

Effects of Different Fertilization Treatments on Leaf Structure and Photosynthetic Characteristics of *Citrus grandis* var. *Longanyou*

Rongfei Li¹, Xueyou Jiang², Yaodong Chang¹, Kangping Zhang¹, Mingming Wang¹, Guolu Liang¹, Zhiming Lu¹, Tao Hu², Youwen Yi³, Lirong Su³, Qigao Guo^{1*}

¹Key Laboratory of Horticulture Science for Southern Mountainous Regions, Ministry of Education/College of Horticulture and Landscape Architecture, Southwest University, Chongqing

²Guang'an Science and Technology Development and Training Center, Guang'an Sichuan

³Guang'an District Agricultural Bureau, Guang'an Sichuan

Email: *qgguo@126.com

Received: Apr. 2nd, 2018; accepted: Apr. 20th, 2018; published: Apr. 27th, 2018

Abstract

The 12-year-old *Citrus grandis* var. *longanyou* orchard was subjected to four different fertilization treatments. By analyzing the leaf quality, photosynthetic characteristic parameters and their correlation, the effect of different fertilization treatments on the photosynthetic capacity of Longanyou on yield formation was revealed, which was used to cultivate Longanyou. The fertilization management provides the theoretical basis. The results showed that: 1) In different phenophases, the leaf thickness and leaf area of Treatment 2 (T2) vegetative shoots and fruiting branches were larger, while CK was the smallest, among which the difference of germination period and fruit ripening period was significant. In addition, the specific leaf weight and leaf dry matter content of T2 were relatively large. Among them, the specific leaf weight at the fruit ripening stage was significantly higher than that of the others ($P < 0.05$). The vegetative shoots and fruiting shoots reached $18.92 \text{ mg}\cdot\text{cm}^{-2}$ and $16.56 \text{ mg}\cdot\text{cm}^{-2}$, respectively. But in other periods, the difference between treatment and control was not significant. This shows that T2 treatment is characterized by thicker leaves, larger leaf area, higher specific leaf weight and higher dry matter content, which is beneficial to the production and storage of organic nutrients, which is one of the reasons for the increase in yield. 2) The contents of chlorophyll a, Chl b, Chl (a+b) and carotenoids in the vegetative shoots and the resulting shoots were significantly higher than those of the control at different phenological stages, but there was no significant difference among the treatments. It shows that the fertilization treatment can significantly increase the content of photosynthetic pigments in leaves. 3) At different phenophases, the net photosynthetic rate (Pn) of fertilized leaves was higher than that of the control, and the changes of different phenophases showed a single peak curve. Among them, Pn maxima of different treatment vegetative shoots appeared in fruit enlargement period, and the maximum value of T2 was ($7.59 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$). The maximum Pn value of the resulting branch twigs appeared in the physiological fruit drop period. In addition, the changes of Tr,

*通讯作者。

Gs, and Pn in the vegetative shoots and the resulting shoots with different treatments were similar, while the change trend of Ci was opposite to that in Pn, showing an inverted peak curve. This shows that the T2 fertilization scheme is beneficial to improve the carbohydrate accumulation in the leaves of Longanyou, so as to ensure the vegetative growth and reproductive growth of the tree. 4) Pn was positively correlated with Chl a, Chl b, and Car at fruit ripening stage, and regression analysis showed that there was a good linear relationship between photosynthetic rate and chlorophyll content. In summary, treatment 2 is beneficial to improve the leaf traits and increase the net photosynthetic rate of leaves, which lays a good foundation for the formation of Longanyou production.

Keywords

Citrus grandis var. *longanyou*, Fertilization, Chlorophyll Content, Photosynthetic Rate, Leaf Structure Traits

龙安柚不同施肥处理对叶片结构和光合特性的影响

李荣飞¹, 江学友², 常耀栋¹, 张抗萍¹, 王明明¹, 梁国鲁¹,
陆智明¹, 胡 涛², 易佑文³, 苏理荣³, 郭启高^{1*}

¹南方山地园艺学教育部重点实验室/西南大学园艺园林学院, 重庆

²广安区农业局, 四川 广安

³广安市科技开发培训中心, 四川 广安

Email: *qgguo@126.com

收稿日期: 2018年4月2日; 录用日期: 2018年4月20日; 发布日期: 2018年4月27日

摘 要

对12年生龙安柚果园进行4种不同施肥处理, 通过分析叶片质量、光合特征参数及其相关性, 以揭示不同施肥处理下龙安柚光合能力对产量形成的影响规律, 为龙安柚栽培中施肥管理提供理论依据。结果表明: 1)不同物候期, 处理2 (T2)营养枝和结果枝的叶厚、叶面积均较大, 而CK最小, 其中萌芽期和果实成熟期差异比较显著。此外, T2的比叶重、叶片干物质含量均较大, 其中, 果实成熟期的比叶重显著高于其他($P < 0.05$), 营养枝和结果枝分别达到 $18.92 \text{ mg} \cdot \text{cm}^{-2}$ 和 $16.56 \text{ mg} \cdot \text{cm}^{-2}$; 但其他物候期各处理与对照间差异不显著。说明T2处理叶片厚, 叶面积大, 比叶重大和叶片干物质含量高, 有利于有机养分的制造和贮藏, 是产量提高的原因之一。2)不同物候期, 施肥处理的营养枝和结果枝叶片中叶绿素a、b、(a+b)和类胡萝卜素含量均显著高于对照, 但各施肥处理间差异不显著。说明施肥处理能显著提高叶片中光合色素的含量。3)不同物候期, 施肥处理叶片的净光合速率(Pn)均大于对照, 且不同物候期的变化多呈单峰曲线。其中, 不同处理营养枝叶片的Pn最大值均出现在果实膨大期, 且以T2最大($7.59 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$); 而结果枝叶片的Pn最大值出现在生理落果期。此外, 不同处理的营养枝和结果枝叶片的Tr、Gs与Pn的变化规律类似, 而Ci变化趋势则与Pn相反, 呈现倒峰曲线。说明T2施肥方案有利于提高龙安柚叶片中碳水化合物的积累, 从而保障树体营养生长和生殖生长。4)果实成熟期Pn与Chl a、Chl b、Car正相关达显著水平, 且回归分析表明光合速率与叶绿素含量间存在良好的线性关系。综上, 处理2有利于改善叶片性状, 提高叶片净光合速率, 为龙安柚产量形成奠定了良好的基础。

关键词

龙安柚, 施肥, 叶绿素含量, 光合速率, 叶片结构性状

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

果树通过光合作用形成碳水化合物是产量形成的主要物质基础, 其干物质的 90% 以上来源于叶片光合作用。因此, 研究果树的光合作用对于揭示产量形成规律具有重要的意义。叶片是植物光合作用的主要器官, 其净光合速率是判定植物光合效能的主要指标。其中, 叶片质量(包括比叶重、叶厚、叶面积及解剖特征等)能反映不同生育期光合作用制造有机物质及其分配趋势, 是决定叶片光合能力的重要因素[1][2]; 而叶绿素含量高低是反应植物叶片光合能力及植株健康状态的主要指标。可见, 叶面积、比叶重、叶绿素含量等与净光合速率之间密切相关[3]。

叶片的光合能力受自身遗传特性及细胞间 CO_2 浓度、气孔导度、气温等环境因子, 以及栽培中土壤施肥与调控等管理措施的影响[4]。有研究表明, 通过施肥处理, 提高树体营养, 改善叶片质量, 能有效提高叶片的光合能力[5]。黄盖群等[6]发现适宜氮、磷、钾施肥量可以提高桑树的 $\text{Chl}(a + b)$ 、 Pn 、 Gs 、 Tr 。罗华等[7]则发现施有机肥可以不同程度地提高肥城桃叶片的叶绿素(Chl) a 、 b 、 $a + b$ 及类胡萝卜素(Car)含量, 而叶绿素含量增加使叶片 Pn 升高。此外, 在葡萄[8]、苹果[9]、核桃[10]、枣[11]等果树上均有施肥处理增加叶片的叶绿素含量和提高叶片的光合能力的研究报道。但类似研究在柚类上较少, 且龙安柚尚未见相关报道。

龙安柚(*Citrus grandis* var. *longanyou*)是四川省广安市极具地方特色的柑橘名特产品, 2008 年获准其成为国家地理标志保护产品[12], 近几年, 其栽培面积不断扩大, 从 2010 年种植面积 $16,000 \text{ hm}^2$, 到 2016 年其种植面积约增至 $23,333 \text{ hm}^2$ (广安市柚子办公室年度统计数据)。但生产中, 农户撂荒种植现象普遍, 肥水条件较差, 树体营养水平低, 叶片质量和光合能力均差, 从而导致产量低、品质差, 严重影响龙安柚的销售及发展。笔者已针对龙安柚进行不同施肥处理, 研究不同处理间产量、品质的差异, 发现化肥、有机肥混施处理的产量最高、品质较好[13]。但是对于龙安柚不同施肥处理对树体光合生产能力的影 响, 以及光合能力对产量形成的规律等尚不清楚。鉴于此, 笔者在原有研究基础上, 以撂荒种植为对照, 对果园进行不同施肥处理, 通过测定比叶重、干物质含量, 叶绿素含量, 以及叶片净光合速率、蒸腾速率等, 分析各指标间的相关性, 以期揭示光合能力对果实产量形成的影响规律, 为进一步筛选龙安柚的合理施肥方案提供科学的理论依据。

2. 材料与方法

2.1. 试验区概况

本试验于 2015~2017 年在广安市广安区龙安乡进行。当地平均海拔 320 m , 年平均气温 17.58°C , 最冷月在 1 月, 平均气温 4°C 。最热月在 7 月, 平均气温 27°C , 无霜期 $306\sim 328 \text{ d}$, 年平均降水量 1240 mm , 年平均日照时数为 1213 h 。试验地为典型的西南丘陵地区高温多雨的气候, 土壤肥力较低。

2.2. 试验设计

试验树为 12 年生龙安柚, 株行距 5.0 m × 5.3 m。试验设置 4 个施肥方案, 并以撂荒种植为对照(CK, 生产上普遍采用的方式), 处理 1 (T1, 每公顷施纯氮 315 kg、磷 173.25 kg、钾 306 kg, 有机质 1575 kg, 氮磷钾比例为 1:0.55:0.99), 处理 2 (T2, 每公顷施纯氮 450 kg、磷 247.5 kg、钾 438 kg, 有机质 2250 kg, 氮磷钾比例为 1:0.55:0.99), 处理 3 (T3, 全部施用有机肥, 每公顷施有机质 3000 kg), 处理 4 (T4, 施用全溶性肥, 多次施用, 每公顷施氮 202.8 kg, 磷 252.3 kg, 钾 268.95 kg, 氮磷钾比例为 1:1.25:1.33)。采取开穴(0.4 * 0.4 m)施肥的方式, 施肥时间分为: 基肥(11 月 10~15 日), 萌芽肥(2 月 25~30 日), 壮果肥(5 月 25~30 日)。每小区 5 株树, 重复 3 次。

2.3. 试验方法

2.3.1. 叶片结构性状的测定

于龙安柚萌芽期(3 月中旬)、第一次生理落果期(6 月上旬)、果实膨大期(7 月中旬)、成熟期(11 月中旬)4 个物候期, 在每株树的营养枝和结果枝上分别取 10 个健康、成熟的叶片, 带回室内, 将叶片放入水中, 在 5°C 的黑暗环境中储藏 12 h 取出后迅速用吸水纸粘去叶片表面的水分后称叶片鲜重(Leaf fresh weight, LFW); 用叶面积仪 LI-3100 测定叶片的叶面积(Leaf area, LA); 用游标卡尺测定叶片厚度(Leaf thickness, LT); 叶片于 60°C 烘箱烘干至恒重称量干重(Leaf dry weight, LDW); 最后计算:

$$\text{比叶重(Specific Leaf Weight, SLW, SLW = LDW * 1000/LA)} \quad (1)$$

$$\text{叶片干物质含量(Leaf dry matter content, LDMC, LDMC = LDW} \times 1000/\text{LFW)} \quad (2)$$

2.3.2. 光合色素含量的测定

光合色素含量测定: 于 4 个不同物候期在不同处理的营养枝和结果枝上分别取 5 片健康、成熟的叶片, 参照 Arnon (1949)和张宪政(1986)的方法并略有改动进行叶绿素提取[14] [15]。具体步骤为: 用剪刀将叶片剪成细丝, 准确称量 0.2 g 叶片于 50 ml 离心管中, 加入 50 ml 丙酮乙醇混合液提取, 黑暗放置, 待叶片变白, 分别在波长 663 nm、645 nm 和 470 nm 分光光度计下测定吸光值。各叶绿素含量计算公式如下:

$$\text{叶绿素 a 的含量(Chl a, mg/g) = (12.71 A}_{663} - 2.59 A}_{645}) * V / (W * 1000)} \quad (3)$$

$$\text{叶绿素 b 的含量(Chl b, mg/g) = (22.88 A}_{645} - 4.67 A}_{663}) * V / (W * 1000)} \quad (4)$$

$$\text{叶绿素总含量(Chl (a + b), mg/g) = (20.29 A}_{645} + 8.04 A}_{663}) * V / (W * 1000)} \quad (5)$$

$$\text{类胡萝卜素的含量(Car, mg/g) = (1000 * A}_{470} - 3.27 * \text{叶绿素 a 浓度} - 104 * \text{叶绿素 b 浓度}) / 229} \quad (6)$$

式中 A₆₆₃、A₆₄₅、A₄₇₀ 分别为相应波长下的吸光值, V 为提取液体积/ml, W 为叶片鲜重/g。

2.2.3. 光合特征参数的测定

使用 LCPRO+光合作用测定仪, 选 4 个物候期的晴天上午 9:00~11:00, 对每个处理树冠中部外围东南西北 4 个方位的营养枝和结果枝叶片, 进行净光合速率(Net photosynthetic rate, Pn)、气孔导度(Stomata conductance, Gs)、胞间 CO₂ 浓度(Intercellular CO₂ concentration, Ci)和蒸腾速率(Transpiration rate, Tr)等光合指标的测定。5 株 1 个小区, 3 次重复, 每株树取不同方位的平均值进行统计分析。

2.4. 数据处理

采用 Excel 2003 整理数据并绘制图表, 用 SPSS.13.0 软件分析显著性及相关性。

3. 结果与分析

3.1. 不同施肥处理对叶片结构性状的影响

根据不同施肥处理叶片结构性状的比较发现,各施肥处理叶片的厚度、叶面积、比叶重和干物质含量均高于对照,且以 T2 最大(见图 1)。其中,叶片厚度除了在生理落果期以 T4 结果枝叶片最厚(0.31 mm)之外,其余物候期的叶片厚度均以 T2 最厚,而 CK 最薄。各处理叶面积比较也发现,除了果实成熟期营养枝以 T1 叶面积最大,而结果枝以 T4 最大之外,其余均以 T2 最大,CK 最小。此外,不同物候期 T2 处理的营养枝和结果枝比叶重均较大,但生理落果期 T2 结果枝的比叶重最小,果实膨大期 CK 营养枝的比叶重最大。不同物候期各处理营养枝和结果枝的叶片干物质含量多呈现 T2 最大的规律,但萌芽期和生理落果期叶片干物质含量最大的分别是 T3、CK,果实成熟期 T2 营养枝叶片干物质含量略低于 T1。上述结果说明,施肥处理有利于增加叶片厚度,增大叶面积,提高单位叶面积光合速率以及叶片利用自然资源的能力,其中 T2 处理效果显著。

3.2. 不同施肥处理对叶片光合色素含量的影响

据图 2 可知,除了果实成熟期外,其余物候期各施肥处理的营养枝和结果枝叶片中 Chl a、Chl b、Chl(a + b)以及 Car 含量均显著高于对照,而各施肥处理间差异不显著。Chl a 含量,除了在果实成熟期 T1、T2、T3 结果枝及 T4 营养枝与对照差异不显著,其他均显著高于对照。Chl b 含量,仅果实成熟期 T1、T2、T3 结果枝与 CK 差异未达显著水平,其他均显著高于对照。而 Car 含量,则是果实成熟期 T4 营养枝及 T1、T3 结果枝与 CK 差异不显著,其他也均显著大于对照。说明施肥处理有利增加叶片中的光合色素含量,但不同时期影响程度有所差异。不同物候期比较发现,萌芽期不同枝类叶片中 Chl a、Chl b 和 Chl(a + b)均较低,而此时叶片中 Car 含量较其他时期高,这可能是该时期龙安柚叶片处于大量更新脱落阶段,其叶片中叶绿素含量降解,类胡萝卜素含量增加。但在果实成熟期,不同处理叶片中叶绿素含量最高,而类胡萝卜素含量也较高,则可能是由于此时光照条件差,叶片通过增加叶绿素含量来提高光合速率所致。

3.3. 不同施肥处理对光合特性的影响

不同物候期,各施肥处理叶片的 Pn 均大于对照,叶片 Pn 变化均呈单峰曲线,而 Ci 的变化趋势与 Pn 相反,呈倒峰曲线(图 3)。不同处理的营养枝叶片 Pn 在果实膨大期呈现峰值,其中 T2 ($7.59 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) 最大;各处理的结果枝叶片 Pn 在生理落果期出现最大值。此外,T2 处理营养枝叶片 Pn 不同时期均较高。在果实膨大期,各处理营养枝叶片 Ci 呈现最低值,其中以 T1 ($200.17 \mu\text{mol}/\text{mol}$) 最低,T2 ($259.64 \mu\text{mol}/\text{mol}$) 次之;各处理结果枝叶片 Ci 在生理落果期最低。不同施肥处理营养枝和结果枝叶片 Ci 分别在果实膨大期和生理落果期出现低值,可能是由于这两个时期对应的 Pn 增高导致的。说明施肥有利于提高叶片同化 CO₂ 的能力,尤以 T2 效果显著。

不同处理营养枝和结果枝叶片的 Tr 变化规律均呈单峰曲线,其变化趋势与当地温度变化一致,峰值均出现在最热的 7 月(果实膨大期)。T2 不论是营养枝还是结果枝,其叶片 Tr 在不同物候期均较高,其 Gs 也均大于其他处理。CK 除了其营养枝在生理落果期叶片 Tr 稍高,CK 营养枝和结果枝叶片 Tr 在 4 个物候期均较低于施肥处理。说明施肥处理提高叶片的 Tr,有利于降低龙安柚叶片表面的温度,从而减少在高温条件下的伤害。果实膨大期,T2 处理 Gs 呈现最低值($0.13 \text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 、 $0.13 \text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$),T1、T4 与 T2 的变化趋势类似。在果实膨大期,各处理营养枝 Gs 较低,Ci 也较低,而 Pn 较大,则此时 Gs 低可能是导致该时期 Ci 也较低的原因之一,同时说明营养枝叶片 Pn 是非气孔因素影响的。

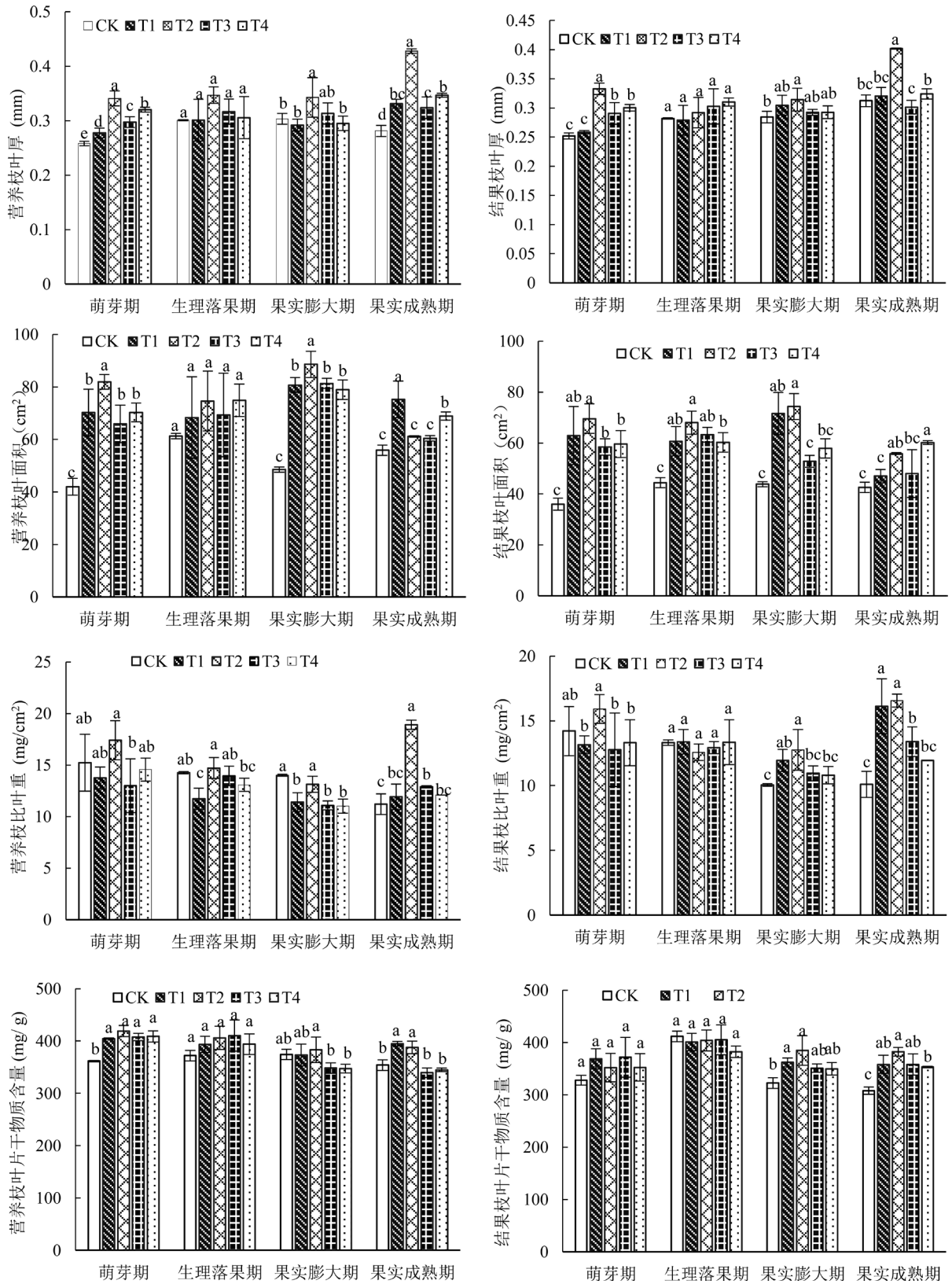
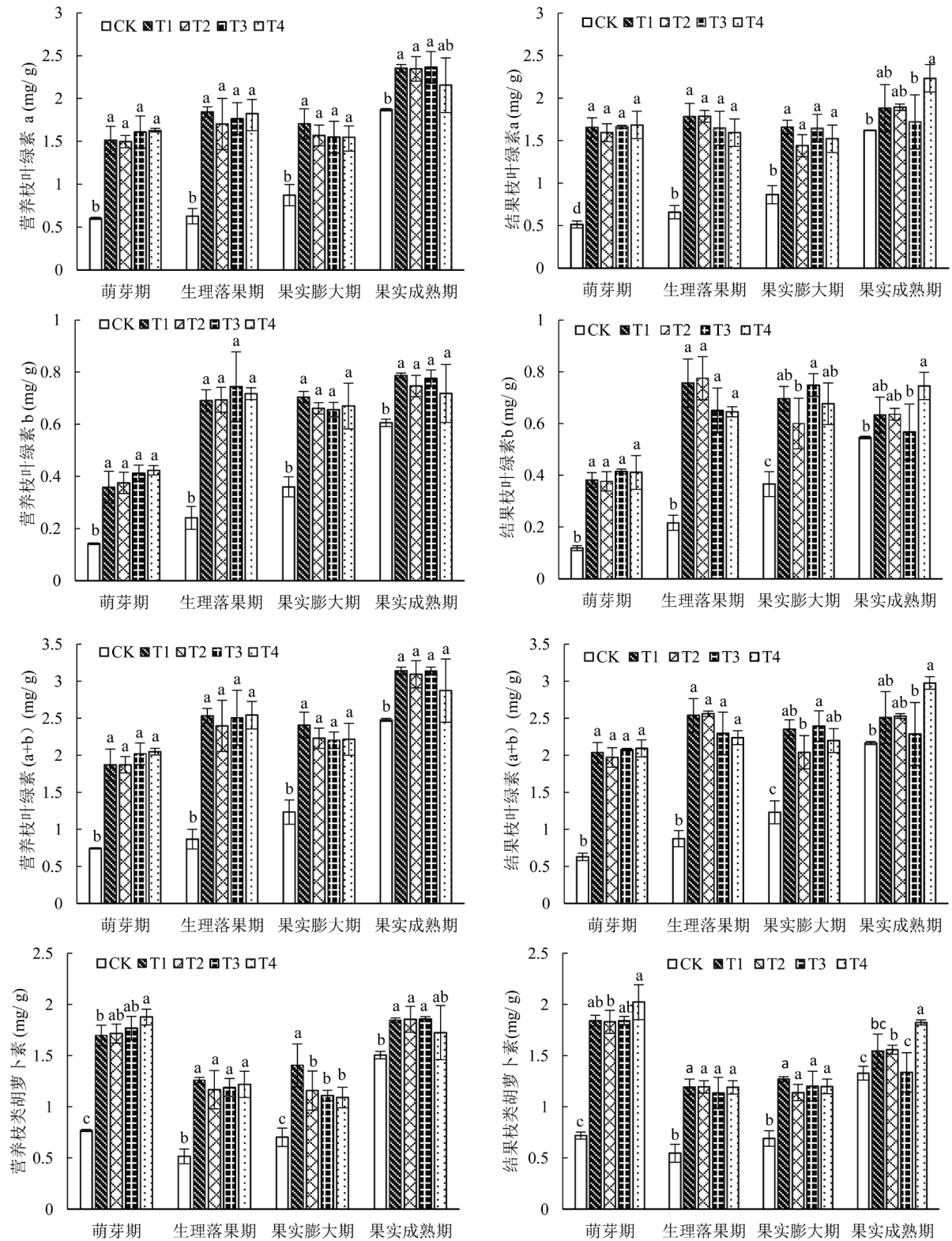


Figure 1. Differences in leaf structure traits of different fertilization treatments
图 1. 不同施肥处理叶片结构性状的差异



注：图中不同小写字母表示在 0.05 水平上差异显著 ($P < 0.05$)，均为同一物候期不同处理间的比较。Note: Different lowercase letters in the figure showed significant difference at 0.05 level ($P < 0.05$), which were compared between different treatments of the same phenology.

Figure 2. Differences in Photosynthetic Pigment Contents in Different Fertilization Treatments

图 2. 不同施肥处理叶片光合色素含量的差异

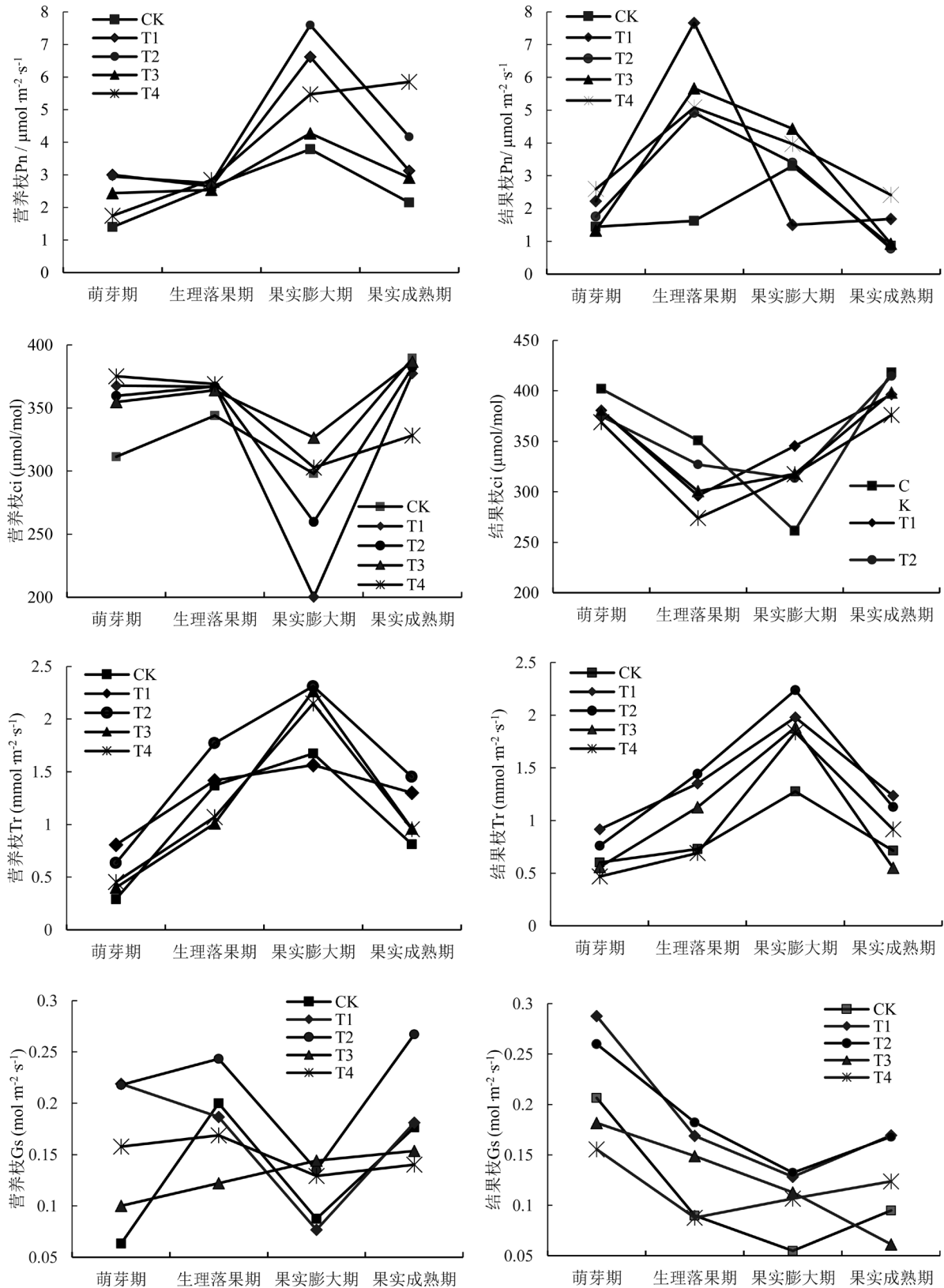


Figure 3. Comparison of Photosynthetic Characteristics of Leaves with Different Fertilization Treatments
图 3. 不同施肥处理叶片光合特性的比较

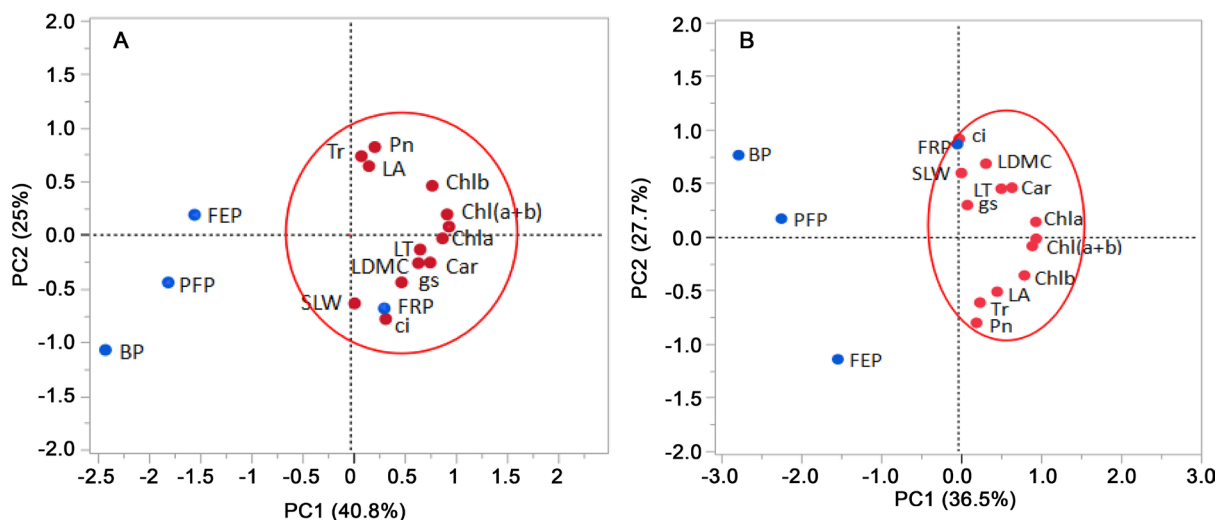
3.4. 光合特性与光合色素含量、叶片结构特性的主成分分析

对不同时期营养枝、结果枝叶片的光合特性与光合色素含量、叶片结构特性等 13 项指标进行主成分分析(图 4)。根据图 4A 可知, PC1 和 PC2 分别解释了总变量的 40.8% 和 25%, 基于营养枝叶片 13 个指标的 PCA 模型中, 可按照其时期被明显地区分为 4 类, 光合特性参数、光合色素含量、叶片结构特性均与果实成熟期归为一类, 而其他三个时期分别单独为一类, 且与这些指标距离较远。根据图 4B 可知, PC1 和 PC2 分别解释了总变量的 36.5% 和 27.7%, 结果枝叶片 13 个指标的 PCA 模型, 按时期也被区分为 4 类, 且规律与营养枝类似。说明不论是营养枝还是结果枝, 对其叶片的光合特性、光合色素含量及叶片结构特性均有影响, 而不同时期比较发现, 果实成熟期对叶片的光合特性、光合色素含量、结构特性影响可能更大。

3.5. 净光合速率与光合色素含量、叶片结构特性的相关性分析

根据表 1 可见, 不同时期, 叶片净光合速率与光合色素含量、叶片结构特性参数多呈现出正相关关系。不同时期净光合速率与光合色素含量间均呈正相关, 其中果实成熟期 Pn 与叶绿素 a、叶绿素 b、叶绿素(a+b)、类胡萝卜素相关性均达显著水平。说明果实成熟期净光合速率与叶绿素含量之间密切相关, 此时光合速率会随叶绿素含量的增加而增高, 存在良好的线性关系。而其他物候期净光合速率与叶绿素含量间相关性不显著, 说明这些时期提高叶片中叶绿素含量, 对净光合速率影响不大。叶片净光合速率与结构特性指标间也呈正相关, 其中萌芽期 Pn 与叶面积相关性达显著水平(0.669), 但是生理落果期 Pn 与叶片结构特性参数呈负相关关系。

通过对净光合速率与光合色素含量及叶片特性的相关性分析, 选择萌芽期 Pn 与叶面积、果实成熟期 Pn 和叶绿素(a+b)含量进行回归分析, 比较不同枝类间差异。不同枝类萌芽期净光合速率 Pn 与叶面积进行



注: 图中字母分别表示: A: 营养枝; B: 结果枝; BP: 萌芽期; FEP: 果实膨大期; PFP: 生理落果期; FRP: 果实成熟期; Pn: 净光合速率; Tr: 蒸腾速率; ci: 胞间 CO₂ 浓度; gs: 气孔导度; Chla: 叶绿素 a; Chlb: 叶绿素 b; Chl(a+b): 叶绿素(a+b); Car: 类胡萝卜素; LT: 叶片厚度; LA: 叶面积; LDMC: 叶片干物质含量; SLW: 比叶重。Note: The letters in the figure indicate: A: vegetative shoots; B: fruiting shoots; BP: budding period; FEP: Fruit enlargement period; PFP: physiological fruiting period; FRP: fruit ripening stage; Pn: net photosynthesis rate; Tr: transpiration rate; ci: intercellular CO₂ concentration; gs: stomatal conductance; Chla: chlorophyll a; Chlb: chlorophyll b; Chl(a+b): chlorophyll (a+b); Car: carotenoid; LT: leaf thickness; LA: leaf area; LDMC: leaf dry matter content; SLW: specific leaf weight.

Figure 4. Principal component analysis of photosynthetic characteristics, photosynthetic pigment content and structural properties

图 4. 光合特性、光合色素含量与结构特性的主成分分析

回归分析发现(图 5), 营养枝叶片 Pn 与叶面积的相关系数为 0.6445, 且达显著水平($P = 0.000 < 0.01$), 而结果枝叶片 Pn 与叶面积的回归方程模型不显著。说明萌芽期营养枝叶片随着叶面积增大, 净光合速率增加。根据图 6 可知, 果实成熟期营养枝和结果枝叶片的 Pn 与叶绿素(a + b)含量的回归模型均达显著水平, 且两者的相关性系数 R^2 值分别为 0.9853、0.767。说明果实成熟期叶片的叶绿素(a + b)含量增加, 净光合速率提高, 光合能力增强, 但营养枝效果更显著。

Table 1. Correlation analysis of photosynthetic characteristics with chlorophyll content and leaf characteristics

表 1. 净光合速率与光合色素含量及叶片特性的相关性分析

R	叶绿素 a(mg/g)	叶绿素 b(mg/g)	叶绿素 (a + b)(mg/g)	类胡萝卜素 (mg/g)	叶面积 cm^2	叶厚/mm	比叶重 (mg/cm^2)	叶片干物质含量 (mg/g)
萌芽期 Pn	0.476	0.454	0.472	0.480	0.669*	0.316	0.119	0.577
生理落果期 Pn	0.423	0.482	0.442	0.431	-0.015	-0.344	-0.244	-0.012
果实膨大期 Pn	0.373	0.354	0.368	0.310	0.525	0.381	0.117	0.321
果实成熟期 Pn	0.700*	0.679*	0.696*	0.685*	0.527	0.298	0.058	0.172

注: *, 显著相关($P < 0.05$), **: 极显著相关($P < 0.01$)。R: 相关系数。Note: *: Significant correlation ($P < 0.05$), **: Very significant correlation ($P < 0.01$). R: correlation coefficient.

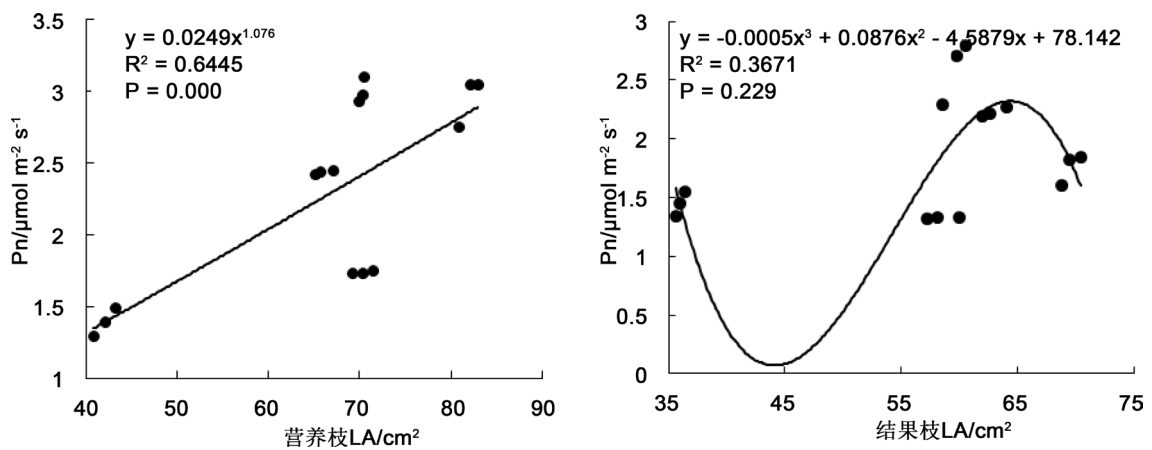


Figure 5. Regression analysis of Pn and leaf area during germination

图 5. 萌芽期 Pn 与叶面积的回归分析

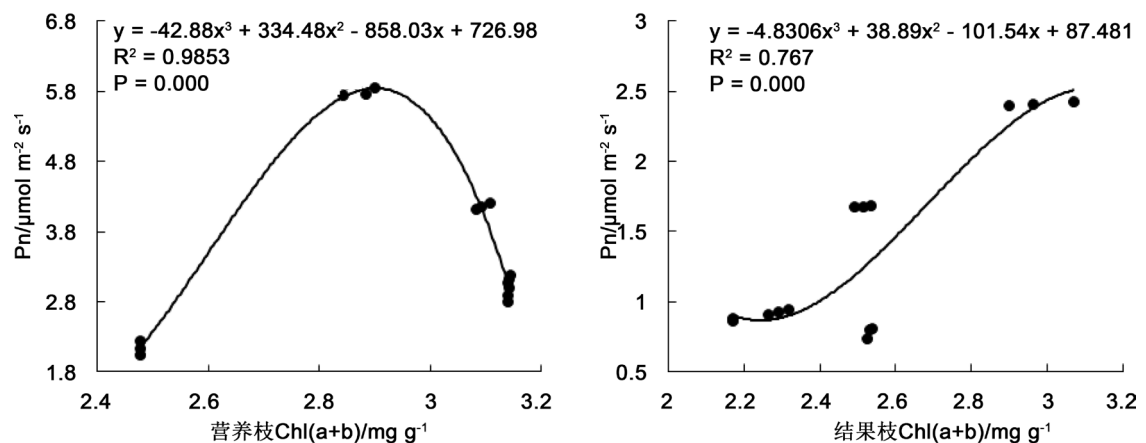


Figure 6. Regression analysis of Pn and chlorophyll (a + b) content in fruit ripening period

图 6. 果实成熟期 Pn 与叶绿素(a + b)含量的回归分析

4. 讨论

4.1. 龙安柚叶片结构性状与产量形成的关系

果树经济产量的高低、果实品质的优劣都与光合作用密切相关[10]，加之柚树 40%以上的氮素是贮藏在叶片中，因此，扩大叶面积，增强光合效能是柚树丰产栽培的一项重要技术措施[16]。本研究表明，施肥处理能提高龙安柚的叶面积，其中对萌芽期和生理落果期的影响显著，这对龙安柚产量形成奠定了良好的基础。比叶重反映了植物的光合碳同化能力[2]，许大全[17]也认为对于同一种植物而言，比叶重与叶片的光合能力呈正相关，在强光下生长的植物叶片的比叶重高，其单位叶面积的光合速率也高。本研究的施肥处理不同程度影响龙安柚比叶重的大小，尤其是处理 2 (T2)使萌芽期和果实成熟期的比叶重明显增大，说明该处理利于提高叶片的光合速率，增加碳同化物的积累量，从而使产量得到大幅度提高，这也基本阐明了 Li 等[13]在不同施肥条件下对龙安柚进行产量测定时，T2 的产量显著高于其他处理的原因。此外，笔者发现不同施肥条件下，各处理间的叶片干物质含量差异不显著，这可能是由于叶干物质含量指标反映植物利用自然资源能力，主要用于体现植物对环境的适应性有关[18]。

4.2. 不同处理叶片光合色素含量的差异

光合色素参与光合作用中光能的吸收、传递和转化等过程。因此，光合色素含量直接影响果树的光合效能，其中叶绿素、类胡萝卜素与光合作用的关系较密切，尤其以叶绿素 a 最为重要[19]。不同施肥处理的叶绿素总含量均显著高于 CK，施用有机肥可不同程度提高叶绿素含量[7] [11]。本研究发现，与对照相比，在萌芽期、生理落果期、果实膨大期，施肥处理显著提高叶片中叶绿素 a、叶绿素 b、叶绿素(a+b)和类胡萝卜素的含量，但是随着有机肥施入量的增多，叶片中光合色素含量并没有显著的变化。叶胜兰等[11]对梨枣开花座果期的叶绿素含量研究发现，各施肥处理的叶绿素 b 含量大小的变化趋势与总含量一致，而本研究也得出类似结论，此外叶绿素 a 含量也与叶绿素总含量一致。研究还发现，萌芽期(3 月中旬)叶绿素含量低，而类胡萝卜素含量高。根据何天富[16]提出，柚树采果后多数开始落叶，以 3~4 个月春梢新叶大量形成时，为落叶最多的时期。则萌芽期是龙安柚大量落叶期，叶片脱落前衰老，导致叶片中叶绿素含量降低，类胡萝卜素含量升高，并降低叶片光合速率。

4.3. 不同处理叶片光合特性的差异

P_n 是反应叶片光合作用的主要指标，不同施肥处理对其影响程度不同[7]，本研究发现各施肥处理叶片的 P_n 均大于对照，其中 T2 处理营养枝叶片 P_n 一直较大于其他。而李保国等[4]在枣树上研究提出不同时期 P_n 变化也不一致，邓秀新等[20]提出柑橘叶片的光合效能随展叶后叶龄增加而提高，叶片成熟后光合效能保持高峰，至入冬前下降，二年生老叶的光合效能不如新叶。本研究发现，营养枝叶片 P_n 在果实膨大期最大，主要由于 7 月份春梢叶片已达成熟状态，则叶片光合效能达到高峰；而龙安柚果实成熟期在 11 月中旬，此时叶片光合效能降低；萌芽期，由于春梢叶片尚未成熟，则笔者选择测定的是老叶，则其光合效能也较低。因此不同物候期 P_n 呈现出单峰曲线，该研究结果与邓秀新等[20]结论相吻合。而 C_i 的变化趋势与 P_n 的相反。许大全[17]曾提出在不能使光合作用饱和的有限光下，叶片 P_n 随光强变化而变化的过程中， P_n 与 C_i 之间呈负相关。此时， C_i 降低时叶肉细胞光合活性增大乃至出现光合速率增高的结果[17]。说明 C_i 在生理落果期和果实膨大期出现低峰，可能是由于这两个时期对应的 P_n 增高导致的。此外， G_s 和 C_i 较低的时期， P_n 却较高，说明施肥处理通过非气孔限制的途径来改善叶肉的光合功能，提高叶片光合速率。Keisuke 等[21]在研究中也发现 P_n 的提高是非气孔因素导致。气孔的开闭是影响蒸腾作用的主要的内部因素，但本研究中 T_r 最大时，而 G_s 最低，则该时期 T_r 的变化不是 G_s 导致的，

可能是外界环境影响的。分析发现,本研究 Tr 的变化趋势与当地温度变化趋势相吻合,不同处理叶片 Tr 在果实膨大期出现最大值,可能是由于龙安柚果实膨大期处于7月中旬,该时期广安地区温度较高,从而增大叶片的蒸腾速率。金孝芳等在茶树上研究发现, P_n 与 Tr 存在极显著正相关,与 C_i 存在显著负相关[22],这与本试验研究结果类似。

4.4. 叶片结构性状、光合色素及光合特性间的关系

P_n 是反应叶片光合作用的主要指标,比叶重[23]、叶绿素含量[24]与 P_n 关系密切,说明比叶重、叶绿素含量高低会影响叶片光合速率。但是关于光合速率与叶绿素含量是否成比例关系,一直存有争议[3]。许大全也提出光合速率仅在弱光下会随叶绿素含量的增加而增高,存在良好的线性关系,而在饱和光下光合速率往往与叶绿素含量的多少无关[17]。金孝芳等提出,茶树叶片的叶绿素与 P_n 之间存在正相关,其中, $Chla$ 、 Chl 与 P_n 之间存在显著性正相关[22]。在吕建林[25]关于甘蔗的研究中发现,不同品种间及同一品种不同生育期 P_n 与叶绿素含量、比叶重均表现显著正相关,但在研究过程中 P_n 的降低和叶绿素含量的减少并不完全成正比。李保国等人在枣上研究发现,同一枣树品种同一时期叶片的光合速率与叶片的叶绿素含量呈显著正相关,同一品种不同时期采样进行分析,由于受其他因素的影响,叶片的光合速率与叶绿素含量间的相关不明显,不同品种间,叶片的叶绿素含量与叶片的光合速率间无明显的相关关系[4]。本研究中,4个物候期中,仅果实成熟期 P_n 与 $Chla$ 、 $Chlb$ 、 Car 正相关达显著水平,而其他时期净光合速率与光合色素含量各指标相关性不显著。其原因可能是龙安柚果实成熟期在11月中旬,相比其他时期,此时光照、温度等环境都差,该时期光合速率会随叶绿素含量的增加而增高,呈现出正相关,说明该时期易受各指标的影响,此观点与主成分分析结果相应。此外,本研究还发现营养枝叶片 P_n 与叶面积、叶绿素含量相关性较强于结果枝。

基金项目

“十二五”国家科技支撑计划项目(2014BAD16B0102-I)。

参考文献

- [1] 束怀瑞. 果树栽培生理学[M]. 北京: 中国农业出版社, 1993: 1-3.
- [2] 刘西军, 陈静, 徐小牛, 舒畅. 桂花叶片 SPAD、叶绿素含量和比叶重特征[J]. 安徽农业大学学报, 2013, 40(1): 51-54.
- [3] 梅闯. 库尔勒香梨不同树形光合特性及果实品质的观测研究[D]: [硕士学位论文]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2012.
- [4] 李保国, 王永蕙. 枣树叶片的的光合速率与叶绿素含量关系的研究[J]. 河北林学院学报, 1991, 6(2): 79-84.
- [5] Evans, J.R. (1989) Photosynthesis and Nitrogen Relationships in Leaves of C3 Plants. *Oecologia*, **78**, 9-19.
- [6] 黄盖群, 张烈, 高辉, 等. 氮磷钾施肥水平对桑树光合特性的影响[J]. 西南农业学报, 2012, 25(6): 2173-2179.
- [7] 罗华, 李敏, 胡大刚, 等. 不同有机肥对肥城桃果实产量及品质的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2012, 18(4): 955-964.
- [8] 吴小华. 鸡粪和化肥配施对夏黑、红地球光合特性的影响研究[D]: [硕士学位论文]. 雅安: 四川农业大学, 2013.
- [9] 张林, 韩振海, 李天忠, 等. 粉煤灰有机肥配施对苹果生长和果实品质的影响[J]. 北方园艺, 2008(4): 20-23.
- [10] 杜研, 杨文忠, 孙林琦, 等. 不同施肥处理对核桃叶片光合作用和叶绿素荧光特性的影响[J]. 甘肃农业大学学报, 2015, 50(4): 97-102.
- [11] 叶胜兰, 徐福利, 王涓玲, 等. 不同有机肥对黄土丘陵区梨枣生长、光合特性及果实品质的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(2): 370-378.
- [12] 熊爱民. 龙安柚高品质果生产技术[J]. 中国南方果树, 2012, 41(5): 83.

- [13] Li, R.F., Chang, Y.D., Hu, T., *et al.* (2017) Effects of Different Fertilization Treatments on Soil, Leaf Nutrient and Fruit Quality of *Citrus grandis* var. *Longanyou*. *World Journal of Engineering and Technology*, **5**, 1-14. <https://doi.org/10.4236/wjet.2017.52B001>
- [14] Arnon, D.I. (1949) Copper Enzymes in Isolated Chloroplasts. Polyphenoloxidase in *Beta Vulgaris*. *Plant Physiology*, **24**, 1. <https://doi.org/10.1104/pp.24.1.1>
- [15] 张宪政. 植物叶绿素含量测定方法比较研究[J]. 沈阳农业大学学报, 1985, 16(4): 81-84.
- [16] 何天富. 柑橘学[M]. 北京: 中国农业出版社, 1999.
- [17] 许大全. 光合作用学[M]. 北京: 科学出版社, 2013: 80-83.
- [18] 高君亮, 罗凤敏, 赵英铭, 等. 乌兰布和沙漠绿洲 3 种杨树比叶面积和叶干物质含量研究[J]. 西北林学院学报, 2016, 31(1): 15-20.
- [19] 姜卫兵, 高光林, 俞开锦, 等. 水分胁迫对果树光合作用及同化代谢的影响研究进展[J]. 果树学报, 2002, 19(6): 416-420.
- [20] 邓秀新, 彭抒昂. 柑橘学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2013.
- [21] Keisuke, O., Atsushi, M., Tsuneo, K., *et al.* (2013) Canopy-Scale Relationships between Stomatal Conductance and Photosynthesis in Irrigated Rice. *Global Change Biology*, **19**, 2209-2220. <https://doi.org/10.1111/gcb.12188>
- [22] 金孝芳, 贾尚智, 石亚亚, 等. 不同绿茶品种(系)光合特性及叶绿素含量的比较研究[J]. 西南农业学报, 2013, 26(2): 520-523.
- [23] 郑淑霞, 上官周平. 不同功能型植物光合特性及其与叶氮含量、比叶重的关系[J]. 生态学报, 2007, 27(1): 171-181.
- [24] Senge, M.O., Ryan, A.A., Letchford, K.A., *et al.* (2014) Chlorophyll, Symmetry, Chirality, and Photosynthesis. *Symmetry*, **6**, 781-843. <https://doi.org/10.3390/sym6030781>
- [25] 吕建林, 陈如凯, 张木清, 等. 甘蔗净光合速率、叶绿素和比叶重的季节变化及其关系[J]. 福建农业大学学报, 1998, 27(3): 285-290.

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2329-7255, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: hjss@hanspub.org