钙尤其是水溶性钙及果胶钙的含量, 增加细胞壁钙的分布和‘肥城桃’果肉的不溶性果

胶含量, 提高果实硬度。王瑞等(2015)研究发现生长期喷施有机钙可减缓蓝莓(*Vaccinium* spp.)果实衰老, 改善贮藏品质和延长贮藏期。本试验中, 喷施氨基酸钙和硝酸钙显著提升了果实成熟期的 Ca^{2+} 含量, 增加了果实硬度, 这与前人的研究结果一致。钙处理同时提高了‘黄金梨’果实的TSS含量和糖酸比, 这与张利云等(2014)在甜瓜(*Cucumis melo*)上的研究结果一致, 且维生素C含量显著提升。氨基酸钙的处理效果优于硝酸钙, 可能是由于氨基酸钙中的 Ca^{2+} 以螯合态的形式存在, 螯合钙电荷趋于中性, 穿过叶片角质层的速度比无机离子快, 利用率高(沈欣等2016)。此外, 氨基酸钙与硝酸钙相比, 富含氨基酸, 改善了树体的营养状况, 提高了叶片的光合能力, 促进了同化物的积累, 果实发育所需的营养得到充足供应, 品质大幅度提升。

细胞壁相关物质的变化对果实的口感和后熟软化等都具有重要影响, 果实中PG、CX和 β -Gal等水解酶共同作用引起果胶物质的聚合溶解, 导致细胞壁结构和组分发生变化, 并影响果实硬度, 发生软化(Mielnik等2006)。温明霞和石孝均(2013)认为外源喷钙能显著降低果实膨大期的裂果率, 果皮中多酚氧化酶(polyphenol oxidase, PPO)、PG、CX的活性得以降低。欧志锋等(2013)在研究采前喷钙对‘红富士’苹果果实品质及贮藏性能的影响中发现, 采前喷钙处理的果实硬度以及PG和CX活性显著低于对照。本试验中不同钙处理果实的PG、CX和 β -Gal活性均显著低于对照, 与前人研究结果一致。这可能是由于果实内钙含量的提高, 促进了其与细胞壁多糖和蛋白质的结合, 保持了细胞壁的完整性, 从而抑制细胞壁水解酶的活性。

综上, ‘黄金梨’幼果期外源喷钙可以显著提高叶片的光合性能, 促进果实对 Ca^{2+} 的吸收, 同时提高成熟期果实的TSS、总糖和维生素C含量, 降低可滴定酸含量, 抑制细胞壁水解酶活性, 改善果实品质; 喷施氨基酸钙优于硝酸钙。

参考文献(References)

- Cao J, Jiang W, Zhao Y (2007). Experiment Guidance of Post-harvest Physiology and Biochemistry of Fruits and Vegetables. Beijing: China Light Industry Press (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]
- Chen L, Wang X, Liu M, et al (2016). Effects of calcium and ABA on photosynthesis and related enzymes activities in cucumber seedlings under drought stress. Chin J Appl Ecol, 27 (12): 3996–4002 (in Chinese with English abstract) [陈露露, 王秀峰, 刘美等(2016). 钙与脱落酸对干旱胁迫下黄瓜幼苗光合及相关酶活性的影响. 应用生态学报, 27 (12): 3996–4002]
- Du BW, Fang Q, Hu YH, et al (2014). Effect of spraying CaCl_2 on characters of peach strain ‘3-18’ leaves. North Hortic, (24): 21–24 (in Chinese with English abstract) [杜保伟, 方庆, 胡月华等(2014). 叶面喷钙对‘3-18’桃叶片性状的影响. 北方园艺, (24): 21–24]
- Fang Q, Du BW, Jue C (2014). Effect of spraying CaCl_2 on the physiological indices of peach variety ‘Qiutian’ leaves. Acta Horti Abstr, 30 (12): 13–15 (in Chinese with English abstract) [方庆, 杜保伟, 决超(2014). 叶面喷钙对‘秋甜’桃叶片生理指标的影响. 中国园艺文摘, 30 (12): 13–15]
- Guan J, Saure M (2005). Calcium Nutrition and Physiology of Fruit Trees. Beijing: Science Press, 2 (in Chinese) [关军锋, Saure M (2005). 果树钙素营养与生理. 北京: 科学出版社, 2]
- Guan XQ, Yang Y, Wang HZ, et al (2014). Effects of spraying calcium on contents of calcium and pectin and fruit quality of Red Globe Grape. J Plant Nutr Fert, 20 (1): 179–185 (in Chinese with English abstract) [管雪强, 杨阳, 王恒振等(2014). 喷钙对红地球葡萄果实钙、果胶含量和品质的影响. 植物营养与肥料学报, 20 (1): 179–185]
- Henriksson E, Henriksson KN (2005). Salt-stress signaling and the role of calcium in the regulation of the *Arabidopsis* *ATHB7* gene. Plant Cell Environ, 28 (2): 202–210
- Hepler PK (2005). Calcium: a central regulator of plant growth and development. Plant Cell, 17 (8): 2142–2155
- Jiang CD, Gao HY, Zou Q (2003). Changes of donor and acceptor side in photosystem 2 complex induced by iron deficiency in attached soybean and maize leaves. Photosynthetica, 41 (2): 267–271
- Li H, Liu SQ, Wang Y, et al (2013). Effects of calcium on photosynthetic characteristics and quality of garlic. Acta Horti Sin, 40 (6): 1169–1177 (in Chinese with English abstract) [李贺, 刘世琦, 王越等(2013). 钙对水培大蒜光合特性和品质的影响. 园艺学报, 40 (6): 1169–1177]
- Li H, Sun YL, Liu SQ, et al (2015). Effects of exogenous calcium on physiological characteristics and qualities of garlic under cadmium stress. Acta Horti Sin, 42 (2): 377–385 (in Chinese with English abstract) [李贺, 孙亚丽, 刘世琦等(2015). 增施钙对镉胁迫下大蒜生理特性及品质的影响. 园艺学报, 42 (2): 377–385]
- Li X (2005). Study on post-harvest physiology and storage technology of Whangkeumbae (dissertation). Baoding: Agricultural University of Hebei (in Chinese with English abstract) [李湘利(2005). 黄金梨采后生理及贮藏技术研究(学位论文). 保定: 河北农业大学]

- Li ZY, Zhang Y, Han LH, et al (2013). The interactive effects of nitrogen and calcium on photosynthetic characteristics and chlorophyll fluorescence parameters of nectarine under protected culture. *J Plant Nutr Fert*, 19 (4): 893–900 (in Chinese with English abstract) [李中勇, 张媛, 韩龙慧等(2013). 氮钙互作对设施栽培油桃叶片光合特性及叶绿素荧光参数的影响. *植物营养与肥料学报*, 19 (4): 893–900]
- Mielnik MB, Olsen E, Vogt G, et al (2006). Grape seed extract as antioxidant in cooked, cold stored turkey meat. *LWT-Food Sci Technol*, 39 (3): 191–198
- Raese JT, Drake SR (2006). Calcium foliar sprays for control of alfalfa greening, cork spot, and hard end in ‘Anjou’ pears. *J Plant Nutr*, 29 (3): 543–552
- Shen X, Yuan L, Li YT, et al (2016). Application of small molecular organics chelated calcium fertilizer. *China Soils Fert*, (3): 87–92 (in Chinese with English abstract) [沈欣, 袁亮, 李燕婷等(2016). 小分子有机物质螯合钙肥的应用效果. *中国土壤与肥料*, (3): 87–92]
- Sun KX, Yang S, Guo F, et al (2015). Effects of exogenous calcium on photosynthetic characteristics of sweet pepper (*Capsicum frutescens* L.) seedlings. *Plant Physiol J*, 51 (3): 280–286 (in Chinese with English abstract) [孙克香, 杨莎, 郭峰等(2015). 高温强光胁迫下外源钙对甜椒 (*Capsicum frutescens* L.) 幼苗光合生理特性的影响. *植物生理学报*, 51 (3): 280–286]
- Tan LY, Ma HN (2017). Advance in the research of plant in response to calcium ions stress. *Plant Physiol J*, 53 (7): 1150–1158 (in Chinese with English abstract) [檀龙颜, 马洪娜(2017). 植物响应钙离子胁迫的研究进展. *植物生理学报*, 53 (7): 1150–1158]
- Wang L, Li L, Chen XD, et al (2016). Effect of foliar Ca spraying on calcium dynamics, fractions and subcellular distribution of pulp cells of Feicheng peach. *J Plant Nutr Fert*, 22 (4): 1102–1110 (in Chinese with English abstract) [王雷, 李玲, 陈修德等(2016). 喷施钙对肥城桃果活性钙含量及其在亚细胞分布的影响. *植物营养与肥料学报*, 22 (4): 1102–1110]
- Wang LL, Liu C, Huang YH, et al (2014). Effects of postharvest heat and calcium treatments on calcium fractions and cell wall metabolism of ‘Huangguan’ pear fruit. *Acta Horti Sin*, 41 (2): 249–258 (in Chinese with English abstract) [王玲利, 刘超, 黄艳花等(2014). ‘黄冠’梨采后热处理和钙处理对其钙形态及细胞壁物质代谢的影响. *园艺学报*, 41 (2): 249–258]
- Wang R, Hu XL, Xie GF, et al (2015). Study on the effect of organic calcium spray on the preservation of blueberry fruit during the growth period. *Mod Food Sci Technol*, 31 (6): 211–218 (in Chinese with English abstract) [王瑞, 胡旭林, 谢国芳等(2015). 生长期喷施有机钙对蓝莓鲜果的保鲜作用研究. *现代食品科技*, 31 (6): 211–218]
- Wang YL, Lu GL, Zhang XF, et al (2016). Effects of preharvest calcium treatment on the storage characteristics of hard-end Whangkeumbae pear fruits and the expression of *PpEX-PA2*. *Mod Food Sci Technol*, 32 (2): 53–59 (in Chinese with English abstract) [王玉玲, 路贵龙, 张新富等(2016). 采前钙处理对黄金梨果顶硬化果实贮藏特性及 *PpEXPA2* 基因表达的影响. *现代食品科技*, 32 (2): 53–59]
- Wei J, Ma F, Shi S, et al (2010). Changes and postharvest regulation of activity and gene expression of enzymes related to cell wall degradation in ripening apple fruit. *Postharv Biol Technol*, 56 (2): 147–154
- Wen M, Shi X (2013). Improve fruit quality and prolong storage time of Jincheng orange by calcium sprayed in growth period. *Trans Chin Soc Agr Eng*, 29 (5): 274–281 (in Chinese with English abstract) [温明霞, 石孝均(2013). 生长期喷钙提高锦橙果实品质及延长贮藏期. *农业工程学报*, 29 (5): 274–281]
- Xu CS (2014). Effects of calcium on biomass and antioxidant systems in seedlings of *Malus xiaojinensis* under salt stress. *Plant Physiol J*, 50 (6): 817–822 (in Chinese with English abstract) [徐臣善(2014). 钙对盐胁迫下小金海棠幼苗生物量及抗氧化系统的影响. *植物生理学报*, 50 (6): 817–822]
- Xu LC, Yi YL, Zhou XY (2013). Effect of calcium and phosphorus interaction on photosynthesis and defense enzyme activity of tomato. *North Horti*, (9): 190–193 (in Chinese with English abstract) [徐龙超, 依艳丽, 周晓阳(2013). 钙、磷平衡对番茄光合作用特性及防御酶活性的影响. *北方园艺*, (9): 190–193]
- Zhang LY, Liu HH, Zhang YP, et al (2014). Effects of calcium nitrate on leaf senescence in fruiting nodes and yield and quality of fruits of muskmelon. *J Plant Nutr Fert*, 20 (2): 490–495 (in Chinese with English abstract) [张利云, 刘海河, 张彦萍等(2014). 硝酸钙对厚皮甜瓜坐果节叶片衰老及果实产量和品质的影响. *植物营养与肥料学报*, 20 (2): 490–495]
- Zhang ZX, Sun J, Guo SR, et al (2011). Effects of supplemental calcium on the photosynthetic characteristics and fruit quality of watermelon under salter stress. *Acta Horti Sin*, 38 (10): 1929–1938 (in Chinese with English abstract) [张振兴, 孙锦, 郭世荣等(2011). 钙对盐胁迫下西瓜光合特性和果实品质的影响. *园艺学报*, 38 (10): 1929–1938]
- Zhao XM, Ye K, Wu YP, et al (2012). Effect of preharvest calcium spray on *Pyrus bretschneideri* Rehd storage. *Food Sci Technol*, 37 (3): 58–63 (in Chinese with English abstract) [赵晓梅, 叶凯, 吴玉鹏等(2012). 采前喷钙对库尔勒香梨贮藏品质和矿质营养的影响. *食品科技*, 37 (3): 58–63]
- Zheng QL, Tan W, Ma N, et al (2010). Effects of calcium on photosynthesis and chlorophyll fluorescence of ‘Kyoho’ grape under high temperature stress. *Sci Agr Sin*, 43 (9): 1963–1968 (in Chinese with English abstract) [郑秋玲, 谭伟, 马宁等(2010). 钙对高温下巨峰葡萄叶片光合作

用和叶绿素荧光的影响. 中国农业科学, 43 (9): 1963–1968]

Zhou HW, Feng X (1991). Polyphenol oxidase from Yali pear (*Pyrus bretschneideri*). *J Sci Food Agric*, 57 (3): 307–313

Zhou W, Wang H (2007). The physiological and molecular

mechanisms of calcium uptake, transport, and metabolism in plants. *Chin Bull Bot*, 24 (6): 762–778 (in Chinese with English abstract) [周卫, 汪洪(2007). 植物钙吸、收转运及代谢的生理和分子机制. 植物学通报, 24 (6): 762–778]

Effect of exogenous calcium on leaf photosynthetic characteristics and fruit quality of ‘Whangkeumbae’ pear

ZHOU Jun, XIAO Wei, CHEN Xiu-De, GAO Dong-Sheng*, LI Ling*

College of Horticulture Science and Engineering, Shandong Agricultural University; State Key Laboratory of Crop Biology; Shandong Collaborative Innovation Center for Fruit and Vegetable Production with High Quality and Efficiency, Taian, Shandong 271018, China

Abstract: The effects of spraying calcium amino acid and calcium nitrate on leaf photosynthetic characteristics and fruit quality of 12 years old ‘Whangkeumbae’ pear (*Pyrus pyrifolia* cv. Whangkeumbae) tree before harvest were investigated to provide the theoretical basis and technological approach for adding calcium nutrient and improving fruit quality. The results show that: (1) photosynthetic efficiency was significantly increased after spraying calcium on ‘Whangkeumbae’ pear trees in young fruit period. SPAD, P_n , T_p , G_s , Φ_{PSII} , q_p , F_v'/F_m' and F_v/F_m under treatment of calcium amino acid and calcium nitrate solutions were improved by 13.3% and 8.3%, 11.5% and 7.3%, 12.6% and 7.8%, 7.8% and 6.2%, 9.8% and 7.2%, 11.6% and 6.4%, 4.6% and 2.8%, 5.0% and 4.2%, respectively, higher than those of the control. The effect of amino acid calcium treatment was the best. (2) For the quality of fruit, spraying calcium could increase the calcium content and fruit firmness of pear fruit. Compared to the control, soluble solids content, ratio of sugar to acid and vitamin C content of ‘Whangkeumbae’ pear fruit under treatment of calcium amino acid and calcium nitrate solutions were enhanced by 11.6% and 6.2%, 49.9% and 32.1%, 25.7% and 11.0%, respectively. Meanwhile, the activities of polygalacturonase (PG), cellulose (CX) and β -galactosidase (β -Gal) under different calcium treatments were decreased. Calcium treatment could improve the fruit quality, and the effects of amino acid calcium treatment were better than those of calcium nitrate. Therefore, spraying calcium (especially calcium amino acid) on ‘Whangkeumbae’ pear trees in young fruit period were the important measures to increase calcium nutrient, as well as improve the photosynthetic characteristics and fruit quality, which can be applied and promoted in production.

Key words: calcium; ‘Whangkeumbae’ pear; photosynthetic characteristics; quality

Received 2017-11-24 Accepted 2018-03-02

This work was supported by the Key Technology Integration, Demonstration and Promotion of High Quality and Efficiency of Pear Production (2014BAD16B03-4), and Shandong Province Modern Agricultural Technology System Fruit Innovation Team (SDAIT-06-01).

*Co-corresponding authors: Gao DS (dsgao@sdau.edu.cn), Li L (lilingsdau@163.com).