

甜樱桃植株不同冠层部位光合 特性及果实品质的研究

龚荣高^{1,2}, 杨 伟¹, 梁国鲁², 张光伦¹

(1 四川农业大学 园艺学院, 四川雅安 625014; 2 西南大学 园艺园林学院, 重庆北碚 400700)

摘 要:在横断山北段台地选取 5 株甜樱桃植株, 应用 Li-6400 XP 光合测定系统和用 CI-700AB/HR2000 光纤光谱仪研究其不同植株冠层部位对生理辐射光谱、光合特性及果实品质的影响。结果表明: (1) 甜樱桃树冠下层和内部表观量子效率(α)最高, 且光补偿点(LCP)最低, 对弱光的利用能力强, 而在树冠上层和外层光饱和点(LSP)极显著高于下层和内部, 利用强光的能力强。 (2) 甜樱桃植株冠层的生理辐射由树冠的下层至上层、以及由内部至外部逐渐增强, 短波光所占比例增大, 说明甜樱桃对环境强光和相对弱光都具有一定的适应能力。 (3) 甜樱桃植株树冠上层叶片的最大光合速率(P_{max})、暗呼吸速率(R_d)、 LCP 和 LSP 均极显著高于下层, 其光合同化以及代谢能力强; 且生理辐射强、短波光多, 利于甜樱桃果实可溶性固形物(TSS)、Vc 及糖积累, 但不利于有机酸积累。

关键词:甜樱桃; 植株冠层; 光合特性; 生理辐射

中图分类号: Q945.79

文献标志码: A

Photosynthetic Properties and Fruit Quality in Different Parts of Sweet Cherry Canopy

GONG Ronggao^{1,2}, YANG Wei¹, LIANG Guolu², ZHANG Guanglun¹

(1 Department of Horticulture, Sichuan Agricultural University, Ya'an, Sichuan 625014, China; 2 College of Horticulture and Landscape Architecture, Southwest University, Beibei, Chongqing 400700, China)

Abstract: Five representative sweet cherry trees were selected from northern part of Hengduan Mountains for comparing physiological radiation, photosynthetic properties and fruit qualities of sweet cherry, especially analyzing light response of photosynthesis (P_n -PPFD) response curve and the correlation between fruit qualities and physiological radiation and photosynthetic parameters of sweet cherry. The results showed that: (1) The apparent quantum yield (α) was the highest, while light compensation point (LCP) the lowest in the substrate and inner part of canopy, which indicated sweet cherry leaves had a good ability of utilizing the low light. However, the light saturated point (LSP) was significantly higher in the top and outer part of canopy, which showed sweet cherry leaves had a good ability of utilizing the strong light. (2) The physiological radiation intensity and ratio of short wave light increased from the substrate to the top part and from the inner to the outer part of canopy. Thus, they indicated that sweet cherry reflected great capability of adapting to low or strong light. (3) The maximum photosynthetic rate (P_{max}), dark respiration rate (R_d), LCP and LSP were the highest in the top and outer part of canopy, enhancing leaves used efficiency to light intensity, increasing leaves ability of utilizing the strong light. The physiological radiation and short wave light intensity were strong, TSS, Vc and total sugar contents increased, but organic acid content re-

收稿日期: 2013-10-08; 修改稿收到日期: 2014-03-03

基金项目: 国家农业科技成果转化项目(2010GB2F000408)

作者简介: 龚荣高(1975—), 男, 博士、副教授, 主要从事果树生理生态方面的研究。E-mail: gongronggao@tom.com

duced.

Key words: sweet cherry; canopy; photosynthetic properties; physiological radiation

甜樱桃 [*Cerasus avium* (L.) Moench.] 属蔷薇科 (Rosaceae) 樱桃属 (*Cerasus*) 落叶果树, 原产于亚洲中西部地区, 适宜于高海拔山地半干旱冷凉生态型区。现已发展为川西横断山脉北段岷江流域上游干旱河谷区的重要经济果木。然而, 甜樱桃植株高大, 不同冠层部位的果实品质差异较大, 目前鲜有关于其生态生理方面的研究报道。光合积累是果实产量品质形成的基础, 而生理辐射 (光谱为 380~710 nm 的辐射) 作为光合作用的能源, 是影响光合特性的重要因子^[1-3]。它由紫光 (380~435 nm)、蓝光 (436~470 nm)、青光 (471~490 nm)、绿光 (491~575 nm)、黄光 (576~595 nm)、橙光 (596~626 nm) 和红光 (627~710 nm) 组成^[4]。在果实品质的形成过程中, 光质不仅为光合作用、有机物合成和生长发育提供能源, 同时也作为一种环境信号来调控果实品质形成。红光利于碳水化合物的合成, 而蓝光利于蛋白质的合成^[4]。

目前, 有关光质对果实品质影响的研究报道, 多集中在以某个或几个光种类或波长方面的研究^[2]。虽然前人研究了外部环境光照对植物的树冠结构特征的影响情况^[5], 但树冠不同部位对光照的影响却鲜有研究。尚未见关于自然辐射中光波的连续性和综合作用性方面的研究报道。为此, 本研究报道了甜樱桃植株不同冠层部位的生理辐射光谱成分、果实品质和叶片光响应曲线的变化规律, 并分析甜樱桃果实品质与生理辐射及叶片光响应曲线特征参数的相关性, 探索植株不同冠层部位间果实品质差异的内在原因, 为甜樱桃整形修剪和生理辐射光谱调控提供理论和实践依据。

1 材料和方法

1.1 材料

试验于 2011~2012 年在川西横断山脉北段茂县甜樱桃果园进行。果园位于 31°17'N, 103°83'E, 海拔高度 1 673 m, 年日照时数 1 572.6 h、年均温 12.0 °C、年降水量 510.4 mm、空气相对湿度 71%, 土壤为山地褐土, 属岷江上游干旱河谷生态型区。选取 12~15 年生山樱桃 (*C. serrulata* G. Don.) 为砧木的甜樱桃‘红灯’品种, 小冠疏层形、树势相似, 并生产常规管理相对一致的代表植株 5 株, 株行距 3.3 m×5 m, 干高 60~80 cm, 树高 2.5~3.0 m, 冠

径 (SN×EW) 为 (4±0.5) m×(4±0.5) m, 主枝 4~6 个, 进行观测和取样。以树体中心干为中心, 根据冠高将树冠均分为下层、中层和上层, 并将已分出的树冠中层从中心干开始, 从内到外均分为内部、中部和外部。分别在这 6 个部位进行光响应曲线及生理辐射的绝对辐射能分布和成分测定。同时, 分别在相应测定部位采取甜樱桃成熟果实 (花后 55 d) 样本 60 个, 冷藏保存, 带回实验室进行果实品质测试分析。

1.2 光响应曲线的测定

在甜樱桃果实发育期的 4 月中旬~5 月中旬, 分别用 1/8 m³ 折叠立方体置于树冠的 6 个分区内, 选取新稍第 4~6 片成熟功能叶片, 通过标记保证各部位的叶龄相同。在晴 (或阴) 天的 9:00~11:30, 运用 Li-6400 XP 光合测定系统, 在自然温湿度条件下进行光响应曲线的测定。测定时, 叶片光合有效辐射 (PAR) 变化范围设定为 0、20、50、100、200、500、800、1 000、1 500、2 000 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 叶室为 2 cm×3 cm 的标准叶室, 采用人工红蓝光源 (Li-6400-02B LED 红蓝光源), CO₂ 浓度设为 (400±20) $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$, 叶温为 (25±1) °C。每天测定树冠的 6 个部位各 1 次, 连续测 5 d, 取其平均值绘制光响应曲线。

1.3 生理辐射光谱的测定

用 1/8 m³ 折叠立方体置于树冠 6 个分区内光照和生长结果具代表性的部位, 分别在甜樱桃果实发育期的 4 月中旬~5 月中旬, 选择一个晴天, 每个代表区随机选取 10 个代表样点在 11:00~13:00 进行生理辐射的测试, 取其平均值。测定其 380~710 nm 生理辐射光谱的绝对辐射能分布和成分。所使用仪器为美国 Ocean Optics 公司生产的光纤光谱仪, 型号为 CI-700AB/HR-2000。

1.4 果实品质测定

果实品质测定参照文献 [6], 有机酸测定采用 NaOH 滴定法, 果实可溶性总糖测定采用斐林试剂法, Vc 含量测定采用 2,6-D 法。可食率为可食的果皮和果肉的质量与果实质量的百分比。

1.5 数据处理

光响应曲线 (P_n -PPFD response curve) 拟合采用直角双曲线模型^[3], 其表达式为:

$$P_n = (\alpha \times PAR \times P_{\max}) / (\alpha \times PAR + P_{\max}) - R_d$$

式中, P_n 表示净光合速率, α 表示表观量子效率; PAR 表示光合有效辐射; P_{max} 表示最大光合速率; R_d 表示暗呼吸速率。

光补偿点(LCP)及光饱和点(LSP)的计算采用张雪松等^[1]的方法。所用软件为 SPSS 软件。

2 结果与分析

2.1 甜樱桃植株不同冠层部位光响应曲线

利用直角双曲线非线性模型拟合光响应曲线,其决定系数(R^2)均在 99% 以上,拟合效果均较好。叶片净光合速率平均值上层>中层>下层,而外部>中部>内部(图 1)。经多重比较结果表明上层和外部极显著高于其它部位,而中层也极显著高于下层,中部极显著高于内部。说明植株冠层内部和下层不利于叶片的光合积累。

利用直角双曲线拟合得到的特征参数表观量子

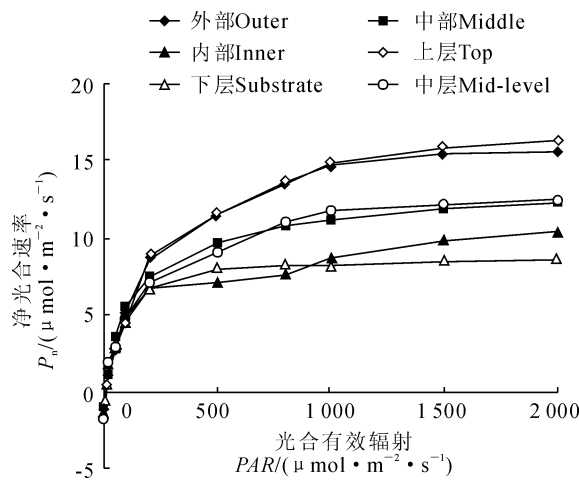


图 1 不同植株冠层甜樱桃光响应曲线
Fig. 1 The response of P_n to photosynthetic photon flux density in different parts of tree

效率(α)、最大光合速率(P_{max})和暗呼吸(R_d),进一步计算出 LCP 和 LSP (表 1)。拟合结果表明,植株冠层下层和树冠内部的表观量子效率 α 最大,分别达到 0.122 和 0.121,上层和外部最小,分别为 0.090 和 0.091。由于表观量子效率是反映植物光能利用和光合物质生产效率的基本参数,值越大效率高。因而,说明甜樱桃树冠下层和中层内部的叶片对光的利用能力和光合生产效率比上层和外部强。同时,树冠下层和中层内部叶片的 LCP 也最低, LCP 则是植物适应低光照度的重要指标,表明它们对弱光的利用能力强。由于这 2 个部位的生理辐射强度也最弱(表 2),表明甜樱桃在生理辐射较弱的环境中,可能是通过提高对弱光的利用率来保持一定的光合效能。树冠上层的最大光合速率最高,其次为外部,可达到 $18.22 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上, R_d 和 LSP 也是最高,表明植株这 2 个部位具有较高的同化和代谢能力。随植株冠层从上到下,以及冠层中部从外到内, LSP 逐渐降低。由于 LSP 是反映植物适应强光照度的重要生态生理指标,表明植株树冠上层和外部对强光利用较强,光合效率高。试验结果进而说明树冠大,树冠下层和内部光照差,影响下层和内部光合效率。

2.2 不同植株冠层生理辐射及其与光响应特征参数的相关分析

表 2 可知,植株冠层从下层至上层或从内部至外部,生理辐射总辐射强度逐渐增强,各生理辐射光谱成分的绝对辐射能也有相似的变化规律。但从各光谱成分所占生理辐射的百分比看,从下层至上层或从内部至外部,波长较短的紫光和蓝光所占比例不断增加;同时,波长较长的橙光和红光所占比例却不断降低;然而,青光、绿光和黄光,所占比例变化相对较小。此外,植株冠层内生理辐射总体上表现为

表 1 甜樱桃植株不同冠层部位叶片光响应曲线特征参数及光补偿点和光饱和点
Table 1 LCP , LSP and photosynthetic parameters of P_n -PPFD response curve in the leaves of different parts of the sweet cherry tree canopy

部位 Part	表观量子效率 α	最大光合速率 P_{max} $/(\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$	暗呼吸速率 R_d $/(\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$	光补偿点 LCP $/(\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$	光饱和点 LSP $/(\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$
上层 Top	0.090±0.005 bB	19.07±0.41 aA	1.119±0.21 aA	11.78 aA	668.11 aA
中层 Mid-level	0.099±0.009 abAB	14.15±0.39 bB	0.924±0.33 bB	8.63 bB	462.46 cC
下层 Substrate	0.122±0.008 aA	9.87±0.35 cC	0.835±0.28 bB	6.30 cC	294.31 fF
外部 Outer	0.091±0.006 bB	18.22±0.31 aA	0.866±0.24 bB	9.08 bB	592.79 bB
中部 Middle	0.117±0.007 aA	13.52±0.39 bB	0.858±0.31 bB	6.91 cC	373.87 dD
内部 Inner	0.121±0.008 aA	10.59±0.40 cC	0.885±0.24 bB	6.74 cC	316.22 eE

注:同列的不同大小写字母分别表示 0.01 和 0.05 水平差异显著;下同。
Note:Different capital and normal letters within column are significant difference at 0.01 and 0.05 level. The same as below.

总辐射越强,波长较短的蓝紫光比例增高,红橙光比例减少。

由表 2 可见,生理辐射总辐射强度依次从甜樱桃冠层的上层到下层,从外部到内部均呈极显著的降低,各光谱组分均表现出树冠上层和外部光照强度极显著高于下层和内部。然而,从各光谱组分所占总辐射百分率来看,从树冠上层到下层,以及从树冠外部到内部,均表现为波长较短的蓝紫光比例不断降低,波长较长的红橙光所占的比例则逐渐升高,绿光比例的差异则不明显。由此表明,不同冠层部位的生理辐射强度和光谱组成上,总体上表现出树冠顶部外围的光强不仅高于内部和下层,而且光谱能量也逐渐移向波长较长的红橙光,而不被叶片吸收的绿光比例变化不明显。

由表 4 可见,生理辐射与光响应特征参数及 *LCP* 和 *LSP* 的相关密切。生理辐射总辐射、蓝紫光和红橙光均与除 R_d 外的其它参数显著或极显著相关。波长较短的紫光和蓝光与表观量子效率 α 呈极显著负相关,与波长较长的橙光和红光呈显著或极显著正相关,而最大光速率、*LCP* 和 *LSP* 则相反。说明蓝紫光比例多,红橙光比例少,不利于光能利用率提高,但利于光合同化和代谢能力的增强。

2.3 果实品质与生理辐射和光合特性的相关性研究

从表 3 可知,甜樱桃树冠从上层到下层,以及从外部到内部,可溶性固形物(TSS)和总糖含量均极显著的降低,而有机酸的含量却显著或极显著升高。单果重和果实 Vc 含量表现为树冠上层和外部显著高于下层和内部。结果说明,植株不同冠层部位对果实的 TSS、有机酸和总糖含量影响明显,对单果重和果实 Vc 含量有一定的影响,但对果实可食率影响却较小。

将果实品质的各指标分别与各光合特征参数、生理总辐射强度、可见光各光谱辐射强度进行相关分析,计算其相关系数。从表 4 可见,生理辐射总辐射及各光谱组成成分的强度与甜樱桃果实 TSS、总糖含量、Vc 含量和单果重均呈显著或极显著相关,特别是与 TSS 和总糖含量基本呈极显著的正相关,而与有机酸含量呈显著或极显著的负相关。说明甜樱桃植株树冠层部位的生理辐射强,利于果实增大,以及 Vc 含量、总糖积累和 TSS 的提高,但不利于有机酸的积累。然而,果实的可食率与生理辐射的相关性不明显。这表明生理辐射对果实可食率的影响小。因此,总体表现为生理辐射强,果实增大,TSS、

表 2 不同植株冠层生理辐射及其光谱成分强度

Table 2 The comparative analysis spectrum of physiological radiation in different parts of sweet cherry tree(W/m²)

部位 Part	总辐射 Total 380~710 nm	紫光 Purple light 380~435 nm	蓝光 Blue light 436~470 nm	青光 Cyan light 471~490 nm	绿光 Green light 491~575 nm	黄光 Yellow light 576~595 nm	橙光 Orange light 596~626 nm	红光 Red light 627~710 nm
上层 Top	145.3 A	13.3 A(9.2)	15.8 A(10.8)	8.7 A(6.0)	30.7 A(21.1)	25.7 A(17.7)	13.0 A(8.9)	37.8 A(26.0)
中层 Middle	99.5 C	8.0 C(8.0)	8.7 C(8.7)	5.8 C(5.8)	21.3 C(21.4)	18.1 B(18.2)	10.2 B(10.3)	27.4 C(27.5)
下层 Substrate	59.5 F	2.2 F(3.8)	3.0 F(5.0)	2.4 D(4.0)	12.3 F(20.7)	12.6 D(21.2)	8.6 D(14.5)	18.1 F(30.5)
外部 Outer	136.0 B	11.4 B(8.4)	14.1 B(10.4)	8.1 B(6.0)	29.0 B(21.3)	25.9 A(19.1)	13.2 A(9.7)	34.1 B(25.1)
中部 Mid-part	92.9 D	6.2 D(6.7)	7.2 D(7.7)	5.7 C(6.2)	19.8 D(21.3)	18.7 B(20.2)	9.4 C(10.1)	25.9 D(27.8)
内部 Inner	68.7 E	3.4 E(5.0)	4.1 E(6.0)	2.7 D(3.9)	14.3 E(20.8)	14.8 C(21.6)	8.9 D(12.9)	20.6 E(29.9)

注:括号内数据表示占总辐射的百分率。
Note:Figures in brackets denote percentage in corresponding part of this wave band in physiological radiation.

表 3 不同植株冠层果实品质的比较

Table 3 The comparative analysis of fruit quality in different parts of sweet cherry

部位 Part	单果鲜重 Fruit mass/g	TSS /%	有机酸含量 Organic acid content(mg/g)	Vc 含量 Vc content (mg/g)	总糖含量 Total sugar (mg/100g)	可食率 Edible percent /%
上层 Top	8.73 aA	14.93 bA	2.40 dB	41.14 aA	102.50 aA	86.6 aA
中层 Middle	7.70 bA	13.40 cB	2.86 cB	31.24 bB	97.92 cB	86.3 aA
下层 Substrate	7.31 bAB	11.43 dC	5.40 bA	28.82 cB	88.23 dC	85.9 aA
外部 Oute	7.96 abA	15.30 aA	2.82 cB	33.88 bB	102.00 bA	85.9 aA
中部 Mid-part	7.80 abA	13.10 cB	2.89 cB	31.90 bB	99.96 cB	86.5 aA
内部 Inner	6.11 cB	11.42 dC	5.91 aA	22.22 dC	90.27 dC	86.4 aA

表 4 甜樱桃果实品质与生理辐射及叶片光响应曲线特征参数的相关性

Table 4 Correlation between fruit quality and physiological radiation and photosynthetic parameters of sweet cheery leaf in response of P_n to PPFD

项目 Item	单果重 Single fruit weight	可溶性固形物 TTS	有机酸含量 Organic acid content	Vc 含量 Vc content	总糖含量 Total sugar	可食率 Edible percent
α	-0.761 *	-0.945 * *	0.796 *	-0.796 *	-0.847 *	-0.067
P_{max}	0.816 *	0.985 * *	-0.847 *	0.861 *	0.943 * *	0.192
R_d	0.596	0.523	-0.486	0.715	0.597	0.625
LCP	0.770 *	0.833 *	-0.712	0.856 *	0.810 *	0.351
LSP	0.800 *	0.951 * *	-0.786 *	0.861 *	0.886 * *	0.184
总辐射 Total radiation	0.805 *	0.981 * *	-0.838 *	0.854 *	0.940 * *	0.209
紫光 Purple light	0.812 *	0.971 * *	-0.850 *	0.862 *	0.939 * *	0.246
蓝光 Blue light	0.805 *	0.974 * *	-0.819 *	0.860 *	0.923 * *	0.193
青光 Cyan light	0.850 *	0.986 * *	-0.912 * *	0.875 * *	0.978 * *	0.236
绿光 Green light	0.806 *	0.984 * *	-0.848 *	0.851 *	0.945 * *	0.207
黄光 Yellow light	0.755 *	0.978 * *	-0.806 *	0.804 *	0.931 * *	0.168
橙光 Orange light	0.729	0.956 * *	-0.714	0.789 *	0.839 * *	0.019
红光 Red light	0.811 *	0.967 * *	-0.845 *	0.866 *	0.947 * *	0.277

注: * 表示相关性在 0.05 水平上显著, * * 则在 0.01 水平上显著(n=5)。
Note: *. Denote correlation was significant difference at the 0.05 level and * * at the 0.01 level(n=5).

Vc 和糖增加,有机酸下降,利于品质的提高。

3 讨 论

生理辐射是植物光合作用的基础,是影响光合积累的重要因子^[3-4,7]。本试验表明,甜樱桃冠层不同部位的生理辐射强度和甜樱桃果实品质差异大。生理辐射总辐射及各光谱组分的辐射强度均表现出树冠上层和外部光照强度极显著高于下层和内部。光谱组分所占总辐射百分率则表现树冠下层和内部蓝紫光所占的比例降低,而红橙光比例升高,但叶片很少吸收的绿光在树冠上下和内外的比例变化不明显。由于树冠内部和下层以散射辐射为主^[4],因而从树冠外部到内部和从上层到下层,光谱的能量逐渐移向波长较长的红橙光。相对甜樱桃树冠下层和内部而言,上层和外部的果实较大,Vc、TSS 和总糖含量高,有机酸下降,品质好,但可食率相近。

试验发现甜樱桃果实品质与生理辐射的强弱关系密切,生理辐射总辐射及各光谱组成成分强度大,果实增大,Vc、TSS 和可溶性总糖含量增加。这可能与叶片截获生理辐射能量多,碳固定能力增强,促进碳水化合物积累有关,进而提高了果实果实品质^[8-10]。试验中树冠内生理辐射强,利于果实增大与龚荣高等^[11]在青脆李上研究结果不一致。他们认为高海拔区生理辐射强,短波光强度大,不利于果实增大。这可能与试验点的海拔不太高和甜樱桃为喜光果树有关。但引起果实品质的生态生理机理还

有待进一步研究。而且,占峰等^[5]研究发现外部光照环境还可能通过改变植株的冠层结构进而影响到枝条寿命。因此,甜樱桃栽培中植株树冠越高大,树冠下层和内部的生理辐射强度越低,不利于光合积累,果实品质降低。生产上,甜樱桃整形修剪时需要注意树冠不宜太大。

甜樱桃树冠下层和内部的叶片表观量子效率 α 最高,且光补偿点最低,由于 LCP 是植物适应低光照度的重要指标,这表明甜樱桃在生理辐射较弱的环境中,是通过提高对弱光的利用率来保持一定的光合效能。而在树冠上层和外部 LSP 高,强光利用能力强^[12]。Moreno 等^[13]研究表明随光强的变化,植物能够在形态及生理方面产生可塑性反应,以适应变化的光环境。李庆康等^[7]研究表明,强光环境下植物表现出较高的 LSP 和 LCP ,它可以通过高光合效率利用强光,防止光组织破坏。前人研究也说明光照条件改变,其光合特性将发生相应变化^[11-14]。虽然树冠下层和内部叶片的暗呼吸速率和光补偿点较低,可减少自身的消耗,但光合速率却远小于树冠上层和外部的,所以不利于光合积累。其实,光合作用和呼吸作用两者是相互紧密联系的两个过程,可以相互促进,因为呼吸作用依赖光合作用产物作为其分解基质,而光合作用依赖呼吸作用一系列产物作为其蛋白和 ATP 合成的碳骨架^[15]。一定范围内,生理辐射的总辐射及短波光强,光饱和点升高,果实 TSS 和可溶性总糖含量增加,但有机酸

含量下降。这可能与叶片截获生理辐射能量多,碳固定能力增强,促进碳水化合物积累有关,进而提高了果实 TSS 和总糖的含量。这与姜仲书等^[2]在苹

果上的研究结果相近。但引起果实品质差异的生态生理机理还有待进一步研究。

参考文献:

- [1] ZHANG X S(张雪松), SHEN SH H(申双和), SONG J(宋 洁). The vertical distribution of cotton leaf nitrogen content and photosynthetic characteristics in the North China Plain[J]. *Acta Ecologica Sinica*(生态学报), 2009, **29**(4): 1 893—1 898(in Chinese).
- [2] JIANG ZH SH(姜仲书), ZHANG G L(张光伦), JIANG G L(江国良), *et al.* Study on light component and its correlation with fruit quality in canopy of Golden Delicious apple tree[J]. *Journal of Fruit Science*(果树学报), 2008, **25**(5): 625—629(in Chinese).
- [3] ZHANG M(张 弥), WU J B(吴家兵), GUAN D X(关德新), *et al.* Light response curve of dominant tree species photosynthesis in broadleaved Korean pine forest of Changbai Mountain[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*(应用生态学报), 2006, **17**(9): 1 575—1 578(in Chinese).
- [4] 张光伦. 园艺生态学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2009: 65.
- [5] ZHAN F(占 峰), YANG D M(杨冬梅). Relationships among light conditions, crown structure and branch longevity: a case study in *Osmanthus fragrans* and *Metasequoia glyptostroboides*[J]. *Acta Ecologica Sinica*(生态学报), 2012, **32**(3): 984—992(in Chinese).
- [6] 韩雅珊. 食品化学实验指导[M]. 北京: 北京农业大学出版社, 1986: 89—92.
- [7] LI Q K(李庆康), MA K P(马克平). Advances in plant succession ecophysiology[J]. *Acta Phytoecologica Sinica*(植物生态学报), 2002, **26**(S): 9—19(in Chinese).
- [8] WU T G(吴统贵), WU M(吴 明), XIAO J H(萧江华). Ecophysiology of dominant plant species during succession in Hangzhou bay wet lands[J]. *Acta Bot. Boreal. -Occident. Sin.*(西北植物学报), 2008, **28**(8): 1 683—1 688(in Chinese).
- [9] JIAO N Y(焦念元), NING T Y(宁堂原), ZHAO CH(赵 春), *et al.* Characters of photosynthesis in intercropping system of maize and peanut[J]. *Acta Agronomica Sinica*(作物学报), 2006, **32**(6): 917—923(in Chinese).
- [10] LI CH H(李潮海), ZHAO Y L(赵亚丽), YANG G H(杨国航), *et al.* Effects of shading on photosynthetic of different genotype maize [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*(应用生态学报), 2007, **18**(6): 1 259—1 264(in Chinese).
- [11] GONG R G(龚荣高), DING J L(丁建林), ZHANG G L(张光伦). Studies on physiological radiation spectrum and photosynthetic properties of Qingcui plum at different altitudes[J]. *Journal of Sichuan Agricultural University*(四川农业大学学报), 2010, **28**(4): 454—458(in Chinese).
- [12] ZHANG J(张 娇), SHI Y J(施拥军), ZHU Y Q(朱月清), *et al.* The photosynthetic carbon fixation characteristics of common tree species in northern Zhejiang[J]. *Acta Ecologica Sinica*(生态学报), 2013, **33**(6): 1 740—1 750(in Chinese).
- [13] MORENO S A, WEISS A, PAPAROZZI E T, *et al.* Stability of leaf anatomy and light response CHIVES of field grown maize as a function of age and nitrogen status[J]. *Plant Physiology*, 2002, 159: 819—826.
- [14] LIU X ZH(刘贤赵), KANG SH ZH(康绍忠), SHAO M A(邵明安), *et al.* Effects of soil moisture and shading levels on photosynthetic characteristics of cotton leaves[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*(应用生态学报), 2000, **11**(3): 377—381(in Chinese).
- [15] ATKIN O K, EVANS J R, BALL M C, *et al.* Leaf respiration of snow gum in the light and dark: interactions between temperature and irradiance[J]. *Plant Physiology*, 2000, 122: 915—923.