果 树 学 报 2023,40(9):1848-1859
Journal of Fruit Science

DOI:10.13925/j.cnki.gsxb.20230126

不同果袋对瑞雪苹果果皮褐变的影响

贺 颖[1],王 辉[1],胡 宇[1],冯郁晨[1],王子盾[1],刘振中[1],史 涛[2],赵政阳[1,2*]

([1]西北农林科技大学园艺学院,陕西杨凌 712100;[2]庆城县苹果试验示范站,甘肃庆城 745199)

摘 要:【目的】探究不同果袋对瑞雪苹果(*Malus* × *domestica* 'Ruixue')果皮褐变及抗氧化物质的影响,为减缓瑞雪苹果果皮褐变并提高瑞雪苹果在陇东地区的经济效益和市场竞争力提供参考。**【方法】**以6年生瑞雪苹果为试材,于盛花后84 d采用绿色波点单层袋(G1)、袋口露白绿色波点单层袋(G2)和白色单层袋(G3)进行套袋处理,以普通双层袋为对照,研究不同果袋对瑞雪果皮褐变及抗氧化物质的影响。**【结果】**相较于对照,G1、G2和G3处理降低了瑞雪果皮褐变率,其褐变率从78.6%分别降至7.0%、6.0%和1.4%。其中对照一至四级褐变指数均为最高,与对照相比,G1和G2出现果皮一级褐变和二级褐变,G3仅出现果皮一级褐变,褐变指数为1.4%,与对照果皮发生褐变现象时间相比,G1和G2推迟了11 d,G3推迟了13 d。对抗氧化物质含量的测定结果表明,与对照相比,G1、G2和G3抗氧化物质含量显著增加,其中G3的含量又显著高于G1和G2。而对照、G1、G2和G3的SOD和POD活性整体依次升高,PPO活性依次降低。**【结论】**白色单层果袋(G3)显著提高了果皮抗氧化物质含量和抗氧化酶活性,降低了瑞雪果皮褐变率及褐变指数。因此,在瑞雪套袋栽培生产时,推荐使用白色单层果袋(G3)。

关键词:瑞雪苹果;果袋;透光率;果皮褐变;抗氧化物质

中图分类号:S661.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1009-9980(2023)09-1848-12

Effects of different fruit bags on the peel browning of Ruixue apple

HE Ying[1], WANG Hui[1], HU Yu[1], FENG Yuchen[1], WANG Zidun[1], LIU Zhenzhong[1], SHI Tao[2], ZHAO Zhengyang[1,2*]

([1]College of Horticulture, Northwest A & F University, Yangling 712100, Shaanxi, China; [2]Qingcheng Station of Apple Experiment and Demonstration, Qingcheng 745199, Gansu, China)

Abstract:【Objective】The study aimed to reveal the effects of different fruit bags on the browning and antioxidant substances of the peel of Ruixue apple (*Malus* × *domestica* Ruixue), in order to mitigate the browning of the peel and enhance the economic benefits and market competitiveness of Ruixue apple in the Longdong region.【Methods】Six-year-old Ruixue apple trees were used as experimental materials. The single-layer bags with green dot (G1), the single-layer bag with green polka dot and exposed white rim (G2), the white single-layer bags (G3) were used 84 days after blooming for bagging treatment. The ordinary double-layer bags (control) were used as control. The fruit peel browning rate and browning index were counted 189 days after blooming. Meanwhile, a temperature and humidity probe was used to measure the temperature inside the different fruit bags from 84 d to 189 d after flowering, and the antioxidant substances and antioxidant enzyme activities of the Ruixue fruit peel were measured.【Results】Based on the statistics of peel browning rate and browning index of the fruits with different bags during the harvest period, it was observed that G1, G2, and G3 treatments resulted in a significant reduction of peel browning rate in Ruixue fruit in comparison with the control, the peel browning rate of Ruixue decreased from 78.6% to 7.0%, 6.0%, and 1.4%, respectively. The browning indices of the 1 to 4 degree browning of the control peel was the highest. Compared with control, G1 and G2 exhibited 1 and 2 de-

收稿日期:2023-04-07 **接受日期:**2023-05-19

基金项目:财政部和农业农村部:国家现代农业产业技术体系(CARS-27)

作者简介:贺颖,女,在读硕士研究生,研究方向为果树栽培生理。Tel:13891460377,E-mail:heying01128@163.com

*通信作者 Author for correspondence. Tel:13891819690,E-mail:zhaozy@nwsuaf.edu.cn

gree peel browning, while G3 only exhibited 1 degree peel browning with a browning index of 1.4%. Compared with the control, G1 and G2 delayed the occurrence of browning by 11 days and G3 delayed by 13 days. The daily average temperature of the fruits inside the different fruit bags showed a downward trend, and the downward trend was consistent in all the fruits with different treatments. Among them, the differences in daily average low temperature and daily average temperature among the fruits with different fruit bags were not significant, while the effective accumulated temperature of the control was the lowest. Compared with the control, the effective accumulated temperature of G3 increased by 36.9 ℃. An illuminometer was used to measure the transmittance of different fruit bags. The Transmittance of the control was zero, and the transmittance of G1 and G3 were 36.6% and 51.2%, respectively, while the transmittance of G2 in the exposed area of the bags was 51.2%, and the transmittance of G2 in the other area of the bags was 32%. The Vitamin C content of G3 was significantly higher than those of the other treatments. Compared with the control, the total phenolic content of G1, G2, and G3 significantly increased by 38.9%, 42.4%, and 57.7%, respectively; The flavonoids of G3 was significantly higher than those of the other treatments, while the flavonoids of G2 was 34.0% higher that of the control; the flavonoids of G1 was 21.0% higher that of the control, while there was no significant difference in the total flavonoid content between G2 and G3. Compared with the control, G3 treatment significantly reduced the content of MDA in the peel, while G2 and G3 treatments significantly reduced the content of $O_2^{\cdot-}$ in the peel. There were significant differences in antioxidant enzyme activity among the fruits with different fruit bags. The SOD activity of G3 was significantly higher than those of the other treatments. The POD activity of G3 was the highest, followed by G2, G1. The CAT activity of G1 and G3 was significantly higher than that of G1. The PPO activity of the control and G1 was significantly higher than those of the other treatments. The comprehensive evaluation indexes of the four fruit bags on the browning and antioxidant quality indicators of Ruixue apple peel were ranked as follows: G3＞G2＞G1＞control, according to the above indicators and the comprehensive evaluation of the membership function.【Conclusion】The antioxidant content and antioxidant enzyme activity of Ruixue apple peel were strongly influenced by the type of fruit bags used during cultivation. G3 fruit bag was particularly effective in increasing the antioxidant content and antioxidant enzyme activity, and decreasing both the browning rate and the degree of peel browning of Ruixue apples. The use of G3 fruit bag would be a promising strategy to mitigate the peel browning and maintain the nutritional quality of Ruixue apples.

Key words: Ruixue apple; Fruit bags; Light transmittance; Peel browning; Antioxidant

苹果（*Malus* × *domestica* Borkh.）是我国主要的果树作物，苹果产业也是现代农业和乡村振兴的支柱产业[1]。瑞雪是由秦富1号和粉红女士杂交选育而成，是一种黄绿色晚熟新品种，其具有果形端正、果面光洁、口感酸甜适中，极耐贮藏等优点[2-3]，深受消费者喜欢。科学的套袋技术是生产优质果实的重要措施之一，具有提高果实外观品质、减少病虫果等多方面的优势[4-6]。栽培者发现种植瑞雪采用不套袋处理时，果点变大、果面较粗糙并会产生着色现象，影响了瑞雪苹果的外观品质，因此果实套袋已成为提升瑞雪果实商品价值的重要技术措施。甘肃陇东地区自然生态条件优越，有极大的区域优势，是我国苹果生产的核心区域[7]。随着陇东地区现代苹果栽培技术的快速发展[8]，近几年陇东地区瑞雪栽培面积迅速增长，但在瑞雪苹果套袋栽培过程中发现，若果袋选择不当，果皮便会发生褐变现象[9]。果皮褐变属于生理性病害，严重影响果实的外观和商品价值，给果农造成一定的经济损失[10]。因此，针对以上生产栽培中亟待解决的实际问题，探究不同果袋与瑞雪果皮褐变及抗氧化物质的关系具有十分重要的意义。

果实套袋技术的应用改变了袋内温度、光照等条件[11]，进而影响果实的抗逆性[6]。樊淼淼[12]的研究

发现套袋会显著提高瑞雪果实的外观品质。王爽[9]探究了果袋温湿度对瑞雪褐变的影响，结果表明套袋瑞雪苹果果皮褐变与果实发育后期的温度因子有关，其中果袋内的有效积温是导致褐变的主要因素。前人研究均未涉及不同果袋与瑞雪果皮褐变及抗氧化物质之间的关系[9,10,13]。因此，笔者在本研究中拟采用3种瑞雪专用果袋和普通双层袋，通过监测不同果袋内的温度及测定果皮抗氧化物质含量，结合果皮褐变率，探讨不同果袋与瑞雪果皮褐变的关系，旨在降低瑞雪果皮褐变率及缓解其褐变程度，为制定优质瑞雪苹果的生产栽培管理技术方案提供新思路。

表1 果袋信息

Table 1 Fruit bag information

果袋类型 Fruit bag type	规格 Specification	材质 Material
普通双层袋（对照） Ordinary double-layer bags (Control)	180 mm×150 mm, 4.8 g	纸＋膜内红 Paper+Film inner red
绿色波点单层袋 Single-layer bags with green dot (G1)	164 mm×206 mm, 3.6 g	100%纯进口木浆制作 Made of 100% pure imported wood pulp
袋口露白绿色波点单层袋 Green polka dot single-layer bag with exposed white rim (G2)	164 mm×206 mm, 3.6 g	100%纯进口木浆制作 Made of 100% pure imported wood pulp
白色单层袋 Single-layer bags with white (G3)	164 mm×206 mm, 3.6 g	100%纯进口木浆制作 Made of 100% pure imported wood pulp

1 材料和方法

1.1 试验材料

试验于2022年7—11月在甘肃省庆阳市西北农林科技大学庆城苹果试验站进行（35°42′~36°17′ N，107°16′~108°05′ E）。试验站海拔为1300 m，年平均降雨量为538 mm，年平均气温为9.5 ℃。试验材料为6年生瑞雪苹果树，基砧为新疆野苹果，中间砧为M26。定植株行距为1 m×4 m，按细长纺锤形树体结构整形，周年进行正常肥水管理与病虫害防治。

1.2 试验设计

选取长势一致的瑞雪植株。根据物候期确定套袋时期，于盛花期（4月13日）后84 d进行套袋。所用果袋为绿色波点单层袋（G1）、袋口露白绿色波点单层袋（G2）和白色单层袋（G3），以普通双层袋为对照（表1）。每个处理选5株树，每株树随机选取60个果实进行套袋处理。采用温湿度探头仪测定自然环境及不同果袋内花后84~189 d的温度，在花后189 d进行连袋采收，并统计褐变率及褐变指数，采收后每个处理随机选取6个苹果作为样品。将待测样品及时置于液氮中冷冻，随后置于−80 ℃冰箱保存，用于后期的生化指标测定。果袋信息见表1。

1.3 试验方法

1.3.1 果袋内温度的测定及温度参数的计算 果袋内温度的测定。在树体中部（距离地面1.5 m左右）同一方向用路格温湿度记录仪（L92-1）设定好起止时间，连续监测果袋内和自然环境的温度（±0.5 ℃），每1 h记录1次果袋内的数据。将温湿度探头放入果袋内，要避免探头与果面接触，并用细绳扎紧果袋口，另外将一个温湿度探头放在果袋的附近，监测自然环境的温度[9]。记录时间从瑞雪果实套袋（花后84 d）至果实采收为止（花后189 d）。

温度参数的计算。日平均温度为24 h记录点的平均值；日最高温度为24 h记录点的最大值；日最低温为24 h记录点的最小值；日最高平均温度为花后84~189 d日最高温的平均值；日最低平均温度为花后84~189 d日最低温的平均值；有效积温的计算参照王爽[9]的方法：以10 ℃作为瑞雪苹果的生物学零度，日平均温度高于10 ℃作为有效温度，花后84~189 d中有效温度的积累量为有效积温。

1.3.2 果袋透光率的测定和计算 用TES-1399照度计测定不同果袋的透光率。首先将探头置于光照培养箱中测量其环境光照度，其次将裁剪后的果袋紧密覆盖在照度计探头上方，待光照度值稳定后读数，同一环境中3次重复，取平均数。

果袋透光率/%=不同果袋内光照度/环境光照度×100。

1.3.3 果皮褐变率及褐变指数的测定 每组处理调查285个果实以统计褐变率和褐变指数，统计参照王爽[9]的方法。

褐变率/%=（褐变果数/抽取样品果数）×100。

褐变分级：

0级：无褐变；1级：褐变面积S，$0<S\leqslant 1/4$；2级：褐变面积S，$1/4<S\leqslant 1/2$；3级：褐变面积S，$1/2<S\leqslant 3/4$；4级：褐变面积S，$3/4<S\leqslant 1$。

褐变指数/%=Σ（褐变级别×该级果实数）/（总果数

量×最高褐变级别）×100。

1.3.4　抗氧化物质及抗氧化酶活性的测定　维生素C含量的测定通过钼蓝比色法，利用紫外分光光度计测定760 nm处吸光度值，用于后续计算维生素C含量。称取1.0 g果皮，液氮研磨，加入1.5 mL乙醇−丙酮混合液（体积比7∶3）在37 ℃温育1 h。匀浆在20 ℃、8000×*g*高速离心20 min，取上清液立即存放在−20 ℃用于总酚、类黄酮、总黄酮含量的测定。总酚含量的测定参照Folin-Ciocalteu法，用紫外分光光度计测定765 nm波长处的吸光度，每一试样重复测定3次，用于后续计算总酚的含量；类黄酮含量的测定参照赵静[14]的方法，取0.15 mL提取液于10 mL玻璃试管中，加入3.4 mL 30%乙醇，0.15 mL 0.5 mol·L^{-1} $NaNO_2$溶液，0.15 mL 0.3 mol·L^{-1} $Al(NO_3)_3$溶液充分混合，反应5 min后，加入1.0 mL 1 mol·L^{-1} NaOH溶液，用紫外分光光度计测定510 nm处的吸光度，每一试样重复测定3次，用于后续计算类黄酮的含量；总黄酮含量的测定参照DMACA法，640 nm波长下测定吸光值，每个试样重复测定3次，用于后续计算总黄酮含量。

MDA和$O_2^{\cdot-}$含量的测定。MDA含量参照赵静[14]的方法测定，取0.3 g果皮粉，用50 mmol·L^{-1} PBS（pH 7.8）研磨成匀浆，定容到6 mL，离心取上清液。取1.5 mL样品和2.5 mL 0.5%的2-硫代巴比妥酸（TBA）溶液于10 mL的离心管中，在100 ℃的水浴锅中放置20 min后，温度下降至室温离心，取上清液进行测定。$O_2^{\cdot-}$含量采用羟胺氧化法测定，反应后在530 nm处测量溶液的吸光度值。

抗氧化酶活性的测定。SOD活性采用试剂盒WST-8法测定；POD活性参照李心草[15]的方法测定，磷酸缓冲液（pH 7.0）、0.125 mL愈创木酚，250 μL 30%的H_2O_2组成POD反应液。20 μL酶提取液加入4 mL POD反应液，迅速混合均匀，测定OD值，波长为470 nm；PPO活性参照邻苯二酚法测定，1 mL酶液，加入1.5 mL 0.1 mol·L^{-1} pH 6.8的磷酸缓冲液，0.5 mL 0.1 mol·L^{-1}的邻苯二酚，立即于420 nm处测定OD值；CAT活性参照赵静[14]的方法测定，1 mL反应体系中含有50 mmol·L^{-1}磷酸缓冲液（pH 7.0），粗酶提液20 μL，25 ℃预热，加入H_2O_2（0.1 mol·L^{-1}）0.1 mL，启动反应。以磷酸缓冲液作为空白对照，记录240 nm波长下吸收值的降低速度。

1.4　数据分析

数据测定取3次生物学重复，用Microsoft Office Excel 2010软件进行数据整理和作图，采用SPSS 20.0软件进行数据分析，数据以平均值±标准差表示。

2　结果与分析

2.1　不同果袋内微域环境的比较

2.1.1　不同果袋内的温度比较　不同果袋内的日平均温度变化如图1所示，不同果袋内日平均温呈下降趋势，且所有处理下降趋势一致。在瑞雪果实生长发育过程中，日平均温度出现两次较大波动的下降，分别是花后120~140 d与花后170~180 d。第一次温度出现短暂回温后继续下降，第二次温度骤减

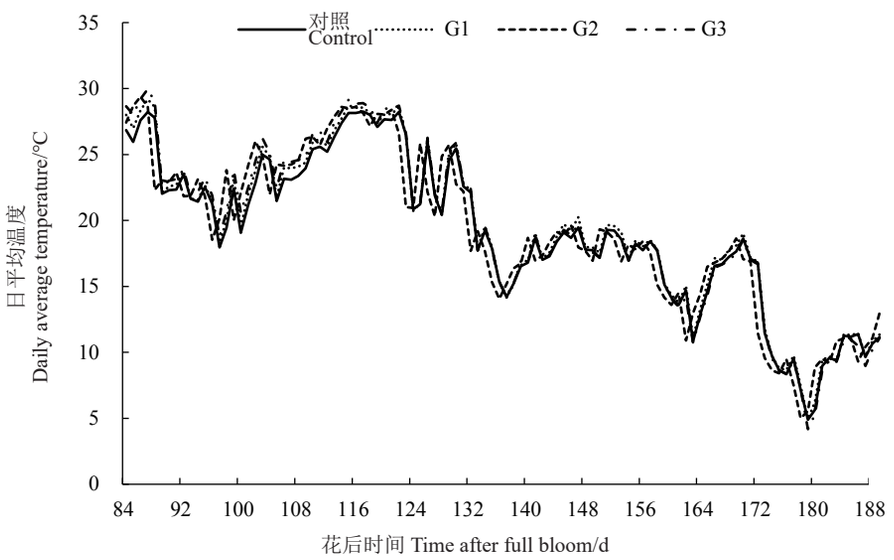

图1　不同果袋内的日平均温度变化

Fig. 1　Daily average temperature changes in different fruit bags

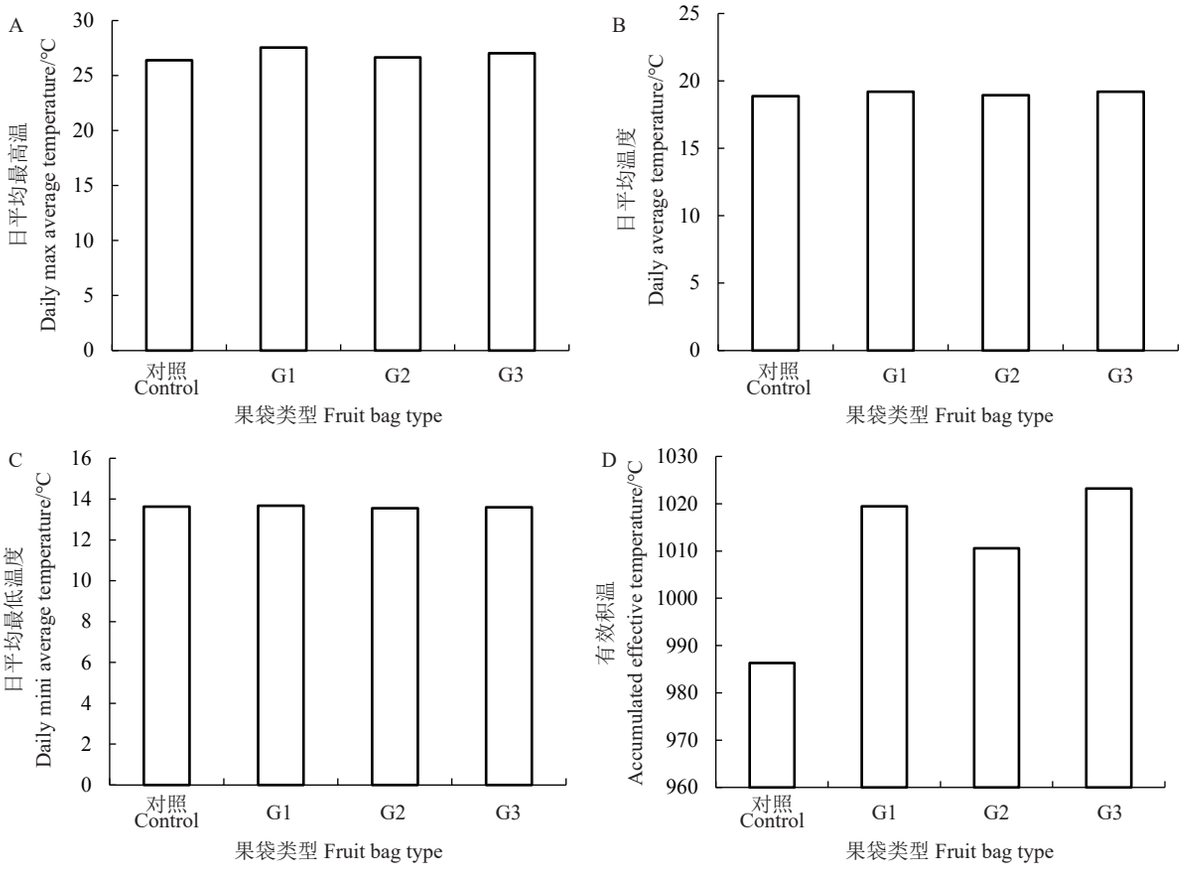

图 2 不同果袋内的日最高平均温度、日平均温度、日最低平均温度、有效积温的比较

Fig. 2 Comparison of daily maximum average temperature, daily average temperature, daily minimum average temperature and accumulated effective temperature in different fruit bags

15 ℃左右。

图2-A可见，G1的日平均最高温度高于其他处理，为27.6 ℃，而后依次为G3、G2、对照，分别为27.0 ℃、26.7 ℃、26.4 ℃；图2-B可见，日平均温度遵循G1＞G3＞G2＞对照的规律；图2-C可见，日平均低温遵循G1＞对照＞G3＞G2的规律；图2-D可见，对照的有效积温最低，为986.3 ℃，与对照相比，G3的有效积温增加了36.9 ℃，为1 023.2 ℃；其中G1和G2的有效积温无显著差异，分别为1 019.4 ℃和1 010.6 ℃。综上所述，不同果袋内日平均低温和日平均温无显著差异，但G3果袋显著提高了袋内的有效积温。

2.1.2 不同果袋透光率的比较 对照透光率为0%，G1和G3透光率分别为36.6%和51.2%，G2露白处透光率为51.2%，绿色单层透光率为32%。综上，果袋透光率由高到低依次是G3、G2、G1。

2.2 不同果袋内果皮褐变率及增长情况

2.2.1 不同果袋内果皮褐变率及褐变指数的比较 如图3所示，不同套袋处理的果实呈现不同色泽，尤其是对照的果实和其他处理的果实色泽相差较大。如图4-A所示，不同果袋瑞雪果皮褐变率统计结果中，对照果皮褐变率显著高于其他处理，为78.6%；G1和G2果皮褐变率无显著差异，分别为7.0%和6.0%；G3果皮褐变率最低，为1.4%。不同果袋瑞雪果皮褐变指数统计结果如图4-B所示，对照中一至四级褐变指数高于其他处理，分别为11.6%、8.9%、6.8%和5.3%。与对照相比，G1和G2出现果皮一级褐变和二级褐变，G3仅出现果皮一级褐变，褐变指数为1.4%。综合分析表明，对照瑞雪果皮褐变率与褐变指数均高于其他套袋处理。其中，与G3相比，G1和G2的褐变率分别是G3的5倍和4.29倍。

2.2.2 不同果袋内果皮褐变率增长情况 不同果袋褐变率增长情况如图5所示，在花后174 d对照开始出现褐变现象，并在花后180~184 d期间瑞雪果皮褐变率迅速增长，褐变率由8.0%增长至24.0%。与对

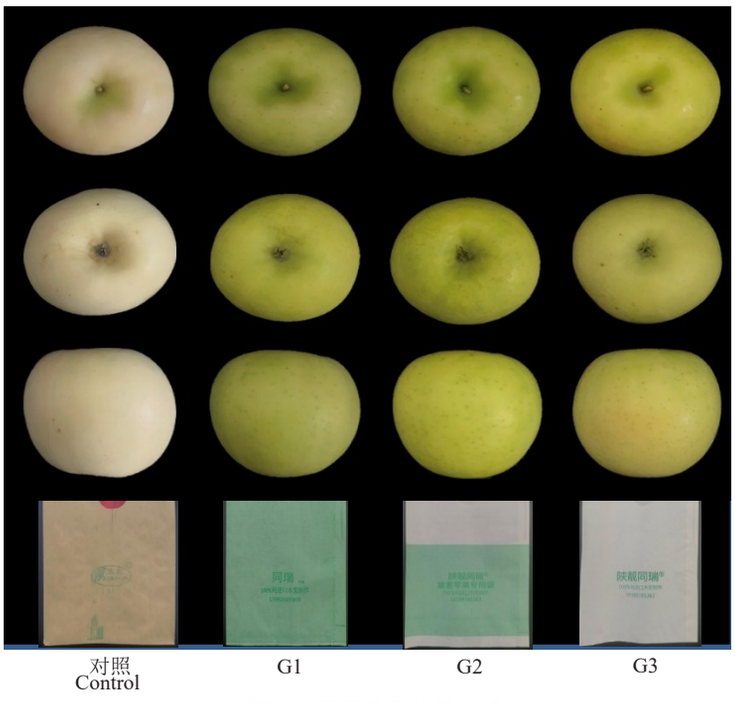

图 3　不同果袋的果实照片

Fig. 3　Photos of fruits in different fruit bags

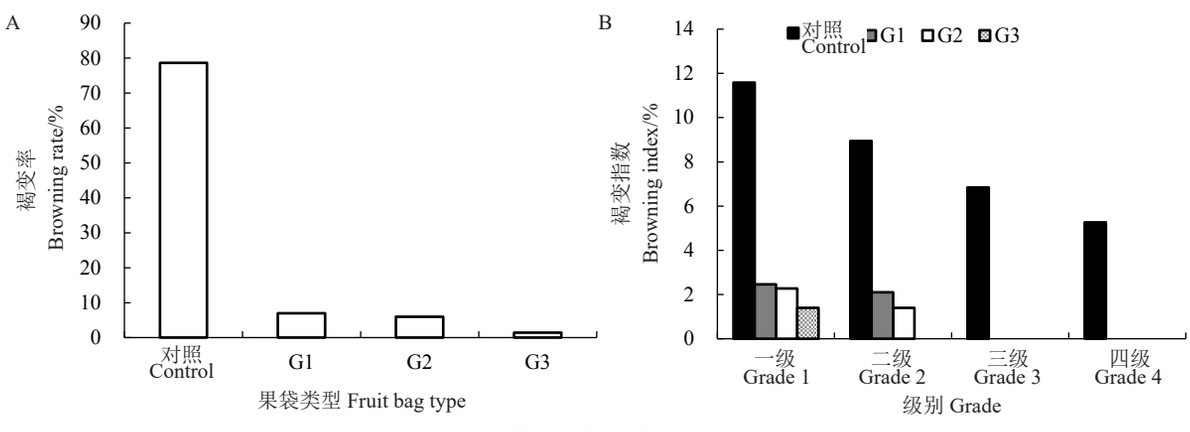

图 4　不同果袋内果皮褐变率及褐变指数

Fig. 4　Browning rate and index of peels in different fruit bags

照相比，G1 和 G2 果皮发生褐变现象推迟了 11 d，且褐变增长较慢，直至花后 189 d，G1 和 G2 的褐变率仅为 7.0%和 6.0%，而 G3 果皮发生褐变现象较对照推迟了 13 d，褐变率为 1.4%。综上所述，不同果袋处理的瑞雪果皮褐变呈显著差异。

2.3　不同果袋内果皮抗氧化物质含量的比较

2.3.1　不同果袋内果皮抗氧化物质含量的比较　维生素 C 含量（w，后同）的测定表明，G3 的含量显著高于其他处理，为 5.19 mg·100 g^{-1}，其次为 G2＞G1＞对照，分别为 4.74、4.41、4.32 mg·100 g^{-1}；与对照相比，G1、G2、G3 总酚含量均有显著增加，分别增加了 38.9%、42.4%、57.7%；与对照果皮中的类黄酮含量相比，G1、G2 和 G3 处理的果皮类黄酮含量显著增加，其中，G3 处理的类黄酮含量最高（3.97 mg·100 g^{-1}），G1 和 G2 的类黄酮含量分别为 3.84 mg·100 g^{-1} 和 3.44 mg·100 g^{-1}；与对照果皮总黄酮的含量相比，G1 显著提高了 21.0%，G2 和 G3 总黄酮含量增加量并无显著差异，分别提高了 43.9%和 49.1%。综合分析表明，与对照相比，G1、G2 和 G3 抗氧化物质含量显著增加，其中，G3 处理提升果皮抗氧化物质含量的效果更好（表 2）。

2.3.2　不同果袋内果皮 MDA 和 $O_2^{\cdot-}$ 含量的比较　由

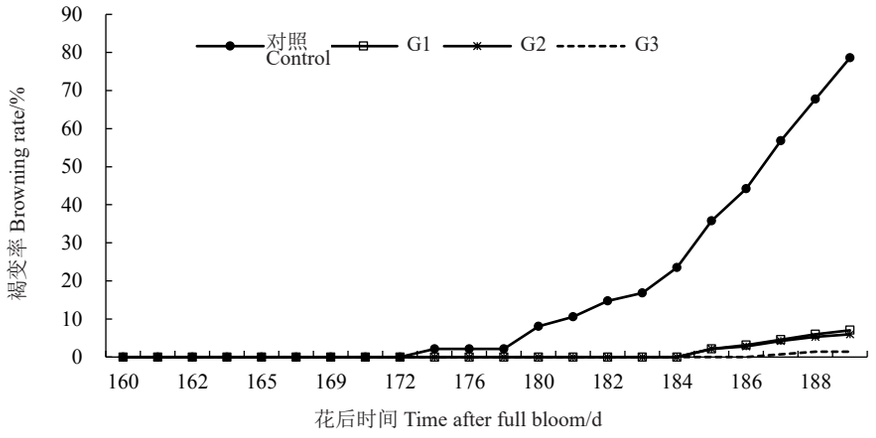

图 5 不同果袋内果皮褐变率增长情况

Fig. 5 Changes of peel browning rate in different fruit bags

表 2 不同果袋内果皮抗氧化物质的含量

Table 2 Content of antioxidant substances of peels in different fruit bags

果袋类型 Fruit bag type	w(维生素C) Vitamin C content/(mg·100 g^{-1})	w(总酚) Total phenolic content/(mg·100 g^{-1})	w(类黄酮) Flavonoids content/(mg·100 g^{-1})	w(总黄酮) Total flavonoids content/(mg·100 g^{-1})
对照 Control	4.32±0.36 c	9.84±0.22 c	2.56±0.06 c	0.057±0.002 71 c
G1	4.41±0.07 c	13.67±0.12 b	3.84±0.18 a	0.069±0.004 73 b
G2	4.74±0.13 b	14.01±0.81 b	3.44±0.07 b	0.082±0.003 73 a
G3	5.19±0.17 a	15.52±0.12 a	3.97±0.36 a	0.085±0.003 80 a

注:不同小写字母表示显著差异(p<0.05)。下同。

Note: Different small letters indicate significant difference (p<0.05). The same below.

图6-A可见,与对照相比,G1、G2和G3果皮的MDA含量分别降低了8.6%、19.7%和21.1%,其中G3果皮的MDA含量下降幅度最大且达到差异显著水平;由图6-B可见,与对照相比,G1果皮的 $O_2^{\cdot-}$ 含量无显著变化,分别为248.32 μg·g^{-1}和252.30 μg·g^{-1},但G2和G3处理中果皮的 $O_2^{\cdot-}$ 含量与对照差异显著,分别下降了4.1%和2.1%。综上,与对照相比,G3处理显著降低了果皮MDA含量,而G2和G3处理显著降低了果皮 $O_2^{\cdot-}$ 含量。

2.3.3 不同果袋内果皮抗氧化酶活性的比较 由图7-A可知,与对照相比,G2和G3处理的SOD活性显著升高,其中G3处理的SOD活性最高,为21.22 U·g^{-1}·min^{-1};由图7-B可知,G3果皮中的POD活性最高,其次为G2和对照,而G1果皮中的POD活性最低,为7.86 U·g^{-1}·min^{-1}。与G1相比,G2、G3的POD活性显著提高11.8%和28.6%;由图7-C可知,与对照相比,G1、G2和G3果皮CAT活性均显著提高,其中G1和G3果皮CAT活性提高效果最为显著,分别提高了59.7%和54.0%,而G2果皮提高了25.2%;由图7-D可知,对照和G1果皮的PPO活性显著高于其他处理,分别为174.45 U·g^{-1}·min^{-1}和172.75 U·g^{-1}·min^{-1},

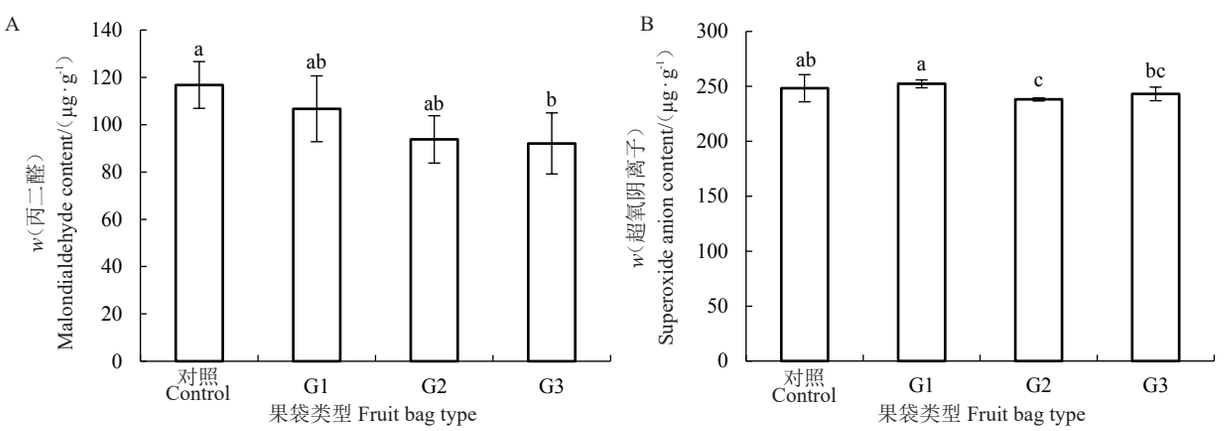

图 6 不同果袋内果皮丙二醛和超氧阴离子的含量

Fig. 6 Contents of malondialdehyde and superoxide anion in peels in different fruit bags

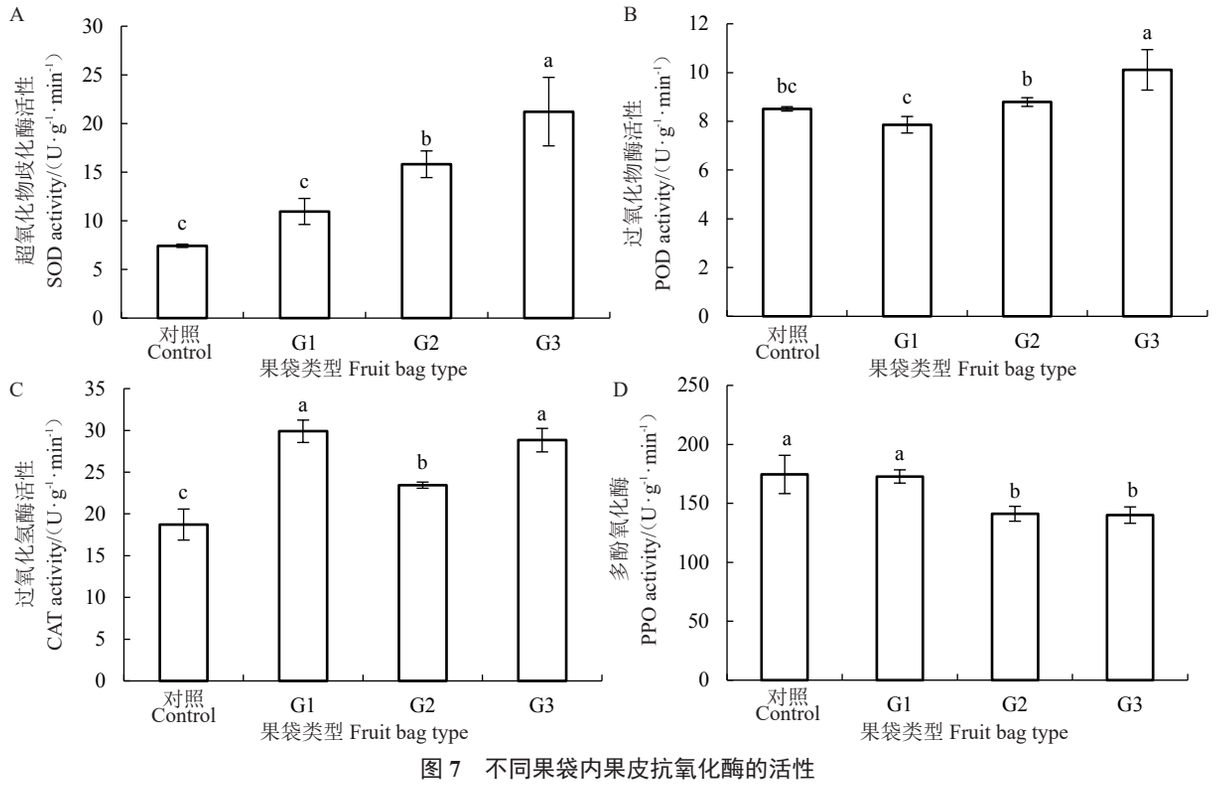

图 7　不同果袋内果皮抗氧化酶的活性

Fig. 7　Activities of antioxidant enzymes in peels in different fruit bags

而G2和G3果皮中的PPO活性无显著差异，分别为141.12 U·g^{-1}·min^{-1}和140.00 U·g^{-1}·min^{-1}。综上，从对照至G1、G2和G3处理，SOD和POD活性整体呈上升趋势，PPO活性呈下降趋势。

2.4　应用隶属函数法对4种果袋的综合评价

通过选取具有显著差异的抗氧化物质指标，以褐变率、维生素C含量、总酚含量、类黄酮含量、总黄酮含量、丙二醛含量、超氧阴离子含量、SOD活性、POD活性、CAT活性、PPO活性作为评价指标。各指标的隶属函数值如表3所示，通过隶属函数综合评价得出，4种果袋对瑞雪苹果果皮褐变及抗氧化品质指标影响效果的综合评价指数排序为：G3＞G2＞G1＞对照，这表明G3果袋在降低瑞雪果皮褐变率和提升瑞雪果皮抗氧化品质方面的综合效果最优，其次是G2果袋和G1果袋。

表 3　不同果袋各指标隶属函数值及综合评价

Table 3　Membership function and comprehensive indexes of different fruit bags

果袋类型 Fruit bag type	指标 Index											综合指数 Comprehensive	排序 Order
	X1	*X2*	*X3*	*X4*	*X5*	*X6*	*X7*	*X8*	*X9*	*X10*	*X11*		
对照 Control	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.28	0.00	0.29	0.00	0.00	0.05	4
G1	0.93	0.10	0.67	0.91	0.41	0.41	0.00	0.26	0.00	1.00	0.04	0.43	3
G2	0.94	0.48	0.73	0.62	0.91	0.93	1.00	0.61	0.41	0.42	0.73	0.73	2
G3	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.65	1.00	1.00	0.91	0.96	0.96	1

注：*X1*. 褐变率；*X2*. 维生素 C 含量；*X3*. 总酚含量；*X4*. 类黄酮含量；*X5*. 总黄酮含量；*X6*. 丙二醛含量；*X7*. 超氧阴离子含量；*X8*. 超氧化物歧化酶活性；*X9*. 过氧化物酶活性；*X10*. 过氧化氢酶活性；*X11*. 多酚氧化酶活性。

Note: *X1*. Broning rate; *X2*. Vitamin C content; *X3*. Total phenols content; *X4*. Flavonoids content; *X5*. Totalflavonoids content; *X6*. Malondialdehyde content; *X7*. Superoxide anion content; *X8*. SOD activity; *X9*. POD activity; *X10*. CAT activity; *X11*. PPO activity.

3　讨　论

3.1　不同果袋对温度和光照的影响

苹果生长发育离不开自然环境。不套袋果主要受自然环境的影响，而套袋果主要受袋内微域环境

的影响[4,11]。不同材质的果袋营造的微域环境不同，进而影响果袋内光照和温度环境。张建光等[5]的研究发现，光照是通过影响袋内的温度进而制约果面的温度，此温度差异必然会造成果实的生理状态差异，从而间接对套袋果产生影响。本研究中虽然不同果袋内日平均低温和日平均温无显著差异，但是不同果袋内日平均最高温和有效积温存在一定的差异，例如对照和G3的有效积温累积量相差36.9 ℃，这必定会对果实的生理指标产生影响。厉恩茂等[11]的研究指出完全遮光袋会导致袋内温度升高，光照度显著降低，也会减小温度的变化幅度。程智慧等[16]对黄瓜进行套袋栽培，发现套袋后温度均有不同程度的提高，而光照度减弱，并得出套袋营造的微环境可以调节黄瓜发育、品质及其商品价值。这与本研究的结果一致，通过对瑞雪苹果采用不同果袋的套袋栽培管理，改变了袋内的微域环境，进而缓解瑞雪果皮的褐变现象并提高瑞雪的品质。

3.2 不同果袋温度对果皮褐变及MDA和$O_2^{\cdot-}$含量的影响

Tong等[17]的研究指出当蜜脆苹果处于易感成熟期时，日平均温的下降可能会提升果肉褐变的发生率。日平均温下降之所以可能是诱发果皮褐变的重要因素，是因为低温会破坏果树体内正常的氧化还原关系，从而导致果实抗氧化能力的变化，进而影响果树体内其他生理代谢过程[18]。与此同时，低温胁迫也会促进胞内活性氧产生，过多的活性氧容易诱发果皮的膜脂过氧化，从而导致膜脂过氧化产物MDA大量积累[19]。Sun等[20]的研究也证明了在低温逆境下，南果梨果皮中*PuMYB21*和*PuMYB54*结合下游结构基因*PuPLDβ1*促进了膜脂代谢，进而引起果皮褐变。王爽[9]的研究得出渭北地区套袋瑞雪在果实发育后期，袋内较低的日平均温和日最高温造成较低的有效积温，使果实处于低温胁迫环境中，从而导致瑞雪果皮褐变的产生。本研究中通过测定果袋内温度，发现在花后170~180 d温度骤降15 ℃，对照开始发生褐变并且褐变率上升较快；此外，对照果袋的有效积温远低于G1、G2和G3，而对照果皮褐变率和褐变程度远高于G1、G2和G3，这与王爽[9]的研究结果一致。因此推测在陇东地区，当瑞雪果实发育后期日平均温大幅度下降时，果皮容易发生褐变现象。当苹果[21]、葡萄[22]在低温胁迫下，活性氧含量和MDA含量都显著升高，这与笔者的研究结果一致。G1果袋内有效积温较低，而$O_2^{\cdot-}$和MDA含量显著高于其他处理，进而果皮褐变现象较为严重。与此相反，G3果袋内有效积温较高，$O_2^{\cdot-}$和MDA含量显著低于对照和其他处理组，同时其果皮褐变率最低。

3.3 不同果袋光照对果皮褐变、抗氧化物质及抗氧化酶活性的影响

光照是影响植物抗氧化能力的重要因子之一[23-24]。Wang等[25]的研究发现，在黑暗条件下，*MdWRKY31*与*MdLAC7*的启动子结合，可调节其活性，进而加速套袋果实的果皮褐变；而在光照环境下，光响应转录因子*MdHY5*与*MdWRKY31*的启动子结合并抑制该基因的表达，从而间接抑制*MdLAC7*的功能，因此抑制了采前果皮的褐变。这与笔者的研究结果一致，透光率为0%的对照果袋会加速袋内瑞雪果皮褐变，而透光率为51.2%的G3果袋果皮褐变延迟13 d，这表明透光率高的果袋降低了袋内果皮的褐变程度。在梨的研究中发现光照度会影响梨果实内的抗氧化性能[20]。在枇杷套袋后也发现枇杷果实的抗氧化能力有不同程度的下降，这主要归因于酚类物质和类黄酮含量下降[26]。本研究中，瑞雪套袋后果皮抗氧化能力均有所下降，但以高透光率的G3（白色单层袋）内果实抗氧化能力降幅小，而以低透光率的对照（普通双层袋）抗氧化能力降幅大。在套袋薄皮甜瓜果实研究中同样发现果袋的透光性和类黄酮含量呈正相关[27]，不套袋黄桃中较高的总酚和总黄酮含量有利于抑制黄桃果肉的褐变[28]。本研究中，双层袋的透光性低于单层袋，且双层袋的总酚和类黄酮的含量显著低于单层袋的含量，其中，随着不同单层袋透光率降低，瑞雪果皮总酚和类黄酮的含量呈下降趋势。因此光照可能影响了瑞雪果皮中总酚和类黄酮等抗氧化物质的代谢，进而影响了瑞雪果皮褐变率和褐变指数。

苹果梨酵素总酚含量上升抑制了PPO活性，从而控制酶促褐变的发生[29]。受光程度较强的不套袋黄桃会延迟PPO活性的降低，减轻果实的氧化胁迫[28]，而总酚含量与抗氧化酶活性升高和PPO活性降低紧密相关[30]。本研究中随着果袋透光率的升高，瑞雪果皮中的酚类物质含量上升，而PPO活性下降。Lin等[31]研究发现龙眼果皮发生褐变归因于SOD活性的降低和$O_2^{\cdot-}$的累积量增加，进而导致膜脂质过氧化严重，细胞膜结构的完整性受损，最终使

PPO与酚类物质接触发生褐变。PPO同样也是影响石榴果皮褐变的主导酶类[32]，在本研究中同样发现在褐变率较高的瑞雪果皮中，PPO活性较高。Zhao等[33]得出采收前的阳光照射显著提升了收获时梨果皮中抗氧化酶的活性。这是因为光照度的增加会调控SOD基因的表达，使抗氧化酶活性提高[18]。在本研究中，随着果袋透光率的升高，瑞雪果皮中SOD活性提高。SOD、POD及CAT等抗氧化酶系统的存在可以有效地清除ROS[34]，保持体内活性氧的平衡，因而SOD、POD及CAT的活性可以作为判定果实抗氧化的指标[35]。本研究中，随果袋透光率的升高，瑞雪果皮SOD、POD整体的活性提升，即果皮抗氧化能力增强，进而降低了瑞雪果皮褐变率及褐变指数。

4　结　论

不同果袋显著影响瑞雪苹果果皮抗氧化物质含量和抗氧化酶活性。白色单层果袋（G3）显著提高了果皮抗氧化物质含量和抗氧化酶活性，降低了瑞雪果皮褐变率及褐变指数。因此，在瑞雪套袋栽培生产中，推荐使用白色单层果袋（G3）。

参考文献 References：

[1] 王金政，毛志泉，丛佩华，吕德国，马锋旺，任小林，束怀瑞，李保华，郭玉蓉，郝玉金，姜远茂，张新忠，杨欣，曹克强，赵政阳，韩振海，霍学喜，魏钦平 . 新中国果树科学研究 70 年：苹果[J]. 果树学报，2019，36(10)：1255-1263.
WANG Jinzheng，MAO Zhiquan，CONG Peihua，LÜ Deguo，MA Fengwang，REN Xiaolin，SHU Huairui，LI Baohua，GUO Yurong，HAO Yujin，JIANG Yuanmao，ZHANG Xinzhong，YANG Xin，CAO Keqiang，ZHAO Zhengyang，HAN Zhenhai，HUO Xuexi，WEI Qinping. Fruit scientific research in New China in the past 70 years：Apple[J]. Journal of Fruit Science，2019，36(10)：1255-1263.

[2] 魏静，王辉，王乐幸，裴琳娜，孙鲁龙，陈旭强，高华 . 套袋‘瑞雪’苹果果皮不同部位褐变的研究[J]. 北方果树，2023(2)：5-9.
WEI Jing，WANG Hui，WANG Lexing，PEI linna，SUN Lulong，CHEN Xuqiang. Study on browning of different parts of bagged ‘Ruixue’ apple peel during harvesting period[J]. Northern Fruits，2023(2)：5-9.

[3] 高华，赵政阳，王雷存，刘振中，武月妮，杨亚州，张伯虎 . 苹果新品种‘瑞雪’的选育[J]. 果树学报，2016，33(3)：374-377.
GAO Hua，ZHAO Zhengyang，WANG Leicun，LIU Zhenzhong，WU Yueni，YANG Yazhou，ZHANG Bohu. Breeding report of a new apple cultivar‘Ruixue’[J]. Journal of Fruit Science，2016，33(3)：374-377.

[4] 卜万锁，牛自勉，赵红钰 . 套袋处理对苹果芳香物质含量及果实品质的影响[J]. 中国农业科学，1998，31(6)：1-5.
BU Wansuo，NIU Zimian，ZHAO Hongyu. Effect of fruit bagging treatment on the content of volatile aroma compounds and flesh quality of apple[J]. Scientia Agricultura Sinica，1998，31(6)：1-5

[5] 张建光，王惠英，王梅，孙建设，刘玉芳，SCHRADER L. 套袋对苹果果实微域生态环境的影响[J]. 生态学报，2005，25(5)：1082-1087.
ZHANG Jianguang，WANG Huiying，WANG Mei，SUN Jianshe，LIU Yufang，SCHRADER L. Effect of bagging on microenvironments of apple fruits[J]. Acta Ecologica Sinica，2005，25(5)：1082-1087.

[6] 王保明，丁改秀，王小原，秦国杰，仓国营，温鹏飞 . 套袋对‘壶瓶枣’果实微域环境及品质的影响[J]. 果树学报，2013，30(5)：787-792.
WANG Baoming，DING Gaixiu，WANG Xiaoyuan，QIN Guojie，CANG Guoying，WEN Pengfei. Effects of bagging on the microenvironment and fruit quality of ‘Huping’ jujube[J]. Journal of Fruit Science，2013，30(5)：787-792.

[7] 董铁，刘兴禄，牛军强，魏玉萍，于良祖，马明 . 4 个苹果新品种在陇东地区的引种表现[J]. 甘肃农业科技，2018(10)：58-61.
DONG Tie，LIU Xinglu，NIU Junqiang，WEI Yuping，YU Liangzu，MA Ming. Introduction performance of 4 new apple cultivars in Longdong area[J]. Gansu Agricultural Science and Technology，2018(10)：58-61.

[8] 邵砾群 . 中国苹果矮化密植集约栽培模式技术经济评价研究[D]. 杨凌：西北农林科技大学，2015.
SHAO Liqun. Techno- economic evaluation on high- density dwarfing cultivation pattern of apple in China[D]. Yangling：Northwest A & F University，2015.

[9] 王爽 . 套袋诱发‘瑞雪’苹果果皮褐变的生理生态机制研究[D]. 杨凌：西北农林科技大学，2021.
WANG Shuang. Research on physiological and ecological mechanism of peel browning of ‘Ruixue’ apple induced by bagging[D]. Yangling：Northwest A & F University，2021.

[10] 苏艳丽，田永真，杨健，王龙，王苏珂，薛华柏，李秀根 . 梨果实褐变的研究进展[J]. 西北林学院学报，2018，33(3)：144-152.
SU Yanli，TIAN Yongzhen，YANG Jian，WANG Long，WANG Suke，XUE Huabai，LI Xiugen. Research progress of pear fruit browning[J]. Journal of Northwest Forestry University，2018，33(3)：144-152.

[11] 厉恩茂，史大川，徐月华，陈锋，翟衡 . 套袋苹果不同类型果袋内温、湿度变化特征及其对果实外观品质的影响[J]. 应用生态学报，2008，19(1)：208-212.
LI Enmao，SHI Dachuan，XU Yuehua，CHEN Feng，ZHAI Heng. Changing characteristics of temperature and humidity in different type bags for bagging apple and their effects on fruit appearance quality[J]. Chinese Journal of Applied Ecology，2008，19(1)：208-212.

[12] 樊淼淼 . ‘瑞雪’苹果套袋栽培关键技术优化[D]. 杨凌：西北农林科技大学，2021.
FAN Miaomiao. Optimization of key technology of ‘Ruixue’ apple bagging cultivation[D]. Yangling：Northwest A & F University，2021.

[13] 李静 . 苹果新品种‘瑞雪’专用育果袋的筛选[D]. 杨凌：西北农林科技大学，2019.
LI Jing. Screening of special fruit-growing bags for new apple variety ‘Ruixue’[D]. Yangling：Northwest A & F University，2019.

[14] 赵静 . 采前光照诱导抗氧化物积累抑制‘Anjou’梨果实虎皮病发生的生化及分子机制[D]. 泰安：山东农业大学，2016.
ZHAO Jing. The biochemical and molecular mechanism of preharvest light expose inhibited ‘Anjou’pear superficial scald via promote accumulation of antioxidant compounds[D]. Tai’an：Shandong Agricultural University，2016.

[15] 李心草 . UV-B 处理对苹果虎皮病的防效和机制研究[D]. 泰安：山东农业大学，2022.
LI Xincao. Effect and mechanism of UV-B treatment on the control of superficial scald in apples[D]. Tai’an：Shandong Agricultural University，2022.

[16] 程智慧，赵英，孟焕文，关志华 . 不同材质果袋春夏季节套袋对黄瓜果实发育和品质的影响[J]. 生态学报，2007，27(2)：732-739.
CHENG Zhihui，ZHAO Ying，MENG Huanwen，GUAN Zhihua. Effects of fruit bagging with different types of bags on growth and quality of cucumber fruit[J]. Acta Ecologica Sinica，2007，27(2)：732-739.

[17] TONG C B S，CHANG H Y，BOLDT J K，MA Y Z B，DEELL J R，MORAN R E，BOURGEOIS G，PLOUFFE D. Diffuse flesh browning in ‘Honeycrisp’ apple fruit is associated with low temperatures during fruit growth[J]. HortScience，2016，51(10)：1256-1264.

[18] 李英丽 . 温度与光照强度对鸭梨果实抗氧化能力的影响及其机理研究[D]. 保定：河北农业大学，2013.
LI Yingli. Effect of temperature and light intensity on fruit antioxidant capacity and its acting mechanism in Yali pears[D]. Baoding：Agricultural University of Hebei，2013.

[19] 孙巧峰，于贤昌，高俊杰，常尚连 . 羧甲基壳聚糖对黄瓜幼苗抗冷性的影响[J]. 中国农业科学，2004，37(11)：1660-1665.
SUN Qiaofeng，YU Xianchang，GAO Junjie，CHANG Shanglian. Effect of carboxymethyl chitosan on chilling tolerance in cucumber seedlings[J]. Scientia Agricultura Sinica，2004，37(11)：1660-1665.

[20] SUN H J，LUO M L，ZHOU X，ZHOU Q，SUN Y Y，GE W Y，YAO M M，JI S J. PuMYB21/PuMYB54 coordinate to activate PuPLDβ1 transcription during peel browning of cold- stored “Nanguo” pears[J]. Horticulture Research，2020，7：136.

[21] 马玉华，王永红，王荔，万明长，邹养军 . 高温胁迫对苹果叶片膜脂过氧化及抗坏血酸的影响[J]. 贵州农业科学，2010，38(8)：176-178.
MA Yuhua，WANG Yonghong，WANG Li，WAN Mingchang，ZOU Yangjun. Effects of high temperature stress on lipid peroxidation and ascorbic acid content in apple leaves[J]. Guizhou Agricultural Sciences，2010，38(8)：176-178.

[22] 张俊环，黄卫东 . 葡萄幼苗在温度逆境交叉适应过程中活性氧及抗氧化酶的变化[J]. 园艺学报，2007，34(5)：1073-1080.
ZHANG Junhuan，HUANG Weidong. Changes of active oxygen and antioxidant enzymes in leaves of young grape plants during cross adaptation to temperature stress[J]. Acta Horticulturae Sinica，2007，34(5)：1073-1080.

[23] HAO C Y，FAN R，WU H S，ZHANG X P，WANG L，CHEN W L，CHEN Z L. Physiological response of *Monimopetalum chinense* to light stress under habitat fragmentation[J]. Plant，Soil and Environment，2010，56(12)：551-556.

[24] DEMMIG-ADAMS B，ADAMS W W. Photoprotection and other responses of plants to high light stress[J]. Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology，1992，43：599-626.

[25] WANG H，ZHANG S H，FU Q Q，WANG Z D，LIU X J，SUN L L，ZHAO Z Y. Transcriptomic and metabolomic analysis reveals a protein module involved in preharvest apple peel browning[J]. Plant Physiology，2023，192(3)：2102-2122.

[26] 冯健君，陈俊伟，徐红霞，张豫超，谢鸣，胡余楚 . 果袋透光性对宁海白枇杷果实品质及抗氧化能力的影响[J]. 果树学报，2009，26(1)：66-70.
FENG Jianjun，CHEN Junwei，XU Hongxia，ZHANG Yuchao，XIE Ming，HU Yuchu. Effect of different light transmittance paper bags on fruit quality and antioxidant capacity in Ninghaibai loquat cultivar[J]. Journal of Fruit Science，2009，26(1)：66-70.

[27] 宋廷宇，李彬，程艳，赵茹，吴春燕，陈赫楠，徐伟，张晓明 . 套袋对薄皮甜瓜袋内微域环境和果实品质的影响[J]. 西北农林科技大学学报（自然科学版），2016，44(12)：150-156.
SONG Tingyu，LI Bin，CHENG Yan，ZHAO Ru，WU Chunyan，CHEN Henan，XU Wei，ZHANG Xiaoming. Effects of bagging on microenvironment and quality of oriental melon[J]. Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition)，2016，44(12)：150-156.

[28] 黄余年，张维，张群，李高阳，单杨，苏东林，朱向荣 . 采前套袋与未套袋处理对黄桃采后贮藏品质的影响[J]. 中国食品学报，2021，21(6)：231-242.
HUANG Yunian，ZHANG Wei，ZHANG Qun，LI Gaoyang，SHAN Yang，SU Donglin，ZHU Xiangrong. Effects of pre-harvest bagging and non-bagging treatment on postharvest storage quality of yellow-flesh peach[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology，2021，21(6)：231-242.

[29] 范昊安，沙如意，方晟，薛淑龙，陈雨，黄俊，崔艳丽，毛建卫 . 苹果梨酵素发酵过程中的褐变与抗氧化活性[J]. 食品科学，2020，41(14)：116-123.
FAN Haoan，SHA Ruyi，FANG Sheng，XUE Shulong，CHEN

Yu，HUANG Jun，CUI Yanli，MAO Jianwei. Browning and antioxidant activity of apple- pear jiaosu during fermentation[J]. Food Science，2020，41(14)：116-123.

[30] 王馨雨，杨绿竹，王婷，王蓉蓉，刘洁，单杨，张群，丁胜华 . 植物多酚氧化酶的生理功能、分离纯化及酶促褐变控制的研究进展[J]. 食品科学，2020，41(9)：222-237.
WANG Xinyu，YANG Lüzhu，WANG Ting，WANG Rongrong，LIU Jie，SHAN Yang，ZHANG Qun，DING Shenghua. Recent progress toward understanding the physiological function，purification，and enzymatic browning control of plant polyphenol oxidases[J]. Food Science，2020，41(9)：222-237.

[31] LIN Y F，LIN H T，ZHANG S，CHEN Y H，CHEN M Y，LIN Y X. The role of active oxygen metabolism in hydrogen peroxide-induced pericarp browning of harvested Longan fruit[J]. Postharvest Biology and Technology，2014，96：42-48.

[32] 冯立娟，尹燕雷，杨雪梅，付莹，李英朋 . 不同石榴品种果皮褐变及其相关酶活性分析[J]. 果树学报，2017，34(3)：354-362.
FENG Lijuan，YIN Yanlei，YANG Xuemei，FU Ying，LI Yingpeng. Analysis on the pericarp browning and related enzyme activities in different pomegranate cultivars[J]. Journal of Fruit Science，2017，34(3)：354-362.

[33] ZHAO J，XIE X B，SHEN X，WANG Y. Effect of sunlight-exposure on antioxidants and antioxidant enzyme activities in ‘d’Anjou’ pear in relation to superficial scald development[J]. Food Chemistry，2016，210：18-25.

[34] GINÉ-BORDONABA J，BUSATTO N，LARRIGAUDIÈRE C，LINDO-GARCÍA V，ECHEVERRIA G，VRHOVSEK U，FARNETI B，BIASIOLI F，DE QUATTRO C，ROSSATO M，DELLEDONNE M，COSTA F. Investigation of the transcriptomic and metabolic changes associated with superficial scald physiology impaired by lovastatin and 1-methylcyclopropene in pear fruit (cv. Blanquilla)[J]. Horticulture Research，2020，7：49.

[35] 左雪冬，胡玉林，邓峰 . 不同果袋对‘蜜丝枣’果实品质及抗氧化酶活性的影响[J]. 热带作物学报，2014，35(10)：2008-2012.
ZUO Xuedong，HU Yulin，DENG Feng. Effect of different fruit nursery bag on the fruit quality and antioxidant enzyme activity of *Zizyphus mauritiana* Lam. ‘Misi’ [J]. Chinese Journal of Tropical Crops，2014，35(10)：2008-2012.