

‘玫瑰香’葡萄果实成熟过程中质地与解剖结构的变化

贾楠 尹勇刚 李敏敏 刘长江 韩斌 孙艳 赵胜建 郭紫娟*

(河北省农林科学院 昌黎果树研究所,河北 昌黎 066600)

摘要 为阐明葡萄果实成熟过程中质地与解剖结构的变化特征及二者之间关系,本研究利用质地多面分析法(TPA)和石蜡切片法,对‘玫瑰香’葡萄果实成熟过程中的质地参数(硬度、内聚性、弹性和咀嚼性)和细胞的显微结构进行了研究,并对果实基本性状进行了分析。结果表明:葡萄果实成熟过程中,果皮(表皮和亚表皮)厚度减少、面积增加,果肉细胞面积、周长和纵径增大,且均在幼果期至转色期变化幅度最大,幼果期到转色期,果实硬度和咀嚼性呈显著下降趋势、内聚性和弹性呈显著上升趋势;进一步相关分析表明,果实硬度和咀嚼性与果皮厚度呈极显著正相关,与果皮细胞面积及果肉细胞面积、周长、纵径、横径和纵横比呈极显著负相关;果实内聚性和弹性与果实解剖形态相关性同硬度和咀嚼性变化规律相反;表皮细胞厚度和果实细胞纵径与果实质地相关系数较高。综上,本研究可为解析葡萄果实成熟过程中质地变化的细胞学基础提供一定参考。

关键词 葡萄;果实;质地;细胞形态

中图分类号 S663.1

文章编号 1007-4333(2022)02-0078-09

文献标志码 A

Changes in fruit texture and anatomical structure of ‘Muscat Hamburg’ grapevines during ripening

JIA Nan, YIN Yonggang, LI Minmin, LIU Changjiang, HAN Bin, SUN Yan,
ZHAO Shengjian, GUO Zijuan*

(Changli Research Institute of Pomology, Hebei Academy of Agricultural and Forestry Sciences, Changli 066600, China)

Abstract The aims of this study were to clarify the change characteristics of fruit texture and anatomical structure and the relationship between them during the ripening of ‘Muscat Hamburg’ grapevines. The characters of fruit texture and anatomical structure were analyzed by texture profile analysis (TPA) (including firmness, cohesiveness, springiness, chewiness) and paraffin section method, respectively. The basic fruit characters were also measured. The results indicated that during fruit ripening, the thickness of pericarp (epidermis and sub-epidermis) cells decreased, the areas of pericarp cells increased, flesh cells size parameters (area, vertical diameter, horizontal diameter) also increased in varying degrees. The greatest changes were in veraison. The texture of the fruit was also changing dramatically, the fruit firmness and chewiness decreased significantly, the fruit cohesiveness and springiness increased significantly. Further correlation analysis showed that fruit firmness and chewiness had significant positive correlations with the thickness of pericarp and significant negative correlations with the area of pericarp cell and morphological parameters (area, perimeter, vertical diameter, horizontal diameter, aspect) of flesh cells at 0.01 level. Fruit cohesiveness and springiness were significantly negatively correlated with the thickness of pericarp at 0.01 level and significantly positively correlated with morphological parameters of flesh cells. The correlation coefficients between fruit texture and epidermal cell thickness and the vertical diameter of the flesh cells were higher. In conclusion, this study provided

收稿日期: 2021-05-28

基金项目: 河北省农林科学院创新工程青年项目(2021020101);河北省自然科学基金项目(C2021301036);河北省自然科学基金项目(C2019301115);河北省科技厅重点研发项目(20326813D)

第一作者: 贾楠,助理研究员,主要从事葡萄杂交育种研究,E-mail:nannanjia123@163.com

通讯作者: 郭紫娟,研究员,主要从事葡萄杂交育种研究,E-mail:grapesworks@outlook.com

references for analyses on the cytological basis of texture changes during grape ripening.

Keywords grapevines; fruit; texture; cell morphology

果实质地是一个综合的果实性状,对果实口感有很大影响,是苹果^[1]、桃^[2]、梨^[3]、香蕉^[4]、蓝莓^[5]、杨梅^[6]、芒果^[7]、草莓^[8]和葡萄^[9]等果实品质的重要评价指标,同时对果实运输、加工、贮藏保鲜和货架期的长短也有显著影响。葡萄果实属于典型的浆果,果实质地具有皮薄多汁和果肉柔软的特点^[10],在采后运输和贮藏期间更易出现挤压变形、失水萎蔫,甚至腐烂变质现象^[11]。因此,亟需研究葡萄果实质地发生变化的机制,为葡萄质地改良育种奠定基础。

果实质地主要由细胞间结合力、细胞壁物质的机械强度以及细胞大小和形状等因素决定^[12]。在苹果上研究发现,水溶性果胶、离子型果胶及纤维素含量差异是苹果质地差异的关键因子^[13],果肉细胞显微结构及一些细胞壁相关代谢酶的差异与苹果质地变化密切相关^[14]。在蓝莓上研究发现,果实硬度的降低伴随着水溶性果胶的增加及纤维素和半纤维素的减少^[15-16]。此外,果实质地也受基因调控。果实质地发育的差异是多种基因协同作用的结果,其中多聚半乳糖醛酸酶(PG)、 β -半乳糖苷酶(β -Gal)和葡聚糖内糖基转移酶(XET)基因等在苹果质地发育中起关键作用^[17]。目前,关于果实质地变化的研究多集中在生理代谢^[13-16,18]和基因调控^[17,19]方面,且在苹果和蓝莓上研究较多。从结构决定功能角度分析,果实结构的变化是影响果实质地的细胞学基础,而目前关于葡萄果实显微结构与质地变化关系的研究相对欠缺。本研究利用质地多面分析法(TPA)和石蜡切片法,对‘玫瑰香’葡萄果实成熟过程中的质地参数和果实细胞的解剖结构进行了研究,并对果实基本性状进行了测定,以期阐明葡萄果实成熟中质地参数与果实显微结构的变化及两者的相关关系,为解析葡萄果实质地的细胞学研究奠定基础,进而为葡萄果实质地改良提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

本研究在河北省农林科学院昌黎果树研究所施各庄基地(39°47' N, 119°20' E)进行。年平均气温12.24℃,太阳日平均有效辐射165 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,降水总量601.8 mm。试验于2019年进行,以5年

生葡萄品种‘玫瑰香’为试验材料,于幼果期(S1)、转色期(S2)、成熟前2周(S3)和成熟期(S4)进行果实采样。试验区为露地棚架栽培,株行距0.7 m×4.0 m,正常水肥管理。土壤为砂壤土,0~60 cm土壤的pH为5.88。土壤有机质的质量分数为1.79%,氮的质量分数为0.15%,磷的质量分数为1.28 mg/kg,钾的质量分数为1.98 mg/kg。土壤排水灌溉条件良好。

1.2 试验方法

1.2.1 试验设计

试验采用完全随机区组设计,3次重复,每个重复选取5棵树。每棵葡萄树随机采3穗果,每个果穗从上中下共采集10粒果,进行果实品质、质地和解剖结构的测定,每个指标测定3次生物学重复。

1.2.2 葡萄果实基本品质测定

单果重采用电子天平测定,单果重=30粒总重量/30。每次生物学重复随机选取10粒果实进行果实纵横径、可溶性固形物和可滴定酸含量的测定。其中果实纵横径采用游标卡尺进行测定,可溶性固形物含量采用糖度计(PAL-1,日本)测定,可滴定酸含量采用果实酸度计测定(GMK-835F,韩国)。

1.2.3 质地多面分析法测定葡萄果实质地

每次生物学重复将随机选取20粒果实进行质地测定。葡萄果实样品置于质地分析仪(CT3,美国)平板上,采用TA25/1000柱头进行测定。参数设置如下:预压速度、下压速度和压后上行速度均为2.0 mm/s,2次压缩间停顿5.0 s,试样受压形变为25%,触发力为5 g。由质地曲线得到果实硬度、内聚性、弹性和咀嚼性4个参数,用于后续分析。其中,硬度为第1次压缩时的最大峰值,内聚性为2次压缩面积之比,弹性为第1次循环目标形变至第2次循环触发点间的位移,咀嚼性=硬度×内聚性×弹性。

1.2.4 葡萄果实细胞解剖结构的观察

每次生物学重复随机选取20粒进行果实结构的观察。果实结构的观察采用石蜡切片法^[20-21],从果实赤道处垂直果皮切取大小约0.5 cm×0.5 cm×0.5 cm的方块(包含果皮和果肉),立即放入甲醛-乙酸-乙醇(FAA)固定液,抽气后固定待用;然后经过酒精梯度脱水,石蜡包埋,切片(厚度为10 μm),

番红-固绿染色,中性树胶封片,用显微镜(Olympus BX51,日本)观察果实细胞结构并拍照。用 SPOT 软件测量果实细胞形态学参数(表皮和亚表皮厚度、细胞面积、周长、纵径和横径)。

表皮和亚表皮细胞排列方式为较疏松、紧密、致密、较致密和非常致密,果肉细胞排列方式为不均匀松散和均匀紧密。

1.3 统计分析

使用 Excel 软件和 SPSS 20.0 软件进行数据的分析和处理,利用 Duncan’s 检验差异显著性($P=0.05$),并用 Excel 软件制图。

2 结果与分析

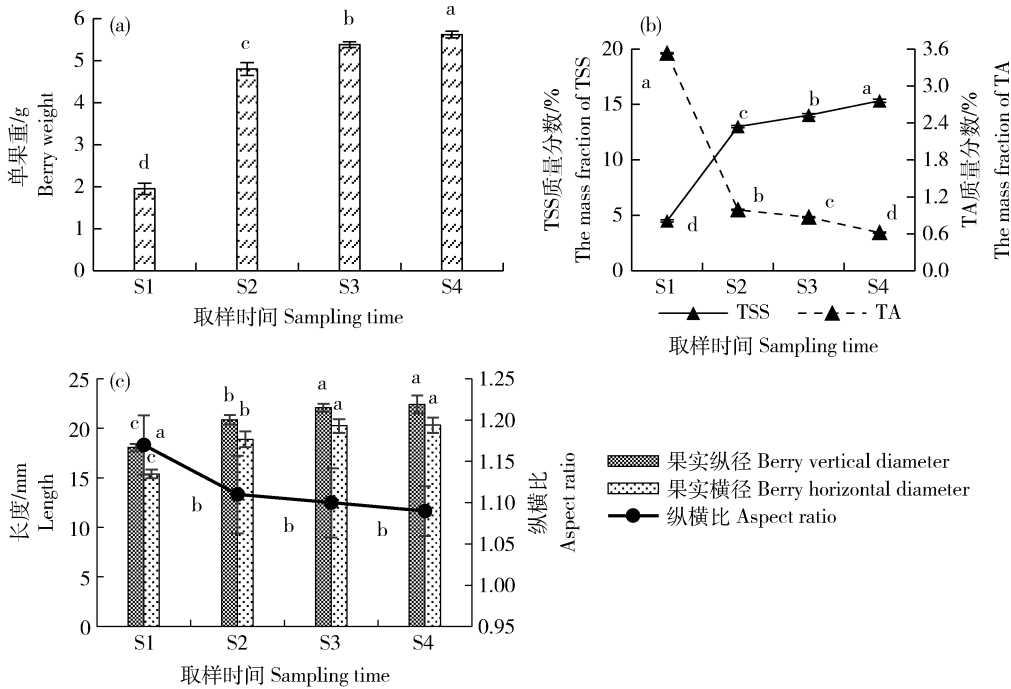
2.1 ‘玫瑰香’葡萄果实成熟过程中果实品质的变化

随着‘玫瑰香’果实的成熟,果实的单果重(图 1(a))和可溶性固形物含量均显著增加(图 1(b)),可滴定酸含量显著降低(图 1(b)),且三者均在幼果期到转色期变化幅度最大。从幼果期到转色期果实的纵径和横径显著增加,纵横比显著下降,而

从成熟前两周到成熟期果实的纵径、横径及纵横比变化不显著(图 1(c))。综合来看,‘玫瑰香’果实在成熟过程中,以转色期为临界点,幼果期到转色期果实品质发生了显著变化,转色后,变化趋势变缓;此外果实在增长的同时,果粒变圆,口感变甜。

2.2 ‘玫瑰香’葡萄果实成熟过程中果实质地的变化

‘玫瑰香’果实成熟过程中,果实硬度呈下降趋势,幼果期到转色期,果实硬度急剧下降,转色后至成熟期果实硬度差异不显著(图 2(a))。这表明,在果实成熟过程中,果实在转色期迅速软化,而后趋于平缓。内聚性与硬度变化规律相反呈上升趋势,幼果期到转色期,果实内聚性显著提高(图 2(b))。内聚性为咀嚼果实时,果实抵抗受损,使果实保持完整的性质,可反映果实细胞间结合力的大小,这表明果实细胞间结合力在幼果期到转色期迅速上升;而转色期至成熟期果实内聚性无显著变化(图 2(b))。弹性的变化趋势与内聚性相似,随着果实成熟,弹性呈上升趋势,在幼果期到转色期增幅最大(图 2(c)),



S1、S2、S3 和 S4 分别表示幼果期、转色期、成熟前两周和成熟期。图中不同时期的不同字母表示数据存在显著性差异($P=0.05$);下同。TSS:可溶性固形物;TA:可滴定酸。

S1, S2, S3 and S4 represent young fruit stage, veraison, two weeks before mature stage, and mature stage, respectively. Different letters in different periods in the figure mean significant differences at 0.05 level; The same below. TSS, soluble solids; TA, titratable acid.

图 1 ‘玫瑰香’葡萄果实成熟过程中果实单果重(a)、糖酸质量分数(b)和果实纵横径(c)的变化

Fig.1 The changes of berry weight (a), the mass fraction of TSS and TA (b), and diameter of fruit (c) of ‘Muscat Hamburg’ grapevine during fruit ripening

而在成熟前 2 周到成熟期弹性无明显差异。弹性为果实经过第一次压缩后能够再恢复的程度,这表明在幼果期到转色期果实受压后恢复能力明显增强。咀嚼性在果实成熟过程中整体呈下降趋势,在转色期达到最低,而后上升,成熟时又降低(图 2(d))。

这是由于咀嚼性为硬度、内聚性和弹性的乘积,转色期果实硬度急剧降低占据主导,使得咀嚼性在转色期最低;在转色后,弹性增加并占主导地位,使得咀嚼性升高;而后,硬度降低又占主导,使得成熟时果实咀嚼性降低。

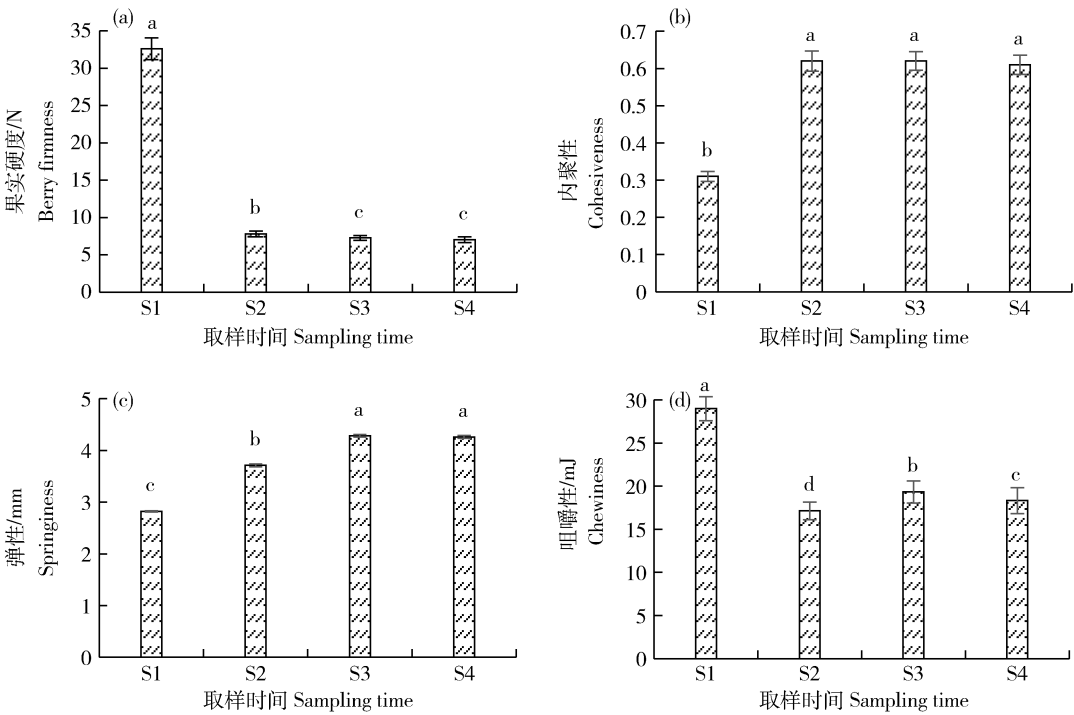


图 2 ‘玫瑰香’葡萄果实成熟过程中果实硬度(a)、内聚性(b)、弹性(c)和咀嚼性(d)的变化

Fig. 2 The changes of berry firmness (a), cohesiveness (b), springiness (c) and chewiness (d) of ‘Muscat Hamburg’ grapevine during fruit ripening

2.3 ‘玫瑰香’葡萄果实成熟过程中果皮细胞结构的变化

从果皮结构(表皮和亚表皮)看,‘玫瑰香’果实的表皮和亚表皮在幼果期细胞排列非常致密,细胞较小,在转色期细胞排列紧密,细胞变大,转色后细胞排列较为疏松,细胞较大(表 1)。表皮细胞面积在果实成熟过程中显著增加,幼果期表皮细胞面积为 138.80 μm^2 ,而成熟期为 263.09 μm^2 ;亚表皮细胞面积与表皮细胞面积变化规律一致,由幼果期的 1 507.67 μm^2 增长到成熟期的 2 160.31 μm^2 。表皮细胞层数在果实成熟过程中未发生变化,为 2~3 层;而表皮细胞厚度随着果实成熟,显著降低,在幼果期表皮细胞厚度为 28.33 μm ,而成熟期为 22.94 μm ;其中从幼果期到转色期下降幅度最大,达到了 16.01%(表 1)。亚表皮细胞层数在幼果期为 9~10 层,而从转色期开始直至成熟减少为 6~7

层;亚表皮细胞厚度从幼果期到转色期显著减少,由 173.15 μm 减少为 142.65 μm ,而转色期至成熟期无明显变化。以上表明,‘玫瑰香’果实在成熟过程中,由于表皮细胞和亚表皮细胞厚度的下降,亚表皮层数的减少,使得果皮变薄。

2.4 ‘玫瑰香’葡萄果实成熟过程中果肉细胞结构的变化

果肉细胞在幼果期排列均匀紧密,细胞较小;从转色期至成熟期,细胞排列不均匀松散,细胞较大(表 2)。果肉细胞的面积在果实成熟过程中显著增加,由幼果期的 17 559.96 μm^2 增加至成熟期的 29 091.42 μm^2 ;其中,幼果期到转色期果肉细胞面积增长幅度最大,可达 41.26%(表 2)。果肉细胞周长和纵径与果肉细胞面积变化规律一致,随着果实的成熟,也显著增加,且在幼果期至转色期涨幅最多,分别增长了 23.38%和 36.16%。果肉细胞横径

表 1 ‘玫瑰香’葡萄成熟过程中果皮细胞形态的变化

Table 1 Changes of pericarp cell morphological parameters of ‘Muscat Hamburg’ grapevine during fruit ripening

形态指标 Morphological index	取样时期 Sampling period			
	S1	S2	S3	S4
表皮细胞层数/层 Number of epidermal cell layers	2~3	2~3	2~3	2~3
表皮细胞排列 Arrangement of epidermal cell	非常致密	紧密	较疏松	较疏松
表皮细胞厚度/ μm Thickness of epidermal cell	28.33 a	24.42 b	23.27 c	22.94 d
表皮细胞面积/ μm^2 Area of epidermal cell	138.80 d	174.82 c	223.99 b	263.09 a
亚表皮细胞层数/层 Number of sub-epidermis cell layers	9~10	6~7	6~7	6~7
亚表皮细胞排列 Arrangement of sub-epidermis cell	非常致密	紧密	较疏松	较疏松
亚表皮细胞厚度/ μm Thickness of sub-epidermis cell	173.15 a	142.65 b	139.61 b	140.27 b
亚表皮细胞面积/ μm^2 Area of sub-epidermis cell	1 507.67 d	1 756.50 c	1 953.03 b	2 160.31 a

注:S1、S2、S3 和 S4 分别表示幼果期、转色期、成熟前两周和成熟期。每行的不同字母表示数据存在显著性差异 ($P=0.05$);下同。

Note: S1, S2, S3 and S4 represent young fruit stage, veraison, two weeks before mature stage, and mature stage, respectively. Different letters in each line mean significant differences at 0.05 level; The same below.

随着果实成熟也显著增加,由幼果期的 134.62 μm 增加至成熟期的 195.27 μm ;在转色期到成熟前两周,果肉细胞横径增长最快,增长了 16.71%。果肉细胞纵横比在幼果期最小,比值为 1.15,细胞近圆形;在转色期最大,比值为 1.46,细胞近长圆形;这与幼果期到转色期果肉细胞纵径增加幅度高于横径有关。

2.5 ‘玫瑰香’葡萄果实成熟过程中质地参数与果实细胞形态学参数的相关性分析

果实硬度和咀嚼性均与表皮细胞厚度和亚表皮细胞厚度呈极显著正相关(硬度的相关系数为 0.947 和 0.907,咀嚼性的相关系数为 0.864 和 0.865);与表皮细胞面积、亚表皮细胞面积及果肉细

胞形态指标呈极显著负相关(硬度的相关系数为 $-0.938\sim-0.554$,咀嚼性的相关系数为 $-0.881\sim-0.524$)(表 3)。果实内聚性和弹性均与表皮细胞厚度和亚表皮细胞厚度呈极显著负相关(内聚性的相关系数为 -0.934 和 -0.902 ,弹性的相关系数为 -0.926 和 -0.814),与表皮细胞面积、亚表皮细胞面积及果肉细胞形态指标呈显著正相关(内聚性的相关系数为 0.558~0.914,弹性的相关系数为 0.224~0.919)。综合来看,表皮细胞厚度和果肉细胞纵径与果实质地参数相关系数相对比较高。综上所述,‘玫瑰香’果实成熟过程果实解剖结构对果实质地有显著的影响,即随着果实成熟,果实硬度降低,口感变软,果皮变薄,果皮细胞和果肉细胞增大。

表 2 ‘玫瑰香’葡萄成熟过程中果肉细胞形态的变化

Table 2 Changes of flesh cell morphological parameters of ‘Muscat Hamburg’ grapevine during fruit ripening

形态指标 Morphological index	取样时期 Sampling period			
	S1	S2	S3	S4
果肉细胞排列 Arrangement of flesh cell	均匀、紧密	不均匀、松散	不均匀、松散	不均匀、松散
果肉细胞面积/ μm^2 Area of flesh cell	17 559.96 d	24 806.53 c	27 135.15 b	29 091.42 a
果肉细胞周长/ μm Perimeter of flesh cell	476.28 d	587.67 c	645.16 b	730.95 a
果肉细胞纵径/ μm Vertical diameter of flesh cell	154.09 d	209.81 c	218.02 b	237.00 a
果肉细胞横径/ μm Horizontal diameter flesh cell	134.62 d	143.60 c	172.42 b	195.27 a
果肉细胞纵横比 Aspect of flesh cell	1.15 d	1.46 a	1.27 b	1.22 c

表 3 ‘玫瑰香’葡萄成熟过程中质地与果实细胞形态的相关性

Table 3 Correlations between berry cell morphological parameters and texture parameters of ‘Muscat Hamburg’ grapevine during fruit ripening

形态指标 Morphological index	硬度 Firmness	内聚性 Cohesiveness	弹性 Springiness	咀嚼性 Chewiness
表皮细胞厚度 Thickness of epidermal cell	0.947**	−0.934**	−0.926**	0.864**
表皮细胞面积 Area of epidermal cell	−0.757**	0.723**	0.879**	−0.649**
亚表皮细胞厚度 Thickness of sub-epidermis cell	0.907**	−0.902**	−0.814**	0.865**
亚表皮细胞面积 Area of sub-epidermis cell	−0.781**	0.757**	0.865**	−0.671**
果肉细胞面积 Area of flesh cell	−0.921**	0.899**	0.919**	−0.840**
果肉细胞周长 Perimeter of flesh cell	−0.840**	0.810**	0.888**	−0.755**
果肉细胞纵径 Vertical diameter of flesh cell	−0.938**	0.914**	0.896**	−0.881**
果肉细胞横径 Horizontal diameter flesh cell	−0.643**	0.614**	0.798**	−0.524**
果肉细胞纵横比 Aspect of flesh cell	−0.554**	0.558**	0.224 *	−0.657**

注：* 和 ** 分别表示在 0.05 和 0.01 水平上显著相关。

Note: * and ** stand for significant correlation at 0.05 and 0.01 level, respectively.

3 讨论与结论

果实质地是果实品质性状的重要影响因子之一。本研究发现,‘玫瑰香’果实成熟过程中,果实硬度和咀嚼性呈下降趋势,而果实内聚性和弹性呈上升趋势,表明‘玫瑰香’果实成熟过程中,果实质地发生了显著变化,这与前人在苹果^[14]和梨^[22]上研究结果一致。此外,本研究发现,‘玫瑰香’果实质地发生变化转折点为转色期,由幼果期到转色期果实质地变化剧烈,转色期后变化趋于平缓。可能有以下原因:其一,葡萄果实转色期伴随着果实内部一系列生理生化指标的改变,包括可溶性固形物的急剧积累^[23-24]、有机酸的分解^[25]和总酚物质的减少^[26]等,这些变化与细胞溶质势和压力势密切相关^[27-28],直接影响细胞水势。因此,葡萄果实转色期的质地变化较大,可能与该时期的果实内部物质代谢导致细胞水势改变相关,需要进一步验证。其二,‘玫瑰香’葡萄果实成熟过程中,果实解剖结构发生了很大变化。果皮细胞和果肉细胞排列变疏松,细胞面积变大,果皮厚度减少,且在转色期变化幅度最大。进一步相关性分析表明,果实硬度和咀嚼性与果皮(表皮和亚表皮)厚度呈极显著正相关,与果皮细胞面积及果肉细胞面积、周长、纵径、横径和纵横比呈极显著负相关;果实内聚性和弹性与果皮厚度呈极显著负相关,与果皮细胞面积及果肉细胞面积、周长、纵径、横径和纵横比呈显著正相关。其中表皮细胞厚度和果肉细胞纵径与果实硬度、咀嚼性、内聚性和弹性相关性较高,相关系数的绝对值在0.864以上。这说明果皮厚度、果肉细胞形状和大小对果实质地有显著影响。

本研究表明,随着‘玫瑰香’果实质地变软,表皮细胞和亚表皮细胞厚度减少,亚表皮细胞层数降低,细胞排列变疏松,细胞面积变大。在西瓜^[29]和苹果^[30]上发现果皮细胞较厚且果皮细胞排列紧密的品种果实耐挤压特性较好,这与本研究结果相似。进一步相关分析表明,果实质地指标与果皮细胞参数呈极显著相关,且果皮(表皮和亚表皮)细胞与果实质地的相关性整体上高于果皮细胞面积与果实质地相关性,这说明相比于果皮细胞面积,果皮厚度对‘玫瑰香’果实质地的影响较大。此外,在‘玫瑰香’果实成熟过程中,果实质地变软,果肉细胞变化与果皮细胞变化一致,排列变疏松,细胞变大,这与前人在苹果^[14]和桃^[31]上研究结果一致。相关性分析结

果表明,果实质地指标与果肉细胞参数呈极显著相关,且与果肉细胞面积和纵径相关性较高。在甜瓜上发现果肉细胞形态学参数与质地参数相关,其中只有部分果肉细胞形态学参数与质地参数达到显著或极显著水平^[32],这与本研究结果不一致。可能与2次实验取样时间差异有关,本实验取样至成熟期结束,而上述试验取样至衰老期,在此基础上进行分析可能会对结果有一定影响。

综上所述,‘玫瑰香’果实成熟过程中,果实质地与果实解剖结构均发生显著变化,果实质地由硬变软,果皮变薄,果皮和果肉细胞变大,排列变疏松。进一步分析表明,果实质地与果实细胞形态显著相关,其中果皮厚度及果肉细胞横径和面积指标相关性较好。因此,在今后葡萄质地育种中,可结合果皮和果肉的细胞解剖形态对果实质地进行综合判断。此外,除了果实细胞的解剖形态以外,细胞的超微结构也可能与葡萄果实质地有关。在苹果上通过激光共聚焦显微镜对果肉细胞结构进行观察,结果表明细胞间隙与果实硬度呈极显著负相关^[33]。通过扫描电镜观察不同质地的苹果果实断裂面,发现断裂面差异明显^[34]。本试验采用的光学显微镜无法对细胞超微结构进行精准测定和评价,因此在今后实验中,可采用高分辨率的显微镜对果实细胞超微结构进行观察,为解析果实质地提供理论依据,以期加快质地育种进程。

参考文献 References

- [1] 董月菊, 张玉刚, 梁美霞, 戴洪义. 苹果果实品质主要评价指标的选择[J]. 华北农学报, 2011, 26(S1): 74-79
Dong Y J, Zhang Y G, Liang M X, Dai H Y. Selection of main indexes for evaluating apple fruit quality[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2011, 26(S1): 74-79 (in Chinese)
- [2] Qian M, Xu Z, Zhang Z H, Li Q, Yan X Y, Liu H K, Han M Y, Li F R, Zheng J C, Zhang D, Zhao C P. The downregulation of *PpPG21* and *PpPG22* influences peach fruit texture and softening[J]. *Planta*, 2021, 254(2): 1-12
- [3] 王燕霞, 王晓曼, 关军锋. 梨肉质质地性状分析[J]. 中国农业科学, 2014, 47(20): 4056-4066
Wang Y X, Wang X M, Guan J F. Flesh texture characteristic analysis of pear [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2014, 47(20): 4056-4066 (in Chinese)
- [4] Bugaud C, Cazevielle P, Daribo M O, Telle N, Julianus P, Fils-Lycaon B, Mbéguié-A-Mbéguié D. Rheological and chemical predictors of texture and taste in dessert banana (*Musa spp*) [J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2013,

84: 1-8

[5] Zhou Q, Zhang F, Ji S J, Dai H Y, Zhou X, Wei B D, Cheng S C, Wang A D. Absciscic acid accelerates postharvest blueberry fruit softening by promoting cell wall metabolism [J]. *Scientia Horticulturae*, 2021, 288: 110325

[6] 陈青, 励建荣. 杨梅果实 在储存过程中质地变化规律的研究 [J]. 中国食品学报, 2009, 9(1): 66-71

Chen Q, Li J R. Research on texture change regularity of the Chinese bayberry during storage [J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2009, 9(1): 66-71 (in Chinese)

[7] Nambi V E, Thangavel K, Rajeswari K A, Manickavasagan A, Geetha V. Texture and rheological changes of Indian mango cultivars during ripening [J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2016, 117: 152-160

[8] Gunness P, Kravchuk O, Nottingham S M, D’Arcy B R, Gidley M J. Sensory analysis of individual strawberry fruit and comparison with instrumental analysis[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2009, 52(2): 164-172

[9] 李婷, 安迪, 鲍金平, 臧运祥, 万嗣宝, 徐凯, 郑伟尉. 基于果实质地参数的葡萄贮藏特性评价 [J]. 核农学报, 2018, 32(11): 2155-2161

Li T, An D, Bao J P, Zang Y X, Wan S B, Xu K, Zheng W W. Evaluation on storage characteristics of different grape cultivars based on texture properties[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2018, 32(11): 2155-2161 (in Chinese)

[10] 刘欣. 浆果类果品的贮藏技术与方法[J]. 农业科技与装备, 2015(12): 46-47

Liu X. Storage technique and methods of berry fruit [J]. *Agricultural Science & Technology and Equipment*, 2015 (12): 46-47 (in Chinese)

[11] 王秋芳, 乔勇进, 乔旭光, 王海宏, 陈召亮. 臭氧处理对巨峰葡萄品质与生理生化的影响 [J]. 果树学报, 2010, 27(1): 63-68

Wang Q F, Qiao Y J, Qiao X G, Wang H H, Chen Z L. Effects of ozone on preservation and physiological-biochemical quality of Kyoho grape cultivar[J]. *Journal of Fruit Science*, 2010, 27(1): 63-68 (in Chinese)

[12] Konstankiewicz K, Pawlak K, Zdunek. Influence of turgor and cell size on the cracking of potato tissue [J]. *International Agrophysics*, 2001: 27-30

[13] 高滋艺, 范献光, 杨惠娟, 蒋小兵, 杨亚州, 赵政阳, 党智宏. 苹果发育过程中细胞壁代谢及果肉质地的变化[J]. 食品科学, 2016, 37(19): 70-75

Gao Z Y, Fan X G, Yang H J, Jiang X B, Yang Y Z, Zhao Z Y, Dang Z H. Correlation among cell wall components, related enzyme activities and texture of developing fruits of different apple (*Malus × domestica*) cultivars [J]. *Food Science*, 2016, 37(19): 70-75 (in Chinese)

[14] 张娟, 高滋艺, 杨惠娟, 杨亚州, 赵政阳. ‘秦冠’和‘富士’质地差异的解剖学观察及相关酶活性研究[J]. 西北农业学报, 2015, 24(10): 88-94

Zhang J, Gao Z Y, Yang H J, Yang Y Z, Zhao Z Y. Study on anatomy and fruit texture related enzymes in apple (*Malus × domestica*) cultivars ‘Qinguan’ and ‘Fuji’ [J]. *Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica*, 2015, 24(10): 88-94 (in Chinese)

[15] Liu B H, Wang K F, Shu X G, Liang J, Fan X L, Sun L. Changes in fruit firmness, quality traits and cell wall constituents of two highbush blueberries (*Vaccinium corymbosum* L.) during postharvest cold storage[J]. *Scientia Horticulturae*, 2019, 246: 557-562

[16] Chen H J, Cao S F, Fang X J, Mu H L, Yang H L, Wang X, Xu Q Q, Gao H Y. Changes in fruit firmness, cell wall composition and cell wall degrading enzymes in postharvest blueberries during storage[J]. *Scientia Horticulturae*, 2015, 188: 44-48

[17] 陈学森, 宋君, 高利平, 冀晓昊, 张宗营, 毛志泉, 张艳敏, 刘大亮, 张芮, 李敏. ‘乔纳金’苹果及其脆肉芽变果实质地发育机理[J]. 中国农业科学, 2014, 47(4): 727-735

Chen X S, Song J, Gao L P, Ji X H, Zhang Z Y, Mao Z Q, Zhang Y M, Liu D L, Zhang R, Li M. Developing mechanism of fruits texture in ‘Jonagold’ apple and its crisp flesh sport[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2014, 47(4): 727-735 (in Chinese)

[18] 高萌, 屈魏, 冉昇, 饶景萍. ‘徐香’与‘海沃德’猕猴桃冷藏期间组织结构与生理变化差异 [J]. 园艺学报, 2020, 47(7): 1289-1300

Gao M, Qu W, Ran B, Rao J P. Differences in tissue structure and physiological changes of ‘Xuxiang’ and ‘Hayward’ kiwifruit fruits during cold storage [J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2020, 47(7): 1289-1300 (in Chinese)

[19] 张芮, 张宗营, 高利平, 冀晓昊, 毛志泉, 许海峰, 王楠, 吴树敬, 陈学森. 苹果绵肉与脆肉株系果实质地差异的分子机理 [J]. 中国农业科学, 2015, 48(18): 3676-3688

Zhang R, Zhang Z Y, Gao L P, Ji X H, Mao Z Q, Xu H F, Wang N, Wu S J, Chen X S. Study on the molecular mechanism controlling differences in fruit texture formation of apple soft/crisp strains [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48(18): 3676-3688 (in Chinese)

[20] 庞洪翔, 廖康, 吴少鹏, 艾斯开尔·买海提, 赵世荣, 徐桂香, 牛莹莹. 木纳格等葡萄品种果实组织结构差异分析[J]. 新疆农业大学学报, 2015, 38(5): 370-375

Pang H X, Liao K, Wu S P, Maihaiti A, Zhao S R, Xu G X, Niu Y Y. Analysis on structural difference of the fruit of munake grape varieties[J]. *Journal of Xinjiang Agricultural University*, 2015, 38(5): 370-375 (in Chinese)

[21] 周会玲, 李嘉瑞. 葡萄果实组织结构与耐贮性的关系[J]. 园艺学报, 2006, 33(1): 28-32

Zhou H L, Li J R. The relationship between fruit texture and storage character in grapes [J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2006, 33(1): 28-32 (in Chinese)

- [22] 王斐, 姜淑苓, 陈秋菊, 欧春青, 张文江, 郝宁宁, 马力, 李连文. 脆肉梨果实成熟过程中质地性状的变化[J]. 果树学报, 2016, 33(8): 950-958
- Wang F, Jiang S L, Chen Q J, Ou C Q, Zhang W J, Hao N N, Ma L, Li L W. Changes in fruit texture of crisp-flesh pear during fruit ripening[J]. *Journal of Fruit Science*, 2016, 33(8): 950-958 (in Chinese)
- [23] 陈发河, 蔡慧农, 冯作山, 张维一, 廖康. 葡萄浆果发育过程中激素水平的变化[J]. 植物生理与分子生物学学报, 2002, 28(5): 391-395
- Chen F H, Cai H N, Feng Z S, Zhang W Y, Liao K. Changes in hormone levels in grape berries during development[J]. *Journal of Plant Physiology and Molecular Biology*, 2002, 28(5): 391-395 (in Chinese)
- [24] 黄旭明, 黄辉白, 王惠聪. 葡萄果实膨大生长的动力相关参数研究[J]. 园艺学报, 1998, 25(1): 11-16
- Huang X M, Huang H B, Wang H C. A study on some parameters related to the driving force of post-veraison expansion of grape berries[J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 1998, 25(1): 11-16 (in Chinese)
- [25] 刘丽媛. 山葡萄糖酸积累规律及代谢调控机理研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2016
- Liu L Y. The physiological study on the sugar and acid accumulations and metabolic regulation mechanisms of *Vitis amurensis* rupr grape [D]. Yangling: Northwest A & F University, 2016 (in Chinese)
- [26] 史国强. 设施栽培对葡萄果实品质及酚类积累的影响[D]. 太谷: 山西农业大学, 2019
- Shi G Q. Effects of facilities cultivation on the grape berries quality and phenols accumulation [D]. Taigu: Shanxi Agricultural University, 2019 (in Chinese)
- [27] 张大鹏, 邓文生, 贾文锁. 葡萄果实生长与水势及其分量和细胞壁展延性之间的关系[J]. 中国农业大学学报, 1997, 2(5): 100-108
- Zhang D P, Deng W S, Jia W S. Relationships between fruit growth, cell water potential and its components and cell wall extensibility in grapevine[J]. *Journal of China Agricultural University*, 1997, 2(5): 100-108 (in Chinese)
- [28] 张大鹏, 罗国光. 葡萄成熟期果实水分出入运动的研究[J]. 植物学报, 1993, 35(1): 1-11
- Zhang D P, Luo G G. Studies on water movement into and out of grapevine fruits during the ripening[J]. *Acta Botanica Sinica*, 1993, 35(1): 1-11 (in Chinese)
- [29] 满艳萍, 张建安. 不同贮运性西瓜果皮显微结构的差异[J]. 甘肃农业大学学报, 2006, 41(4): 64-67
- Man Y P, Zhang J N. Pericarp microstructure difference among watermelon types with different storage and transport quality[J]. *Journal of Gansu Agricultural University*, 2006, 41(4): 64-67 (in Chinese)
- [30] 邓继光, 刘国成, 李进辉, 殷广春. 苹果品种果实组织结构研究[J]. 果树科学, 1995, 12(2): 71-74
- Deng J G, Liu G C, Li J H, Yin G C. Investigation on the organization structure of apple fruits[J]. *Journal of Fruit Science*, 1995, 12(2): 71-74 (in Chinese)
- [31] 曹珂, 王力荣, 朱更瑞, 方伟超, 陈昌文, 冯义彬. 桃不同类型果实发育的解剖结构特性[J]. 果树学报, 2009, 26(4): 440-444
- Cao K, Wang L R, Zhu G R, Fang W C, Chen C W, Feng Y B. Comparison of anatomical fruit structure in different types of peach during fruit development [J]. *Journal of Fruit Science*, 2009, 26(4): 440-444 (in Chinese)
- [32] 李三培, 华德平, 高星, 徐伟欣, 杨旭辉, 刘莉. 不同类型甜瓜成熟过程中果肉质地及其细胞显微结构的变化[J]. 西北植物学报, 2017, 37(6): 1118-1125
- Li S P, Hua D P, Gao X, Xu W X, Yang X H, Liu L. Variation characteristics of flesh texture and cell microstructure of different types of melon during ripening[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2017, 37(6): 1118-1125 (in Chinese)
- [33] Hou J M, Sun Y H, Chen F Y, Yu L B, Mao Q, Wang L, Guo X L, Liu C. Analysis of microstructures and macrotextures for different apple cultivars based on parenchyma morphology [J]. *Microscopy Research and Technique*, 2016, 79(4): 304-312
- [34] 李红光, 刘俊灵, 党美乐, 杨惠娟, 范献光, 杨亚州, 赵政阳. 苹果新品种‘瑞阳’及其亲本果实组织结构的比较分析[J]. 果树学报, 2018, 35(10): 1182-1189
- Li H G, Liu J L, Dang M L, Yang H J, Fan X G, Yang Y Z, Zhao Z Y. Comparative the anatomy of the fruit between a new apple cultivar ‘Ruiyang’ and its parents[J]. *Journal of Fruit Science*, 2018, 35(10): 1182-1189 (in Chinese)

责任编辑: 董金波