殷晨,田路明,徐钰清,等.不同类型梨果肉质地发育动态比较分析[J].山西农业大学学报(自然科学版),2025,45(1):73-84.
Yin C, Tian L M, Xu Y Q, et al. Comparative analysis of dynamic development of flesh texture in different types of pear fruits [J]. Journal of Shanxi Agricultural University(Natural Science Edition), 2025,45(1):73-84.
doi: 10.13842/j.cnki.issn1671-8151.202403059

不同类型梨果肉质地发育动态比较分析

殷晨,田路明*,徐钰清,曹玉芬,董星光,刘超

(中国农业科学院 果树研究所/农业农村部园艺作物种质资源利用重点实验室,辽宁 兴城 125100)

摘　要:[目的]本文旨在探究不同类型梨品种在不同生长发育阶段果肉质地的变化规律,优化梨果质地评价方案。[方法]应用物性分析仪的穿刺法和质地多面分析法(TPA),以脆肉型梨品种和软肉型梨品种为试验材料,测定相关果实指标,并对其进行相关性分析、方差分析和主成分分析。[结果]随着梨果的生长发育,单果重和可溶性固形物含量呈现为上升趋势。穿刺法和TPA法的质地参数指标穿刺果实硬度、穿刺果肉硬度、穿刺果肉脆度、TPA果肉硬度、破裂力、内聚性、弹性、胶粘性和咀嚼性整体呈现为下降趋势。不同类型梨品种以及不同质地参数指标的下降趋势存在差异,主要集中于花后97~153 d。软肉型梨果的TPA果肉硬度、破裂力、弹性、胶粘性、咀嚼性、穿刺果实硬度、穿刺果肉硬度和穿刺果肉脆度比脆肉型梨果大,脆肉型梨果的粘附性比软肉型梨果大。相关性分析表明,梨果单果重和可溶性固形物含量与TPA果肉硬度、破裂力、内聚性、弹性、胶粘性、咀嚼性、穿刺果实硬度、穿刺果肉硬度和穿刺果肉脆度呈现极显著负相关,与粘附性呈现为正相关,但没有达到显著水平。梨果肉质地参数PCA分析结果表明,第一主成分的方差贡献率为64.3%,第二主成分的方差贡献率为23.8%,软肉型梨果主成分综合得分均高于脆肉型梨果的得分,明显区分了软肉型梨果和脆肉型梨果。[结论]研究明确了软肉梨和脆肉梨果实质地动态变化规律,软肉梨和脆肉梨果实质地存在明显差异,并且可以利用成熟期果肉质地参数建立指标模型以量化评价果肉质地性状和果实成熟度。

关键词:梨;果实质地;穿刺法;质地多面分析法;生长发育
中图分类号:S661.2　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1671-8151(2025)01-0073-12

Comparative analysis of dynamic development of flesh texture in different types of pear fruits

Yin Chen, Tian Luming*, Xu Yuqing, Cao Yufen, Dong Xingguang, Liu Chao

(*1.Institute of Pomology, Chinese Academy of Agricultural Sciences/Key Laboratory of Horticultural Crop Germplasm Resources Utilization, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Xingcheng 125100, China*)

Abstract: [Objective] The purpose of this study was to explore changes in the flesh texture of different types of pear varieties at different growth and development stages, and provide a reference for optimizing pear texture evaluation methods. [Methods] The study employed the puncture method and texture polyhedral analysis (TPA) with a physical property analyzer, using crispy and soft pear varieties as experimental material. Relevant fruit indicators were measured and analyzed. [Results] As pear fruits grew, single fruit weight and soluble solid content showed an increasing trend. Texture parameter measured through the puncture and TPA methods, including puncture fruit firmness, puncture flesh firmness, puncture flesh stiffness, TPA flesh firmness, fracture, cohesiveness, springiness, adhesiveness, and chewiness, generally showed a decreasing trend. The rate of decline varied among pear varieties and texture parameter, particularly during days after flower bloom (97~153 d). Soft-flesh pears exhibited higher TPA flesh firmness, fracture, springiness, adhesiveness, chewiness, punctured fruit firmness, punctured flesh firmness, and punctured flesh stiffness compared to crispy-flesh pears, whereas crispy flesh pears demonstrated great-

收稿日期:2024-03-21　　**修回日期**:2024-06-08
基金项目:中国农业科学院科技创新工程(CAAS-ASTIP-RIP);国家现代农业产业技术体系(CARS-28-01);国家科技资源共享服务平台项目(NHGRC2023-NH02-1)
作者简介:殷晨(ORCID:0009-0008-3914-2459),硕士研究生,研究方向:梨种质资源,E-mail:yinchen4869@163.com
*通信作者:田路明(ORCID:0009-0007-2801-8762),研究员,E-mail:tianluming@caas.cn

er adhesiveness. Single fruit weight and soluble solid content were significantly negatively correlated with TPA flesh firmness, fracture, cohesiveness, springiness, gumming, chewiness, punctured fruit firmness, punctured flesh firmness, and punctured flesh stiffness, but positively correlated with adhesiveness, though the latter correlation was not significant. PCA analysis of texture parameters showed that the first principal component accounted for 64.3% of the variance, and the second accounted for 23.8%. The comprehensive PCA scores for soft flesh pear were higher than those for crispy flesh pear fruits, clearly distinguishing the two types. [Conclusion] The study elucidated the dynamic changes in texture between soft flesh and crispy flesh pears, and highlighted significant differences in their characteristics. An indicator model could be established to quantitatively evaluate fruit flesh quality and maturity based on mature fruit texture parameters.

Keywords: Pear, Fruit texture, Puncture, TPA, Growth and development

1861年,第一台用于测定胶状食品稳定程度的质构仪诞生,经过不断地改进和完善,被广泛用于食品质地评价分析[1]。质构仪又称物性仪,是通过模拟人的触觉来检测样品物理特征的仪器[1],测定模式主要有质地多面分析法(texture polyhedral analysis TPA)、穿刺法、单压缩法、剪切法、板压法[2-5]等,这些模式通过力、时间和距离的关系体现出力学与形变的关系,进而推导出形变在物理性质中的代表意义[1]。从消费者角度来看,质地、风味和营养价值是接受水果的重要属性,也是评估其质量的基本特征[6]。国内外关于水果质地研究已在蔓越莓[4]、蓝莓、西瓜、李和无花果[7-10]等多种水果中取得了较多进展。果实成熟过程中,质地特征主要受软化相关性状的影响,如角质层结构的变化、细胞的增大、细胞壁多糖的组成等[11]。由于果实质地属性不同,脆肉梨与软肉梨果实在软化过程中果胶降解途径差异显著,使得2个品种梨果实具有不同的后熟软化[11],大多数脆肉型梨果质地脆嫩,而多数软肉型梨果在刚采收时果肉质地粗硬,经后熟果实变软[2]。在蔓越莓[4]等物种中,测量方法、设定参数和压缩距离的改变都会导致测量结果存在偏差,因此选择合适的测量方法、参数和条件对获得准确的质地分析结果十分重要。一般来说,以果实局部为测试对象的穿刺法能更好地反映质地性状的细节特征,以整个果实为测试对象的TPA法能更好地反映与基本理化指标的相关性[9]。

梨属于蔷薇科梨属,是世界第三大温带水果,因其独特的风味而深受消费者欢迎。梨果肉质地能直接反映果实的组织状态和口感,不仅是影响果实品质的重要指标,也是评价果实成熟度的重要依据[2]。一般梨属种质资源按果肉质地可分为软肉型和脆肉型,成熟后软肉型和脆肉型梨果肉质地发生显著的变化[11],但由于缺乏一致的评价方法,关于梨果实质地的鉴定评价仍需进一步研究。目前,现有的大量梨果质地研究集中于成熟梨果质地品质和软化机制的讨论,而与生长发育时期的质地研究联系较少。本研究采用穿刺法和TPA法对4种脆肉型梨和4种软肉型梨进行测定,比较分析这2种方法在测定生长发育阶段的梨果质地的适用程度,为优化现有的质地测量方案和制定梨果质地评价的标准方法提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料

试验材料于2023年在国家梨种质资源圃(兴城)中选取了4种脆肉型梨品种:库尔勒香梨(*Pyrus sinkiangensis* Yu.)、茌梨(*Pyrus bretschneideri* Rehd.)、鸭梨(*Pyrus bretschneideri* Rehd.)和砀山酥梨(*Pyrus bretschneideri* Rehd.);4种软肉型梨品种:南果梨(*Pyrus ussuriensis* Maxim.)、京白梨(*Pyrus ussuriensis* Maxim.)、软儿梨(*Pyrus ussuriensis* Maxim.)和居特路易斯(*Pyrus communis* L.)。选取品种均为9月中旬成熟的中晚熟品种与9月下旬成熟的晚熟品种。实验设置了8个采样时期,分别在6月21日、7月5日、7月19日、8月2日、8月16日、8月30日、9月13日与9月27日,每两周选取果形端正、大小均匀、成熟度一致、无病虫害及机械损伤的果实进行实验。国家梨种质资源圃的花期为2023年4月22日左右,不同品种花期相当,且于最后采样期达到成熟果采摘标准。

1.2 试验仪器

平均单果重采用电子天平(上海乾峰电子仪器有限公司)进行称量;可溶性固形物含量(SSC)采用PR-101α型折糖仪(日本ATAGO公司)进行测定;穿刺法和TPA法采用美国Food Technology Corporation公司的TMS-TOUCH食品物性分析仪(质构仪)进行测定。

1.3　试验仪器试验方法和参数设置

采用穿刺法和TPA法对果实质地参数指标进行测定,试验方法参考徐钰清等[2]和王燕霞等[3]的测定方法并加以改进。

穿刺法选用P/2(直径2 mm)探头进行试验。将果实纵向分为两半,一半果实削去果皮,一半保留果皮,作为试样,每次随机取削皮和不削皮的试样各10个测定。参数设置条件为:试验检测速度60 mm/min,起始力1 N,穿刺距离则根据果实大小变化进行调整。通过质地特征图线可得质地参数指标:果实硬度、果肉硬度和果肉脆度。果肉脆度[9]表示果实咀嚼在口中的突然断裂,因此取最大穿刺力与相应距离的比值,计算公式如下:

果肉脆度=Fs/Dp

式中,Fs为穿刺试验曲线中的最大力(N);Dp为探头位移(mm),即最大受力之间的距离。

TPA法选用P/35(直径75 mm)探头进行试验。沿梨果果梗将果实纵切为两半,每半果实用内径10 mm打孔器于中果皮部分打孔取样,切取高度9 mm小圆柱体为试样,每次随机取10个试样测定。参数为:探头回升到样品表面的高度10 mm,形变百分量50%,检测速度30 mm/min,起始力1 N。通过质地特征图线可得质地参数指标:果肉硬度、破裂力、果实硬度、内聚性、弹性、胶粘性、咀嚼性。

1.4　试验仪器数据处理

选用Excel 2021和Origin 2022进行作图和数据统计分析,采用SPSS 25.0软件进行差异显著性分析、相关性分析和主成分分析。

2　结果与分析

2.1　8个品种梨果实生长发育过程中单果重与SSC的变化

如图1所示,随着梨果生长发育进程的不断推进,单果重和SSC以及单果重与SSC的比值呈现逐渐上升的趋势。4个软肉型梨果、砀山酥梨和库尔勒香梨在生长发育后期因单果重增长减缓,SSC增长加快,出现比值下降,不同品种梨果的比值下降时间点不同。

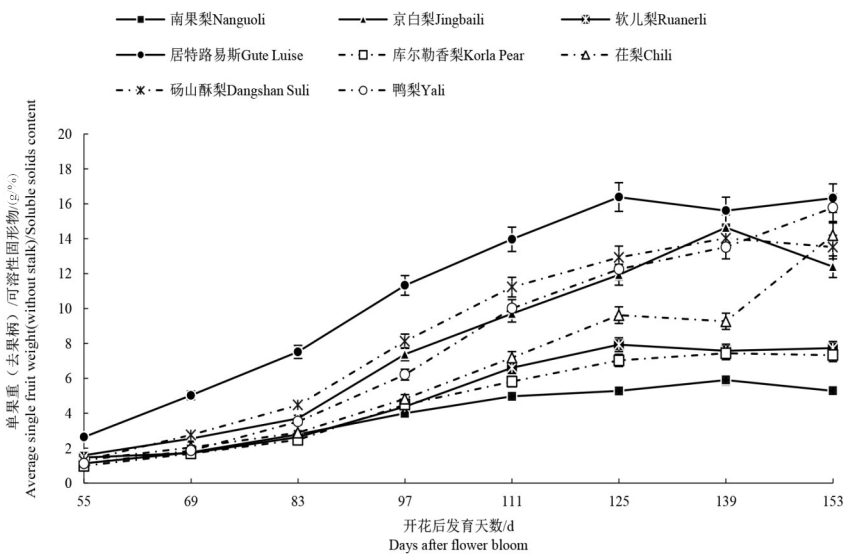


图1　单果重与SSC比值的变化

Fig.1　Changes in the ratio of single fruit weight to SSC

2.2　生长发育时期穿刺法各项参数的变化

2.2.1　果实硬度与果肉硬度的变化

由表1可见,在梨果实生长发育过程中,果实硬度和果肉硬度逐渐下降。脆肉型梨果的果实硬度是9.79 N,果肉硬度是6.60 N,软肉型梨果的果实硬度是12.60 N,果肉硬度是9.43 N,软肉型梨果的果实硬度和果肉硬度总体比脆肉型梨果大。同一品种梨果的果实硬度下降趋势与果肉硬度下降趋势较为相似,个别生长阶段存在差异,主要集中于花后111～153 d。4种脆肉型梨果分别于花后111 d与125 d因果实硬度下降减缓,果肉硬度下降加快,出现比值大幅上升。4种软肉型梨果出现比

值上升的时间点较为分散。穿刺法所测果实硬度和果肉硬度在生长发育阶段的变化差异极显著，从时间节点看，55～97 d变化差异不显著，111～153 d变化差异显著($P<0.05$)(表2)。

表1 不同生长发育阶段梨果的质地性状变化

Table1 Changes in texture traits of pear during different development stages

质地性状 Texture traits	开花后发育天数/d Days after flower bloom	南果梨 Nanguoli	京白梨 Jingbaili	软儿梨 Ruanerli	居特路易斯 Gute Luise	库尔勒香梨 Korla Pear	茌梨 Chili	砀山酥梨 Dangshan Suli	鸭梨 Yali
果实硬度/N Fruit firmness	55	18.37	18.78	18.22	16.22	14.26	15.51	17.09	16.05
	69	15.63	15.91	16.88	14.73	11.69	15.45	14.52	14.93
	83	13.25	12.48	16.67	14.24	8.81	12.95	12.06	12.90
	97	13.20	12.03	14.89	13.17	8.08	11.65	9.69	11.86
	111	12.89	11.21	13.29	12.68	7.56	10.13	8.42	9.79
	125	10.47	10.07	12.24	12.12	6.20	8.48	7.01	8.67
	139	9.79	7.20	10.85	8.10	4.37	5.64	5.19	5.45
	153	8.39	4.21	6.96	7.99	4.30	5.45	4.26	4.95
穿刺果肉硬度/N Puncture flesh firmness	55	13.36	14.38	18.82	11.83	11.53	10.78	13.33	11.96
	69	11.78	13.76	17.39	11.53	8.53	10.15	8.76	10.69
	83	9.60	9.71	14.92	9.15	6.64	8.79	8.47	8.45
	97	7.22	8.23	11.55	8.93	5.39	8.01	7.05	7.28
	111	6.41	7.91	10.37	7.81	4.19	6.59	4.73	5.27
	125	6.17	7.54	8.88	7.57	3.86	4.46	4.19	4.43
	139	5.68	6.98	7.88	6.46	3.09	4.15	3.48	3.77
	153	4.79	3.88	5.74	5.66	2.90	3.28	3.31	3.56
果肉脆度/(N/mm) Flesh stiffness	55	5.892	4.770	6.523	2.945	4.515	5.038	5.493	5.126
	69	3.125	4.071	6.064	1.516	3.251	2.897	2.301	3.202
	83	2.081	2.167	3.148	1.273	1.559	2.858	1.624	2.758
	97	1.780	1.050	2.035	0.850	0.992	0.925	1.427	0.973
	111	1.336	0.830	1.707	0.799	0.713	0.672	0.498	0.612
	125	1.169	0.771	1.239	0.712	0.558	0.484	0.342	0.485
	139	1.095	0.665	1.120	0.579	0.475	0.418	0.260	0.358
	153	0.824	0.342	0.713	0.528	0.344	0.339	0.256	0.345
TPA果肉硬度/N TPA flesh firmness	55	—	—	—	172.29	—	—	—	—
	69	—	—	—	104.02	—	—	—	—
	83	—	—	—	86.01	—	—	67.01	—
	97	—	60.98	—	69.03	—	54.86	42.28	54.55
	111	59.81	47.16	63.06	51.93	31.29	39.04	27.89	31.53
	125	53.97	38.76	50.43	49.32	26.61	27.98	21.79	25.23
	139	47.05	40.00	48.19	39.19	21.43	24.39	16.95	20.57
	153	47.01	30.00	30.10	31.29	17.58	21.40	15.23	17.48
破裂力/N Fracture	55	—	—	—	128.43	—	—	—	—
	69	—	—	—	104.57	—	—	—	—
	83	—	—	—	81.59	—	—	60.58	—
	97	—	53.77	—	60.16	—	50.93	44.48	50.91
	111	52.84	43.04	59.55	49.60	28.43	35.35	26.04	28.87
	125	48.91	34.79	46.65	47.55	23.19	24.79	19.99	23.23
	139	42.39	37.15	47.57	35.23	19.88	23.19	16.03	19.02
	153	39.86	29.97	23.71	30.68	16.99	21.34	13.53	17.60

续表

质地性状 Texture traits	开花后发育天数/d Days after flower bloom	南果梨 Nanguoli	京白梨 Jingbaili	软儿梨 Ruanerli	居特路易斯 Gute Luise	库尔勒香梨 Korla Pear	茌梨 Chili	砀山酥梨 Dangshan Suli	鸭梨 Yali
粘附性/(N•mm) Adhesiveness	55	—	—	—	0.123	—	—	—	—
	69	—	—	—	0.158	—	—	—	—
	83	—	—	—	0.213	—	—	0.255	—
	97	—	0.281	—	0.292	—	0.273	0.309	0.301
	111	0.345	0.188	0.220	0.222	0.273	0.186	0.241	0.210
	125	0.242	0.304	0.221	0.334	0.316	0.265	0.296	0.354
	139	0.304	0.281	0.270	0.288	0.316	0.349	0.369	0.314
	153	0.175	0.193	0.146	0.236	0.219	0.162	0.298	0.252
内聚性/Ratio Cohesiveness	55	—	—	—	0.167	—	—	—	—
	69	—	—	—	0.160	—	—	—	—
	83	—	—	—	0.157	—	—	0.139	—
	97	—	0.129	—	0.143	—	0.131	0.121	0.155
	111	0.133	0.123	0.130	0.131	0.112	0.111	0.121	0.135
	125	0.112	0.119	0.126	0.132	0.111	0.112	0.122	0.128
	139	0.111	0.119	0.132	0.133	0.108	0.113	0.131	0.121
	153	0.108	0.119	0.133	0.129	0.098	0.104	0.114	0.114
弹性/mm Springiness	55	—	—	—	1.94	—	—	—	—
	69	—	—	—	2.15	—	—	—	—
	83	—	—	—	2.27	—	—	1.73	—
	97	—	1.81	—	1.75	—	1.72	1.62	1.83
	111	1.59	1.64	1.77	1.77	1.35	1.45	1.45	1.60
	125	1.46	1.53	1.67	1.52	1.28	1.37	1.31	1.32
	139	1.42	1.47	1.69	1.68	1.24	1.23	1.25	1.24
	153	1.47	1.57	1.62	1.61	1.17	1.15	1.15	1.15
胶粘性/N Gumminess	55	—	—	—	28.79	—	—	—	—
	69	—	—	—	16.39	—	—	—	—
	83	—	—	—	13.84	—	—	9.32	—
	97	—	7.86	—	9.96	—	7.16	5.16	8.46
	111	7.89	5.78	8.22	6.83	3.51	4.32	3.36	4.25
	125	6.05	4.63	6.34	6.54	2.96	3.13	2.66	3.23
	139	5.25	4.76	6.37	5.23	2.31	2.78	2.22	2.49
	153	5.07	3.59	4.08	4.05	1.73	2.27	1.74	1.99
咀嚼性/mj Chewiness	55	—	—	—	55.49	—	—	—	—
	69	—	—	—	35.27	—	—	—	—
	83	—	—	—	31.42	—	—	16.10	—
	97	—	14.24	—	17.39	—	12.59	8.32	15.57
	111	12.59	9.52	14.66	12.16	4.78	6.32	4.91	6.84
	125	8.89	7.12	10.62	9.95	3.83	4.32	3.51	4.30
	139	7.49	7.02	10.85	8.91	2.89	3.44	2.78	3.13
	153	7.49	5.71	6.92	6.51	2.03	2.65	1.99	2.32

注:表中数据包括穿刺法、TPA法2种方法所测得果肉硬度;—代表数据为空。

Note:Data included the flesh firmness measured by puncture method and TPA method. — indicated that the data wasn't available.

2.2.2　果肉脆度的变化

果肉脆度表示果实咀嚼在口中的突然断裂[12]。随着梨果实生长发育进程的推进,果肉脆度呈现逐渐下降趋势(表1)。8个品种梨果肉脆度

下降都表现为生长发育前期下降迅速,生长发育后期下降趋势减缓直至趋于平稳。软肉型梨果的果肉脆度是1.99 N/mm,脆肉型梨果的果肉脆度是1.63 N/mm,软肉型梨果的果肉脆度总体大于脆肉型梨果,并且下降趋势更大。穿刺法所测的果肉脆度在整个生长发育阶段变化差异极显著,从时间节点看,前期变化差异显著,后期差异不显著(表2)。

2.3 生长发育时期TPA法各项参数的变化

因采用TPA法测定要求梨果的中果皮内径达到10 mm,居特路易斯于开花后发育55 d时,砀山酥梨于69 d时,茌梨、鸭梨和京白梨于97 d时,南果梨、软儿梨和库尔勒香梨于111 d时达到TPA法检测要求。

2.3.1 TPA法果肉硬度的变化

如表1所示,随着梨果实的生长发育,果肉硬度总体呈现逐渐下降趋势,不同品种下降趋势存在差异。软肉型梨果TPA果肉硬度是54.67 N,脆肉型梨果的TPA果肉硬度是29.87 N,软肉型梨果的TPA果肉硬度比脆肉型梨果的硬度大。在花后111~153 d,软肉型梨果果肉硬度的下降趋势比脆肉型梨果更为平缓。TPA法所测的果肉硬度在整个生长发育阶段变化差异极显著,从时间节点看,前期变化差异显著,后期差异不显著(表2)。

2.3.2 破裂力的变化

破裂力是指样品发生折断时的力,在一定程度上代表了果实的脆度[12]。随着梨果生长发育,果实破裂力总体呈现逐渐下降趋势,软肉型梨果的破裂力是49.34 N,脆肉型梨果是27.82 N,软肉型梨果的破裂力比脆肉型梨果的破裂力大(表1)。4种脆肉型梨果的破裂力下降趋势相似,前期下降迅速,后期减缓。软肉型梨果中,京白梨和软儿梨的下降趋势在花后139 d出现一个上升峰值后下降。TPA法所测的果肉破裂力在整个生长发育阶段变化差异极显著,从时间节点看,前期变化差异显著,后期差异不显著(表2)。

2.3.3 粘附性的变化

粘附性是指在咀嚼果实时,上颚、牙齿、舌头等克服果肉表面吸引力所需的能量[13]。随着梨果实的生长发育,粘附性的变化呈现为“先上升,后下降,再上升,又下降”的趋势(表1)。趋势变化转折点的出现主要集中于花后125 d和139 d,不同品种的梨果出现转折点的时间点不同。脆肉型梨果的粘附性是0.28 N·mm,软肉型梨果的粘附性是0.24 N·mm,脆肉型梨果的粘附性总体比软肉型梨果的粘附性大。TPA法所测的果肉粘附性在整个生长发育阶段变化差异极显著,从时间节点看,前期变化差异显著,后期差异不显著(表2)。

2.3.4 内聚性的变化

内聚性是指果实抵抗牙齿咀嚼破坏而表现出来的内部收缩力,反映了细胞间结合力的大小和果实保持完整性的能力[13]。随着梨果生长发育,内聚性整体呈现下降趋势,前期下降迅速,后期下降减缓(表1)。不同品种梨果的下降趋势存在差异。砀山酥梨、软儿梨、居特路易斯和茌梨在花后139 d出现一个趋势上升后又下降的转折点。TPA法所测的果肉内聚性在整个生长发育阶段变化差异显著,从时间节点看,前期和后期变化不显著,在花后97~111 d存在显著差异(表2)。

2.3.5 弹性的变化

弹性是指果实受压后,在去掉压力时恢复原状的能力[13]。随着梨果生长发育,弹性逐渐下降。不同品种梨果的弹性下降趋势存在差异(表1)。脆肉型梨果的弹性下降趋势相似,前期下降迅速,后期减缓;软肉型梨果则在花后125 d和139 d出现一个弹性迅速下降又回升的转折点。软肉型梨果弹性是1.65 mm,脆肉型梨果弹性是1.37 mm,软肉型梨果的弹性比脆肉型梨果的弹性大。TPA法所测的果肉弹性在整个生长发育阶段变化差异极显著,从时间节点看,前期和后期变化差异不显著,在花后97~111 d存在显著差异(表2)。

2.3.6 胶粘性与咀嚼性的变化

胶粘性是指果肉在咀嚼过程中粘稠的程度[2]。咀嚼性是指牙齿咀嚼果实样品时需要的能量,综合反映果实对咀嚼的抵抗能力[13]。胶粘性与咀嚼性的变化趋势相似。随着梨果生长发育,胶粘性与咀嚼性总体呈现逐渐下降趋势(表1)。软肉型梨果的胶粘性是7.27 N,咀嚼性是12.68 mj,脆肉型梨果的胶粘性是3.68 N,咀嚼性是5.49 mj,软肉型梨果的胶粘性和咀嚼性大于脆肉型梨果,二者的下降趋势总体相似度较高,呈现为前期下降迅速,后期减缓,下降减缓的转折时间点较多集中于花后111 d。TPA法所测的果肉胶粘性在整个生长发育阶段变化差异极显著,咀嚼性为变化差

表2　供试梨果各质地参数的ANOVA方差分析

Table 2　ANOVA analysis of variance for texture parameters of tested pear fruits

质地参数 Texture parameters	显著性 Significance	质地多面分析法 TPA							
		55 d	69 d	83 d	97 d	111 d	125 d	139 d	153 d
TPA果肉硬度/N TPA flesh firmness	***	—	—	76.51±13.450a	56.35±9.819b	43.96±13.561bc	36.76±12.994bc	32.22±12.709c	26.26±10.572c
破裂力/N Fracture	***	—	—	71.09±14.856a	52.05±5.669b	40.47±12.655bc	33.64±12.418c	30.06±11.983c	24.21±8.769c
粘附性/(N•mm) Adhesiveness	***	—	—	0.23±0.030bc	0.29±0.015ab	0.24±0.052bc	0.29±0.046ab	0.31±0.034a	0.21±0.056c
内聚性/Ratio Cohesiveness	0.002	—	—	0.15±0.013a	0.14±0.013ab	0.13±0.009bc	0.12±0.008bc	0.12±0.010bc	0.12±0.012c
弹性/mm Springiness	***	—	—	2.00±0.382a	1.75±0.083ab	1.58±0.153bc	1.43±0.136c	1.40±0.197c	1.36±0.211c
胶粘性/N Gumminess	***	—	—	11.58±3.196a	7.72±1.764b	5.52±1.943bc	4.44±1.656c	3.93±1.648c	3.07±1.289c
咀嚼性/mj Chewiness	0.022	—	—	23.76±10.833a	13.62±3.448b	8.97±3.809bc	6.57±2.942c	5.81±3.158c	4.45±2.416c
		穿刺法 Puncture							
穿刺果实硬度/N Puncture fruit firmness	***	16.81±1.581a	14.97±1.522ab	12.92±2.195bc	11.82±2.129cd	10.75±2.134cd	9.41±2.216de	7.07±2.338ef	5.81±1.726f
穿刺果肉硬度/N Puncture flesh firmness	***	13.25±2.537a	11.57±2.894ab	9.47±2.402bc	7.96±1.787cd	6.66±2.017de	5.89±1.918de	5.19±1.802e	4.14±1.112e
穿刺果肉脆度/(N/mm) Puncture flesh stiffness	***	5.04±1.061a	3.30±1.343b	2.18±0.682c	1.25±0.444d	0.90±0.412d	0.72±0.328d	0.62±0.325d	0.46±0.206d

注：55～153 d为开花后发育天数。***代表显著水平$P<0.001$；同行中不同小写字母表示不同生长阶段的差异达显著水平($P<0.05$)；—代表数据为空。

Note: 55～153 d represented days after flower bloom. *** indicated that the significant difference at 0.001 level; Different letters in the same row indicated significant differences in different growth stages at 0.05 level; — indicated that the data wasn't available.

异显著,从时间节点看,两者都是前期差异变化显著,后期差异不显著(表2)。

2.4 单果重和SSC与各质地参数的相关性

如表2所示,单果重与SSC呈现极显著正相关。单果重和SSC分别与TPA果肉硬度、破裂力、内聚性、弹性、胶粘性、咀嚼性、穿刺果实硬度、穿刺果肉硬度和穿刺果肉脆度呈极显著负相关。粘附性与单果重和SSC呈正相关,但未达到显著水平。在Spearman系数中,TPA果肉硬度、破裂力、胶粘性、咀嚼性、穿刺果实硬度、穿刺果肉硬度和穿刺果肉脆度这7个质地参数与单果重和SSC的相关系数为-1,说明二者变化近乎相同。根据Person系数可知,穿刺果实硬度与单果重和SSC的相关系数显著性最高。粘附性与其它质地参数在Person系数中呈现为负相关,其中与内聚性、胶粘性、咀嚼性、穿刺果肉硬度和果肉脆度呈显著负相关,与TPA硬度和破裂力呈极显著负相关。

2.5 梨果实各质地参数主成分分析

通过主成分分析得到前2个成分的特征值分别为7.073和2.621,均大于1,累计方差贡献率达88.13%,可以代表原始数据的大部分信息(图2)。第一主成分的方差贡献率为64.3%,TPA果肉硬度、破裂力、内聚性、弹性、胶粘性、咀嚼性、穿刺果实硬度和穿刺果肉硬度在第一主成分上有较大荷载,且与第一主成分呈正相关。粘附性也在第一主成分上有较大荷载,但与第一主成分呈负相关。第二主成分的方差贡献率为23.8%,SSC、穿刺果肉脆度和穿刺果肉硬度在第二主成分上有较大荷载,SSC与第二主成分呈正相关,穿刺果肉硬度和穿刺果肉脆度呈负相关。为综合考虑质地参数对不同品种梨果实质地信息的反应程度,采用2个主成分的得分情况,以各自的方差贡献率为权重,二者相乘求和构建综合评价得分函数,计算出不同品种梨果实在整个生长阶段的综合得分及排名,综合得分越高表明这些质地参数能更好地反映该品种的果实质地信息。在整个生长阶段的综合得分由高到低依次为居特路易斯、软儿梨、京白梨、南果梨、茌梨、鸭梨、砀山酥梨和库尔勒香梨(表3)。软肉型梨果的得分均高于脆肉型梨果。

3 讨论

3.1 生长发育过程中梨果实单果重和SSC及质地参数的变化

本试验研究表明,随着梨果生长发育直至成熟,单果重与SSC的比值整体呈现为上升趋势。各有不同的脆肉型梨果和软肉型梨果分别于花后125 d或139 d出现比值下降趋势,该时期可以作为采摘期的参考,如南果梨、软儿梨和京白梨较适宜在9月中旬采摘,未出现比值下降现象的梨果的采摘时间可延至花后153 d后,如砀山酥梨、茌梨和

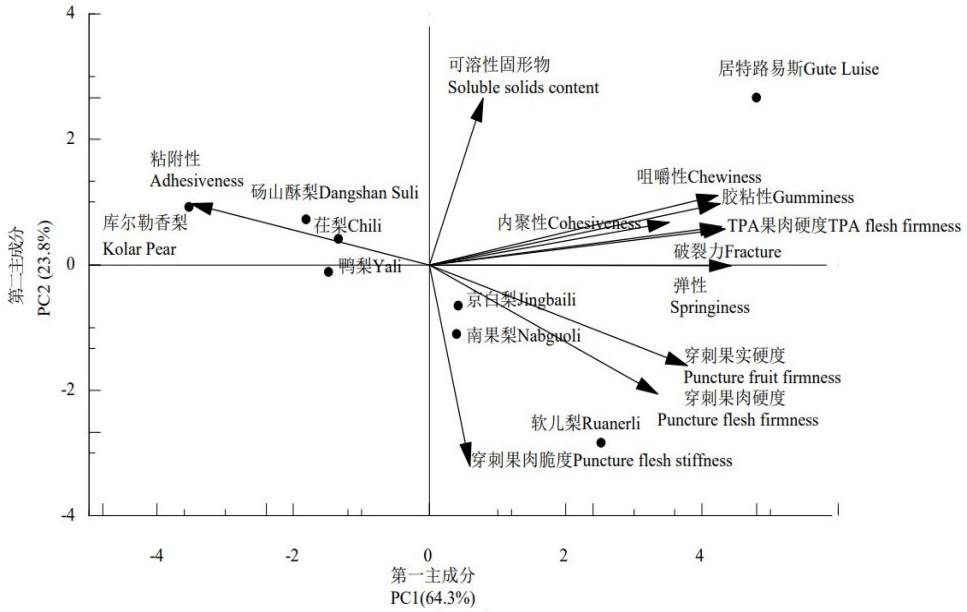


图2 不同品种梨果实主成分分析

Fig.2 PCA of pear fruit of different varieties

表3　梨果实单果重和可溶性固形物与各质地参数间的相关系数

Table 3　Correlation coefficients between single fruit weight, soluble solids, and various texture parameters of pear fruit

	单果重 Average single fruit weight	可溶性固形物 Soluble solids content	TPA果肉硬度 TPA flesh firmness	破裂力 Fracture	粘附性 Adhesiveness	内聚性 Cohesiveness	弹性 Springness	胶粘性 Gumminess	咀嚼性 Chewiness	穿刺果实硬度 Puncture fruit firmness	穿刺果肉硬度 Puncture flesh firmness	穿刺果肉脆度 Puncture flesh stiffness
单果重 Average single fruit weight	1	1.000**	−1.000**	−1.000**	0.619	−0.976**	−0.929**	−1.000**	−1.000**	−1.000**	−1.000**	−1.000**
可溶性固形物 Soluble solids content	0.973**	1	−1.000**	−1.000**	0.619	−0.976**	−0.929**	−1.000**	−1.000**	−1.000**	−1.000**	−1.000**
TPA果肉硬度 TPA flesh firmness	−0.858**	−0.816*	1	1.000**	−0.619	0.976**	0.929**	1.000**	1.000**	1.000**	1.000**	1.000**
破裂力 Fracture	−0.918**	−0.872**	0.977**	1	−0.619	0.976**	0.929**	1.000**	1.000**	1.000**	1.000**	1.000**
粘附性 Adhesiveness	0.611	0.498	−0.808**	−0.813**	1	−0.595	−0.524	−0.619	−0.619	−0.619	−0.619	−0.619
内聚性 Cohesiveness	−0.963**	−0.910**	0.938**	0.984**	−0.744*	1	0.905**	0.976**	0.976**	0.976**	0.976**	0.976**
弹性 Springness	−0.958**	−0.896**	0.760**	0.868**	−0.627	0.934**	1	0.929**	0.929**	0.929**	0.929**	0.929**
胶粘性 Gumminess	−0.846**	−0.802*	1.000**	0.974**	−0.814*	0.934**	0.751*	1	1.000**	1.000**	1.000**	1.000**
咀嚼性 Chewiness	−0.873**	−0.822*	0.996**	0.989**	−0.828*	0.958**	0.800*	0.996**	1	1.000**	1.000**	1.000**
穿刺果实硬度 Puncture fruit firmness	−0.980**	−0.971**	0.903**	0.941**	−0.666	0.953**	0.902**	0.892**	0.907**	1	1.000**	1.000**
穿刺果肉硬度 Puncture flesh firmness	−0.968**	−0.935**	0.952**	0.987**	−0.740*	0.992**	0.912**	0.946**	0.963**	0.979**	1	1.000**
穿刺果肉脆度 Puncture flesh stiffness	−0.871**	−0.823*	0.995**	0.990**	−0.830*	0.957**	0.800*	0.995**	1.000**	0.907**	0.964**	1

注：上三角为Spearman法计算结果，下三角为Pearson法计算结果。*代表$P<0.05$，**代表$P<0.01$。

Note: The upper triangle was calculated using Spearman method; the lower triangle was calculated using Pearson method. * and ** indicated difference at 0.05 and 0.01 level, respectively.

表4 不同品种梨果实主成分综合得分

Table 4 Comprehensive PCA scores of different pear varieties

品种 Varieties	主成分得分 Principal component score		综合得分 Comprehensive score	排序 Sort
	F1	F2		
南果梨 Nanguoli	0.40	−1.11	−0.01	4
京白梨 Jingbaili	0.42	−0.65	0.12	3
软儿梨 Ruanerli	2.52	−2.84	0.94	2
库尔勒香梨 Korla Pear	−3.53	0.92	−2.05	8
茬梨 Chili	−1.34	0.41	−0.76	5
砀山酥梨 Dangshan Suli	−1.81	0.73	−0.99	7
鸭梨 Yali	−1.47	−0.11	−0.98	6
居特路易斯 Gute Luise	4.80	2.66	3.72	1

鸭梨晚采的果实品质更好。

果实质地的变化是一个复杂的生化过程,受多种因素调控,包括遗传背景、细胞壁结构和组成、细胞壁降解酶活性等[14]。果实质地也受果实细胞的大小和排列的影响,在坐果到成熟的过渡过程中,果肉细胞逐渐增大,果肉质地由紧致变为柔软[15]。Lu等[8]研究发现,随着果实的发育,细胞变大,排列更松散,细胞间隙也变大,质地参数有减小的趋势,这一结果在西瓜、苹果、甜瓜、猕猴桃等水果中得到证实。穿刺法和TPA法的质地参数指标穿刺果实硬度、穿刺果肉硬度、果肉脆度、TPA果肉硬度、破裂力、内聚性、弹性、胶粘性和咀嚼性整体呈现下降趋势。这与王斐等[16]的研究结果一致。粘附性则与其它质地参数指标的变化趋势完全不同。比较发现,软肉型梨果的TPA果肉硬度、破裂力、弹性、胶粘性、咀嚼性、穿刺果实硬度、穿刺果肉硬度和穿刺果肉脆度都比脆肉型梨果大,脆肉型梨果的粘附性比软肉型梨果大。蓝莓果实质地研究中,质地参数存在品种间差异,其中果皮脆性、果实硬度、粘附性、咀嚼性和回复性品种间差异较大,弹性和内聚性差异较小[7]。高等植物中由果胶、纤维素、半纤维素等细胞壁物质通过相互交联形成的网状结构,是果实质地表现的重要物质基础[17]。魏建梅等[17]以京白梨为试材研究发现,果实硬度与半纤维素、离子型果胶和共价结合型果胶呈极显著相关,与水溶性果胶和纤维素呈显著相关,与α-L-阿拉伯呋喃糖苷酶和β-半乳糖苷酶呈极显著负相关。许娟等[18]以库尔勒香梨为试材研究发现,幼果期的梨果质地坚硬,果胶多为原果胶,水溶性和离子型果胶含量较低,共价结合型果胶含量较高,纤维素和半纤维素含量较高并伴随细胞膨大需要而逐渐下降,果实逐渐发育成熟后,共价结合型果胶降解,水溶性和离子型果胶含量上升,纤维素和半纤维素含量下降平缓,β-葡萄糖苷酶在梨果发育过程中整体活性升高。这与穿刺果实硬度、穿刺果肉硬度、果肉脆度、TPA果肉硬度、破裂力、弹性、胶粘性和咀嚼性出现前期下降迅速,花后97～111 d下降趋势减缓,后期趋势平缓的现象吻合。

花后125～153 d,8个品种梨果在不同时间节点出现了穿刺果实硬度与果肉硬度和单果重与SSC比值大幅下降的现象。花后125～139 d,不同类型梨果的粘附性与内聚性出现与前期趋势走向不同的转折点。梨果实的成熟度与果实硬度相关[19]。幼果期的库尔勒香梨细胞分裂迅速,需要大量合成细胞壁物质来满足细胞构建需要,以果实进入膨大期为转折点,细胞体积迅速增大,胞间细胞机械分离,细胞壁含量相对下降随着果实成熟,细胞壁变薄,大量细胞壁结构消失,细胞壁含量缓慢下降,所以细胞壁含量的变化符合梨果的生长规律[18],延迟收获的梨果出现果实紧致度减少的现象是由细胞增大引起的,很少或不涉及细胞壁物质的降解,而且梨的收获成熟度在商业上是由果肉紧实度决定的[20],所以可通过这些参数指标更好更标准化地评价梨果的成熟度。花后125～153 d,软肉型梨果的弹性和破裂力出现与前期趋势走向不同的转折点,表明可通过与弹性和破裂力的结合更好地评价软肉型梨果的成熟度。

3.2 生长发育过程中梨果质地测定方法比较分析

相关性分析结果与王燕霞等[3]的研究结果一

致,王斐等[16]和高海生等[13]研究发现,黏着性与果肉硬度和果皮硬度呈正相关,徐钰清等[2]研究发现,不同成熟期梨果单果重与SSC呈极显著负相关,该研究采样侧重成熟期不同阶段;本研究侧重生长发育阶段,单果重与SSC比值后期呈负相关。理化性状与质地性状相关,Qiu等[9]研究发现,TPA法测定的所有质地特征都与一种以上的理化性质显著相关,穿刺法测定的质地特征大多与理化性质无关。主成分分析结果表明,两种质地测试方法均能较好地反映生长发育阶段梨果实的质地信息。穿刺法与TPA法获得的质地参数指标与单果重和SSC存在明显相关性,可以很好地与单果重和SSC结合对梨果的果肉类型、成熟度等品质进行评价。Pearson相关性结果表明,TPA果肉硬度、破裂力、内聚性、胶粘性、咀嚼性、穿刺果实硬度、穿刺果肉硬度和果肉脆度两两相互之间呈极显著正相关。在冬枣质地研究中,就筛选出了弹性、粘附性、硬度和断裂度这4个代表性指标作为冬枣质地评价的因子[21]。在无花果中研究发现,果皮硬度、果皮韧性、果肉硬度和果肉韧性间相互影响,并对果实特性影响较大,在一定程度上较好地体现了果实的质地特性[12]。梨果肉质地的评价一般为描述性指标,缺乏数量化评价指标,而梨果的质地参数可以作为评价质地的量化指标,将相关性分析与主成分分析相结合可以更好地对梨果实的质地品质进行分类并提取出主要特征,同时通过品种间的质地参数比较进一步提出成熟期梨果的质地量化指标,如在第一主成分上有较大荷载的果实硬度、果肉硬度、破裂力、内聚性、胶粘性和咀嚼性。根据主成分分析结果,可以选择果肉硬度、破裂力、弹性和胶粘性建立成熟期果肉质地参数模型,用以评价梨品种果肉质地和成熟度判断,从而实现果肉质地的量化评价。

通过对整个生长发育阶段的8种梨果进行综合得分计算可知,软肉型梨果的得分均高于脆肉型梨果。由主成分分析图2可知,软肉型梨和脆肉型梨品种分隔明显,白梨系统的砀山酥梨、茌梨和鸭梨果肉质地特征相似性较强,秋子梨系统中的南果梨、京白梨和软儿梨果肉质地特征相似性较强。从地缘关系看,原产于北京近郊的京白梨与原产于辽宁鞍山的南果梨的地理位置最近,果肉质地相似性最近,与原产于甘肃的软儿梨地理位置和果肉质地相似性较近,而与德国引进的居特路易斯地理位置和果肉质地相似性最远;而原产于安徽砀山的砀山酥梨、原产于山东茌平的茌梨和原产于河北的鸭梨地理位置和果肉质地相似性较为相近,与原产于新疆库尔勒地区的'库尔勒香梨'地理位置和果肉质地相似性相对较远(图2)。关于库尔勒香梨的分类存在争议,俞德浚根据形态特征将库尔勒香梨归属于白梨系统,而分子标记聚类分析有两种不同研究结果,支持库尔勒香梨归属于新疆梨系统或白梨系统[22]。植物的表型会随着地理环境、光、温、水、气的影响,以及时间的推移而变化,并且个体之间存在差异[22]。库尔勒香梨作为欧洲梨与东方梨的杂交品种,得分差距与居特路易斯最大,表明库尔勒香梨的果肉质地性状与东方梨更接近,并且与秋子梨相比,库尔勒香梨的质地性状与白梨更接近。因此,穿刺法和TPA法获得的质地参数指标存在明显相关性,并且能客观反映软肉型梨与脆肉型梨以及不同梨品种间的差异。

4　结论

研究发现,随着梨果的发育成熟,多数质地参数呈整体下降趋势,不同类型梨果以及不同质地参数指标的变化趋势存在差异。软肉型梨果的TPA果肉硬度、破裂力、弹性、胶粘性、咀嚼性、穿刺果实硬度、穿刺果肉硬度和穿刺果肉脆度都比脆肉型梨果大,脆肉型梨果的粘附性比软肉型梨果大。本研究明确了软肉梨和脆肉梨果实质地动态变化规律,软肉梨和脆肉梨果实质地存在明显差异,可以利用成熟期果肉参数建立指标模型以量化评价果肉质地性状和果实成熟度。

参　考　文　献

[1]贺丽霞,王敏,黄忠民.质构仪在我国食品品质评价中的应用综述[J].食品工业科技,2011,32(9):446-449.
He L X, Wang M, Huang Z M. The application of texture analyzer on food quality evaluation in China[J]. Science and Technology of Food Industry, 2011, 32(9): 446-449.

[2]徐钰清,田路明,曹玉芬,等.7个梨品种不同熟期果肉质地评价分析[J].果树学报,2023,40(10):2112-2123.
Xu Y Q, Tian L M, Cao Y F, et al. Evaluation of flesh texture of seven pear varieties at different ripening stages[J]. Journal of Fruit Science, 2023, 40(10): 2112-2123.

[3]王燕霞,王晓蔓,关军锋.梨果肉质地性状分析[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.

[4]Lopez-Moreno H, Phillips M, Diaz-Garcia L, et al. A survey of key methods, traits, parameters, and conditions for measuring texture in cranberry (*Vaccinium macrocarpon* ait.) [J]. Horticulturae, 2023, 9(4): 479.

[5]Sirisomboon P, Tanaka M, Akinaga T, et al. Evaluation of the textural properties of Japanese pear [J]. Journal of Texture Studies, 2000, 31(6): 665-677.

[6]Singh V, Guizani N, Al-Alawi A, et al. Instrumental texture profile analysis (TPA) of date fruits as a function of its physico-chemical properties [J]. Industrial Crops and Products, 2013, 50: 866-873.

[7]刘丙花,王开芳,王小芳,等.基于主成分分析的蓝莓果实质地品质评价[J].核农学报,2019,33(5):927-935.
Liu B H, Wang K F, Wang X F, et al. Evaluation of fruit texture quality of blueberry based on principal component analysis[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2019, 33(5): 927-935.

[8]Lu X Q, He N, Anees M, et al. A comparison of watermelon flesh texture across different ploidy levels using histology and cell wall measurements[J]. Horticulturae, 2024, 10(2): 112.

[9]Qiu X, Zhang H N, Zhang H Y, et al. Fruit textural characteristics of 23 plum (*Prunus salicina* lindl) cultivars: evaluation and cluster analysis[J]. HortScience, 2021, 56(7): 816-823.

[10]周靖宇,薄艳红,解小锋,等.无花果果实质地测定参数优化及质地特性分析[J].经济林研究,2020,38(3):258-264.
Zhou J Y, Bo Y H, Xie X F, et al. Optimization of texture measurement parameters and characteristics analysis of fig fruit [J]. Non-wood Forest Research, 2020, 38(3): 258-264.

[11]徐钰清,田路明,曹玉芬,等.梨果肉质地及香气研究进展[J].果树学报,2023,40(4):757-770.
Xu Y Q, Tian L M, Cao Y F, et al. Research progress in flesh texture and aroma of pears[J]. Journal of Fruit Science, 2023, 40(4): 757-770.

[12]Camps C, Guillermin P, Mauget J C, et al. Data analysis of penetrometric force/displacement curves for the characterization of whole apple fruits [J]. Journal of Texture Studies, 2005, 36(4): 387-401.

[13]高海生,贾艳茹,魏建梅,等.用物性分析仪检测鸭梨和京白梨果实采后质地的变化[J].园艺学报,2012,39(7):1359-1364.
Gao H S, Jia Y R, Wei J M, et al. Studies on the post-harvested fruit texture changes of 'yali' and 'jingbaili' pears by using texture analyzer[J]. Acta Horticulturae Sinica, 2012, 39(7): 1359-1364.

[14]Zhang B C, Gao Y H, Zhang L J, et al. The plant cell wall: biosynthesis, construction, and functions [J]. Journal of Integrative Plant Biology, 2021, 63(1): 251-272.

[15]Poles L, Gentile A, Giuffrida A, et al. Role of fruit flesh cell morphology and MdPG1 allelotype in influencing juiciness and texture properties in apple [J]. Postharvest Biology and Technology, 2020, 164: 111161.

[16]王斐,姜淑苓,陈秋菊,等.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, et al. Changes in fruit texture of crisp-flesh pear during fruit ripening [J]. Journal of Fruit Science, 2016, 33(8): 950-958.

[17]魏建梅,马锋旺,关军锋,等.京白梨果实后熟软化过程中细胞壁代谢及其调控[J].中国农业科学,2009,42(8):2987-2996.
Wei J M, Ma F W, Guan J F, et al. Cell wall metabolism and its regulation in harvested *Pyrus ussuriensis* maxin. cv. jingbaili fruit during ripening[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2009, 42(8): 2987-2996.

[18]许娟,李疆,张校立,等.'库尔勒香梨'果实发育中细胞壁组分和水解酶活性的变化[J].果树学报,2015,32(6):1114-1117.
Xu J, Li J, Zhang X L, et al. Variations of cell wall components and hydrolase activity of 'Korla fragrant pear' during the fruit developmental stage [J]. Journal of Fruit Science, 2015, 32(6): 1114-1117.

[19]Hiruta T, Sasaki K, Hosoya N, et al. Firmness evaluation of postharvest pear fruit during storage based on a vibration experiment technique using a dielectric elastomer actuator[J]. Postharvest Biology and Technology, 2021, 182: 111697.

[20]Bai J H, Wu P S, Manthey J, et al. Effect of harvest maturity on quality of fresh-cut pear salad[J]. Postharvest Biology and Technology, 2009, 51(2): 250-256.

[21]Kong X B, Xu M, Wan H L, et al. Development of a texture evaluation system for winter jujube (*Ziziphus jujuba* 'Dongzao') [J]. Journal of Integrative Agriculture, 2022, 21(12): 3658-3668.

[22]田路明,董星光,曹玉芬,等.梨属植物分类研究进展[J].中国果树,2021(9):5-10.
Tian L M, Dong X G, Cao Y F, et al. Advances in the research on the taxa of *Pyrus* plants[J]. China Fruits, 2021(9): 5-10.

(编辑:韩志强)