

付沃兴, 刘德春, 匡柳青, 等. 透湿性反光膜对柑橘果皮蜡质晶体结构和组成成分的影响[J]. 江苏农业学报, 2022, 38(4): 1062-1069.  
doi:10.3969/j.issn.1000-4440.2022.04.024

## 透湿性反光膜对柑橘果皮蜡质晶体结构和组成成分的影响

付沃兴, 刘德春, 匡柳青, 蒙志鑫, 刘勇, 胡威, 杨莉

(江西农业大学农学院, 江西 南昌 330045)

**摘要:** 以12年生枳砧宫川温州蜜柑为试验材料, 在果实膨大期覆盖透湿性反光膜, 研究其对土壤含水量、冠层光照特征、果实色泽、果皮蜡质晶体结构和成分等的影响。结果表明, 覆盖透湿性反光膜可以有效地维持土壤水分。柑橘树冠层的地表反射光光照度、光合指标( $P_n$ 、 $T_r$ 、 $G_s$ )、色差指数( $L^*$ 、 $a^*$ 、 $b^*$ 、 $c^*$ 和 $CCI$ )显著提高。覆盖透湿性反光膜后的果皮蜡质排列紧密、分布均匀, 蜡质晶体似乎与无定型蜡质结构融合并明显减少。透湿性反光膜处理后果皮蜡质总量、蜡质组分脂肪酸和烷烃含量变化不大, 醇类含量有所上升但不显著, 而醛类含量极显著下降, 各组分占总量比例大小顺序为烷烃(35.19%)>脂肪酸(34.60%)>醇(18.57%)>醛(11.64%)。蜡质组分含量测定结果显示: C20脂肪酸在透湿性反光膜覆盖处理后显著下降, 烷烃组分含量在覆盖处理后无显著变化; C28醛在透湿性反光膜处理后相比于对照极显著下降, 是引起总醛减少的主要原因; C28醇在透湿性反光膜处理后极显著上升, C32醇含量显著下降。综上所述, 透湿性反光膜的铺设引起了宫川温州蜜柑光照环境的改变和光合能力的提升, 使得果皮蜡质晶体数量和结构以及蜡质组分含量发生变化, 从而对果实外观品质的提高起到了积极作用, 推测蜡质组分中C28醛含量显著下降可能与晶体减少以及透湿性反光膜覆盖有关。

**关键词:** 温州蜜柑; 透湿性反光膜; 光照; 果皮蜡质

**中图分类号:** S666.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2022)04-1062-08

## Effects of vapor-permeable reflective film on cuticular wax structure and composition of citrus

FU Wo-xing, LIU De-chun, KUANG Liu-qing, MENG Zhi-xin, LIU Yong, HU Wei, YANG Li

(College of Agronomy, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, China)

**Abstract:** Miyakawa Satsuma mandarin with 12-year-old trifoliate orange rootstock was used as the test material. The vapor-permeable reflective film was covered during the fruit expansion period, and its effects on soil water content, canopy light characteristics, fruit color, wax crystal structure and composition of the peel were studied. The results showed that covering with vapor-permeable reflective film could effectively maintain soil moisture. The surface reflected light intensity, photosynthetic indices ( $P_n$ ,  $T_r$ ,  $G_s$ ), and chromatic aberration indices ( $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$ ,  $c^*$  and  $CCI$ ) of citrus canopy were significantly improved. The cuticular wax covered by the vapor-permeable reflective film was closely arranged and evenly distributed, and the waxy crystals seemed to be fused with the amorphous wax structure and decreased significantly. The total amount of wax and the contents of fatty acids and alkanes did not change significantly after the vapor-permeable reflective film treatment, the content of alcohols increased but did not show significant difference, while the content of aldehydes decreased significantly. The proportions of each component followed the order of alkanes (35.19%) > fatty

收稿日期: 2022-05-07

基金项目: 国家重点研发计划项目(2019YFD1000100); 国家自然科学基金项目(31860544); 江西省柑橘产业技术体系项目(JXARS-07-栽培岗位)

作者简介: 付沃兴(1998-), 男, 湖南岳阳人, 硕士研究生, 研究方向为果树发育生理。(E-mail) 1603805000@qq.com

通讯作者: 杨莉, (E-mail) yangli526526@126.com; 胡威, (E-mail) wei.hu1986@foxmail.com

acids (34.60%) > alcohols (18.57%) > aldehydes (11.64%). The determination results of waxy components showed that C20 fatty acid decreased significantly after being covered with vapor-permeable reflective film, but there was no significant difference in the content of alkane components. Compared with the control, C28 aldehyde decreased significantly after being treated with vapor-permeable reflective film, which was the main reason for the reduction of total aldehydes. C28 alcohol increased significantly after the treatment of vapor-permeable reflective film, and C32 alcohol decreased significantly. To sum up, the installation of the vapor-permeable reflective film caused the change of light environment and the improvement of photosynthetic capacity of the Miyakawa Satsuma mandarin, which changed the number and structure of wax crystals and the content of wax components in the peel, thus playing a positive role in improving of the appearance quality of fruit. It is speculated that the significant decrease of C28 aldehyde in the wax component may be related to the reduction of crystals and the coverage of vapor-permeable reflective film.

**Key words:** Satsuma mandarin; vapor-permeable reflective film; illumination; cuticular wax

覆盖反光膜可以调节果树的微环境,是有效提高果实品质与商品性的措施之一<sup>[1]</sup>。近几年透湿性反光膜在葡萄、苹果、桃、柑橘等果树上都有应用<sup>[2-7]</sup>。有相关研究结果表明覆盖透湿性反光膜能够显著提升冠层反射光光照度及叶片光合特性<sup>[8]</sup>,降低土壤水分蒸发<sup>[9]</sup>等,从而影响果实品质及商品价值<sup>[10-11]</sup>。

植物蜡质是指覆盖在植物表皮细胞外的一层由亲脂性化合物构成的疏水层,由位于角质层外的外层蜡质和深嵌在角质层中连接表皮和细胞壁的内层蜡质两部分构成。外层蜡质大多自我组装成片状、丝状、杆状、颗粒状等蜡质晶体,而内层蜡质呈无定型状态填充于网状结构内。植物蜡质具有一定的不稳定性,作为与外界环境第一接触面的蜡质,当遭遇环境条件的变化,会通过改变外部蜡质晶体的微结构形态、调节蜡质产物的合成等来进行适应。其中,光能直接改变植物表皮蜡的形态和性质<sup>[12]</sup>。据报道,在阳光下生长的葡萄果实角质层蜡质厚度要比在树冠下生长的果实更大<sup>[13]</sup>。Nodskov<sup>[14]</sup>发现培养在黑暗条件下的大麦转入光照条件下后,蜡质密度增加,表明光照对蜡质的积累具有促进作用。紫外辐射占太阳直接辐射的7%左右,对植物发育有负面影响。而植物蜡质层被认为是紫外辐射有效的“反射器”,可以有效地减少太阳辐射的伤害<sup>[15]</sup>。增强紫外光中的UV-B会使黄瓜(*Cucumis sativus* L.)、蚕豆(*Phaseolus vulgaris* L.)、大麦(*Hordeum vulgare* L.)<sup>[16]</sup>、苹果(*Malus domestica* Borkh.)<sup>[17]</sup>和棉花(*Gossypium hirsutum* L.)<sup>[18]</sup>叶片的蜡质总量增加,改变蜡质化学成分。在增强的紫外线辐射下,玉米蜡质缺陷突变体 glossy1 比野生型有更多的叶片卷缩和DNA损伤<sup>[19]</sup>。此外,红外光也会影响蜡质积累,在贮藏过程中单色远红外光处理可刺激番茄和甜椒果实表皮蜡质的生物合成<sup>[20]</sup>。

蜡质以晶体形态堆积在叶、茎、果实等器官的表面,当其结构形态、疏密度等不同时,因对光反射的差异导致器官表面的亮度也会有所区别。如过表达高粱 *SbWIN1* 基因的拟南芥莲座叶片,比野生型叶片的蜡质晶体更丰富,更有光泽<sup>[21]</sup>。而蓖麻所有茎部表皮(包括下胚轴)却由于螺旋状表皮蜡晶体的缺少,表面更加光滑<sup>[22]</sup>。虽然大量结果表明,反光膜铺设后会使得果皮更光亮,提高了果实外观品质,但反光膜对果皮蜡质结构及组分的影响还未见报道。本研究以宫川温州蜜柑为材料,研究覆盖反光膜后果园土壤水分、光照环境、叶片光合能力、果皮色泽以及蜡质结构和成分的变化,以期为提高柑橘果实外观品质提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

试验在江西省吉安市新干县宫川温州蜜柑果园内进行,以36株生长势与挂果量基本一致的12年生枳砧宫川温州蜜柑(*Citrus unshiu* Marc.)为试验材料。其中18株在果实膨大期(2020年7月下旬)进行覆膜,覆膜材料为特卫强(Tyvek)白色防水透气性反光膜,覆膜范围包括茎面和沟(反光膜处理)。另外18株不覆膜设置为对照,其他栽培管理方式一致。每6株为一个重复处理,试验重复3次。

### 1.2 土壤含水量测定

自覆膜后分别于不同时间采用TDR150便携式土壤水分速测仪(美国Spectrum)测定其0~10.0 cm、10.1~20.0 cm土层土壤含水量。

### 1.3 树冠光照环境测定

9月23日采用手持式光度计[UNI-T-UT383,优利德科技(中国)股份有限公司]测定直射光与反射

光光照度。选定距离每株树主干 1 m 左右的 4 个方位作为测定位置,分别于垂直高度 0.5 m 和 1.0 m 处测定入射光与反射光光照度,计算反射率,反射率=(反射光光照度/入射光光照度)×100%。

#### 1.4 叶片光合指标测定

9 月 23 日采用 LI-6400 XT 便携式光合仪(美国 LI-COR 公司)测定光合参数,测定时间为上午 10:00–11:00。测量叶片的净光合速率( $P_n$ )、蒸腾速率( $T_r$ )、气孔导度( $G_s$ )和胞间  $CO_2$  浓度( $C_i$ )。

#### 1.5 果实色泽测定

11 月 1 日在树冠外围同一高度选择有代表性的果实,于当天运回实验室测定果皮色泽。采用 MI-NOLTA CR-300 型(D65 光源)色差计和“CIELab”表色系统测定果实表皮赤道部位对角 4 个方向的色差值,包括  $L^*$ (明亮度)、 $a^*$ (红绿偏差)、 $b^*$ (蓝黄偏差)、 $h$ (色调角)值、色差综合指标  $CCI$ ( $CCI=1\,000\times a^*/(L^*\times b^*)$ )。

#### 1.6 果实蜡质层结构观测

将样品先用蒸馏水轻柔冲洗,除去其表面灰尘、细菌等杂质,随后置于阴处晾干。用刀片在果实赤道部位切取 2 mm×3 mm 大小的果皮数块,放入 5% 戊二醛固定液的中固定。经 0.1 mol/L、pH 7.2 的磷酸缓冲液漂洗后(30 min 和 15 min 各 2 次),用 30%、50%、70%、80%、90% 梯度的乙醇逐级脱水 15 min 后,用含无水硫酸钠的乙醇重复脱水 3 次(每次

15 min),最后用醋酸异戊酯脱去乙醇(重复 3 次,每次 20 min)。将样品在临界点干燥后粘置样品台上,用 JFC-1100 型离子溅射仪进行镀金膜,最后用 JSM-T300 型扫描电子显微镜观察拍片。

#### 1.7 果实表皮蜡质成分的提取与测定

用内径为 1.4 cm 的打孔器在果实赤道部位均匀选取 5 处打孔。随后去除果皮圆片的白皮层,称量后放入样品瓶。圆片样品在氯仿中浸泡和搅拌 2 次,每次 1 min,在通风柜下提取表皮蜡质。在进行气相色谱分析之前,收集的含蜡溶液使用旋转蒸发器进行浓缩,并在温和的氮气流下干燥,直到完全干燥。采用气相色谱-质谱联用技术(GC-MS)分析果实表皮蜡质的化学组成成分,所有蜡质成分都通过与内标正四十烷的峰面积比较进行定量。蜡质含量以  $\mu\text{g}/\text{cm}^2$  表示。

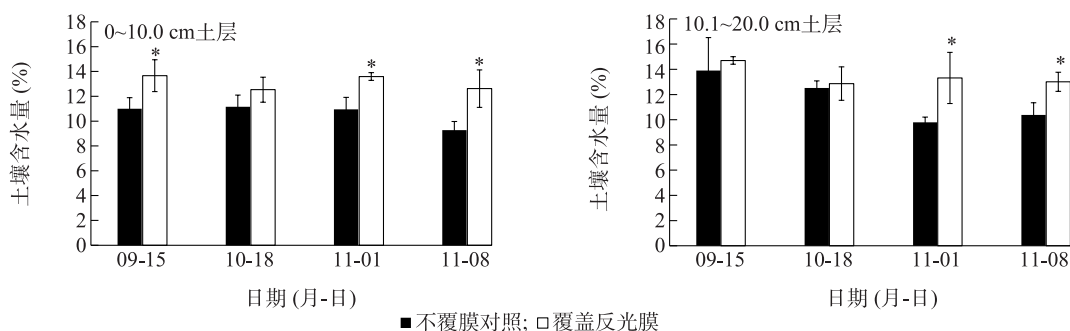
#### 1.8 数据统计分析

运用 SPSS 26.0 进行显著性分析,并利用 Student's t-test ( $P<0.05$  和  $P<0.01$ ) 进行对照和处理间的比较。

## 2 结果与分析

### 2.1 透湿性反光膜铺设对土壤水分的影响

由图 1 可知,在宫川果园进行反光膜覆盖处理的保湿效果明显。覆膜后 0~10.0 cm 和 10.1~20.0 cm 土层土壤体积含水量均高于不覆膜的对照。



\* 表示同一日期与对照之间差异显著 ( $P<0.05$ )。

图 1 透湿性反光膜覆盖处理对不同土层土壤含水量的影响

Fig.1 Effects of vapor-permeable reflective film mulching treatment on soil moisture content in different soil layers

### 2.2 透湿性反光膜铺设对树冠光照环境和叶片光合指标的影响

由表 1 可知,反光膜覆盖处理后,在 0.5 m 和 1.0 m 两个垂直高度的反射光光照度相比于对照都明显增加。反射光率分别达到了

57.94% 和 42.97%, 相比于对照分别提高了 5.11 倍和 6.39 倍(表 1)。此外,反光膜还明显提高了叶片的净光合速率( $P_n$ )、气孔导度( $G_s$ )和蒸腾速率( $T_r$ ),但胞间二氧化碳浓度( $C_i$ )无明显变化。(表 2)。

表 1 透湿性反光膜覆盖对温州蜜柑果园光照的影响

Table 1 Effects of vapor-permeable reflective film mulching on illumination of Satsuma mandarin orchard

| 垂直高度<br>(m) | 试验处理  | 直射光光照度<br>(×100 lx) | 反射光光照度<br>(×100 lx) | 反射率<br>(%)    |
|-------------|-------|---------------------|---------------------|---------------|
| 0.5         | 覆盖反光膜 | 297.25±12.49        | 172.02±20.46 **     | 57.94±7.32 ** |
|             | 不覆膜对照 | 297.25±12.49        | 33.67±5.08          | 11.33±1.68    |
| 1.0         | 覆盖反光膜 | 297.25±12.49        | 127.72±10.56 **     | 42.97±3.18 ** |
|             | 不覆膜对照 | 297.25±12.49        | 20.01±4.78          | 6.72±1.51     |

\*\* 表示同一垂直高度与对照之间差异极显著( $P<0.01$ )。

表 2 透湿性反光膜覆盖对温州蜜柑叶片光合指标的影响

Table 2 Effects of vapor-permeable reflective film mulching on photosynthetic indices of Satsuma mandarin leaves

| 试验处理  | 净光合速率( $P_n$ )<br>[ $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ] | 蒸腾速率( $T_r$ )<br>[ $\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ] | 气孔导度( $G_s$ )<br>[ $\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ] | 胞间二氧化碳浓度( $C_i$ )<br>( $\mu\text{mol}/\text{mol}$ ) |
|-------|---|--|---|---|
| 覆盖反光膜 | 7.78±1.02 **  | 1.65±0.29 **   | 0.117±0.023 **  | 303.4±17.6  |
| 不覆膜对照 | 5.35±0.89   | 0.99±0.13  | 0.078±0.012   | 306.4±13.2  |

\*\* 表示与对照之间差异极显著( $P<0.01$ )。

2.3 透湿性反光膜覆盖处理对温州蜜柑果实色泽变化的影响

图 2 显示,反光膜覆盖处理的宫川温州蜜柑果实颜色更黄,果皮更光滑。表 3 中覆膜处理的色差指数  $L^*$ 、 $a^*$ 、 $b^*$ 、 $c^*$ 、 $CCI$  值都显著高于不覆膜对照,  $h$  值则相反,这与图 2 观察到的结果一致,表明反光膜铺设使得果实受光光照度和面积增加,可以有效地提高果皮亮度、颜色以及果实色泽综合指标。

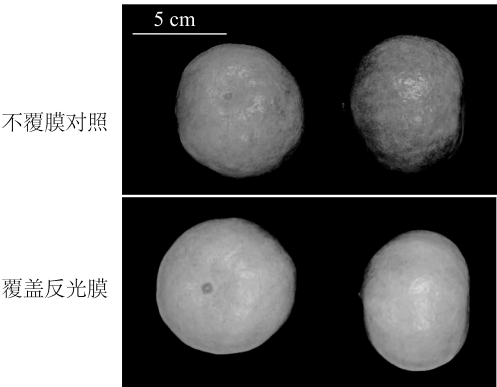


图 2 透湿性反光膜覆盖处理对温州蜜柑果实外观的影响

Fig.2 Effects of vapor-permeable reflective film mulching on fruit appearance of Satsuma mandarin

2.4 透湿性反光膜覆盖处理对宫川密柑果实表皮蜡质结构的影响

由图 3 电镜扫描结果可以看出,宫川密柑果实的表皮蜡质层是由无定型蜡质结构和散落其上的蜡质晶体组成,蜡质晶体呈片状结构。未覆膜处理的

片状蜡质晶体层层叠加,边界明显,晶体之间有明显的缝隙,并且分布不均匀。而反光膜覆盖处理的果皮蜡质排列紧密,分布均匀,蜡质晶体似乎与无定型蜡质结构融合而明显减少,气孔边缘也不存在如未覆膜处理所表现出来的凹陷。

2.5 透湿性反光膜覆盖处理对果皮蜡质总量和各成分含量的影响

通过 GC-MS 分析发现,反光膜覆盖处理和对照的果皮蜡质总量分别为  $5.794 \mu\text{g}/\text{cm}^2$  和  $5.759 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ ,二者不存在显著差异(图 4)。检测到的 4 种蜡质成分包括脂肪酸、烷烃、醛和醇类,脂肪酸和烷烃的含量大于醛和醇类。反光膜覆盖处理和对照的脂肪酸含量分别为  $2.00 \mu\text{g}/\text{cm}^2$  和  $1.90 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ ,烷烃含量分别为  $2.04 \mu\text{g}/\text{cm}^2$  和  $2.08 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ ,醛类含量分别为  $0.67 \mu\text{g}/\text{cm}^2$  和  $1.08 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ ,醇类含量分别为  $1.08 \mu\text{g}/\text{cm}^2$  和  $0.70 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ 。反光膜覆盖处理后脂肪酸和烷烃含量变化不大,醛类含量极显著下降,醇类含量有所上升但不显著。

如图 5 所示,不覆膜对照的 4 种蜡质成分占蜡质总量的比例分别为烷烃(36.09%)>脂肪酸(32.96%)>醛(18.78%)>醇(12.17%),而反光膜覆盖处理后比例分别为烷烃(35.19%)>脂肪酸(34.60%)>醇(18.57%)>醛(11.64%)。两者蜡质成分的含量比例大小顺序不一致,烷烃和脂肪酸含量占总蜡的比例差异不大,但反光膜覆盖处理的醛类含量所占比例相比对照下降了 7.14%,而醇类相比对照上升了 6.40%。

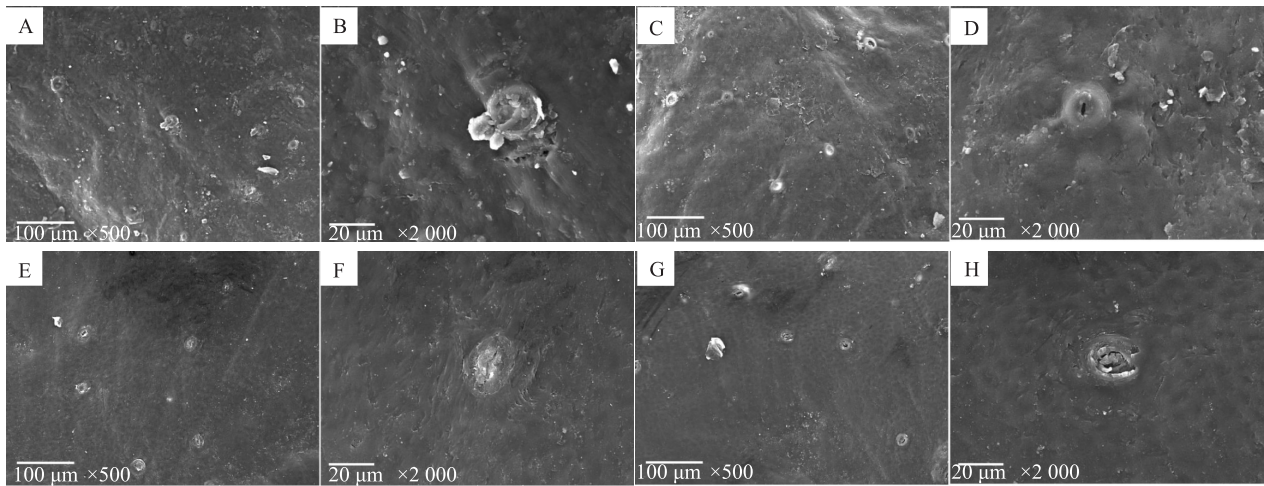


表 3 透湿性反光膜覆盖处理对温州蜜柑果皮色差指数的影响

Table 3 Effects of vapor-permeable reflective film mulching on chromatic aberration index of Satsuma mandarin peel

| 试验处理  | 色差指数        |             |             |             |             |            |
|-------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|------------|
|       | $L^*$       | $a^*$       | $b^*$       | $h$         | $c^*$       | $CCI$      |
| 覆盖反光膜 | 65.4±1.1 ** | 15.3±5.1 ** | 61.0±1.3 ** | 76.0±4.6 ** | 63.1±1.8 ** | 3.8±1.3 ** |
| 不覆膜对照 | 62.1±2.6    | 3.9±5.8     | 55.3±4.2    | 86.2±5.9    | 55.7±4.6    | 1.0±1.6    |

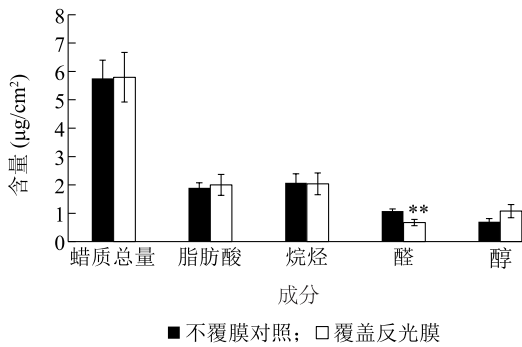
\*\* 表示与对照之间差异极显著 ( $P<0.01$ )。



A~D 为不覆膜对照, E~H 为覆盖反光膜。

图 3 透湿性反光膜覆盖处理对温州蜜柑果皮蜡质结构的影响 (×500, ×2 000)

Fig.3 Effects of vapor-permeable reflective film mulching on the wax structure of Satsuma mandarin peel (×500, ×2 000)



\*\* 表示与对照之间差异极显著 ( $P<0.01$ )。

图 4 透湿性反光膜覆盖处理对温州蜜柑果皮蜡质总量和各成分含量的影响

Fig.4 Effects of vapor-permeable reflective film mulching on total wax content and components of Satsuma mandarin peel

由图 6 可知,反光膜覆盖处理和对照果皮蜡质中均鉴定到 28 种蜡质组分,分别为 C16、C18、C20、C22、C24、C26、C28、C30、C32、C34 脂肪酸, C25、C27、C29、C30、C31、C33 烷烃, C24、C26、C28、C30、C32、C34 醛类, 以及 C24、C26、C28、C30、C32、C34

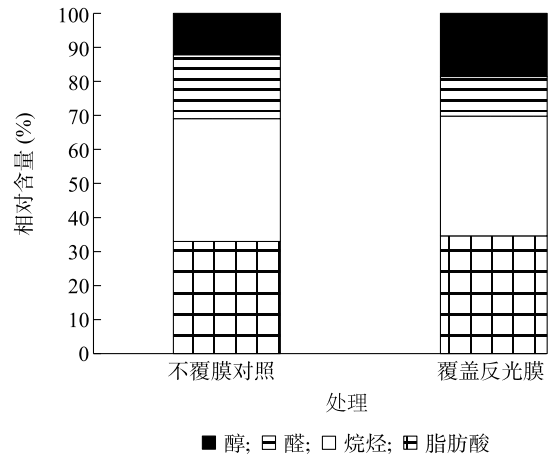


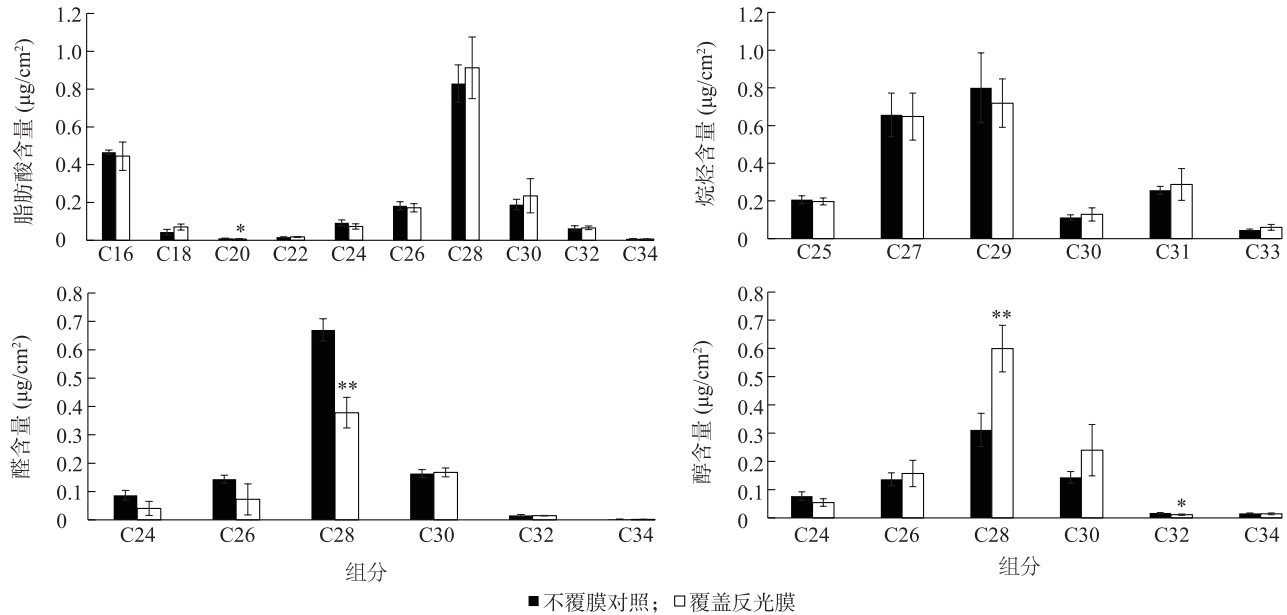
图 5 透湿性反光膜覆盖处理对温州蜜柑果皮蜡质成分相对含量的影响

Fig.5 Effects of vapor-permeable reflective film mulching on relative content of wax components in peel of Satsuma mandarin

醇类。脂肪酸中 C28 含量最高,但除了含量最低的 C20 脂肪酸在反光膜覆盖处理后含量显著下降外,其他组分处理间都未达到显著差异。烷烃中 C27

和 C29 含量明显高于其他组分,覆盖反光膜后所有烷烃组分含量与对照之间不存在显著差异。醛类中 C28 含量最高,反光膜覆盖处理后其相比于对照极

显著下降,是引起总醛含量明显减少的主要原因。醇类中 C28 含量最高,反光膜覆盖处理后其含量极显著上升,但 C32 醇含量则显著下降。



\*、\*\* 分别表示处理与对照之间差异显著 ( $P < 0.05$ )、差异极显著 ( $P < 0.01$ )。

图6 透湿性反光膜处理对温州蜜柑果皮蜡质组分相对含量的影响

Fig.6 Effects of vapor-permeable reflective film mulching on relative content of wax components in peel of Satsuma mandarin

### 3 讨论

特卫强 (Tyvek) 透湿性反光膜具有高反射率、漫反射性能、透气阻水性、低温传导等<sup>[2,9,23]</sup>特性。本研究发现覆盖透湿性反光膜显著增加了柑橘中下层树冠的反射光光照度,同时较不覆膜对照土壤含水量更高。光合作用是植物生长发育的基础,光照度和土壤水分<sup>[24]</sup>是影响光合强度的关键因素。覆盖反光膜后较高的土壤水分和光照度显著提升了柑橘叶片的光合强度,使得其光合产物得到增加,从而为提升其果实品质提供物质基础<sup>[25]</sup>。本试验结果表明覆盖透湿性反光膜显著提升了果实的  $L^*$  值、 $a^*$  值、 $b^*$  值、 $c^*$  值及  $CCI$  值,并降低了  $h$  值,果实表面更光亮且着色更好。与本研究结果一致,早熟温州蜜柑不同品种 (龟井、兴津和宫川) 在覆膜处理后果皮亮度值  $L^*$ 、果皮色泽指数 ( $a^*/b^*$ ) 均高于对照<sup>[10,26]</sup>。另外,覆盖反光膜后李果实  $a^*$  值、 $b^*$  值、 $c^*$  值显著上升,且  $h$  值降低<sup>[27]</sup>。

由于透湿性反光膜铺设可以使整个树冠,特别是内膛光照增强,这势必会影响与外界环境直接接触的蜡质层。本研究发现铺设透湿性反光膜后,宫

川温州蜜柑果皮蜡质相比于对照分布更均匀,且蜡质晶体融入无定型蜡质结构而导致晶体明显减少,这可能与特卫强透湿性反光膜的漫反射性能以及对微域环境的调节有关。这种因光照增强导致蜡质晶体减少的情况,也在实验室控制的光合有效辐射和紫外线 UV-B 处理下水稻 (*Oryza sativa* L.) 叶面观察到<sup>[28]</sup>。另外,蜡质晶体减少可能与反光膜处理的果皮光亮度值 ( $L^*$ ) 变高密切相关。在之前的研究中也相似的报道,Liu 等<sup>[29]</sup>发现纽荷尔脐橙的果皮突变体——赣脐3号,由于果皮蜡质晶体和蜡质总量减少,果皮变得更加光亮。Wang 等<sup>[30]</sup>发现黄瓜 *CsCER1* 突变系的果实表面蜡质晶体几乎完全缺失,并呈现有光泽的果型。一些苹果品种,如红富士、乔纳金、红粉佳人等,在低温贮藏期间,因蜡从固体 (晶体) 到液体 (无定形) 的转变,果皮表面变得油腻而显得很有光泽<sup>[31]</sup>。因为蜡质有反射紫外辐射、保护植物的作用,在增强光照或 UV-B 紫外辐射实验的研究中,大部分物种的蜡质含量会随光照度的增加而增加。与之不同的是,本试验发现反光膜增强宫川温州蜜柑反射光率后,蜡质总量并没有出现显著变化。但此结果与云杉<sup>[32]</sup>和油菜<sup>[33]</sup>叶片受到

UV-B 辐射后,表面蜡质总量变化情况一致。另外, Pilon 等<sup>[34]</sup>研究了早熟禾(*Poa annua* L.)对高紫外线辐射的反应,发现 UV-B 辐射增强后表面蜡量减少。对不同品种豌豆的研究发现,在正常条件下合成较多蜡质的品种经紫外线辐射后蜡质含量降低,而原本蜡质含量较低的品种则合成较多的蜡质<sup>[35]</sup>。这种光照对蜡质影响存在的品种差异,被推测与这些植物对光辐射的敏感性以及物种自身生理差异有关<sup>[36]</sup>。另外,透湿性反光膜覆盖所产生的光照度、光质以及辐射范围都与直接的紫外线辐射处理不同,而植物会通过刺激保护机制或激活修复机制来应对不同类型的胁迫<sup>[37]</sup>,这也可能是透湿性反光膜处理与 UV-B 紫外辐射处理对蜡质含量影响存在差异的一个原因。

光照对表皮蜡质的影响主要依赖其对蜡质成分合成途径的调控。试验结果表明透湿性反光膜增强宫川温州蜜柑反射光率后烷烃和脂肪酸含量和比例并没有显著变化,醛类含量和比例显著下降,醇类含量和比例上升。而柑橘表皮片状蜡质晶体的形成被认为与烷烃和醛类有关<sup>[38]</sup>,因此透湿性反光膜处理后醛类含量和比例显著下降,可能是造成果皮蜡质晶体减少的重要原因。Shepher 等<sup>[39]</sup>对甘蓝蜡质的研究也获得了与本研究相似的结果,室外种植的甘蓝相比于室内甘蓝蜡质中醛、酮和仲醇的比例更低,烷烃、伯醇和长链酯的比例更高。Bringe 等<sup>[17]</sup>也发现苹果叶片表面蜡质组分伯醇在 UV-B 处理后一段时间后含量增加。但与蜡质晶体和总量一样,受光照辐射处理的植物被发现在蜡质组分合成上存在物种差异<sup>[15]</sup>。Baker<sup>[40]</sup>和 Gordon 等<sup>[41]</sup>发现高光照条件下植物更倾向于进入脱羧途径,形成更多的烷烃。但油菜在接受增强性紫外线辐射时,烷烃没有发生变化,而在不同叶片上检测到醛和酮含量增加,酯类、仲醇和伯醇含量减少<sup>[33]</sup>。

## 4 结 论

透湿性反光膜的铺设导致宫川温州蜜柑光照环境的改变和光合能力的提升,使得果皮蜡质晶体数量和结构以及蜡质成分含量发生变化,从而对果实外观品质的提高起到了积极作用。推测蜡质成分中 C28 醛含量的显著下降可能与晶体的减少以及覆盖状态的改变有关。

## 参考文献:

- [1] 魏召新,洪 林,漆巨容,等.铺设反光膜对渝红橙果实品质的影响初探[J].西南农业学报,2012,25(2):649-651.
- [2] 唐晓松,曹丽春,张 旭,等.新型反光材料特卫强对红富士葡萄果实着色及品质形成的影响[J].中国农业大学学报,2015,20(3):51-58.
- [3] OVERBECK V, SCHMITZ-EIBERGER M A, BLANKE M M. Reflective mulch enhances ripening and health compounds in apple fruit[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2013, 93(10), 2575-2579.
- [4] 胡湘明,张慧琴,肖金平,等.覆盖透湿性反光膜对桃品质的影响[J].浙江农业学报,2012,24(5):814-820.
- [5] JIA X M, YANG Q, WANG Y, et al. Effects of DuPont Tyvek © non-woven material mulching on fruit quality and chlorophyll fluorescence in Wanzhou Rose Orange[J]. Scientia Horticulturae, 2017, 219:31-36.
- [6] 石学根,陈俊伟,徐红霞,等.透湿性反光膜覆盖对椪柑果实品质的影响[J].果树学报,2011,28(3):418-422.
- [7] 张慧琴,吴 慧,肖金平,等.透湿性反光膜和秸秆覆盖对越橘果实品质形成的影响[J].东北农业大学学报,2012,43(10):50-56.
- [8] 宋 洋,胡 丹,陈 巍,等.反光膜对四季柚树体微环境及果实品质的影响[J].浙江农业科学,2020,61(7):1306-1309.
- [9] 高恒锦,吴韶辉,金国强,等.透湿性反光膜对宫川温州蜜柑果实品质与果面色差的影响[J].江西农业学报,2021,33(8):40-45.
- [10] 王 浩,王 磊,王 杰,等.透湿性反光膜覆盖对柑橘树体微环境、新梢生长及果实发育的影响[J].果树学报,2017,34(8):996-1006.
- [11] 陈俊伟,谢 鸣,徐红霞,等.透湿性反光膜覆盖对‘宫川’温州蜜柑果实品质的影响[J].浙江农业学报,2011,23(6):1095-1099.
- [12] CHARLES M T, MAKHLOUF J, ARUL J. Physiological basis of UV-C induced resistance to *Botrytis cinerea* in tomato fruit; II. modification of fruit surface and changes in fungal colonization[J]. Postharvest Biology & Technology, 2008, 47(1), 21-26.
- [13] ROSENQUIST J K, MORRISON J C. Some factors affecting cuticle and wax accumulation on grape berries[J]. American Journal of Enology and Viticulture, 1989, 40(4):241-244.
- [14] NODSKOV G B. Effects of light and temperature on the composition of epicuticular wax of barley leaves[J]. Phytochemistry, 1975, 14(4):921-929.
- [15] TAFOLLA-ARELLANO J C, BÁEZ-SAÑUDO R, TIZNADO-HERNÁNDEZ M E. The cuticle as a key factor in the quality of horticultural crops[J]. Scientia Horticulturae, 2018, 232:145-152.
- [16] STEINMÜLLER D, TEVINI M. UV-B-Induced effects upon cuticular waxes of cucumber, bean, and barley leaves[C] //WORLD REST R C, CALDWELL M M. Stratospheric ozone reduction, so-

- lar ultraviolet radiation and plant life. Berlin: Springer-Verlag, 1986;261-269.
- [17] BRINGE K, HUNSCHE M, SCHMITZ-EIBERGER M, et al. Retention and rainfastness of mancozeb as affected by physicochemical characteristics of adaxial apple leaf surface after enhanced UV-B radiation[J]. Journal of Environmental Science and Health, Part B, 2007, 42(2):133-141.
- [18] KAKANI V G, REDDY K R, ZHAO D, et al. Effects of ultraviolet-B radiation on cotton (*Gossypium hirsutum* L.) morphology and anatomy[J]. Annals of Botany, 2003, 91(7):817-826.
- [19] STURARO M, HARTINGS H, SCHMELZER E, et al. Cloning and characterization of *GLOSSY1*, a maize gene involved in cuticle membrane and wax production[J]. Plant Physiology, 2005, 138(1):478-489.
- [20] COZMUTA A M, COZMUTA L M, PETER A, et al. The influence of far-red light on the attributes of green bell pepper fruits (*Capsicum annuum* L.) during storage[J]. Annals of the University Dunarea de Jos of Galati. Fascicle VI: Food Technology, 2016, 40(2):98-118.
- [21] BAO S G, SHI J X, LUO F, et al. Overexpression of sorghum *win1* gene confers drought tolerance in arabidopsis thaliana through the regulation of cuticular biosynthesis[J]. Plant Cell Tissue & Organ Culture, 2017, 128(2):347-356.
- [22] GUHLING O, HOBL B, YEATS T, et al. Cloning and characterization of a lupeol synthase involved in the synthesis of epicuticular wax crystals on stem and hypocotyl surfaces of *ricinus communis* [J]. Archives of Biochemistry & Biophysics, 2006, 448(1/2):60-72.
- [23] 张 卓,王 磊,陈秋菊,等.铺设反光膜对日光温室甜樱桃果实品质的影响初报[J].上海交通大学学报(农业科学版), 2019, 37(4):24-28.
- [24] 勉有明,苗芳芳,吴鹏年,等.施氮量对扬黄灌区土壤水分、温度、碳氮及玉米产量的影响[J].排灌机械工程学报, 2021, 39(9):950-958.
- [25] 王 浩.透湿性反光膜覆盖对柑橘树体微环境、生长及果实发育的影响[D].上海:上海交通大学, 2017.
- [26] 吴黎明,蒋迎春,王志静,等.地面覆盖反光膜对温州蜜柑果实着色及品质的影响研究[J].中国南方果树, 2009, 38(6):39-41.
- [27] 姜翠翠,方智振,潘少霖,等.地面覆反光膜对秋姬李果实色泽及内在品质的影响[J].中国南方果树, 2019, 48(3):102-104, 111.
- [28] ALMEIDA S, SCHMIDT-ÉDER C, RODRIGUES A C, et al. Effects of natural radiation, PAR and artificial ultraviolet radiation-B on the ultrastructure and histochemistry of leaf of *Oryza sativa* L. [J]. American Journal of Plant Sciences, 2012, 3(10):1361-1368.
- [29] LIU D C, ZENG Q, JI Q X, et al. A comparison of the ultrastructure and composition of fruit' cuticular wax from the wild-type 'Newhall' navel orange (*Citrus sinensis* [L.] Osbeck cv. Newhall) and its glossy mutant[J]. Plant Cell Reports, 2012, 31(12):2239-2246.
- [30] WANG W, ZHANG Y, XU C, et al. Cucumber *ECERIFERUM1* (*CsCER1*), which influences the cuticle properties and drought tolerance of cucumber, plays a key role in VLC alkanes biosynthesis[J]. Plant Molecular Biology, 2015, 87(3):219-233.
- [31] YANG Y, ZHOU B, WANG C, et al. Analysis of the inhibitory effect of 1-Methylcyclopropane on skin greasiness in postharvest apples by revealing the changes of wax constituents and gene expression[J]. Postharvest Biology and Technology, 2017, 134:87-97.
- [32] GORDON D C, PERRY K E, RIDING R T. Effects of UV-B radiation on epicuticular wax production and chemical composition of four *Picea* species[J]. New Phytologist, 1998, 138(3):441-449.
- [33] NI Y, XIA R, LI J. Changes of epicuticular wax induced by enhanced UV-B radiation impact on gas exchange in brassica napus [J]. Acta Physiologiae Plantarum, 2014, 36(9):2481-2490.
- [34] PILON J J, LAMBERS H, BAAS W, et al. Leaf waxes of slow-growing alpine and fast-growing lowland *Poa* species; inherent differences and responses to UV-B radiation[J]. Phytochemistry, 1999, 50(4):571-580.
- [35] GONZALEZ R, PAUL N D, PRECY K, et al. Responses to ultraviolet-B radiation (280 - 315 nm) of pea (*Pisum sativum*) lines differing in leaf surface wax[J]. Physiologia Plantarum, 1996(4):852-860.
- [36] 李永才,尹 燕,陈松江,等.采前套袋对苹果梨表皮蜡质结构和化学组分的影响[J].中国农业科学, 2012, 45(17):3661-3668.
- [37] FROHNMEYER H, STAIGER D. Ultraviolet-B radiation-mediated responses in plants. Balancing damage and protection[J]. Plant Physiology, 2013, 133(4):1420-1428.
- [38] WANG J, HAO H, LIU R, et al. Comparative analysis of surface wax in mature fruit between Satsuma mandarin (*Citrus unshiu*) and 'Newhall' navel orange (*Citrus sinensis*) from the perspective of crystal morphology, chemical composition and key gene expression[J]. Food Chemistry, 2014, 153:177-185.
- [39] SHEPHER T, ROBERTSON G W, GRIFFITHS D W, et al. Effects of environment on the composition of epicuticular wax from kale and swede[J]. Phytochemistry, 1995, 40(2):407-417.
- [40] BAKER E A. The influence of environment on leaf wax development in *Brassica oleracea* var. gemmifera[J]. New Phytologist, 1974, 73(5):955-966.
- [41] GORDON D C, PRECY K E, RIDING R T. Effect of enhanced UV-B radiation on adaxial leaf surface micromorphology and epicuticular wax biosynthesis of sugar maple[J]. Chemosphere, 1998, 36(4/5):853-858.

(责任编辑:张震林)