

120份石榴种质果实的抗日灼能力评价及抗日灼指标筛选

苏颖^{1,2,3}, 刘春燕^{1,2}, 张虎平³, 贾波涛^{1,2}, 黎积誉^{1,2},
于晴^{1,2,3}, 杨圆^{1,2}, 曹榛^{1,2}, 秦改花^{1,2*}

(¹园艺作物遗传改良与生理生态安徽省重点实验室, 安徽省农业科学院园艺研究所, 合肥 230001; ²果树果实发育与品质生物学安徽省农业科学院重点实验室, 安徽省农业科学院, 合肥 230001; ³南京农业大学园艺学院, 南京 210095)

摘要:【目的】明确不同石榴种质果实日灼发生情况及其抗日灼能力, 进而筛选出反映果实抗日灼能力的生理指标。【方法】调查了120份石榴资源的日灼发生率和日灼指数, 并对其进行抗日灼能力评价。对15份具不同抗日灼能力的资源进行总抗氧化能力评价, 并测定果皮日灼面的几种抗氧化物质含量, 最后对日灼指数、总抗氧化能力及相关生理指标进行相关性分析。【结果】不同石榴种质果实的日灼发生率和日灼指数具明显多样性。15份不同资源的总抗氧化能力和抗氧化活性物质含量表现出明显的基因型差异。线性回归和相关性分析表明, 日灼指数与总抗氧化能力呈现极显著正相关; 相关性分析表明, 日灼指数与抗坏血酸、总酚、花青素、谷胱甘肽、总黄酮含量呈极显著正相关($p < 0.01$), 日灼指数与类胡萝卜素含量之间没有明显的相关性。进一步分析发现, 总酚、抗坏血酸和谷胱甘肽与总抗氧化能力的相关性最强($p < 0.01$)。【结论】不同石榴种质果皮的抗日灼能力具有明显的多态性; 总抗氧化能力可以反映其抗日灼能力, 总酚、抗坏血酸和谷胱甘肽含量可以很大程度上反映其抗氧化能力。

关键词:石榴; 日灼; 抗氧化能力; 抗氧化剂

中图分类号:S665.4

文献标志码:A

文章编号:1009-9980(2021)10-1725-11

Evaluation of sunburn resistance and screening of physiological indexes related to sunburn of the fruits in 120 pomegranate accessions

SU Ying^{1, 2, 3}, LIU Chunyan^{1, 2}, ZHANG Huping³, JIA Botao^{1, 2}, LI Jiyu^{1, 2}, YU Qing^{1, 2, 3}, YANG Yuan^{1, 2}, CAO Zhen^{1, 2}, QIN Gaihua^{1, 2*}

(¹Key Laboratory of Horticultural Crop Genetic Improvement and Eco-physiology of Anhui Province, Institute of Horticulture Research, Anhui Academy of Agricultural Sciences, Hefei 230001, Anhui, China; ²Key Laboratory of Fruit Quality and Developmental Biology, Anhui Academy of Agricultural Sciences, Hefei 230001, Anhui, China; ³College of Horticulture, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, Jiangsu, China)

Abstract:【Objective】Sunburn is a physiological disease of pomegranate fruits, which seriously affects the appearance and quality of the fruits. In order to understand the sunburn resistance of pomegranate fruits, we investigated the incidences of sunburn and sunburn indexes of 120 pomegranate accessions. Based on the sunburn resistance of pomegranate accessions, 15 accessions with different sunburn resistance were selected to study the relationship between the sunburn resistance and the antioxidant activity.【Methods】The sunburn incidences and sunburn indexes of 120 pomegranate accessions, planted in Gangji Eco-Agricultural Demonstration site, Anhui Academy of Agricultural Sciences, were investigated, and the corresponding sunburn resistance were evaluated. The antioxidant capacity was determined by FRAP (Ferric reducing antioxidant power) method. The contents of total phenol, total flavonoid, anthocyanin, carotenoid, ascorbic acid (AsA) and glutathione (GSH) content of sunburn pericarp were de-

收稿日期:2021-04-02 接受日期:2021-06-15

基金项目:安徽省科技重大专项(201903b06020017)

作者简介:苏颖,女,硕士,研究方向为果树栽培生理。Tel:15205157797, E-mail:15109159670@163.com

*通信作者 Author for correspondence. Tel:0551-62160858, E-mail:qghahstu@163.com

tected. SPSS 25.0 software was used to do the correlation analysis and linear regression analysis between total antioxidant capacity and antioxidant contents. 【Results】There were significant differences in the sunburn rates and the sunburn indexes of 120 pomegranate germplasm resources. The most abundant pomegranate accessions had the sunburn index from 20 to 40, which represented resistant accessions. There were 40 varieties with sunburn index from 40 to 60, which represented susceptible accessions. There were 25 accessions with sunburn index ranging from 0 to 20, which represented highly resistant accessions. There were 10 accessions with sunburn index over 60, which represented high sensitivity to sunburn. The relationship between the sunburn resistance ability and the antioxidant activity of 15 accessions with high resistance and sensitive accessions was studied. The results showed that there were significant differences in the total antioxidant capacity of 15 accessions, which increased with the increase of sunburn index. AHHB-31 and AHHB-27 had the strongest total antioxidant capacity, which were 416.22 and 414.20 mmol·g⁻¹, respectively. While AHHB-65 had the weakest total antioxidant capacity (131.05 mmol·g⁻¹). The contents of total phenol, total flavonoid, anthocyanin, carotenoid, ascorbic acid and glutathione in the pericarp of 15 pomegranate accessions were also different in germplasm level. In general, the antioxidant contents of pomegranate pericarp increased with the sunburn index in a certain range. Exceeding this threshold, the content of antioxidant in highly susceptible accessions was reduced. The total antioxidant capacity of the pomegranate peel and the sunburn index was significantly and positively correlated ($p < 0.01$). The correlation analysis between antioxidant substances and sunburn index showed that ascorbic acid and total phenol content had significantly positive correlation with the sunburn index of fruit ($p < 0.01$), and the correlation coefficients were 0.750 and 0.629, respectively. The anthocyanin, glutathione and total flavonoid contents had correlation coefficients of 0.624, 0.538 and 0.506, respectively ($p < 0.01$). There was no correlation between the sunburn index and the carotenoid content. Furthermore, the correlation between the total antioxidant capacity and the contents of total phenol, total flavonoid, anthocyanin, carotenoid, ascorbic acid and glutathione were analyzed, separately. The results showed that the total antioxidant capacity was significantly correlated with the contents of total phenol, glutathione, ascorbic acid, total flavonoid, anthocyanin and carotenoid content ($p < 0.01$), indicating that these antioxidants could greatly reflect the total antioxidant capacity of sunburn fruits. Among them, the correlation coefficient between the total antioxidant ability and the total phenol, glutathione and ascorbic acid contents were higher than those between the total antioxidant ability and total flavonoid, anthocyanin and carotenoid contents. 【Conclusion】The sunburn resistance of pomegranate accessions were significantly different. Generally, the total antioxidant capacity can reflect the sunburn resistance of pomegranate fruits. The antioxidant ability of pomegranate fruits depends on the contents of total phenols, ascorbic acid and glutathione. The results not only provide a basis for genetic improvement of sunburn-resistant varieties, but also provide an insight to studying the anti-sunburn mechanism of pomegranate.

Key words: Pomegranate; Sunburn; Antioxidant capacity; Antioxidant

石榴(*Punica granatum* L.)为千屈菜科(Lythraceae)石榴属(*Punica* L.)落叶果树,广泛种植于热带和亚热带地区^[1]。在中国,石榴有2000多年的栽培历史,长期栽培过程中形成了丰富的生态类型和地方品种^[2-3]。据不完全统计,2017年全国石榴种植面积约12万hm²,年产量超过170万t^[4]。近年来,全

球气候变暖和极端天气频发,导致石榴果实日灼日趋严重^[5]。在管理粗放的果园,日灼发生率为40%~50%^[5]。石榴果实发生日灼后,灼伤部分的果皮变为深褐色或黑色,籽粒失水变干,严重影响果实内外品质,降低商业价值^[6]。

日灼是由高温和太阳辐射引起的生理性紊

乱^[7]。植物在受到日灼胁迫时,体内会产生大量活性氧(ROS)导致氧化应激^[8]。为消除ROS的毒性作用,植物已进化出复杂而有效的调节系统,其中抗氧化剂防御系统至关重要^[9]。研究表明,抗坏血酸(ascorbic acid, AsA)和谷胱甘肽(glutathione, GSH)在抗氧化剂防御系统中发挥关键作用^[10]。AsA和GSH不仅自身是有效的抗氧化剂,还能通过抗坏血酸-谷胱甘肽循环将活性氧转化为无毒物质^[11]。花青素和类黄酮等多酚类物质也具极强的抗氧化作用,多酚可通过减少紫外线辐射降低对植物的伤害程度^[12]。类胡萝卜素也是一种优良的抗氧化剂,具较强清除自由基的能力^[13]。此外,一些抗氧化剂水平(AsA和GSH)会影响植物的抗氧化胁迫能力^[11],因此,植物对胁迫耐受性的提高与抗氧化代谢产物含量有关^[14]。

早期研究表明,不同苹果品种对日灼的敏感性明显不同^[15]。澳洲青苹被认为是日灼的易感品种,富士属于比较敏感的品种,而粉红女士被认为是抗日灼能力最强的品种^[16]。这种敏感性差异可能与果皮的理化性质有关^[17],也可能与影响晒伤发生的间接因素有关,如品种的成熟时间和花青素的积累^[18]。目前,日灼对石榴的影响仅停留在单个品种的内外品质上^[19-20],不同石榴种质果实抗日灼能力研究暂未发现,石榴果皮抗氧化物质含量与抗日灼能力关系并不明确。因此,开展不同石榴种质果实的抗日灼能力评估是遗传改良及实现石榴提质增效的基础。

石榴种质资源极其丰富,长期的栽培过程中同物异名和同名异物现象严重,项目组前期对218份我国石榴种质资源的遗传多样性开展了分析,根据居群结构将其分为三个类群,筛选出了核心种质^[21]。以此为基础,笔者所在项目组开展不同石榴资源的抗日灼能力评价,选取各产区有代表性的120份石榴资源,调查日灼发生情况。此外,选择不同抗性的代表资源进行总抗氧化能力测定,将其与抗氧化代谢物含量进行相关性分析,研究胁迫的耐受性与植物抗氧化物质含量的关系,从而为石榴果实抗日灼机制研究及抗日灼评价指标的筛选提供依据。

1 材料和方法

1.1 供试材料

调查材料为各产区典型石榴品种资源,共计120份,均采自安徽省农业科学院果树研究所示范基地(安徽合肥)(表1)。树龄为5年生,树势一致,行株距4 m×2.5 m。果园进行常规管理,土质为壤砂土。

根据先前调查的石榴资源日灼情况,以日灼指数的大小和抗病等级的高低为标准,筛选出15个代表性石榴种质资源作为供试品种,其中高抗(HR)品种包括SD-31、SD-47、HY-3、SD-48;抗病(R)品种包括AHHB-65、SD-44、AHHB-60、HY-19、AHHB-2;感病(S)品种包括AHHB-31、AHHB-10、HYSZ-1;高感(HS)品种包括AHHB-21、SD-34、AHHB-27。

选择生长势和结果量均匀一致的石榴树,每个品种设3次重复,每次重复随机取10个果实。向阳面果皮被分离后,切碎混匀,用锡箔纸包裹并置于-80 ℃超低温冰箱中冷冻保存备用。对这15个资源果皮进行抗氧化能力及相关抗氧化活性物质的测定。

1.2 试验方法

1.2.1 调查方法 在自然生长的情况下,于2020年果实成熟期对120份石榴种质资源做田间日灼发生情况调查,种质资源采取统一编号,编号方法参考Liu等^[22],并对各种质资源的日灼指数进行抗性评价。每个资源选择3株,单株作为1次重复,每株资源在阳面随机调查10个果实。

结合 Felicetti^[22]在苹果和张彦坤等^[23]在核桃中的分级方法,制定石榴日灼分级标准。按照日灼程度将石榴果实分为四个等级,具体为:SB-0(无日灼);SB-1(果面出现轻微日灼症状,日灼部分出现暗红斑点且面积不到总面积的1/4);SB-2(果面褐色斑点开始逐渐明显,占总面积的1/5-1/4);SB-3(果面呈现黑褐色斑点,且开始出现坏死,占总面积的1/4及以上)。

$$\text{日灼发生率}/\% = \frac{\text{日灼果数}}{\text{调查总果数}} \times 100;$$

$$\text{日灼指数}/\% = \frac{\sum (\text{各级日灼果数} \times \text{各级代表值})}{(\text{调查总果数} \times \text{最高级代表值})} \times 100.$$

根据日灼指数,确定抗性评价标准。参照侯晖等^[24]的方法,根据日灼指数评价石榴抗日灼能力。具体标准如下:高抗(Highly Resistant, HR), 0 < 日灼指数 ≤ 20; 抗(Resistant, R), 20 < 日灼指数 ≤ 40; 感(Susceptible, S), 40 < 日灼指数 ≤ 60; 高感(Highly susceptible, HS), 日灼指数 > 60。

1.2.2 生理指标测定 采用 Benzie 等^[25]的方法测定总抗氧化能力。FRAP 工作液试剂含有 2.5 mL 10 mmol·L⁻¹ 的 2,4,6-三吡啶三叶嗪(2,4,6-trispyridyl-s-triazine, TPTZ)溶液(用 40 mmol·L⁻¹ HCl 配制), 2.5 mL 20 mmol·L⁻¹ FeCl₃ 溶液以及 25 mL 0.3 mol·L⁻¹ 的醋酸盐缓冲液(pH 3.6)。尽量现配现用。将 10 μL 样品液、200 μL 蒸馏水和 1.8 mL FRAP 工作液混合均匀, 37 °C 下避光水浴 10 min。在 593 nm 处测量反应混合物的吸光度。以 0.1~1.0 mmol·L⁻¹ FeSO₄ 溶液代替样品作标准曲线。

总酚含量参照 Folin-Ciocalteu 法测定, 并略作改良^[26]。反应体系为: 100 μL 样品提取液+0.5 mL Folin-Ciocalteu 试剂, 反应 1 min 后加入 1.5 mL 20% Na₂CO₃ 溶液混匀, 然后用蒸馏水定容至 10 mL。75 °C 水浴 15 min 后, 用可见分光光度计在 765 nm 处测量吸光度。结果以没食子酸为标准品制作标准曲线。

类黄酮提取参考 Jia 等^[27]的方法并稍作修改。具体如下: 将 200 μL 提取物置于 10 mL 容量瓶中。加入 0.3 mL 的 5% NaNO₂ 溶液。6 min 后加入 0.3 mL 10% AlCl₃。6 min 后, 加入 1 mL 1 mol·L⁻¹ NaOH, 用蒸馏水定容到 10 mL。在 510 nm 空白处测量吸光值。以芦丁作标准曲线。

花青素含量参照 Qin 等^[28]的方法测定。

类胡萝卜素含量参照曾德志等^[29]的方法测定, 并作适当调整: 将 0.2 g 样品与 2 mL 萃取剂(丙酮溶液含 BHT 0.2%)充分混合, 超声萃取 10 min 后离心, 收集上清; 再在下层中继续加入萃取剂 1 mL, 充分混匀后二次超声离心, 混合收集的上清液, 用分光光度计测定其在 450 nm 处吸光度值, 按下列公式计算: $X(\text{mg} \cdot 100 \text{ g}^{-1}) = A \times V \times 1000 / E_{\text{1cm}}^{\%} \times m$ 。式中, X 为类胡萝卜素总含量($\text{mg} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$); A 为样品最大吸光度值; V 为样品溶液体积(mL); $E_{\text{1cm}}^{\%}$ 为吸光系数, 取值为 2500; m 为样品质量(g)。

抗坏血酸提取参考前人^[30]方法并作适当改进。称取 0.3 g 石榴果皮, 加入预冷的 5% 碳基水杨酸 2 mL 和适量石英砂, 冰浴研磨。随后转入离心管中, 4 °C 下 20 000 r 离心 20 min, 收集上清液并根据 Kampfenkel 等^[31]的 Fe³⁺ 还原法进行总抗坏血酸含量的测定。反应体系中含: 24 μL 1.84 mol·L⁻¹ 三乙醇胺以中和样液, 0.8 mL 0.2 mol·L⁻¹ 磷酸缓冲液(PBS, pH

7.4), 15 μL 提取液, 0.2 mL 6 mmol·L⁻¹ 二硫苏糖醇(DTT), 0.2 mL 0.4% N-乙基马来酰亚胺(NEM), 后依次加入 1.0 mL 10% 三氯乙酸(TCA), 0.8 mL 42% 磷酸, 0.8 mL 2% 2,2'-双吡啶, 0.4 mL 3% FeCl₃。混匀后 42 °C 水浴 60 min, 测 525 nm 处的吸光值。用同样方法作标准曲线, 计算总抗坏血酸含量。

谷胱甘肽含量根据前人^[32]的测定方法并作适当改进。取石榴果皮 0.3 g, 加入 2 mL 5% TCA 冰浴研磨后离心, 上清液为待测样液。反应体系为 0.25 mL 提取液+150 mmol·L⁻¹ NaH₂PO₄(pH 7.7) 2.6 mL+DTNB 试剂 0.18 mL。摇匀后, 于 30 °C 保温反应 5 min, 测定 412 nm 波长下吸光值。以 GSH 作标准曲线, 根据标准曲线或公式计算样品中的 GSH 含量。

1.3 统计分析

所有数据使用 Excel 2019 和 SPSS 25.0 进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 不同石榴种质果实抗日灼能力的评价

研究发现, 120 份石榴种质资源的日灼发生率具有明显差异(表 1)。同一品种不同级别的日灼石榴比例也相差明显。不同品种间果实的日灼指数具有明显差异。不同石榴种质资源的日灼指数呈明显正态分布(图 1)。日灼指数在 20~40 的品种分布最多, 有 45 个品种, 表现为抗性。日灼指数分布在 40~60 的有 40 个品种, 表现为感病。日灼指数分布在 0~20 的有 25 个品种, 表现为高抗。日灼指数在 60 以上的有 10 个品种, 表现为高感。

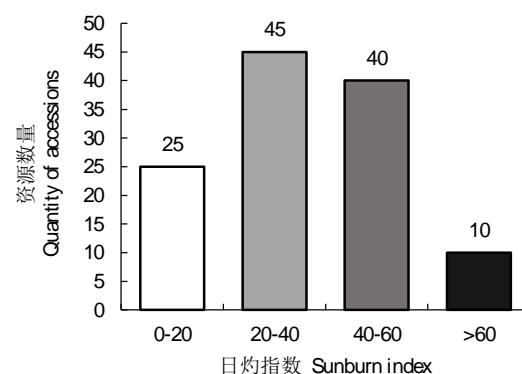


图 1 石榴资源的日灼指数分布
Fig. 1 Distribution histogram of sunburn index in pomegranate accessions

表1 石榴种质资源日灼情况评价
Table 1 Evaluation of pomegranate accessions sunburn

品种编号 Cultivar	日灼等级比例 Sunburn grade ratio/%				日灼发生率 Sunburn rate/%	日灼指数 Sunburn index	抗日灼等级 Resistant grade	品种来源地 Origin of cultivar
	SB-0	SB-1	SB-2	SB-3				
SXXA-2	89.5	5.3	5.3	0.0	10.6	5.3	HR	陕西 Shaanxi
SXXA-5	63.3	6.7	13.3	16.7	36.7	27.8	R	陕西 Shaanxi
SXXA-9	66.7	13.3	6.7	13.3	33.3	22.2	R	陕西 Shaanxi
SXXA-11	23.3	33.3	20.0	23.3	76.7	47.8	S	陕西 Shaanxi
SXXA-12	23.3	26.7	13.3	36.7	76.7	54.4	S	陕西 Shaanxi
SXXA-18	53.3	6.7	20.0	20.0	46.7	35.6	R	陕西 Shaanxi
SXXA-20	64.0	8.0	16.0	12.0	36.0	25.3	R	陕西 Shaanxi
SXXA-21	53.3	6.7	20.0	20.0	46.7	35.6	R	陕西 Shaanxi
SXXA-22	28.0	44.0	8.0	20.0	72.0	40.0	R	陕西 Shaanxi
AH-1	48.1	25.9	7.4	18.5	51.9	32.1	R	安徽 Anhui
AH-2	30.0	43.3	10.0	16.7	70.0	37.8	R	安徽 Anhui
AH-10	73.3	0.0	23.3	3.3	26.7	18.9	HR	安徽 Anhui
AH-20	53.3	0.0	33.3	13.3	46.7	35.6	R	安徽 Anhui
MQ-65	26.7	16.7	30.0	26.7	73.3	52.2	S	安徽 Anhui
HQ-65	20.0	15.0	17.5	47.5	80.0	64.2	HS	安徽 Anhui
HQ-66	0.0	0.0	6.7	93.3	100.0	97.8	HS	安徽 Anhui
HQ-68	0.0	0.0	17.5	82.5	100.0	94.2	HS	安徽 Anhui
HQ-89	10.0	7.1	14.3	68.6	90.0	80.5	HS	安徽 Anhui
HN-4	42.9	9.5	28.6	19.0	57.1	41.3	S	河南 Henan
HN-5	90.0	3.3	6.7	0.0	10.0	5.6	HR	河南 Henan
HN-15	80.0	5.0	5.0	10.0	20.0	15.0	HR	河南 Henan
HB-1	47.8	8.7	13.0	30.4	52.2	42.0	S	河北 Hebei
HYSZ-1	20.6	23.5	17.7	38.2	79.4	57.8	S	安徽 Anhui
DBZ	50.0	0.0	30.0	20.0	50.0	40.0	R	安徽 Anhui
HY-3	88.5	3.8	0.0	7.7	11.5	9.0	HR	安徽 Anhui
HY-5	17.9	25.0	21.4	35.7	82.1	58.3	S	安徽 Anhui
HY-6	73.3	13.3	13.3	0.0	26.7	13.3	HR	安徽 Anhui
HY-14	81.0	14.3	4.8	0.0	19.0	7.9	HR	安徽 Anhui
HY-15	95.7	4.3	0.0	0.0	4.3	1.4	HR	安徽 Anhui
HY-17	40.0	23.3	20.0	16.7	60.0	37.8	R	安徽 Anhui
HY-19	50.0	12.5	16.7	20.8	50.0	36.1	R	安徽 Anhui
HY-20	20.0	16.7	23.3	40.0	80.0	61.1	HS	安徽 Anhui
HY-21	46.7	20.0	16.7	16.7	53.3	34.4	R	安徽 Anhui
HY-22	36.4	22.7	27.3	13.6	63.6	39.4	R	安徽 Anhui
HY-23	61.1	11.1	16.7	11.1	38.9	25.9	R	安徽 Anhui
HY-24	60.0	13.3	13.3	13.3	40.0	26.7	R	安徽 Anhui
HY-25	36.7	10.0	20.0	33.3	63.3	50.0	S	安徽 Anhui
HY-26	36.7	26.7	30.0	6.7	63.3	35.6	R	安徽 Anhui
SD-3	96.7	0.0	0.0	3.3	3.3	3.3	HR	山东 Shandong
SD-8	90.0	0.0	6.7	3.3	10.0	7.8	HR	山东 Shandong
SD-13	90.0	10.0	0.0	0.0	10.0	3.3	HR	山东 Shandong
SD-15	100.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	HR	山东 Shandong
SD-16	86.7	3.3	6.7	3.3	13.3	8.9	HR	山东 Shandong
SD-22	85.0	0.0	10.0	5.0	15.0	11.7	HR	山东 Shandong
SD-23	79.3	0.0	13.8	6.9	20.7	16.1	HR	山东 Shandong
SD-24	80.0	0.0	0.0	20.0	20.0	20.0	HR	山东 Shandong
SD-27	80.0	0.0	12.0	8.0	20.0	16.0	HR	山东 Shandong
SD-31	100.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	HR	山东 Shandong
SD-33	94.1	0.0	0.0	5.9	5.9	5.9	HR	山东 Shandong
SD-34	6.7	30.0	26.7	36.7	93.3	64.4	HS	山东 Shandong
SD-35	30.0	23.3	26.7	20.0	70.0	45.6	S	山东 Shandong
SD-36	23.3	20.0	16.7	40.0	76.7	57.8	S	山东 Shandong
SD-37	100.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	HR	山东 Shandong
SD-38	60.0	0.0	30.0	10.0	40.0	30.0	R	山东 Shandong
SD-39	46.7	10.0	20.0	23.3	53.3	40.0	R	山东 Shandong
SD-41	50.0	10.0	26.7	13.3	50.0	34.4	R	山东 Shandong
SD-42	53.3	23.3	6.7	16.7	46.7	28.9	R	山东 Shandong
SD-43	40.0	16.7	23.3	20.0	60.0	41.1	S	山东 Shandong
SD-44	63.3	13.3	10.0	13.3	36.7	24.4	R	山东 Shandong
SD-45	50.0	20.0	13.3	16.7	50.0	32.2	R	山东 Shandong

表1 (续)
Table 1 (Continued)

品种编号 Cultivar	日灼等级比例 Sunburn grade ratio/%				日灼发生率 Sunburn rate/%	日灼指数 Sunburn index	抗日灼等级 Resistant grade	品种来源地 Origin of cultivar
	SB-0	SB-1	SB-2	SB-3				
SD-46	56.0	16.0	12.0	16.0	44.0	29.3	R	山东 Shandong
SD-47	100.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	HR	山东 Shandong
SD-48	76.7	13.3	3.3	6.7	23.3	13.3	HR	山东 Shandong
AHHB-1	26.7	33.3	23.3	16.7	73.3	43.3	S	安徽 Anhui
AHHB-2	33.3	33.3	23.3	10.0	66.7	36.7	R	安徽 Anhui
AHHB-3	33.3	30.0	23.3	13.3	66.7	38.9	R	安徽 Anhui
AHHB-4	65.5	0.0	27.6	6.9	34.5	25.3	R	安徽 Anhui
AHHB-5	36.7	20.0	26.7	16.7	63.3	41.1	S	安徽 Anhui
AHHB-6	66.7	3.3	16.7	13.3	33.3	25.6	R	安徽 Anhui
AHHB-7	50.0	6.7	26.7	16.7	50.0	36.7	R	安徽 Anhui
AHHB-8	46.7	6.7	26.7	20.0	53.3	40.0	R	安徽 Anhui
AHHB-9	26.7	33.3	23.3	16.7	73.3	43.3	S	安徽 Anhui
AHHB-10	30.0	26.7	10.0	33.3	70.0	48.9	S	安徽 Anhui
AHHB-11	50.0	16.7	13.3	20.0	50.0	34.4	R	安徽 Anhui
AHHB-12	66.7	19.0	9.5	4.8	33.3	17.5	HR	安徽 Anhui
AHHB-14	30.0	20.0	13.3	36.7	70.0	52.2	S	安徽 Anhui
AHHB-15	55.6	14.8	18.5	11.1	44.4	28.4	R	安徽 Anhui
AHHB-16	53.8	11.5	19.2	15.4	46.2	32.1	R	安徽 Anhui
AHHB-17	60.0	13.3	0.0	26.7	40.0	31.1	R	安徽 Anhui
AHHB-18	75.0	4.2	0.0	20.8	25.0	22.2	R	安徽 Anhui
AHHB-19	33.3	10.0	10.0	46.7	66.7	56.7	S	安徽 Anhui
AHHB-20	56.7	16.7	13.3	13.3	43.3	27.8	R	安徽 Anhui
AHHB-21	23.3	6.7	26.7	43.3	76.7	63.3	HS	安徽 Anhui
AHHB-24	66.7	3.3	6.7	23.3	33.3	28.9	R	安徽 Anhui
AHHB-25	53.3	20.0	16.7	10.0	46.7	27.8	R	安徽 Anhui
AHHB-26	43.3	16.7	10.0	30.0	56.7	42.2	S	安徽 Anhui
AHHB-27	13.8	17.2	17.2	51.7	86.2	69.0	HS	安徽 Anhui
AHHB-28	36.7	16.7	16.7	30.0	63.3	46.7	S	安徽 Anhui
AHHB-29	40.0	13.3	23.3	23.3	60.0	43.3	S	安徽 Anhui
AHHB-30	60.0	16.0	16.0	8.0	40.0	24.0	R	安徽 Anhui
AHHB-31	30.0	23.3	20.0	26.7	70.0	47.8	S	安徽 Anhui
AHHB-32	56.7	16.7	10.0	16.7	43.3	28.9	R	安徽 Anhui
AHHB-34	50.0	6.7	30.0	13.3	50.0	35.6	R	安徽 Anhui
AHHB-35	73.3	0.0	13.3	13.3	26.7	22.2	R	安徽 Anhui
AHHB-36	90.0	0.0	3.3	6.7	10.0	8.9	HR	安徽 Anhui
AHHB-37	40.0	10.0	30.0	20.0	60.0	43.3	S	安徽 Anhui
AHHB-38	23.3	16.7	33.3	26.7	76.7	54.4	S	安徽 Anhui
AHHB-39	23.3	33.3	20.0	23.3	76.7	47.8	S	安徽 Anhui
AHHB-40	86.7	0.0	13.3	0.0	13.3	8.9	HR	安徽 Anhui
AHHB-41	13.3	23.3	33.3	40.0	96.7	70.0	HS	安徽 Anhui
AHHB-42	55.0	10.0	10.0	25.0	45.0	35.0	R	安徽 Anhui
AHHB-43	23.3	20.0	30.0	26.7	76.7	53.3	S	安徽 Anhui
AHHB-45	20.0	16.7	30.0	33.3	80.0	58.9	S	安徽 Anhui
AHHB-46	30.0	30.0	16.7	23.3	70.0	44.4	S	安徽 Anhui
AHHB-47	43.3	0.0	30.0	26.7	56.7	46.7	S	安徽 Anhui
AHHB-50	26.7	23.3	16.7	33.3	73.3	52.2	S	安徽 Anhui
AHHB-54	26.7	23.3	23.3	26.7	73.3	50.0	S	安徽 Anhui
AHHB-55	50.0	6.7	30.0	13.3	50.0	35.6	R	安徽 Anhui
AHHB-56	56.7	3.3	16.7	23.3	43.3	35.6	R	安徽 Anhui
AHHB-59	70.0	0.0	23.3	6.7	30.0	22.2	R	安徽 Anhui
AHHB-60	53.6	0.0	32.1	14.3	46.4	35.7	R	安徽 Anhui
AHHB-61	46.7	0.0	33.3	20.0	53.3	42.2	S	安徽 Anhui
AHHB-62	66.7	0.0	30.0	3.3	33.3	23.3	R	安徽 Anhui
AHHB-65	66.7	0.0	26.7	6.7	33.3	24.4	R	安徽 Anhui
AHHB-69	43.3	0.0	36.7	20.0	56.7	44.4	S	安徽 Anhui
AHHB-70	93.3	0.0	0.0	6.7	6.7	6.7	HR	安徽 Anhui
AHHB-71	23.3	6.7	46.7	23.3	76.7	56.7	S	安徽 Anhui
AHHB-73	10.0	30.0	15.0	45.0	90.0	65.0	HS	安徽 Anhui
AHHB-74	10.0	43.3	20.0	26.7	90.0	54.4	S	安徽 Anhui
AHHB-76	26.7	20.0	16.7	36.7	73.3	54.4	S	安徽 Anhui

2.2 石榴果皮抗氧化物质含量与抗日灼能力的关系

2.2.1 不同抗日灼能力石榴资源的总抗氧化能力
15份资源的总抗氧化能力测定结果如图2,具不同抗日灼能力石榴的总抗氧化能力差异明显,总体上呈现出:总抗氧化能力随日灼指数上升而呈现增加

的趋势。其中,AHHB-31和AHHB-27的总抗氧化能力最强,分别达到416.22和414.20 mmol·g⁻¹。AHHB-65的总抗氧化能力最弱,为131.05 mmol·g⁻¹,总抗氧化能力最大值是最小值的3.1倍,表明品种之间的抗氧化能力相差较大。

2.2.2 不同抗日灼能力石榴资源的抗氧化物质含

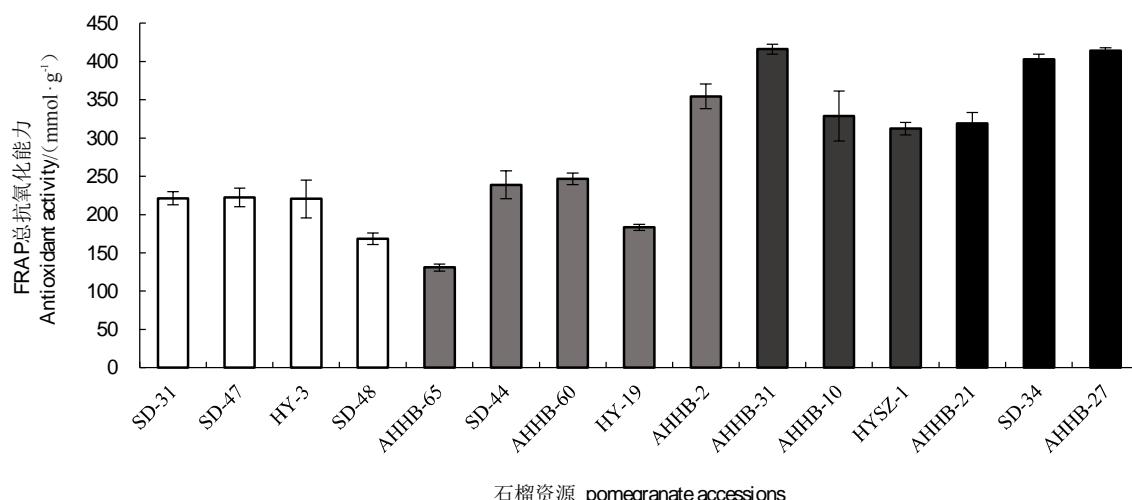


图2 不同石榴资源的总抗氧化能力

Fig. 2 Total antioxidant ability of pomegranate accessions

量 对不同石榴果皮的抗氧化物质测定的结果表明,不同石榴资源果皮中的总酚、总黄酮、花青素、类胡萝卜素、AsA和GSH含量表现出一定的种间差异(表2)。其中,总酚含量平均值为47.54 mg·g⁻¹,变幅为23.21~69.82 mg·g⁻¹,含量最多的是AHHB-31,

HYSZ-1次之,含量最少的是AHHB-65。总黄酮含量平均值为41.52 mg·g⁻¹,变化幅度为32.02~54.94 mg·g⁻¹。总黄酮含量最高的品种为HYSZ-1,含量最低的品种为HY-19。花青素含量最高的品种为HYSZ-1,其次为AHHB-2,含量最低的品种为AH-

表2 石榴果皮的抗氧化物质含量

Table 2 Antioxidant contents in pomegranate pericarps

品种编号 Cultivar	w(总酚) Total polyphenols/ (mg·g ⁻¹)	w(总黄酮) Total flavonoids/ (mg·g ⁻¹)	b(花青素) Anthocyanin/ (nmol·g ⁻¹)	w(类胡萝卜) Carotenoids/ (mg·g ⁻¹)	b(抗坏血酸) Ascorbic acid/ (μmol·g ⁻¹)	b(谷胱甘肽) Glutathione/ (μmol·g ⁻¹)
SD-31	34.98±1.61	37.09±1.31	0.19±0.00	1.2±0.13	8.64±0.36	1.57±0.03
SD-47	52.18±1.86	45.09±1.55	0.23±0.01	2.62±0.3	11.27±0.17	2.04±0.08
HY-3	32.58±2.84	32.84±1.49	0.20±0.00	0.95±0.19	10.93±0.76	1.08±0.04
SD-48	32.27±1.38	32.52±0.49	0.28±0.01	1.25±0.05	8.30±0.23	1.03±0.01
AHHB-65	23.21±1.09	36.41±0.27	0.11±0.01	0.96±0.09	9.17±0.54	1.10±0.03
SD-44	34.63±0.53	33.05±0.95	0.17±0.01	1.25±0.23	9.6±0.16	1.42±0.03
AHHB-60	40.10±1.61	35.69±0.80	0.22±0.03	1.6±0.04	7.96±0.2	1.27±0.02
HY-19	31.99±1.18	32.02±0.41	0.23±0.02	1.08±0.13	8.39±0.35	1.12±0.02
AHHB-2	53.68±2.31	50.80±0.55	0.37±0.01	2.38±0.27	13.55±0.15	2.00±0.01
AHHB-31	69.82±3.55	54.69±0.54	0.33±0.01	2.38±0.15	12.28±0.36	2.51±0.01
AHHB-10	60.13±0.61	47.19±1.90	0.35±0.00	1.77±0.12	13.56±0.32	2.40±0.02
HYSZ-1	69.35±3.32	54.94±1.64	0.63±0.03	2.50±0.13	16.77±0.43	2.26±0.05
AHHB-21	38.24±1.03	38.72±0.49	0.32±0.01	1.04±0.05	13.75±0.71	1.59±0.05
SD-34	74.44±5.74	46.35±1.34	0.35±0.04	1.61±0.08	18.73±1.42	2.19±0.02
AHHB-27	65.53±3.52	45.45±0.68	0.35±0.00	1.27±0.13	17.41±0.21	2.19±0.04

HB-65, 平均值为 $0.29 \text{ nmol} \cdot \text{g}^{-1}$, 变化幅度为 $0.11\sim0.63 \text{ nmol} \cdot \text{g}^{-1}$ 。类胡萝卜素含量最高的品种为 SD-47, 含量最低的品种为 HY-3, 平均值为 $1.59 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$, 变化幅度为 $0.95\sim2.62 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 。不同品种石榴果皮的抗坏血酸含量变幅为 $7.96\sim18.73 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1}$, SD-34 的抗坏血酸含量最高, AHBB-60 的含量最低。谷胱甘肽含量变幅为 $1.03\sim2.51 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1}$, AHBB-31 的谷胱甘肽含量最高, AHBB-10 次之, SD-48 含量最低。

2.3 石榴果皮总抗氧化能力与日灼指数的相关性

对不同品种石榴的总抗氧化能力和日灼指数进行了相关性分析(图3),发现日灼指数与总抗氧化能力之间存在显著的相关性或线性关系,相关系数为0.744,达到极显著正相关水平($p < 0.01$),表明不同资源的总抗氧化能力与抗日灼能力相关,总抗氧化能力可成为评价果实抗日灼能力的重要指标。

2.4 日灼指数、总抗氧化能力与果皮抗氧化物质含量的相关性

相关性分析表明,抗坏血酸和总酚与果实的日灼指数呈极显著的正相关关系($p < 0.01$),相关系数分别为0.750和0.629(表3)。此外,花青素、谷胱

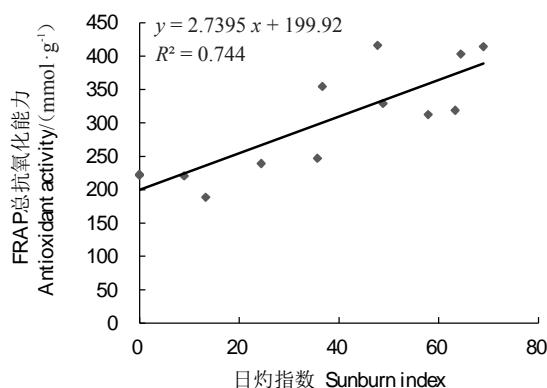


图3 石榴果皮日灼指数与总抗氧化能力的相关性关系
Fig. 3 Correlation between sunburn index and FRAP of pomegranate pericarps

甘肽和总黄酮含量与日灼指数也呈现出极显著的正相关,相关系数分别为0.624、0.538和0.506($p < 0.01$)。日灼指数与类胡萝卜素含量没有呈现出相关性。

将总抗氧化能力与总酚、总黄酮、花青素、类胡萝卜素、抗坏血酸和谷胱甘肽含量进行了相关性分析(表3)。结果表明,总抗氧化能力与总酚、谷胱甘

表3 石榴果皮的日灼指数、总抗氧化能力与抗氧化物质含量相关性

Table 3 Correlation between sunburn index and antioxidant ability and antioxidant contents in pomegranate pericarps

项目 Item	总酚含量 Total polyphenols contents	总黄酮含量 Total flavonoids contents	花青素含量 Anthocyanin contents	类胡萝卜素含量 Carotenoids contents	抗坏血酸含量 Ascorbic acid contents	谷胱甘肽含量 Glutathione contents
日灼指数 Sunburn index	0.629**	0.506**	0.624**	0.101	0.750**	0.538**
总抗氧化能力 FRAP	0.863**	0.751**	0.594**	0.424**	0.803**	0.832**

注:** 在0.01级别(双尾),相关性极显著。

Note: ** The correlation is significant at level 0.01 (two-tailed).

肽、抗坏血酸、总黄酮、花青素和类胡萝卜素含量均有极显著的相关性($p < 0.01$),表明这几种物质含量对果实的总抗氧化能力均有显著影响。其中,总抗氧化能力与总酚、谷胱甘肽和抗坏血酸的抗氧化性较强,与总黄酮、花青素和类胡萝卜素的抗氧化性较弱。

3 讨 论

早期研究指出,同一栽培条件下,一些苹果品种比其他品种更易晒伤^[33]。本研究中以日灼指数作为石榴果实抗性评价标准,发现石榴品种对日灼的抗性具有明显差异,与苹果中的研究结果一致^[33]。因

此,笔者认为石榴抗日灼能力与品种具有密切关系。此外,筛选到一些高抗日灼的品种,如SD-15、SD-31、SD-47、SXXA-2等,这些资源可以为抗日灼品种的遗传改良提供材料。

抗氧化物质含量的不同导致植物体具有不同的抗氧化特性^[34]。本研究测定了15个代表性石榴品种的总抗氧化能力和相关抗氧化物质含量,发现在不同的石榴品种中,果皮的总抗氧化能力差异显著,相关抗氧化物质含量也明显不同。此前,在蓝莓^[35]和果桑^[36]等果树的研究中也发现相似的结果。这种现象产生的原因可能是不同基因型的果实理化性质具有差异,导致果皮合成抗氧化代谢物质含量不

同^[17]。其次,日灼胁迫触发了果实的应激反应,不同品种对日灼的敏感性导致了抗氧化物质含量发生不同程度的变化。

在一定的日灼指数分布范围内,随着日灼指数的升高,石榴果皮的总抗氧化能力和各个抗氧化物质含量呈现增加的趋势。这可能是由于日灼胁迫下果实内部ROS的大量产生,满足了果实清除ROS的需求,而下游抗氧化防御系统的上调是对ROS增加的响应^[37]。然而,当日灼指数超过某个阈值时,即在抗日灼能力相对较差的几个资源中(如AHHB21、SD34、AHHB27),持续高温和强光胁迫使活性氧自由基积累过量,导致果皮的抗氧化能力降低,相关抗氧化物质含量为消除大量自由基也降低^[38]。

相关性分析发现,总抗氧化能力(FRAP)与日灼指数呈极显著正相关,总抗氧化能力高的石榴具有较高的抗日灼能力,说明总抗氧化能力在一定程度上可反映果实的抗日灼能力。进一步分析表明,总抗氧化能力(FRAP)与总酚、谷胱甘肽、抗坏血酸、黄酮、花青素和类胡萝卜素等物质含量均存在极显著相关关系,其中以总酚、谷胱甘肽和抗坏血酸相关系数最大,分别为0.863、0.832、0.803($p < 0.01$)。研究发现,石榴汁中的酚类物质与抗氧化活性密切相关^[39]。Jing等^[40]报道,石榴籽的FRAP值与总酚含量的相关系数为0.99,推测石榴籽的抗氧化能力可能与总酚含量有关,总酚含量可用于评价果实抗氧化能力。因此,笔者认为石榴果实的总酚含量可用于评价果实的总抗氧化能力。

据报道,苹果中维生素C(抗坏血酸)的抗氧化能力仅占总抗氧化活性的0.4%,抗氧化活性主要取决于酚类化合物^[41]。然而,陆育生等^[42]在黄皮的研究中表明,除黄酮和多酚外,抗坏血酸对其抗氧化能力的贡献最大。一些亲脂性化合物(维生素E或类胡萝卜素)和花色苷类物质,也可能有助于提高果实的总抗氧化活性^[43-44]。本研究中除总酚含量外,谷胱甘肽和抗坏血酸含量与总抗氧化能力也具较强的正相关关系,其次是花青素和类胡萝卜素含量。因此,笔者推测在石榴响应日灼胁迫的抗氧化系统中,总酚是发挥抗氧化生物活性的最重要物质成分,却不是唯一的,谷胱甘肽和抗坏血酸也极为重要。石榴果实内部可能已经形成相互协同的抗氧化体系,不同的抗氧化物质共同发挥作用。

4 结 论

不同石榴种质资源对日灼的敏感性不同,石榴抗日灼能力具有明显的多态性。总抗氧化能力可以反映其抗日灼能力,总酚、抗坏血酸和谷胱甘肽含量可以很大程度上反映其抗氧化能力。该研究结果不仅为抗日灼品种遗传改良提供材料,也为石榴的抗日灼机制研究奠定了重要基础。

参考文献 References:

- [1] CHATER J M, MERHAUT D J, JIA Z, MAUK P A, PREECE J E. Fruit quality traits of ten California-grown pomegranate cultivars harvested over three months[J]. *Scientia Horticulturae*. 2018, 237: 11-19.
- [2] 曹尚银,侯乐峰.中国果树志·石榴卷[M].北京:中国林业出版社,2013.
- [3] CAO Shangyin, HOU Lefeng. Chinese fruit trees: Volume pomegranate[M]. Beijing: China Forest Press, 2013.
- [4] 冯玉增,宋梅亭,韩德波.我国石榴种质资源概况[J].中国果树,2006(4):57-58.
- [5] FENG Yuzeng, SONG Meiting, HAN Debo. Survey of pomegranate germplasm resources in China[J]. *China Fruits*, 2006(4): 57-58.
- [6] 陶华云,黄敏,王秀兰.我国石榴产业发展趋势分析与对策建议[J].中国果业信息,2019,36(7):13-16.
- [7] TAO Huayun, HUANG Min, WANG Xiulan. Development trend analysis and countermeasures of pomegranate industry in China[J]. *Chinese Fruit News*, 2019, 36(7):13-16.
- [8] YAZICI K, ERCISLI S. Characterization of hybrid pomegranate genotypes based on sunburn and cracking traits related to maturation time[J]. *Journal of Applied Botany & Food Quality*, 2017, 90: 132-139.
- [9] YAZICI K, KAYNAK L. Effects of air temperature, relative humidity and solar radiation on fruit surface temperatures and sunburn damage in pomegranate (*Punica granatum* L. cv. Hicaznar) [J]. *Acta Horticulturae*, 2009, 818: 181-186.
- [10] 删传化,杨朝选,刘三军,吴国良,陈汉杰,郑先波.落叶果树果实日灼病研究进展[J].果树学报,2008,25(6):901-907.
- [11] KUAI Chuanhua, YANG Chaoxuan, LIU Sanjun, WU Guoliang, CHEN Hanjie, ZHENG Xianbo. Advances in research on fruit sunburn of deciduous fruit crops[J]. *Journal of Fruit Science*, 2008, 25(6):901-907.
- [12] LAL N, SAHU N. Management strategies of sun burn in fruit crops-A review[J]. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 2017, 6(6):1126-1138.
- [13] SZYMANSKA R, ŚLESAK I, ORZECHOWSKA A, KRUK J J E. Physiological and biochemical responses to high light and temperature stress in plants[J]. *Environmental and Experimental*

- Botany, 2017, 139: 165-177.
- [10] 秦爱国, 高俊杰, 于贤昌. 温度胁迫对马铃薯叶片抗坏血酸代谢系统的影响[J]. 应用生态学报, 2009, 20(12): 2964-2970.
QIN Aiguo, GAO Junjie, YU Xianchang. Effects of high and low temperature stresses on ascorbic acid metabolism system in potato leaves[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2009, 20(12): 2964-2970.
- [11] WU X, HE J, DING H, ZHU Z, CHEN J, XU S, ZHA D. Modulation of zinc-induced oxidative damage in *Solanum melongena* by 6-benzylaminopurine involves ascorbate-glutathione cycle metabolism[J]. Environmental and Experimental Botany, 2015, 116: 1-11.
- [12] TSAO R. Chemistry and biochemistry of dietary polyphenols[J]. Nutrients, 2010, 2(12): 1231-1246.
- [13] 周丹蓉, 方智振, 廖汝玉, 叶新福, 姜翠翠, 潘少霖. 李果皮花色素苷、类黄酮和类胡萝卜素含量及抗氧化性研究[J]. 营养学报, 2013, 35(6): 571-576.
ZHOU Danrong, FANG Zhizhen, LIAO Ruyu, YE Xinfu, JIANG Cuicui, PAN Shaolin. Contents of anthocyanin, flavonoids and carotenoids and antioxidant capacity of plum peels[J]. Nutrimenta Sinica, 2013, 35(6): 571-576.
- [14] MA Y, MA F, ZHANG J, LI M, WANG Y, LIANG D. Effects of high temperature on activities and gene expression of enzymes involved in ascorbate-glutathione cycle in apple leaves[J]. Plant Science, 2008, 175(6): 761-766.
- [15] 刘玉莲, 陶佳, 左存武, 吴玉霞, 车飞. 苹果果实日灼产生条件及适应机制[J]. 果树学报, 2020, 37(11): 1758-1765.
LIU Yulan, TAO Jia, ZUO Cunwu, WU Yuxia, CHE Fei. The production conditions and adaptation mechanism of sunburn in apple[J]. Journal of Fruit Science, 2020, 37(11): 1758-1765.
- [16] MAKEREDZA B, MARAIS H, SCHMEISSER M, LOETZE E, STEYN W J. Ripening associated red color development masks sunburn browning in apple peel[J]. Hortscience, 2015, 50(6): 814-818.
- [17] WUNSCHE J N, BOWEN J, FERGUSON I, WOOLF A, MCGHIE T. Sunburn on apples-causes and control mechanisms[J]. Acta Horticulture, 2004, 636: 631-636.
- [18] RACSKO J, SCHRADER L E. Sunburn of apple fruit: historical background, recent advances and future perspectives[J]. Critical Reviews in Plant Sciences, 2012, 31(6): 455-504.
- [19] HAMEDI S F, MORADINEZHAD F, KHAYYAT M. Pre-harvest bagging influences sunburn, cracking and quality of pomegranate fruits[J]. Journal of Horticulture and Postharvest Research, 2019, 2(2): 131-142.
- [20] GRINAN I, MORALES D, GALINDO A, TORRECILLAS A, PEREZ - LOPEZ D, MORIANA A, COLLADO - GONZALEZ J, CARBONELL - BARRACHINA Á, HERNANDEZ F. Effect of preharvest fruit bagging on fruit quality characteristics and incidence of fruit physiopathies in fully irrigated and water stressed pomegranate trees[J]. Journal of the Science of Food & Agriculture, 2019, 99(3): 1425-1433.
- [21] LIU C, LI J, QIN G. Genome-wide distribution of simple sequence repeats in pomegranate and their application to the analysis of genetic diversity[J]. Tree Genetics & Genomes, 2020, 16(2): 1-9.
- [22] FELICETTI D A, SCHRADER L E. Changes in pigment concentrations associated with the degree of sunburn browning of 'Fuji' apple[J]. Journal of the American Society for Horticultural Science, 2008, 133(1): 27-34.
- [23] 张彦坤, 齐国辉, 孙萌, 张雪梅, 李保国, 张锐. 早实核桃果实日灼影响因子研究[J]. 林业科技开发, 2015, 29(5): 31-35.
ZHANG Yankun, QI Guohui, SUN Meng, ZHANG Xuemei, LI Baoguo, ZHANG Rui. Studies on the influence factors of sunburn on precocious walnut fruit[J]. China Forestry Science and Technology, 2015, 29(5): 31-35.
- [24] 侯珲, 张恒涛, 周增强, 王丽, 阎振立, 王生荣. 苹果种质资源枝干轮纹病抗性评价[J]. 园艺学报, 2017, 8(44): 137-146.
HOU Hui, ZHANG Hengtao, ZHOU Zengqiang, WANG Li, YAN Zhenli, WANG Shengrong. Evaluation of resistance to apple ring rot in *Malus* germplasms[J]. Acta Horticulturae Sinica, 2017, 8(44): 137-146.
- [25] BENZIE I F F, STRAIN J J. The ferric reducing ability of plasma (FRAP) as a measure of 'antioxidant power': The FRAP assay[J]. Analytical Biochemistry, 1996, 239(1): 70-76.
- [26] SINGLETON V L, ORTHOFER R, LAMUELA-RAVENTOS R M. Analysis of total phenols and other oxidation substrates and antioxidants by means of folin-ciocalteu reagent[J]. Methods in Enzymology, 1999, 299(1): 152-178.
- [27] JIA Z, TANG M, WU J. The determination of flavonoid contents in mulberry and their scavenging effects on superoxide radicals [J]. Food Chemistry, 1999, 64(4): 555-559.
- [28] QIN G, XU C, MING R, TANG H, GUYOT R, KRAMER E M, HU Y, YI X, QI Y, XU X, GAO Z, PAN H, JIAN J, TIAN Y, YUE Z, XU Y. The pomegranate (*Punica granatum* L.) genome and the genomics of punicalagin biosynthesis[J]. Plant Journal, 2017, 91(6): 1108-1128.
- [29] 曾德志, 郭世星, 张星星, 杨华伟, 李霖超, 牛应泽. 甘蓝型油菜花瓣发育过程中类胡萝卜素含量变化[J]. 广东农业科学, 2015, 42(21): 25-29.
ZENG Dezh, GUO Shixing, ZHANG Xingxing, YANG Huawei, LI Linchao, NIU Yingze. Carotenoids changes in petals during petal development of *Brassica napus* L.[J]. Journal of Guangdong Agricultural Sciences, 2015, 42(21): 25-29.
- [30] 李忠光, 杜朝昆, 龚明. 在单一提取系统中同时测定植物 ASA/DHA 和 GSH/GSSG[J]. 云南师范大学学报, 2003, 23(3): 67-70.
LI Zhongguang, DU Chaokun, GONG Ming. Simultaneous measurement of ASA /DHA and GSH /GSSG using a single extraction system[J]. Journal of Yunnan Normal University, 2003, 23(3): 67-70.

- [31] KAMPFENKEL K, VANMONTAGU M, INZE D. Extraction and determination of ascorbate and dehydroascorbate from plant tissue[J]. Analytical Biochemistry, 1995, 225(1):165-167.
- [32] 陈建勋,王晓峰.植物生理学实验指导[M].广州:华南理工大学出版社,2006.
- CHEN Jianxun, WANG Xiaofeng. Experimental guidance of plant physiology[M]. Guangzhou: South China University of Technology Press, 2006.
- [33] RACSKO J, NAGY J, SZABO Z, MAJOR M, NYEKI J. The impact of location, row direction, plant density and rootstock on the sunburn damage of apple cultivars[J]. International Journal of Horticultural Science, 2005, 11(1):19-30.
- [34] SCALZO J, POLITI A, PELLEGRINI N, MEZZETTI B, BATINO M. Plant genotype affects total antioxidant capacity and phenolic contents in fruit[J]. Nutrition, 2005, 21(2):207-213.
- [35] 闫静,王德炉,郝家孝,谢双喜.光照强度对贵州兔眼蓝莓果品质的影响[J].经济林研究,2017,35(4):118-123.
- YAN Jing, WANG Delu, HAO Jiaxiao, XIE Shuangxi. Effects of light intensity on fruit quality of rabbiteye blueberry in Gui-zhou[J]. Non-wood Forest Research, 2017, 35(4):118-123.
- [36] 黄盖群,姚永权,李永远,佟万红,桂仲争,危玲,曾益春,曾贞,殷浩,刘刚.不同果桑品种资源理化性状的主成分分析[J].中南林业科技大学学报,2017,37(11):19-23.
- HUANG Gaiqun, YAO Yongquan, LI Yongyuan, TONG Wan-hong, GUI Zhongzheng, WEI Ling, ZENG Yichun, ZENG Zhen, YIN Hao, LIU Gang. Principal component analysis for physicochemical characteristics of different fruit mulberry culti-vars[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2017, 37(11):19-23.
- [37] CHEN L S, LI P, CHENG L. Effects of high temperature coupled with high light on the balance between photooxidation and photoprotection in the sun-exposed peel of apple[J]. Planta, 2008, 228(5):745-56.
- [38] ZHANG J, NIU J, DUAN Y, ZHANG M, LIU J, LI P, MA F. Photoprotection mechanism in the ‘Fuji’ apple peel at different levels of photooxidative sunburn[J]. Physiology Plant, 2015, 154 (1):54-65.
- [39] WASILA H, XUAN L, LINWEI L, AHMAD I. Comparing phenolics composition and antioxidant activities of different pomegranate products[J]. Pakistan Journal of Agricultural Sciences, 2014, 51(1):167-174.
- [40] JING P, YE T, SHI H, SHENG Y, SLAVIN M, GAO B, LIU L, YU L. Antioxidant properties and phytochemical composition of China-grown pomegranate seeds[J]. Food Chemistry, 2012, 132 (3):1457-1464.
- [41] MARIANV E, CHANG Y, LEE R, LIU H. Antioxidant activity of fresh apples[J]. Nature, 2000, 405(6789):903-904.
- [42] 陆育生,彭程,常晓晓,陈喆,林志雄,潘建平,邱继水.黄皮种质资源抗氧化特性的鉴定与评价[J].经济林研究,2020,38 (2):17-25.
- LU Yusheng, PENG Cheng, CHANG Xiaoxiao, CHEN Zhe, LIN Zhixiong, PAN Jianping, QIU Jishui. Appraisal and evaluation on antioxidant properties in *Clausena lansium* fruits from different germplasm resources[J]. Non-wood Forest Research, 2020, 38(2):17-25.
- [43] 王振江,唐翠明,刘学铭,肖更生,戴凡炜,罗国庆.桑椹高花色苷及抗氧化能力种质资源的筛选与评价[J].植物遗传资源学报,2014,15(3):639-643.
- WANG Zhenjiang, TANG Cuiming, LIU Xueming, XIAO Geng-sheng, DAI Fanwei, LUO Guoqing. Screening and evaluation for high anthocyanin content and antioxidantactivity of fruit mulberry germplasm resources[J]. Journal of Plant Genetic Resources, 2014, 15(3):639-643.
- [44] MERZLYAK M N, SOLOVCHENKO A, CHIVKUNOVA O B. Patterns of pigment changes in apple fruits during adaptation to high sunlight and sunscald development[J]. Plant Physiology & Biochemistry, 2002, 40(6):679-684.

欢迎订阅2022年《中国瓜菜》

《中国瓜菜》是由中华人民共和国农业农村部主管、中国农业科学院郑州果树研究所主办的全国性瓜菜科技期刊,连续进入2014年版、2017年版、2020年版《中文核心期刊要目总览》园艺类核心期刊,进入《中国农林核心期刊2020》A类。2022年《中国瓜菜》将继续及时报道瓜菜领域的重大科研成果、科研新进展、实用技术和信息,努力把《中国瓜菜》打造成我国瓜菜科研和产业交流的优质平台,促进我国瓜菜业的全面发展和社会、经济、生态效益的综合提升。本刊设有专题综述、试验研究、品种选育、产业经济、技术规范、栽培与植保等栏目。

适合瓜菜科技人员、农业院校师生、瓜菜种植者、种子及

产品经销商、行业组织及实体管理人员、瓜菜区领导等瓜菜从业者参阅。月刊,每月5日出版,每期80页码、定价8元,全年12期共96元。邮发代号:36-143;国外代号:M2654。也可汇款至本刊发行部订阅。

编辑部地址:河南省郑州市未来路南端·中国农业科学院郑州果树研究所;邮编:450009;E-mail: zhongguoguacai@caas.cn; http://zgxg.cbpt.cnki.net(在线投稿); http://www.chinacuveg.cn(网址);电话:0371-65330927(编辑部),65330926(广告部),65330981(发行部)

