

doi: 10.11838/sfsc.20170314

# 叶面喷施 Ca 和 Mg 肥影响三月红荔枝果皮着色的初步机理

高丹, 李世军, 王展, 周开兵\*

(海南大学园艺园林学院, 海南 海口 570228)

**摘要:** 以三月红荔枝 (*Litchi chinensis* Sonn. cv Sanyuehong) 成年树为试材, 以叶面喷施 Ca、Mg 肥以及它们的混合液为处理, 以清水为对照 (CK), 探讨叶面喷施 Ca 和 Mg 肥对三月红荔枝果皮着色影响的初步机理。结果表明, 叶面喷施不同的肥料可以明显提高果皮同种矿质元素的含量; 不同处理和 CK 的果皮水溶性 K 含量与全 Ca 含量、水溶性 K 含量与全 Mg 含量、水溶性 Mg 含量与全 Ca 含量以及全 Ca 含量与全 Mg 含量的偏相关系数均达到显著水平, 水溶性和全量 K、Ca 和 Mg 含量之一分别与其余 5 种含量间的复相关系数达到极显著水平; Ca + Mg 处理解决了三月红荔枝果皮“滞绿”问题, Mg 处理解决了三月红荔枝果肉“退糖”问题; Mg 处理和 CK 的果皮水溶性 Mg 含量较高, 是促进其果皮红色着色的主导因素, Ca 处理的果皮全 Ca 含量较高, 是促进其果皮红色着色的主导因素, Ca + Mg 处理的果皮水溶性 Mg 含量以及全 Ca 含量较高, 是促进其果皮红色着色的主导因素; 不同处理和 CK 的果皮全 Mg、水溶性 Ca、全 Ca 含量均与其花色苷含量呈正相关指数函数回归关系, 不同处理和 CK 的果皮水溶性 Ca 含量均与叶绿素含量呈负相关指数函数关系。可见, 在三月红荔枝果皮着色发育过程中, Ca 和 Mg 元素具有增益作用, 不同的施肥处理通过提高 Ca、Mg 元素的含量而促进果皮着色。

**关键词:** 三月红荔枝; 叶面肥; Ca; Mg; 果皮着色

**中图分类号:** S145.2

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1673-6257 (2017) 03-0080-09

三月红荔枝 (*Litchi chinensis* Sonn. cv Sanyuehong) 为无患子科 (*Sapindaceae*) 荔枝属 (*Litchi*) 热带亚热带常绿果树, 是我国重要的早熟品种<sup>[1]</sup>。但三月红荔枝的果皮着色与果肉风味变佳发育不同步, 当果肉风味品质达最佳时, 果皮尚未完全着色; 当果皮全红时, 果肉风味品质口感又偏酸<sup>[2]</sup>, 即分别出现了类似妃子笑荔枝果实的“滞绿”和“退糖”现象<sup>[2-6]</sup>, 从而降低其商品价值。施肥促进果皮着色的研究在梨<sup>[7]</sup>、苹果<sup>[8]</sup>、葡萄<sup>[9]</sup>等树种上均有报道, 但目前有关荔枝果皮着色的研究主要集中在套袋和化学调控, 而叶面喷施肥促进三月红荔枝果皮着色的调控机理鲜有报道。笔者所在课题组已报道, 在三月红荔枝和妃子笑荔枝果实膨大期经叶面喷施 Ca 和 Mg 肥可以促进果皮着色, 进而提出有可能解决其果皮着色和果肉风味品质发育不同步的问题<sup>[10-12]</sup>。本文通过连续两年对三月红荔枝在果实稳果后进行叶面喷施 Ca 和 Mg 单一肥及其混

合肥等处理, 为了探究果皮 Ca、Mg 含量对果皮着色影响的初步机理, 为制定三月红合理施肥技术提供参考依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地点和材料

试验地点为海南省荔枝沟农场, 该农场位于三亚市吉阳镇, 属热带海洋性季风气候区, 年平均气温 25.7 °C, 全年日照时间 2 534 h, 年平均降水量 1 347.5 mm, 终年无霜; 土壤为肥沃的砖红壤。在该基地荔枝园选 16 年生、生长势一致和无任何不良表现三月红荔枝本砧嫁接树 12 株作为试验材料。

### 1.2 试验设计方法

以叶面喷清水为对照 (CK), 依据 Ca 和 Mg 的氯化物在果树上用于叶面喷肥时的常用浓度, 设置如下 3 个处理水平: 1.5% MgCl<sub>2</sub> (Mg) 溶液、0.3% CaCl<sub>2</sub> (Ca) 溶液和 2 种氯化物上述浓度的混合溶液。试验中 Ca 和 Mg 肥均采用氯化物是为了避免不同阴离子影响对试验结果分析产生干扰。单株小区, 重复 3 次。在稳果后至果实进入成熟期前进行叶面喷肥处理, 共 3 次。叶面喷肥处理分别在

收稿日期: 2016-03-23; 最后修订日期: 2016-08-02

基金项目: 国家自然科学基金项目 (31160383)。

作者简介: 高丹 (1990-), 女, 山东威海人, 硕士研究生, 从事果树栽培生理研究。E-mail: 1179113660@qq.com。

通讯作者: 周开兵, E-mail: kaibingzhou0528@163.com。

2015年3月22日、25日和29日的9:00~10:00进行。

### 1.3 试验指标及其测定方法

#### 1.3.1 取样及样品处理方法

刚进入果实膨大期时(假种皮刚刚包满种子时,即2015年3月22日),在每株树树冠外围中部选5个大小基本一致的果实作为每次取样的标准果,并挂牌标记,此后在不同时期动态采样时均参照这5个标准果纵、横径的平均值,采集与其果径一致的样果。从果实开始膨大到果皮全红时为止,在3月22、25、29日,4月1、5、8、12和15日各取样1次,其中3月22、25和29日取样均在叶面喷肥处理之前完成。果样取自树冠中部外围,每次取样采果30个/株。在田间将样果立即用液氮速冻,带回实验室后,取出样果并趁冻先测定果皮着色指标,然后剥皮,及时趁冻将果皮和果肉研磨成颗粒,按不同样树分装混匀的果皮和果肉颗粒样品,贮放于-80℃超低温冰箱中备用。

#### 1.3.2 果皮K、Ca和Mg含量测定

将果皮样品用自来水冲洗干净后,再用去离子水漂洗2~3次,放入烘箱。在110℃下杀青15min,在65℃下烘干至恒重,取出研磨成粉末,过0.25mm筛后放入封口塑料袋,置于干燥器中保存备用。称取约0.05g样品(精确至0.0001g),用1mol/L分析纯盐酸溶液震荡过夜,用于测定果皮全K、Ca和Mg含量;称取约0.10g样品(精确至0.0001g),用去离子水震荡过夜,用于测定果皮水溶性K、Ca和Mg含量。两种样品溶液分别过滤后收集其滤液,采用原子吸收分光光度法测定果皮3种营养元素各相应的含量,原子吸收分光光度计为德国进口的耶拿NOVAA400P。

#### 1.3.3 果皮着色指标和果肉可溶性糖含量测定

采用日本产Minolta CR2300型全自动测色色差计测定果顶、果蒂和果胴部位分布均匀的4点果皮a、b值,换算出色度角(h),公式为 $h = \tan^{-1}(b/a)$ ,各观测指标以此6点的平均值作为该样果的观测值,每样树30个样果果皮观测值平均值作为该重复观测值。a、b和h值与颜色的关系如图1所示,其中h值越小则果皮综合色泽越红。采用改良Arnon法测定荔枝果皮叶绿素和类胡萝卜素含量<sup>[13]</sup>;采用Pirie等<sup>[14]</sup>和张昭其等<sup>[15]</sup>提出的方法测定荔枝果皮花色苷含量;采用蒽酮比色法测定荔枝果肉可溶性糖含量<sup>[16]</sup>;采用中和滴定法测定

果肉总酸含量,并换算成柠檬酸含量;针对每测样的可溶性糖和总酸含量求其糖酸比。

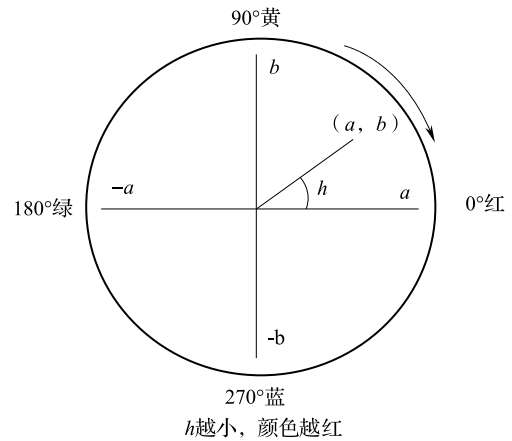


图1 a、b和h值与颜色的关系示意图

### 1.4 统计分析方法

采用SAS软件ANOVA过程作方差分析,采用DUNCAN法作多重比较分析;采用CORR过程作多元线性相关分析;采用CANCORR过程作典型性相关分析;采用REG过程作一元指数函数回归分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 果皮水溶性K、Ca和Mg含量的动态变化特点

#### 2.1.1 果皮水溶性K含量动态变化

由图2可知,从3月22日到3月29日,不同处理和CK的水溶性K含量均显著上升;从3月29日到4月5日,Ca处理无显著变化,其余处理和CK均显著升高;从4月5日到4月8日,各处理和CK均显著降低;从4月8日到4月12日,Ca处理和Ca+Mg处理显著升高,Mg处理和CK无显著变化;从4月12日到4月15日,Ca处理极显著升高,Mg处理和CK显著升高,Ca+Mg处理无显著变化。

由图2还可知,从3月22日到29日,各处理分别与同时期CK差异不显著;在4月1日,Mg处理和Ca+Mg处理显著高于CK,Ca处理与CK无显著差异;在4月5日和4月8日,Mg处理和Ca+Mg处理显著高于CK,Ca处理显著低于CK;在4月12日,Mg处理显著高于CK,Ca+Mg处理极显著高于CK,Ca处理与CK无显著差异;在4月15日,Mg处理和Ca处理显著高于CK,Ca+Mg处理极显著高于CK。由此可知,不同处理均可提高其果皮水溶性K含量。

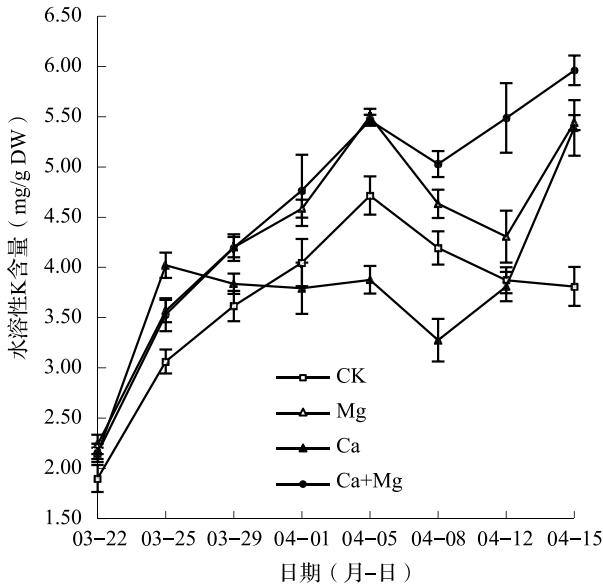


图2 不同处理对果皮水溶性 K 含量的影响

2.1.2 果皮水溶性 Mg 含量动态变化

由图3可知,从3月22日到3月29日,不同处理和CK的水溶性Mg含量均无显著变化;3月29日到4月1日,Mg处理无显著变化,其余处理和CK均显著升高;从4月1日到4月5日,Mg处理显著升高,其余处理和CK无显著变化;从4月5日到4月8日,Ca处理显著降低,其余处理和CK无显著变化;从4月8日到4月12日,Mg处理极显著升高,Ca+Mg处理和CK均显著升高,Ca处理无显著变化;从4月12日到4月15日,各处理和CK均显著升高。

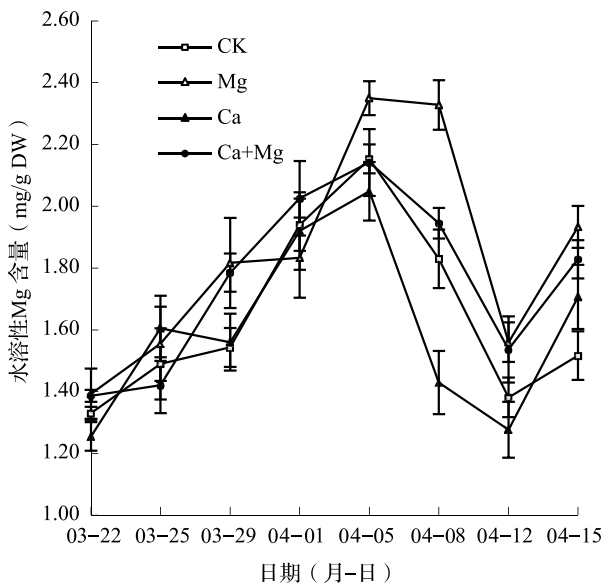


图3 不同处理对果皮水溶性 Mg 含量的影响

由图3还可知,4月5日之前,各处理与其同期CK无显著差异;在4月8日,Mg处理极显著高于CK,Ca处理显著低于CK,Ca+Mg处理与CK差异不显著;在4月12日,Mg处理和Ca+Mg处理显著高于CK,Ca处理与CK无显著差异;在4月15日,Mg处理极显著高于CK,Ca处理和Ca+Mg处理显著高于CK。由此可知,不同处理均可不同程度改变水溶性Mg含量,Mg处理和Ca处理、Ca+Mg处理分别提高果实发育总体和后期的水溶性Mg含量。

2.1.3 果皮水溶性 Ca 含量动态变化

由图4可知,4月1日之前,不同处理和CK的水溶性Ca含量均无显著变化;4月1日到5日,Mg处理显著降低,其余处理和CK均无显著变化;从4月5日到8日,Mg处理和Ca处理极显著升高,CK显著升高,Ca+Mg处理无显著变化;从4月8日到12日,各处理均显著降低;从4月12日到15日,Ca+Mg处理显著升高,其余处理和CK均无显著变化。

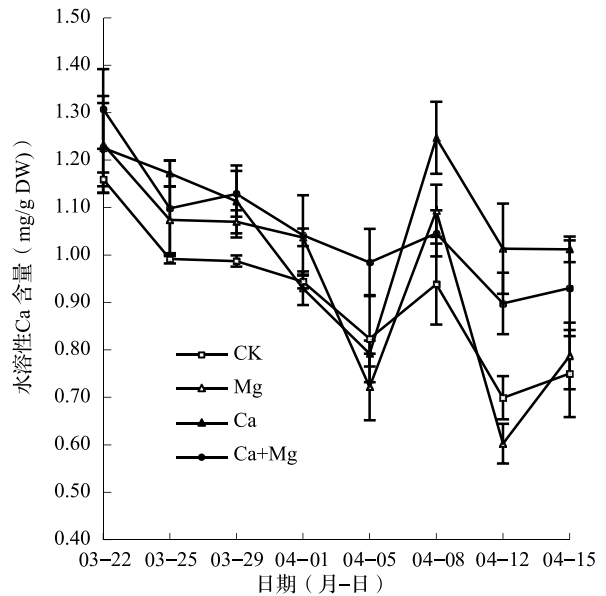


图4 不同处理对果皮水溶性 Ca 含量的影响

由图4还可知,4月5日之前,各处理与其同期CK无显著差异;在4月8日,Mg处理和Ca+Mg处理显著高于CK,Ca处理极显著高于CK;在4月12日和15日,Ca处理极显著高于CK,Ca+Mg处理显著高于CK,Mg处理与CK无显著差异。由此可知,不同处理均可不同程度改变水溶性Ca含量,Mg处理和Ca处理、Ca+Mg处理分别提高果实发育前期和总体的水溶性Ca含量。

## 2.2 果皮全量 K、Ca 和 Mg 含量动态变化

### 2.2.1 果皮全 K 含量动态变化

由图 5 可知, 3 月 29 日之前, 不同处理和 CK 的全 K 含量均无显著变化; 从 3 月 29 日到 4 月 1 日, Ca + Mg 处理显著降低, 其余处理和 CK 无显著变化; 从 4 月 1 日到 5 日, Ca 处理和 Ca + Mg 处理显著升高, Mg 处理和 CK 无显著变化; 从 4 月 5 日到 8 日, Ca 处理和 CK 均显著下降, Ca + Mg 处理极显著下降, Mg 处理无显著变化; 从 4 月 8 日到 12 日, Ca + Mg 处理显著下降, 其余处理和 CK 均显著上升; 从 4 月 12 日到 15 日, Ca 处理和 Ca + Mg 处理极显著上升, Mg 处理和 CK 极显著下降。

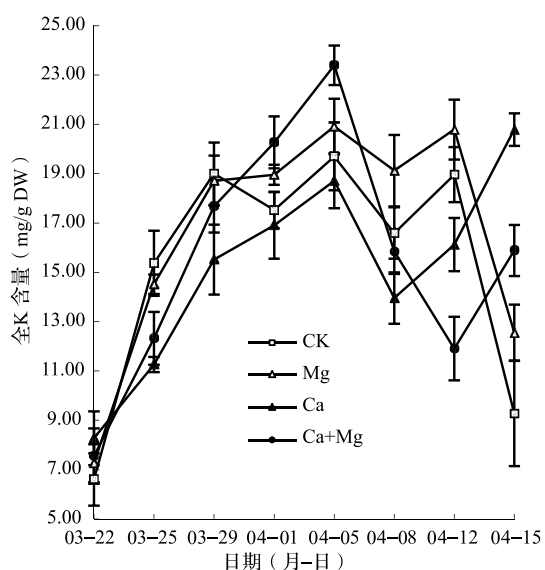


图 5 不同处理对果皮全 K 含量的影响

由图 5 还可知, 在 4 月 1 日之前, 不同处理与同期 CK 之间无显著差异; 在 4 月 5 日, Ca + Mg 处理显著高于 CK; 在 4 月 8 日, 各处理与 CK 无显著差异; 在 4 月 12 日, Ca 处理显著低于 CK, Ca + Mg 处理极显著低于 CK, Mg 处理无显著变化; 在 4 月 15 日, Mg 处理显著高于 CK, Ca 处理和 Ca + Mg 处理极显著高于 CK。由此可知, 不同处理基本是在果实发育后期提高全 K 含量。

### 2.2.2 果皮全 Mg 含量动态变化

由图 6 可知, 从 3 月 22 日到 25 日, Ca 处理的全 Mg 含量显著升高, 其余处理和 CK 无显著变化; 从 3 月 25 日到 29 日, Mg 处理和 Ca + Mg 处理显著升高, 其余处理和 CK 无显著变化; 从 3 月 29 日到 4 月 1 日, Ca + Mg 处理和 CK 显著升高, 其余处理无显著变化; 从 4 月 1 日到 5 日, Ca + Mg 处理显著升高, 其余处理和 CK 均无显著变化; 从 4 月 5 日到 8 日, 各处理和 CK 均显著升高; 从 4 月 8 日到 12 日, 各处理和 CK 均无显著变化; 从 4 月 12 日到 15 日, Ca + Mg 处理无显著变化, 其余处理和 CK 显著升高。

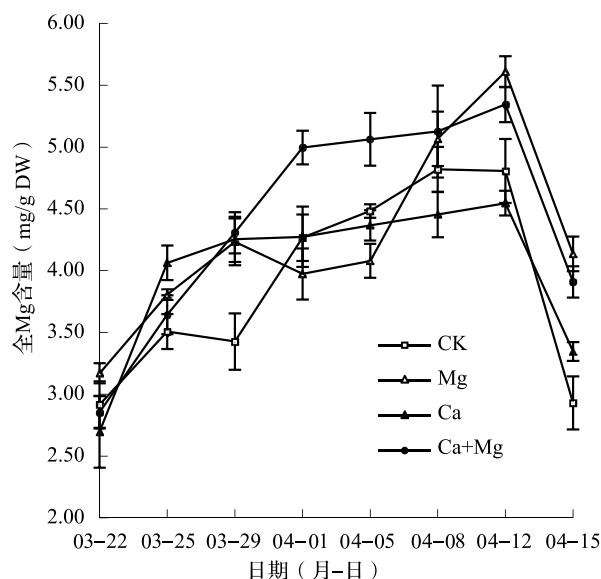


图 6 不同处理对果皮全 Mg 含量的影响

从 4 月 5 日到 8 日, Mg 处理极显著升高, 其余处理和 CK 均无显著变化; 从 4 月 8 日到 12 日, Mg 处理显著升高, 其余处理和 CK 均无显著变化; 从 4 月 12 日到 15 日, 各处理和 CK 均极显著下降。

由图 6 还可知, 3 月 25 日之前, 不同处理和同期 CK 无显著差异; 在 3 月 29 日, 各处理均显著高于 CK; 在 4 月 1 日和 5 日, Ca + Mg 处理显著高于 CK, 其余处理与 CK 无显著差异; 在 4 月 8 日, 不同处理和同期 CK 无显著差异; 在 4 月 12 日, Mg 处理和 Ca + Mg 处理均显著高于 CK, Ca 处理与 CK 无显著差异; 在 4 月 15 日, Mg 处理和 Ca + Mg 处理均极显著高于 CK, Ca 处理与 CK 无显著变化。可见, 不同处理均可一定程度提高全 Mg 含量, Ca 处理和 Mg 处理、Ca + Mg 处理分别提高果实发育前期和总体的全 Mg 含量。

### 2.2.3 果皮全 Ca 含量动态变化

由图 7 可知, 3 月 25 日之前, 不同处理和 CK 的全 Ca 含量均无显著变化; 从 3 月 25 日到 3 月 29 日, Ca 处理无显著变化, 其余处理和 CK 均显著升高; 从 3 月 29 日到 4 月 1 日, Ca 处理极显著升高, 其余处理和 CK 均无显著变化; 从 4 月 1 日到 5 日, Mg 处理和 Ca + Mg 处理显著升高, 其余处理和 CK 无显著变化; 从 4 月 5 日到 8 日, 各处理和 CK 均显著升高; 从 4 月 8 日到 12 日, 各处理和 CK 均无显著变化; 从 4 月 12 日到 15 日, Ca + Mg 处理无显著变化, 其余处理和 CK 显著升高。



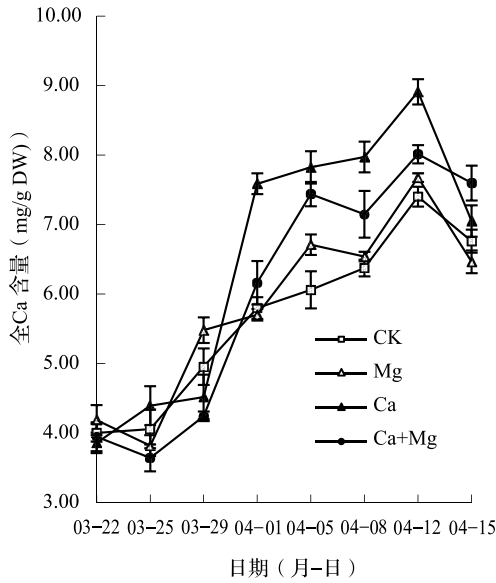


图7 不同处理对果皮全Ca含量的影响

由图7 还可知, 3月29日之前, 不同处理与同期CK均无显著差异; 在4月1日, Ca处理极显著高于CK, Ca+Mg处理显著高于CK, 其余处理与CK无显著差异; 在4月5日, 各处理显著高于CK; 在4月8日和12日, Ca处理极显著高于CK, Ca+Mg处理显著高于CK, 其余处理与CK无显著差异; 在4月15日, Ca+Mg处理显著高于CK, 其余处理与CK无显著差异。可见, Ca处理和Ca+Mg处理可提高果实发育总体的全Ca含量, 其余处理不改变全Ca含量。

表2 不同元素含量的复相关系数

处理	水溶性K	水溶性Ca	水溶性Mg	全K	全Ca	全Mg
CK	0.940 7**	0.837 4**	0.720 3*	0.870 2**	0.964 5**	0.914 5**
Mg	0.885 3**	0.865 6**	0.958 7**	0.875 2**	0.975 2**	0.962 6**
Ca	0.977 7**	0.995 3**	0.997 8**	0.991 8**	0.983 2**	0.975 6**
Ca+Mg	0.989 7**	0.935 6**	0.995 4**	0.911 5**	0.990 7**	0.909 3**

## 2.4 果皮着色与果肉风味变甜同步性的变化

### 2.4.1 果皮h值含量动态变化

由图8 可知, 在果实发育过程中, 不同处理与CK的果皮h值均呈下降的动态变化趋势。4月1日之前, 不同处理与CK的果皮h值均无显著变化; 从4月1日到5日, Ca处理和Ca+Mg处理显著下降, Mg处理和CK均无显著变化; 从4月5日到12日, 各处理和CK均极显著下降; 从4月12日到15日, Ca+Mg处理无显著变化, 其余处理和CK均显著下降。说明Ca+Mg处理的h值

## 2.3 果皮全K、Ca和Mg含量与水溶性K、Ca、Mg含量间的线性相关性

对果皮着色发育过程中的K、Ca、Mg元素的全量和水溶性含量相互间作多元线性相关分析, 由表1可知, 不同处理和CK的果皮水溶性K含量与全Ca含量、水溶性K含量与全Mg含量、水溶性Mg含量与全Ca含量以及全Ca含量与全Mg含量的偏相关系数均具有显著正相关性, 其余所有偏相关系数均不显著, 说明不同处理和CK的果皮K、Ca和Mg含量之间均具有相互增益效应。由表2可知, 水溶性K、Ca、Mg和全K、Ca、Mg含量其中的每一种含量分别与其余5种含量间的复相关系数具有极显著相关性, 说明果皮中K、Ca和Mg含量在果皮着色发育过程中存在相互影响的关系。可见, 不同施肥处理虽然不改变果皮K、Ca和Mg含量间的线性相关性, 但如果其中一个元素的含量发生改变则会引起其它相关元素含量的变化。

表1 不同元素含量具显著性的偏相关系数

处理	水溶性K 与全Ca	水溶性K 与全Mg	水溶性Mg 与全Ca	全Ca 与全Mg
CK	0.956 3**	0.708 4**	0.956 9**	0.630 3**
Mg	0.640 2**	0.691 5**	0.649 6**	0.612 8**
Ca	0.602 4**	0.754 8**	0.598 3**	0.544 7*
Ca+Mg	0.772 3**	0.840 5**	0.933 3**	0.506 7*

注: \*表示显著性水平  $P < 0.05$ ; \*\*表示显著性水平  $P < 0.01$ 。下同。

在4月12日已经降至最低, 此后无显著变化, 即已经提前着色。

由图8 还可知, 不同处理在果实发育期间对同期果皮的h值产生明显的影响。3月29日之前, 各处理与CK之间无显著差异; 在4月1日, Ca+Mg处理显著高于CK, 其余各处理与CK差异不显著; 在4月5日, Ca、Ca+Mg处理显著低于CK, Mg处理与CK无显著差异; 在4月8日, Ca、Ca+Mg处理极显著低于CK, Mg处理与CK差异不显著; 在4月12日, Ca处理显著高于CK, Ca+Mg处理

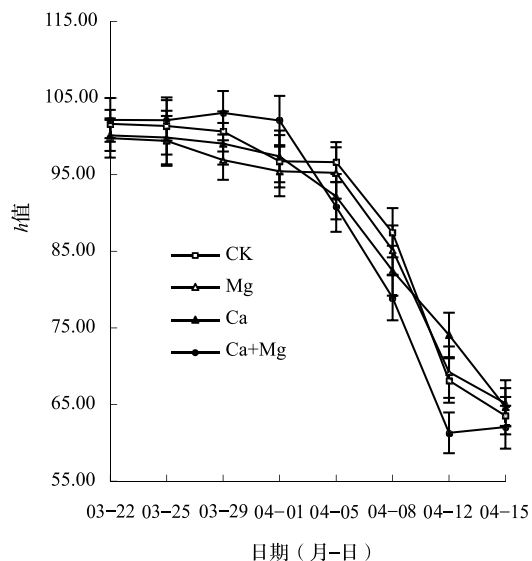


图8 不同处理对果皮 h 值的影响

极显著低于 CK, Mg 处理与 CK 差异不显著; 在 4 月 15 日, 各处理与 CK 差异不显著。说明 Ca + Mg 处理在 4 月 12 日着色优于 CK 和其他处理, 但最终着色各处理与 CK 差异不显著。

#### 2.4.2 果肉糖酸比的动态变化

由图 9 可见, 在果实生长发育过程中, 不同处理与 CK 的果肉糖酸比均总体上呈上升变化趋势。不同处理和 CK 在 4 月 1 日之前糖酸比均无显著变化; 此后至 4 月 8 日, 不同处理和 CK 均极显著升高; 从 4 月 8 日到 12 日, Ca + Mg 处理无显著变化, 其余处理和 CK 均显著升高; 从 4 月 12 日到 15 日, Mg 处理无显著变化, 其余处理和 CK 均显著下降。说明 Mg 处理无“退糖”现象。

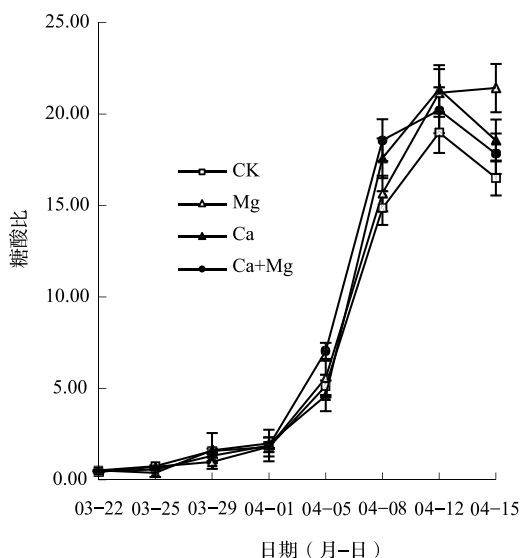


图9 不同处理对果肉糖酸比的影响

由图 9 还可见, 不同处理对同期果肉糖酸比产生明显的影响。在 4 月 1 日之前, 不同处理分别与同期 CK 差异不显著; 在 4 月 5 日, Ca + Mg 处理显著高于 CK, 其余各处理与 CK 差异不显著; 在 4 月 8 日, Ca 和 Ca + Mg 处理显著高于 CK, Mg 处理与 CK 差异不显著; 在 4 月 12 日, Mg 处理极显著高于 CK, Ca + Mg 处理和 Ca 处理显著高于 CK; 在 4 月 15 日, Mg 处理极显著高于 CK, 其余处理与 CK 差异不显著。说明在果实不同发育时期, 不同处理均可不同程度提高其糖酸比, 但最终 Mg 处理糖酸比高于 CK。

#### 2.4.3 不同处理对荔枝果皮着色与果肉风味变甜同步性的影响

对上述果皮着色指标和果肉主要营养、风味品质指标的动态变化结果作综合分析, 表明 Ca + Mg 处理在 4 月 12 日果皮完全着色和果肉风味最佳, 因而克服了果皮“滞绿”问题; Mg 处理果皮完全着色时果肉未发生“退糖”现象。这两个处理均成功实现果皮着色和果肉风味品质同步发育。

#### 2.5 果皮 K、Ca 和 Mg 含量与果皮着色的关系

##### 2.5.1 果皮 K、Ca 和 Mg 含量与果皮着色指标间典型性相关分析

在果皮着色发育过程中, 对果皮水溶性和全 K、Ca、Mg 含量与果皮着色指标间作典型性相关分析, 得到 5 对典型性相关变量, 其中仅第二对典型性相关变量的相关性达到显著水平, 表明典型性相关分析结果是理想的, 统计分析结果如表 3 所示。对显著典型性相关变量与各自相关变量的相关系数进行比较, 得到主要变量间的相关关系如下所述。

对 Mg 处理和 CK 而言, U 主要与  $x_1$  (a 值) 正相关、与  $x_3$  (h 值) 负相关, V 主要与  $y_3$  (水溶性 Mg 含量) 正相关。说明两组变量中主要是  $x_1$ 、 $x_3$  与  $y_3$  相关, 即果皮水溶性 Mg 含量与果皮 a 值正相关, 与 h 值负相关。可见, 在果皮着色发育过程中, Mg 处理和 CK 的果皮水溶性 Mg 含量较高, 是促进其果皮红色着色的主导因素。

对 Ca 处理而言, U 主要与  $x_1$  (a 值) 正相关、与  $x_3$  (h 值) 负相关, V 主要与  $y_3$  (水溶性 Mg 含量)、 $y_5$  (全 Ca 含量) 正相关。说明两组变量中主要是  $x_1$ 、 $x_3$  与  $y_3$ 、 $y_5$  相关, 即果皮水溶性 Mg 含量和全 Ca 含量与果皮 a 值正相关, 与 h 值负相关。可见, Ca 处理的果皮全 Ca 含量较高, 是促进其果皮红色着色的主导因素。

表3 典型相关分析

处理	典型性相关变量	线性回归方程	典型性相关变量与其回归变量的相关系数
CK	U	$U = 1.6463x_1 - 0.0147x_2 + 2.5311x_3 + 1.6421x_4 + 0.0390x_5$	0.8030, -0.4733, -0.6068, 0.5113, -0.4914
	V	$V = 2.4558y_1 - 0.6934y_2 + 0.2241y_3 - 1.2358y_4 - 1.5903y_5 - 0.4720y_6$	0.1188, -0.4965, 0.7636, 0.2347, 0.5550, 0.4221
Mg	U	$U = 0.9612x_1 + 0.1385x_2 - 0.4876x_3 + 0.9560x_4 - 0.9560x_5$	0.9612, 0.1385, -0.9876, 0.4560, -0.4560
	V	$V = 0.5558y_1 - 0.8913y_2 + 0.8905y_3 + 0.2013y_4 + 0.9272y_5 + 0.8282y_6$	0.5558, -0.3913, 0.8905, 0.2013, 0.427, 0.5282
Ca	U	$U = 0.3414x_1 - 0.0173x_2 - 0.0188x_3 - 0.1592x_4 - 0.7670x_5$	0.9542, -0.3908, -0.7763, 0.4263, -0.3953
	V	$V = -0.0443y_1 + 1.4745y_2 + 1.7386y_3 - 0.9915y_4 + 2.2627y_5 - 0.8691y_6$	0.4150, -0.2300, 0.7465, 0.5997, 0.9101, 0.5586
Ca + Mg	U	$U = 3.1264x_1 + 0.8727x_2 - 1.0850x_3 - 2.6802x_4 + 0.0722x_5$	0.8023, -0.4863, -0.6913, 0.4645, -0.3350
	V	$V = -0.1172y_1 - 0.6515y_2 - 0.5630y_3 + 0.5021y_4 + 1.0687y_5 - 0.3500y_6$	0.1766, -0.2263, 0.8997, 0.3858, 0.9080, 0.6965

注: (1)  $x_1 \sim x_5$  依次表示  $a$ 、 $b$  和  $h$  值、花色素苷含量、叶绿素含量,  $y_1 \sim y_6$  依次表示水溶性 K、水溶性 Ca、水溶性 Mg、全 K、全 Ca、全 Mg 含量。(2) 表中典型相关变量与各自回归变量的相关系数排列顺序与相应回归方程中回归变量先后顺序一致。

对 Ca + Mg 处理而言,  $U$  主要与  $x_1$  ( $a$  值) 正相关, 与  $x_3$  ( $h$  值) 负相关,  $V$  主要与  $y_2$  (水溶性 Ca 含量)、 $y_3$  (水溶性 Mg 含量)、 $y_5$  (全 Ca 含量) 正相关。说明两组变量中主要是  $x_1$ 、 $x_3$  与  $y_2$ 、 $y_3$ 、 $y_5$  相关, 即果皮水溶性 Ca 含量、水溶性 Mg 含量、全 Ca 含量与果皮  $a$  值正相关, 与  $h$  值负相关。可见, 在果皮着色发育过程中, Ca + Mg 处理的果皮水溶性 Mg 含量以及水溶性和全 Ca 含量较高, 是促进其果皮红色着色的主导因素。

综上所述, Ca 处理和 Ca + Mg 处理改变了果皮 Ca、Mg 含量与果皮着色指标间的典型性相关性, 说明不同施肥处理对果皮着色的调节存在不完全相同的生理基础和特点。

### 2.5.2 果皮色素含量与果皮 K、Ca 和 Mg 含量的一元指数函数回归分析

对果皮着色发育过程中的果皮花色素苷、叶绿素含量与果皮 K、Ca 和 Mg 的全量、水溶性含量分别作一元指数函数回归分析, 具显著性的指数函数回归方程见表 4。结果表明, 在果皮着色发育过程中, 不同处理和 CK 的果皮全 Mg、水溶性 Ca、全 Ca 含量均与其花色素苷含量呈正相关指数函数回归关系, 不同处理和 CK 的果皮水溶性 Ca 含量均与

表4 具显著性的指数函数回归方程

处理	花色素苷与全 Mg	花色素苷与水溶性 Ca	花色素苷与全 Ca
CK	$y = 0.00002e^{1.878x}$ $r = 0.926$	$y = 7.731e^{-7.665x}$ $r = 0.950$	$y = 0.0001e^{0.967x}$ $r = 0.934$
Mg	$y = 0.00026e^{1.137x}$ $r = 0.874$	$y = 2.372e^{-5.195x}$ $r = 0.901$	$y = 0.0006e^{0.653x}$ $r = 0.930$
Ca	$y = 0.00005e^{1.620x}$ $r = 0.817$	$y = 10.778e^{-6.046x}$ $r = 0.922$	$y = 0.0006e^{0.659x}$ $r = 0.903$
Ca + Mg	$y = 0.0002e^{1.273x}$ $r = 0.881$	$y = 4.633e^{-4.938x}$ $r = 0.934$	$y = 0.00073e^{0.627x}$ $r = 0.920$
处理	叶绿素与水溶性 Mg	叶绿素与全 Mg	叶绿素与水溶性 Ca
CK	$y = 5.222e^{-2.679x}$ $r = -0.904$	$y = 3.238e^{-0.995x}$ $r = -0.858$	$y = 0.00277e^{3.693x}$ $r = -0.801$
Mg	$y = 2.144e^{-1.764x}$ $r = -0.829$	$y = 1.453e^{-0.714x}$ $r = -0.803$	$y = 0.00431e^{3.366x}$ $r = -0.855$
Ca	$y = 4.689e^{-2.474x}$ $r = -0.687$	$y = 5.848e^{-1.094x}$ $r = -0.806$	$y = 0.00216e^{3.722x}$ $r = -0.829$
Ca + Mg	$y = 4.714e^{-2.344x}$ $r = -0.814$	$y = 2.711e^{-0.900x}$ $r = -0.886$	$y = 0.00253e^{3.190x}$ $r = -0.859$

叶绿素含量呈负相关指数函数回归关系,其余的指数函数回归方程均不显著。可见,这些具显著性的指数函数回归关系也说明不同处理和CK的果皮Ca和Mg存在相互增益效应,并且不同施肥处理不改变果皮花色素苷、叶绿素含量与果皮水溶性和全量K、Ca和Mg含量间的指数函数回归关系。

### 3 讨论与结论

对果皮着色指标和果肉风味品质指标的动态变化结果作综合分析,表明Ca+Mg处理克服了果皮“滞绿”问题,Mg处理解决了果肉“退糖”现象,均成功实现果皮着色和果肉风味品质同步发育。由三月红荔枝果皮水溶性和全K、Ca、Mg含量动态变化可知,叶面喷施不同的肥料可以明显提高果皮同种矿质元素的含量。典型性相关分析结果表明,Ca处理和Ca+Mg处理改变了果皮Ca、Mg含量与果皮着色指标间的典型性相关性,果皮着色是由于果皮Ca、Mg含量的增加。线性相关性分析和一元指数函数回归分析结果都表明,不同处理和CK的果皮Ca和Mg存在相互增益效应。

前人有报道表明,Ca可以促进糖的积累<sup>[17]</sup>,而糖既可以起到信号作用<sup>[18]</sup>,也可以作为糖苷配基来促进其合成<sup>[19]</sup>。其次,Ca<sup>2+</sup>作为第二信使参与的信号转导作用,可以诱导花色素苷合成<sup>[20]</sup>。本试验也表明,喷施Ca肥能显著提高果皮中Ca含量,从而提高花色素苷的含量,进而促进果皮着色,与前人在甜樱桃<sup>[21]</sup>、黄连木<sup>[22]</sup>和水稻<sup>[23]</sup>中研究结果相同。

叶面喷Mg可使叶片中Mg<sup>2+</sup>增加而提高光合色素含量,Mg同时是多种光合酶的活化剂,RuBP羧化酶和Mg<sup>2+</sup>结合后,使它对CO<sub>2</sub>的亲合力增加,促进CO<sub>2</sub>同化,有利于植物体内糖的合成<sup>[24]</sup>,从而使叶片光合产物运输到果皮的有机物增加,为合成花色素苷提供更多的底物<sup>[18]</sup>。如果缺Mg,碳水化合物从源器官向库器官的运输受限,可能会导致植物叶片中蔗糖和淀粉积累而果实中糖分不足,因而影响其品质<sup>[25]</sup>。另外有报道指出,Mg<sup>2+</sup>能与花色素苷螯合,对花色素苷具有稳定和保护作用<sup>[26]</sup>,在三月红荔枝果皮中,Mg<sup>2+</sup>可能也有类似作用,可通过增强花色素苷结构稳定性而促进其积累量升高。前人报道指出,Mg肥可以提高葡萄花色素苷含量,与本试验结果相同<sup>[9,27-29]</sup>。

本试验结果表明,Ca+Mg处理可以解决三月

红荔枝果皮“滞绿”问题,但是单独Ca或Mg处理没有克服“滞绿”效果,是由于三月红荔枝果皮中Ca和Mg存在相互增益作用,与前人研究结果相同<sup>[27,30-31]</sup>。Reay等<sup>[32]</sup>曾提出,元素对果实着色的作用应从元素的浓度与元素间平衡比例的相互作用考虑。有报道指出Ca和Mg具有拮抗作用<sup>[33]</sup>,有可能是不同的施肥比例所致。

综上所述,三月红荔枝叶面喷施Ca、Mg肥可以提高果皮中相应Ca、Mg元素的含量,Ca和Mg元素相互增益而促进果皮花色素苷积累,从而改善果皮着色。

### 参考文献:

- [1] 张蓓,吕立才,庄丽娟.我国荔枝生产的区域性布局及发展分析[J].广东农业科学,2011,(23):174-176.
- [2] 陈霞,周娜.荔枝果实发育过程中果皮色素变化对着色效果的影响[J].西南园艺,2005,33(增刊):52-54.
- [3] 王惠聪,黄旭明,黄辉白.‘妃子笑’荔枝果实着色不良原因的研究[J].园艺学报,2002,29(5):408-412.
- [4] 李平,陈大成,胡桂兵,等.荔枝果皮发育过程中果皮颜色形成的相关性分析[J].热带亚热带植物学报,1999,71(1):53-58.
- [5] 高飞飞,尹金华,陈大成,等.荔枝果皮叶绿素、类胡萝卜素、花色素的形成规律对果色的影响[J].华南农业大学学报,2000,21(1):16-18.
- [6] 王家保,刘志媛,杜中军,等.荔枝果实发育过程中果皮颜色形成的相关分析[J].热带作物学报,2006,27(2):11-17.
- [7] 张茜,杨健,王龙,等.红皮梨着色与花青苷合成研究进展[J].果树学报,2012,29(4):668-675.
- [8] 姜学玲,徐维华,李延菊,等.钾肥对富士苹果着色的影响及机理[J].中国农业科学,2014,47(5):946-954.
- [9] 汪建妹,马军伟,姜丽娜,等.硫酸钾镁肥在葡萄上的应用效果试验[J].浙江农业科学,2007,(2):144-145.
- [10] 周开兵,苏举,徐远峰.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.
- [11] 周晓超,苏阳,高丹,等.叶面钙和镁营养对妃子笑荔枝果实主要内外品质发育的影响[J].中国南方果树,2015,44(3):64-69.
- [12] 高丹,周晓超,苏阳,等.叶面喷施钾、钙和镁肥调节三月红荔枝果皮着色和果肉风味变化同步的效果[J].中国土壤与肥料,2016,(1):112-118.
- [13] 齐秀娟,徐善坤,李作轩,等.山楂果实发育期矿质元素和色素含量的动态变化及相关关系[J].果树学报,2006,23(2):214-217.
- [14] Pirie A, Mullins M G. Changes in anthocyanin and phenolic content of grapevine leaf and abscisic acid [J]. Plant Physiology, 1976, 58: 468-472.
- [15] 张昭其,庞学群,段学武,等.荔枝采后果皮花色素苷的



- 降解与花色素苷酶活性变化 [J]. 中国农业科学, 2003, 36 (8): 945-949.
- [16] 翁雪成, 袁红. 蒽酮-硫酸法测定荔枝核中可溶性多糖含量 [J]. 杭州师范学院学报 (医学版), 2007, 27 (2): 107-108.
- [17] Lu Y Q, Liu H P, Wang Y, et al. Synergistic roles of leaf boron and calcium during the growing season in affecting sugar and starch accumulation in ripening apple fruit [J]. Acta Physiologia Plantarum, 2013, 8 (8): 2483-2492.
- [18] 张学英, 张上隆, 骆军, 等. 果实花色素苷合成研究进展 [J]. 果树学报, 2004, 21 (5): 456-460.
- [19] Zhang Z Q, Pang X Q, Yang C, et al. Purification and structural analysis of anthocyanins from litchi pericarp [J]. Food Chemistry, 2004, 84 (4): 601-604.
- [20] Cang Q W, Ye F Z, Tao L. Activity changes of calmodulin and  $Ca^{2+}$ -ATPase during low-temperature-induced anthocyanin accumulation in *Alternanthera bettzickiana* [J]. Physiol Plant, 2005, 124: 260-266.
- [21] 关军锋, 张立彬, 于凤鸣, 等. 采前喷钙对甜樱桃果实品质和采后生理的影响 [J]. 河北农业大学学报, 1999, 22 (1): 43-46.
- [22] 胡静静, 沈向, 李雪飞, 等. 黄连木秋季叶色变化与可溶性糖和矿质元素的关系 [J]. 林业科学, 2010, 46 (2): 80-86.
- [23] 孙明茂. 水稻籽粒铁、硒、锌、铜等矿质元素和花色素含量的遗传及QTL分析 [D]. 泰安: 山东农业大学, 2006.
- [24] 汪洪, 金继运. 铁、镁、锌营养胁迫对植物体内活性氧代谢影响机制 [J]. 植物营养与肥料学报, 2006, 12 (5): 738-744.
- [25] 汪洪, 褚天铎, 刘新保. 缺镁与正常供镁的菜豆组织结构比较研究 [J]. 中国农业科学, 1999, 32 (4): 63-67.
- [26] 陈建, 陈晨甜, 吕长平. 观赏植物花色形成影响因子研究进展 [J]. 现代园艺, 2009, (6): 4-6, 10.
- [27] 陈丽璇, 李金雨, 蔡晓东, 等. 2种葡萄柚果实发育过程中金属营养元素变化及活性氧代谢差异 [J]. 热带作物学报, 2010, 31 (12): 2180-2186.
- [28] 李青军, 张炎, 胡伟, 等. 硫酸钾镁肥在葡萄上施用效果研究 [J]. 新疆农业科学, 2014, 51 (11): 2009-2013.
- [29] 韩艳婷. 葡萄镁营养生理机制研究 [D]. 长沙: 湖南农业大学, 2011.
- [30] 段法尧, 夏连胜, 郑兆乾, 等. 钙镁互作对甘蓝产量和品质的影响 [J]. 陕西农业科学, 2007, (6): 31-33.
- [31] 于忠范, 王悦燕, 崔丽静, 等. 影响苹果着色的施肥因素及改良途径 [J]. 烟台果树, 2011, (2): 25-26.
- [32] Reay P F, Fletcher R H, Thomas V J. Chlorophylls, carotenoids and anthocyanin concentrations in the skin of 'Gala' apples during maturation and the influence of foliar applications of nitrogen and magnesium [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 1999, 76 (1): 63-71.
- [33] 李延, 刘星辉, 庄卫民. 龙眼幼苗镁素吸收特性研究 [J]. 热带作物学报, 2001, 22 (1): 56-60.

### The primary mechanisms on the effects of Ca and Mg applied in foliar nutrients on the pericarp colouring of *Litchi chinensis* Sonn. cv Sanyuehong

GAO Dan, LI Shi-jun, WANG Zhan, ZHOU Kai-bing\* (College of Horticulture and Landscape Hainan University, Hainan Haikou 570228)

**Abstract:** The study of the primary mechanisms on effects of Ca and Mg applied in foliar nutrients on the pericarp's coloring was conducted with Sanyuehong litchi fruits. The treatments included spraying the Ca, Mg solutions and their mixtures, and the check (CK) was sprayed with clean water. The results were the following: in the course of the development of the pericarp's reddening, the different foliar nutrients treatments and CK all improved the contents of the corresponding elements in pericarp. The partial correlation coefficients between the content of total Ca and the water-soluble K, the total Mg and the total Ca, the water-soluble K and the total Mg, the water-soluble Mg and the total Ca were significant positive in all the treatments and CK. The multiple correlation coefficients between one of the contents of the total and the water-soluble K, Ca and Mg and the other five ones rest were respectively significant. The treatment Ca + Mg successfully solved the problem that the peel kept green at the total soluble sugar in flesh rising to the top, and the treatment Mg successfully solved the problem that the total soluble sugar in flesh dropped at the pericarp's full reddening. The higher content of the water-soluble Mg in pericarp of the treatment Mg and CK was the key factor for improving the pericarp's reddening, the higher content of the total Ca in pericarp of the treatment Ca was the key factor for improving the pericarp's reddening, and the higher content of Ca and water-soluble Mg in pericarp of the treatment Ca + Mg was the key factor for improving the pericarp's reddening. To the different treatments and CK, the exponential regression equations of the contents of the anthocyanin to those of the total Mg, the water-soluble Ca and the total Ca in pericarp indicated significant respectively positive correlations, while the exponential regression equations of the contents of the chlorophyll to those of the water-soluble Ca in pericarp were significant respectively negative correlations. In conclusion, the element Ca and Mg had a synergistic effect on the growth and development of pericarp in Sanyuehong litchi, and different treatments promoted peel coloration by increasing the contents of Ca and Mg.

**Key words:** Sanyuehong litchi; foliar nutrients; Ca; Mg; pericarp coloring