



‘灵武长枣’果实发育过程中果肉质地与解剖结构的变化

院 钦^{1,2}, 杨四钰¹, 乔 帅¹, 任玉锋^{1,3}, 周 军^{1,3}, 张 欣^{1,3},
陈卫军⁴, 万仲武⁵, 魏天军⁶, 徐文娣^{1,3}, 王惠冉¹

(1. 北方民族大学 生物科学与工程学院, 银川 750021; 2. 上海师范大学 生命科学学院, 上海 200234;
3. 宁夏经济林遗传改良创新团队, 北方民族大学, 银川 750021; 4. 灵武市自然资源局, 宁夏灵武 750400;
5. 灵武市大泉林场, 宁夏灵武 750400; 6. 宁夏农林科学院 园艺研究所, 银川 750002)

摘 要 为探究‘灵武长枣’发育过程中枣果质地与解剖结构的变化特征及两者间关系。以国家地理标志品种‘灵武长枣’为试验材料, 利用质地剖面分析法(TPA)和石蜡切片法, 分析测定果实7项质地品质指标、10项显微结构指标, 并对果实基本性状进行测定。结果表明, ‘灵武长枣’果实成熟过程中, 以硬核期为转折点, 硬核期到半红期枣果实品质发生了显著变化, 如硬核期到膨大前期单果质量增幅412.3%、体积增幅403.7%, 且果实解剖结构与大部分质地参数显著相关。即随着果实成熟, 果实的单果质量、纵横径, 体积均增加; 果实硬度、脆度和胶粘性先增大后减小, 弹性、咀嚼性和粘附性呈上升趋势, 内聚性变化不显著。果皮变薄, 表皮细胞和薄壁细胞、维管束和空腔面积增大, 细胞排列变疏松, 成熟期口感变酥脆。角质层加厚, 果实抗损伤性加强。此外, 枣果表皮细胞中的质体也发生很大变化, 幼果期到半红期, 由叶绿体逐渐转变为有色体。进一步相关性分析表明, 果实硬度、弹性、咀嚼性和粘附性同枣果细胞形态参数存在不同程度的相关性, 粘附性与大部分果实细胞形态参数达极显著水平, 如粘附性与空腔面积呈极显著正相关($r=0.979$)。‘灵武长枣’果实发育过程中, 其果实品质发生显著变化, 其中果实细胞形态的动态变化显著影响其质地品质(硬度、弹性、咀嚼性、粘附性)。

关键词 灵武长枣; 果肉质地; 解剖结构; 细胞动态

‘灵武长枣’(*Ziziphus jujuba* ‘Lingwuchangzao’)是宁夏具有地方特色的优质鲜食枣品种, 作为宁夏灵武市国家地理标志产品, 其栽培历史悠久, 果肉琥珀色, 质地酥脆, 汁液多, 酸甜适口, 鲜枣可溶性固形物含量34%, 含糖量28%, 含酸量0.44%, 食味品质和营养价值高, 深受人们喜爱, 且经济效益明显^[1-3]。然而‘灵武长枣’果肉质地松脆的问题, 严重影响了‘灵武长枣’的品鉴品质, 影响‘灵武长枣’产业的快速发展, 近年来, 探讨‘灵武长枣’果肉质地松脆的机制, 改良枣果的果肉质地已成为‘灵武长枣’产业亟待解决的问题。

果实质地是评定果实品质的重要指标之一^[4-7], 影响到消费者对商品果实的选择^[8], 同时

也对果实运输、贮藏保鲜和货架期有显著影响^[9-10]。果实发育成熟过程中质地的形成也一直是园艺学和植物生理学领域普遍被重视的问题^[11]。果肉质地可以用质地参数进行客观地评价^[12], 毛叶枣^[13]、葡萄^[14]、苹果^[15]和梨^[16]等已进行了相关的研究。许玲等^[13]表明枣果皮强度极显著正相关于果皮脆性和韧性, 显著正相于果肉硬度, 果肉硬度与黏着性、回复性存在极显著负相关。王燕霞等^[17]发现梨果肉硬度、凝聚性、回复力和咀嚼性之间呈显著正相关。

此外, 果实质地主要由细胞大小、形状和细胞壁机械强度等微观因素决定^[18], 还受细胞壁代谢酶及相关基因表达量的影响^[19-22]。细胞大小、形状影响果蔬质地的相关研究已在葡萄^[23]、甜瓜^[8]

收稿日期: 2022-12-31 修回日期: 2023-03-21

基金项目: 宁夏农科院农业高质量发展与生态保护科技创新示范项目(NGSB-2021-1-02); 宁夏回族自治区经济林遗传改良创新团队基金(2022QCXTD04)。

第一作者: 院 钦, 男, 硕士研究生, 从事植物学研究。E-mail: 2976181029@qq.com

通信作者: 任玉锋, 女, 教授, 硕士生导师, 从事果实采后的生物学技术研究。E-mail: ren_yufeng@163.com

魏天军, 男, 研究员, 从事枣树新品种选育、高效栽培技术及枣果贮藏保鲜技术的研究与示范工作。E-mail: wtjunnx@qq.com

和马铃薯^[18]等中有所报道。贾楠等^[14]发现葡萄果肉细胞面积越大,硬度、咀嚼性越小。李三培等^[8]在甜瓜中发现细胞越小,排列越紧密,果肉质越硬;细胞越圆,口感越硬。Konstankiewicz等^[18]认为马铃薯块茎组织细胞面积对其质地有着显著影响,细胞越大,则块茎硬度越小。

目前,许多学者针对枣果裂果的原因及防治做了多方面研究^[24-26],但从细胞动态变化入手研究枣果发育过程中质地变化的研究鲜见报道。因此,本试验利用质地剖面分析(TPA)和石蜡切片技术,研究‘灵武长枣’从幼果期到半红期发育过程中枣果质地的变化,并对枣果细胞进行形态学观察,以期阐明不同时期枣果细胞显微结构的差异和与质地参数的相关关系。

1 材料与方法

1.1 材料

试验所用‘灵武长枣’材料于2021年7月7日至9月20日(幼果期到半红期)采自灵武市富成枣业(北纬38°06′,东经106°36′)的露地栽培园,株行距3 m×4 m,正常水肥管理。分别设置3个生物学重复,每个重复选取5棵管理得当、树龄一致、生长正常的枣树。试验前期,在枣树同一高度的东南西北4个方向,用红线绳标记。采样时,随机取无机械损伤、发育期一致的‘灵武长枣’果实,装入自封袋内,并置于采样箱中低温保存,于当天带回实验室,进行相关指标测定及处理。

1.2 方法

每个时期随机选取200~300个果实,进行果实生长指标、质地及解剖结构的观测,所有样品均设3个重复。

1.2.1 ‘灵武长枣’果实生长指标测定 单果质量:随机选取100个枣果,另选10个大果、10个小果,分别利用电子秤(WH-B09)测其总重,用以计算单果质量。果实纵横径:利用电子游标卡尺测量枣果纵横径,并计算果形指数。果实体积:参照曹建康等^[27]的排水法测定枣果体积。

1.2.2 ‘灵武长枣’果实质地测定 利用美国FTC公司-TMA-PRO食品性分析仪(质构仪)测定枣果质地指标,选用2 mm的探头,参数设置:测试速度30 mm·min⁻¹,形变百分量40%,触发力0.1 N,上升高度15 mm。将枣果沿垂直赤道部位紧贴果核位置切开,将切块置于质构仪托盘

上进行检测,通过电脑实时传输数据绘制曲线图^[28]。由质地特征曲线得到表征果实质地状况的评价参数:硬度、脆度、弹性、粘附性、胶粘性、咀嚼性、内聚性。每个果取最大横径处阴阳面2个部位,结果取平均值。

1.2.3 ‘灵武长枣’果实解剖结构的观察 每个生物学重复随机选取10颗枣果进行果实解剖结构的观察。采用石蜡切片法进行研究^[14],从果实赤道处垂直果皮切取大小约5 mm×5 mm×5 mm的小块(包含果皮和果肉),立即放入70% FAA固定液,抽气后固定48 h以上,送样于Servicebio公司制作石蜡切片。并用显微镜(Olympus,日本)观察果实细胞显微结构并拍照记录,每片观察10个视野,测量枣果实细胞形态学参数(角质层和表皮厚度、维管束面积、空腔面积、薄壁细胞纵横径等)。

1.3 数据处理

利用Excel 2010、SPSS Statistics 17.0进行数据统计及分析,结果用“平均值±标准误差”表示。采用单因素方差分析进行差异显著性检验,采用皮尔逊相关分析,计算质地指标和显微结构指标间的关系。

2 结果与分析

2.1 ‘灵武长枣’发育过程中果实生长指标的变化

由表1可知,随着‘灵武长枣’果实的成熟,果实的单果质量、纵横径、体积均增加,果形指数先增大后减小,最后维持在1.81左右。从硬核期到膨大前期单果质量的变化最显著,增重3.34 g,为硬核期单果质量的5.12倍。白熟期比膨大后期单果增重3.87 g,半红期比白熟期单果增重3.56 g。从幼果期到膨大前期果实的纵径和横径显著增加,分别增幅23.41 cm和11.6 cm,但果形指数显著下降。从幼果期到硬核期果实的单果质量、体积变化不显著,而果实的纵横径、果形指数显著增大。从硬核期到半红期果实的单果质量、体积变化显著。此外,白熟期到半红期枣果的质量、体积、纵径发生显著变化,但横径变化不显著,表明该阶段主要为枣果的纵向发育。果实的单果质量、纵横径、体积均呈现近似“S”型增长曲线(表1)。综合来看,‘灵武长枣’果实在成熟过程中,以硬核期为转折点,硬核期到半红期枣果实外观品质发生了显著变化。

表 1 不同发育时期‘灵武长枣’果实生长指标的比较

Table 1 Comparison of fruit growth indexes of *Ziziphus jujuba* ‘Lingwuchangzao’ at different development stages

发育时期 Development stage	单果质量/g Mass per fruit	纵径/mm Vertical diameter	横径/mm Transverse diameter	体积/cm ³ Volume	果形指数 Fruit shape index
幼果期 Young fruit stage	0.15±0.02 e	10.34±0.73 d	4.82±0.24 e	0.16±0.02 e	2.14±0.07 b
硬核期 Hard core stage	0.81±0.16 e	21.24±1.78 c	8.60±0.61 d	0.82±0.09 e	2.47±0.11 a
膨大前期 Early stage of expansion	4.15±0.46 d	33.75±0.36 b	16.42±1.26 c	4.13±0.12 d	2.07±0.18 bc
膨大后期 Late stage of expansion	5.57±0.78 c	33.02±1.87 b	19.95±1.02 b	8.07±0.33 c	1.66±0.03 d
白熟期 White ripening stage	9.44±0.48 b	37.12±1.63 b	22.62±0.42 a	11.43±0.95 b	1.64±0.05 d
半红期 Semi-red stage	13.00±0.56 a	44.37±1.05 a	24.55±0.20 a	14.17±0.24 a	1.81±0.05 cd

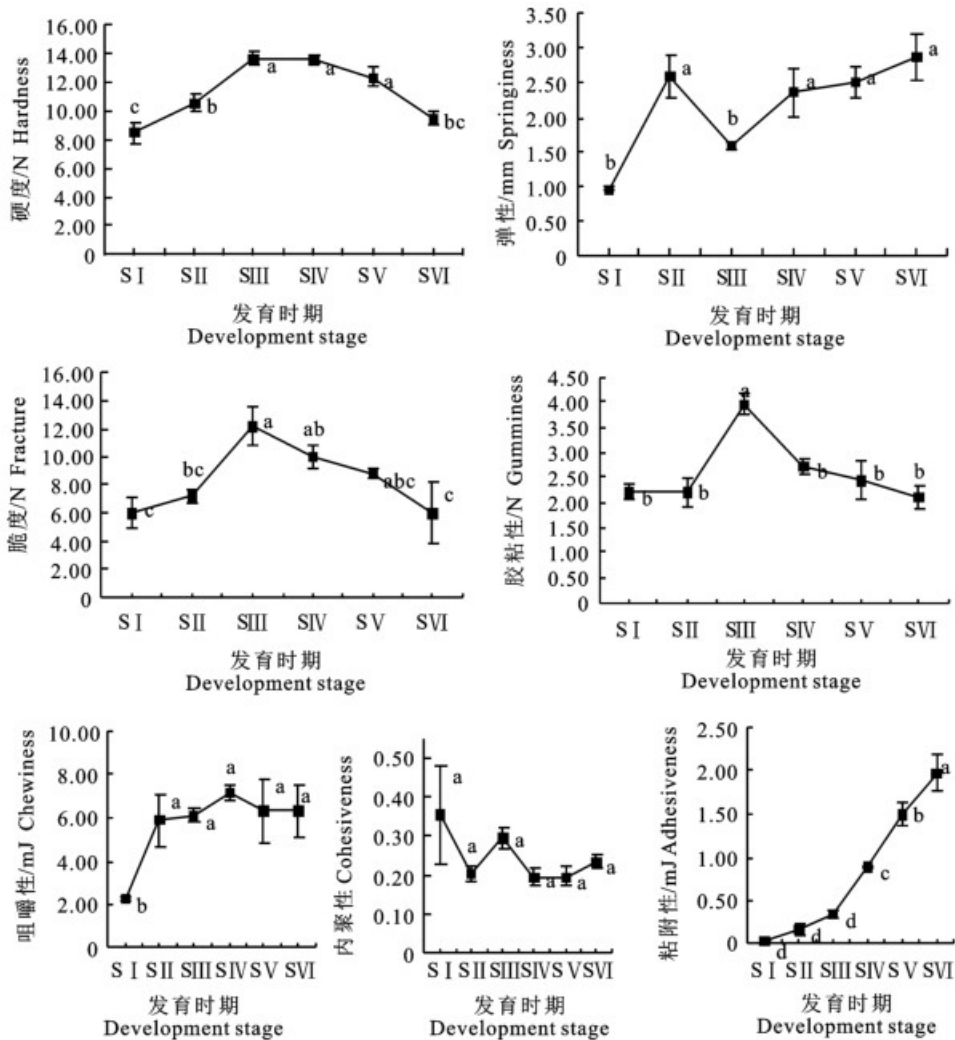
注:同一列不同小写字母表示在 $P<0.05$ 差异显著。下同。

Note: Different lowercase letters within the same column indicate significant differences at $P<0.05$. The same below.

2.2 ‘灵武长枣’发育过程中果实质地指标的变化

由图 1 可见,‘灵武长枣’果实成熟过程中,果实硬度先增大后减小,半红期枣果硬度为 9.50

N。幼果期到膨大前期果实硬度变化显著,膨大前期达到峰值 13.64 N,增幅 61.4%,膨大前期至白熟期果实硬度差异不显著。白熟期至半红期,



图中标有不同字母者表示差异显著 ($P<0.05$), 下同。SI, 幼果期; SII, 硬核期; SIII, 膨大前期; SIV, 膨大后期; SV, 白熟期; SVI, 半红期

Different lowercase letters in the figure indicate significant differences ($P<0.05$), the same below. SI, Young fruit stage; SII, Hard core stage; SIII, Early expansion stage; SIV, Late expansion stage; SV, White ripening stage; SVI, Semi-red stage

图 1 不同发育时期‘灵武长枣’果实质地指标的变化

Fig. 1 Changes in fruit texture indexes of *Ziziphus jujuba* ‘Lingwuchangzao’ at different developmental stages

果实硬度下降显著,降幅 22.8%。这表明,在果实白熟期后,果实开始软化。弹性、咀嚼性与粘附性变化规律一致,整体呈上升趋势,但果实粘附性变化较明显,且在膨大前期后持续显著增大,膨大前期到膨大后期增幅最大,为 161.8%。咀嚼性参数大小是硬度、弹性和内聚性三者的乘积,它综合反映了果实对咀嚼的持续抵抗性,从幼果期到硬核期硬度、弹性显著增加占据主导,使得咀嚼性到硬核期变化显著,硬核期后变化不显著。弹性为样品经过第一次压缩以后能够再恢复的程度^[29],硬核期、膨大后期、白熟期和半红期枣果的弹性差异不显著。脆度和胶粘性变化趋势一致,均在枣果膨大前期达到峰值,分别为 12.18 N、3.97 N(图 1)。内聚性为咀嚼时,果实抵抗受损,使果实保持完整的特性,能反映果实细胞间结合力的大小^[14]。内聚性在枣果成熟过程中变化不显著,整体呈下降趋势,这表明果实细胞间结合力在果实成熟过程中变化不显著。

2.3 ‘灵武长枣’发育过程中果肉细胞显微结构的变化

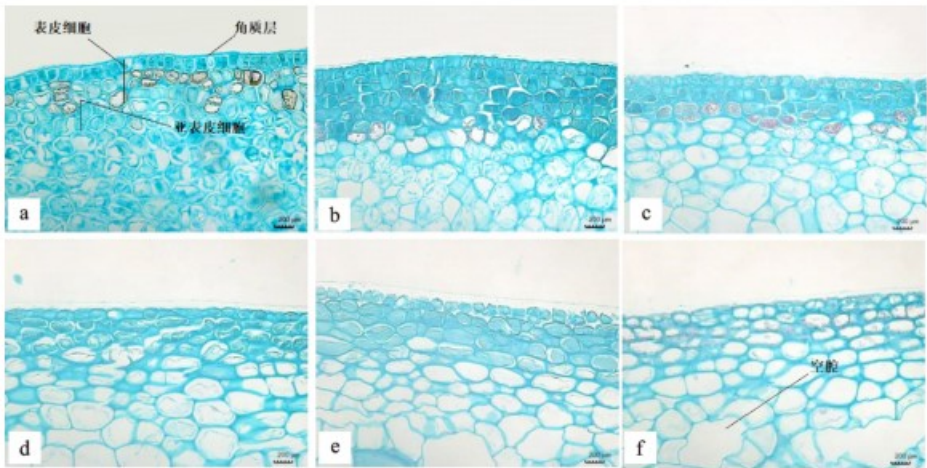
2.3.1 外果皮细胞显微结构的变化 ‘灵武长枣’果实为核果,由外果皮、中果皮和果核组成,外果皮由外向内依次为角质层、表皮细胞和亚表皮细胞^[30]。从果皮结构图(表皮和亚表皮)看,‘灵武长枣’果实的表皮和亚表皮在幼果期细胞排列较致密,细胞较小;在膨大前期细胞排列紧密,细胞大;膨大后期细胞排列较疏松,细胞较大(图 2、表 2)。角质层厚度随果实成熟而增厚,幼果期枣果的角质层厚度为 2.26 μm ,半红期为 9.15 μm 。膨大后期、白熟期、半红期枣果的角质层厚度差异不显著,维持在 8.94~9.15 μm 。在果实成熟过程中表皮细胞层数未发生变化,为 1 层;而表皮细胞厚度随着果实成熟有所增加,幼果期枣果的表皮细胞厚度为 73.61 μm ,半红期为 83.48 μm 。膨大后期、白熟期、半红期枣果的表皮细胞厚度差异不显著,整体在 81.53~83.48 μm 。在果实成熟过程中表皮细胞面积显著增加,幼果期枣果的表皮细胞面积为 253.61 μm^2 ,而半红期为 527.93 μm^2 ;亚表皮细胞面积也显著增加,由幼果期的 386.41 μm^2 ,生长到半红期的 735.94 μm^2 。以上表明,‘灵武长枣’果实在成熟过程中,角质层和表皮细胞厚度增加,果实抗损伤性加强,外果皮细胞层数减少,表皮细胞变得疏松,口感变酥脆。

由图 2 可见,从幼果期至半红期,枣果亚表皮

细胞中的质体会发生一个转变。从幼果期至膨大后期,在亚表皮细胞中沿细胞壁分布着大量的、呈颗粒状的叶绿体,使得枣果呈现绿色;白熟期亚表皮细胞中呈颗粒状的叶绿体逐渐解体消失,枣果呈现绿白色;半红期在亚表皮细胞中沿细胞壁分布着大量的、呈颗粒状的有色体,使得枣果逐渐呈现红色。

2.3.2 中果皮细胞显微结构的变化 中果皮是‘灵武长枣’果实的主要食用部分,主要由薄壁细胞和维管束组成。薄壁细胞在幼果期排列均匀紧密,细胞较小;从膨大前期至半红期,细胞排列不均匀松散,细胞较大(图 3、表 3)。薄壁细胞的面积从硬核期至半红期显著增加,由 578.74 μm^2 增大至 5 070.04 μm^2 ;其中,硬核期到膨大前期薄壁细胞面积增长幅度最大为 135.36%(表 3)。薄壁细胞纵径与薄壁细胞面积变化趋势一致,随着果实的成熟,从硬核期到半红期也显著增加,由 31.83 μm 至 104.98 μm ,且在硬核期至膨大前期涨幅最多,增长了 54.38%。薄壁细胞横径随着果实成熟也不断增加,由幼果期的 20.87 μm 增加至半红期的 61.75 μm ;在硬核期到膨大前期,果肉细胞横径增长幅度最大,增长了 46.96%。薄壁细胞纵横比在硬核期最小,比值为 1.39;在半红期最大,比值为 1.70,细胞近长圆形;表明薄壁细胞纵径增加幅度大于横径。在幼果期,‘灵武长枣’果肉薄壁细胞排列较紧密,细胞间隙较小,空腔小而密,同一视野下,维管束分布较多;随着果实成熟,果实不断变大,同一视野内,空腔、维管束数量减少,面积增大。维管束面积和空腔面积的变化规律一致,随着果实的成熟而不断增加,从膨大前期至膨大后期增幅最大,分别为 161.49%、992.17%。

由图 4 可见,幼果期维管束外被维管束鞘,由向心的两部分组成一个圆形,原生韧皮部存在于原生木质部两侧,之间存在束中形成层;随着果实的发育,维管束逐渐呈椭圆形至不规则形,后生木质部和后生韧皮部逐渐形成、增多,导管数目增多,孔径增大。另外,在中果皮薄壁细胞中还分布着一定数量的黏液仓(图 3),随果实的发育进程推进,黏液仓数量、大小也发生着变化。在同一视野下,幼果期黏液仓小而数量最多,随着果实的发育,从硬核期至白熟期,黏液仓逐渐增大而数量减少,至半红期解体消失。



a. 幼果期;b. 硬核期;c. 膨大前期;d. 膨大后期;e. 白熟期;f. 半红期。下同
a. Young fruit stage; b. Hard core stage;c. Early expansion stage;d. Late expansion stage;e. White ripening stage; f. Semi-red stage.
The same below

图 2 ‘灵武长枣’果实外果皮显微结构

Fig. 2 Microstructure of exocarp of *Ziziphus jujuba* ‘Lingwuchangzao’ fruit

表 2 不同发育时期‘灵武长枣’果实外果皮细胞形态的变化

Table 2 Changes in exocarp cell morphological parameter of *Ziziphus jujuba* ‘Lingwuchangzao’ fruit at different developmental stages

发育时期 Development stage	角质层厚度/ μm Cuticle thickness	表皮细胞厚度/ μm Thickness of epidermal cell	表皮细胞面积/ μm^2 Area of epidermal cell	亚表皮细胞面积/ μm^2 Area of sub- epidermis cell
幼果期 Young fruit stage	2.26 ± 0.16 d	73.61 ± 0.69 e	253.61 ± 6.62 e	386.41 ± 5.83 f
硬核期 Hard core stage	3.03 ± 0.22 c	78.53 ± 2.41 d	313.70 ± 5.94 d	477.97 ± 3.26 e
膨大前期 Early stage of expansion	8.20 ± 0.61 b	80.77 ± 0.51 cd	351.98 ± 19.09 c	586.65 ± 15.83 d
膨大后期 Late stage of expansion	8.94 ± 0.47 a	81.53 ± 0.56 bc	359.73 ± 23.68 c	636.08 ± 5.75 c
白熟期 White ripening stage	9.00 ± 0.21 a	82.17 ± 0.31 abc	447.12 ± 3.72 b	686.77 ± 9.18 b
半红期 Semi-red stage	9.15 ± 0.05 a	83.48 ± 0.94 ab	527.93 ± 6.69 a	765.94 ± 7.22 a

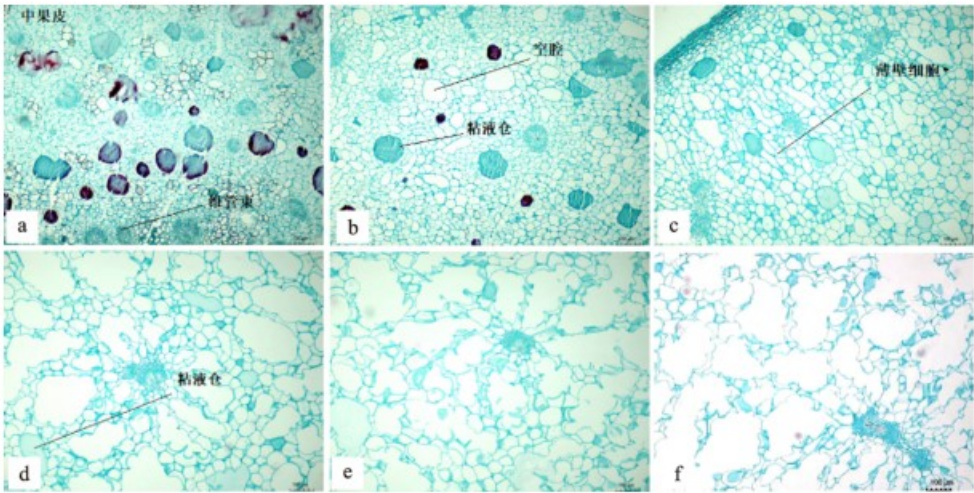


图 3 ‘灵武长枣’果实中果皮显微结构

Fig. 3 Microstructure of mesocarp of *Ziziphus jujuba* ‘Lingwuchangzao’ fruit

表 3 不同发育时期‘灵武长枣’果实中果皮细胞形态的变化
Table 3 Changes in mesocarp cell morphological parameter of *Ziziphus jujuba*
‘Lingwuchangzao’ fruit at different developmental stages

发育时期 Development stage	薄壁细胞纵径/ μm Vertical diameter of parenchymacell	薄壁细胞横径/ μm Horizontal diameter of parenchymacell	薄壁细胞纵横比 Aspectratio of parenchyma cell	薄壁细胞面积/ μm^2 Area of parenchyma cell	维管束面积/ μm^2 Area of vascular bundle	空腔面积/ μm^2 Area of cavity
幼果期 Young fruit stage	30.23 $\pm$ 0.93 e	20.87 $\pm$ 1.14 d	1.45 $\pm$ 0.04 ab	557.40 $\pm$ 16.14 e	4 926.86 $\pm$ 286.75 d	1 944.69 $\pm$ 57.03 d
硬核期 Hard core stage	31.83 $\pm$ 0.97 e	22.85 $\pm$ 0.86 d	1.39 $\pm$ 0.01 b	578.74 $\pm$ 13.58 e	6 267.80 $\pm$ 437.43 d	2 055.019 $\pm$ 73.72 d
膨大前期 Early stage of expansion	49.14 $\pm$ 3.87 d	33.58 $\pm$ 0.27 c	1.46 $\pm$ 0.11 ab	1 362.10 $\pm$ 56.09 d	7 318.06 $\pm$ 250.94 d	3 193.00 $\pm$ 138.58 d
膨大后期 Late stage of expansion	66.90 $\pm$ 3.21 c	45.00 $\pm$ 2.90 b	1.49 $\pm$ 0.03 ab	2 622.53 $\pm$ 74.52 c	19 136.11 $\pm$ 505.44 c	34 872.87 $\pm$ 2 557.48 c
白熟期 White ripening stage	78.84 $\pm$ 3.59 b	48.40 $\pm$ 3.81 b	1.63 $\pm$ 0.19 ab	3 209.19 $\pm$ 18.92 b	22 825.17 $\pm$ 1 493.72 b	64 268.71 $\pm$ 1 050.57 b
半红期 Semi-red stage	104.98 $\pm$ 2.18 a	61.75 $\pm$ 0.52 a	1.70 $\pm$ 0.02 a	5 070.04 $\pm$ 119.11 a	27 243.20 $\pm$ 1361.58 a	71 976.57 $\pm$ 2 384.20 a

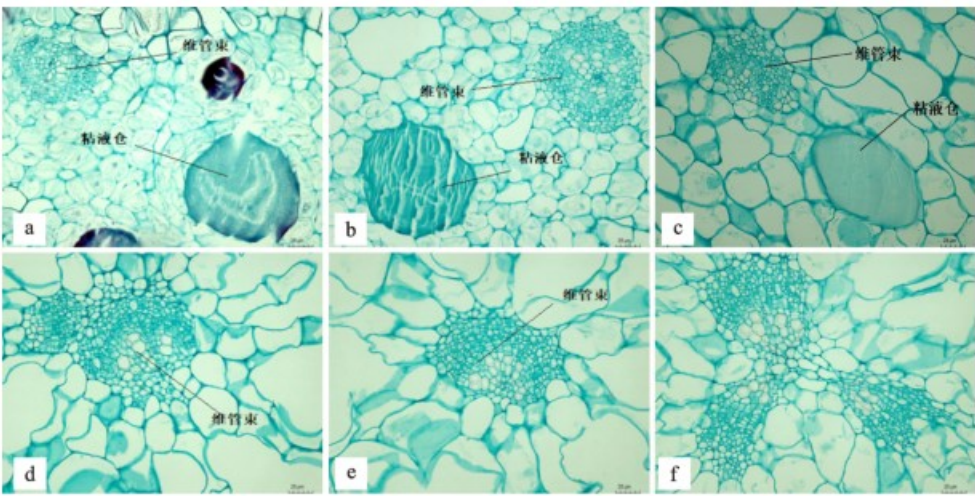


图 4 ‘灵武长枣’果实中果皮维管束显微结构

Fig. 4 Microstructure ofmesocarp vascular bundle of *Ziziphus jujuba* ‘Lingwuchangzao’ fruit

2.4 ‘灵武长枣’果实质地和显微结构指标的相
关性

由相关性分析可知(表 4),果实硬度与角质层厚度呈极显著正相关,与表皮细胞厚度呈显著正相关(硬度的相关系数分别为 0.593 和 0.491)。果实弹性与表皮细胞厚度、表皮细胞面积、亚表皮细胞面积、薄壁细胞纵径、薄壁细胞横径、薄壁细胞面积、维管束面积、空腔面积呈极显著正相关(弹性的相关系数分别为 0.688、0.701、0.669、0.618、0.651、0.627、0.661 和 0.632),与角质层厚度呈显著正相关(弹性的相关系数为 0.479)。果实脆度和胶黏性与表皮细胞面积、薄壁细胞纵径、薄壁细胞纵横比、薄壁细胞面积、维管束面积、空腔面积呈负相关($P>0.05$)。果实咀嚼性与角质层厚度、表皮细胞厚度、亚表皮细胞面积呈极显著正相关(咀嚼性的相关系数分别为

0.660、0.684 和 0.635),与表皮细胞面积、薄壁细胞纵径、薄壁细胞横径、维管束面积呈显著正相关(咀嚼性的相关系数分别为 0.502、0.475、0.555 和 0.479)。果实内聚性与表皮细胞厚度呈显著负相关(相关系数为-0.504)。果实粘附性与角质层厚度、表皮细胞厚度、表皮细胞面积、亚表皮细胞面积、薄壁细胞纵径、薄壁细胞横径、薄壁细胞面积、维管束面积、空腔面积呈极显著正相关(粘附性的相关系数分别为 0.759、0.750、0.945、0.915、0.966、0.958、0.702、0.973、0.968 和 0.979)。果实质地指标中,果实硬度、弹性、咀嚼性和粘附性同枣果解剖结构指标存在不同程度的相关性。综上所述,‘灵武长枣’果实成熟过程中,果实解剖结构对果实质地(硬度、弹性、咀嚼性及粘附性)有显著影响。

表 4 ‘灵武长枣’果实成熟过程中质地和显微结构指标的相关性

Table 4 Correlation between texture and microstructure indexes of *Ziziphus jujuba*

‘Lingwuchangzao’ during ripening

指标 Index	硬度 Hardness	弹性 Springiness	脆度 Fracture	胶粘性 Gumminess	咀嚼性 Chewiness	内聚性 Cohesiveness	粘附性 Adhesiveness
角质层厚度 Cuticle thickness	0.593 ^{**}	0.479 [*]	0.435	0.333	0.660 ^{**}	-0.345	0.759 ^{**}
表皮细胞厚度 Thickness of epidermal cell	0.491 [*]	0.668 ^{**}	0.26	0.139	0.684 ^{**}	-0.504 [*]	0.750 ^{**}
表皮细胞面积 Area of epidermal cell	0.088	0.701 ^{**}	-0.081	-0.15	0.502 [*]	-0.397	0.945 ^{**}
亚表皮细胞面积 Area of sub-epidermis cell	0.339	0.669 ^{**}	0.169	0.036	0.635 ^{**}	-0.437	0.915 ^{**}
薄壁细胞纵径 Vertical diameter of parenchyma cell	0.100	0.618 ^{**}	-0.042	-0.15	0.475 [*]	-0.343	0.966 ^{**}
薄壁细胞横径 Horizontal diameter of parenchyma cell	0.173	0.651 ^{**}	0	-0.082	0.555 [*]	-0.361	0.958 ^{**}
薄壁细胞纵横比 Aspect ratio of parenchyma cell	-0.036	0.279	-0.049	-0.262	0.083	-0.181	0.702 ^{**}
薄壁细胞面积 Area of parenchyma cell	0.035	0.627 ^{**}	-0.117	-0.21	0.454	-0.326	0.973 ^{**}
维管束面积 Area of Vascular bundle	0.112	0.661 ^{**}	-0.122	-0.282	0.479 [*]	-0.425	0.968 ^{**}
空腔面积 Area of cavity	0.029	0.632 ^{**}	-0.189	-0.333	0.411	-0.395	0.979 ^{**}

注 ** 表示在 0.01 水平极显著相关; * 表示在 0.05 水平上显著相关。

Note ** indicates a significant correlation at $P<0.01$; * indicates a significant correlation at $P<0.05$.

3 讨论

随着‘灵武长枣’果实的成熟,果实的单果质量、纵横径、体积均增加,符合‘灵武长枣’果实发育规律^[31]。果实的发育伴随着其质地品质的变化,而果实质地是评价果实品质的重要指标。采用 TPA 法进行质地分析,数据精确,可克服传统感官评价主观性强的缺点^[32]。本试验发现,‘灵武长枣’果实成熟过程中,果实硬度、脆度和胶粘性呈先上升后下降及总体呈下降趋势,而果实弹性、咀嚼性和粘附性呈上升趋势,果实内聚性变化不显著。表明‘灵武长枣’果实成熟过程中,其果实质地发生了显著变化,与前人在苹果^[20]、脆肉梨^[16]上研究结果一致,与葡萄果实质地有所差异,可能是浆果与核果发育存在差别^[14]。此外,与其他枣果实 TPA 分析结果相比存在一定差异,可能是不同品种枣果实在成熟发育过程中细胞壁物质降解特性存在差异的原因^[33]。此外,本试验研究结果表明,‘灵武长枣’果实质地发生变化转折点为硬核期,硬核期后,果实硬度、脆度、胶粘性 and 粘附性发生显著变化,而咀嚼性、内聚性变化趋于平缓。可能存在的原因:一方面,在硬核期后随着‘灵武长枣’果实内一系列生理、生化指标的不断变化,其中包括酸、可溶性固形物、淀粉、果胶等物质含量的变化^[14,34],可能影响枣果 TPA 分析。且有研究表明红枣微观结构变化与纤维成

分和糖类(蔗糖和还原糖)的浓度有关^[35]。另一方面,‘灵武长枣’果实成熟过程中,其果实细胞形态和分布发生很大变化。角质层和表皮细胞厚度增加,表皮细胞排列变疏松,细胞面积变大,细胞层数减少,在硬核期变化显著且幅度大。相关性分析表明,果实硬度、弹性、咀嚼性和粘附性与角质层厚度、表皮细胞厚度呈不同程度的显著正相关;果实弹性、咀嚼性与粘附性与果皮细胞(表皮、亚表皮)面积呈不同程度的显著正相关,其中果实粘附性与表皮细胞、亚表皮细胞面积的相关系数分别为 0.945、0.915。在幼果期‘灵武长枣’中果皮果肉薄壁细胞排列紧密,细胞间隙较小,空腔小而密,同一视野下,维管束分布较多;随着果实成熟,果实不断变大,果肉薄壁细胞排列变疏松,同一视野内,空腔、维管束数量减少,面积增大,这与前人的研究结果一致^[30]。薄壁细胞的纵径、横径及面积在硬核期也发生显著变化,而维管束、空腔面积在膨大前期发生显著变化。进一步相关分析表明,果实弹性、咀嚼性和粘附性与薄壁细胞的纵径、横径存在不同程度的显著正相关,果实弹性、粘附性与薄壁细胞面积、维管束面积和空腔面积存在极显著正相关关系。其中果实粘附性与角质层厚度、表皮细胞厚度、表皮细胞面积、亚表皮细胞面积、薄壁细胞纵径、薄壁细胞横径、薄壁细胞纵横比、薄壁细胞面积、维管束面积、空腔面积呈极显著正相关,相关系数的绝对值在 0.702 以上。

这表明外果皮厚度、薄壁细胞形状和大小、细胞疏松程度以及空腔和维管束大小对枣果实质地有显著影响。

本试验表明,随着果实进入成熟期果实质地变软,而果实软化通常是由硬度的降低引起的,在葡萄^[23]、甜瓜^[8]上发现表皮细胞排列越疏松、细胞越大的果实果肉质度越软,这与本研究结果相似。此外,在‘灵武长枣’果实成熟过程中,其果肉薄壁细胞变化与表皮细胞变化相一致,细胞变大,排列变疏松,这与在葡萄^[14]、苹果^[15]和桃^[36]上研究结果一致。此外,在马铃薯中同样发现,细胞越大其块茎硬度越小^[18]。已有研究表明在果实解剖结构中,细胞大小、细胞形状、细胞壁和细胞膜的化学成分以及细胞膨大的作用都会影响果实的坚实度^[37]。而本试验发现‘灵武长枣’果实硬度仅与角质层厚度、表皮细胞厚度显著相关。因此,在‘灵武长枣’中可能存在其他因素影响枣果实的坚实度,如细胞壁代谢情况、细胞膨大作用等,其差异性需进一步探究。

相关性分析结果表明,外果皮细胞形态参数(角质层厚度、表皮细胞厚度、表皮细胞面积及亚表皮细胞面积)与果实质地参数(硬度、弹性、咀嚼性、内聚性和粘附性)呈不同程度显著相关,而中果皮细胞形态参数(薄壁细胞纵径、薄壁细胞横径、薄壁细胞纵横比、薄壁细胞面积、维管束面积、空腔面积)与果实质地参数(弹性、咀嚼性和粘附性)呈不同程度显著相关。这表明‘灵武长枣’外果皮结构对枣果实硬度影响较大,而且果实粘附性与所有细胞形态参数达显著或极显著水平。在葡萄上发现果实细胞形态学参数与质地参数显著相关,其中大部分果实细胞形态学参数与其质地参数达到显著或极显著水平^[14],在有关甜瓜^[8]的试验中发现,只有粘着性、脆性与果肉细胞形态参数相关性较好,而马铃薯^[18]块茎细胞形状与其绝大部分质地参数不相关,这与本试验研究结果不一致。这可能与测样方法和果实品种不同有关,有必要在以后研究中增加其他枣品种做参考。

4 结 论

综上所述,‘灵武长枣’果实成熟过程中,以硬核期为转折点,硬核期到半红期果实品质发生了显著变化,且果实解剖结构与大部分质地参数显著相关。即随着果实成熟,果实的单果质量、纵横径、体积均增加;果实硬度、脆度和胶粘性先增大

后减小,弹性、咀嚼性和粘附性总体呈上升趋势,内聚性变化不显著。果皮变薄,表皮细胞和薄壁细胞、维管束和空腔面积增大,细胞排列变疏松,成熟期口感变酥脆。角质层加厚,果实抗损伤性加强。此外,枣果表皮细胞中的质体也发生很大变化,幼果期到半红期,先由叶绿体转变为白色体,最终形成有色体(红色),粘液仓数量也不断减少。进一步相关性分析表明,果实质地指标中,果实硬度、弹性、咀嚼性和粘附性同枣果解剖结构指标存在不同程度的相关性,其中粘附性与大部分果实细胞形态参数达极显著水平。因此,在今后‘灵武长枣’育种中,可结合果实细胞解剖形态对果实质地进行综合评价。此外,针对目前有关果实质地的研究,除细胞解剖结构外,加入了细胞壁代谢相关内容,这也与果实质地的变化息息相关。

参考文献 Reference:

- [1] 张振荣,谢志强,夏湛河,等. 灵武市长枣生产现状及对策[J]. 现代农业科技, 2015(1): 330, 338.
ZHANG ZH R, XIE ZH Q, XIA ZH H, et al. Current situation and countermeasures of jujube production in Lingwu city[J]. *Modern Agricultural Science and Technology*, 2015(1): 330, 338.
- [2] 马亚平,曹 兵,王 艳. ‘灵武长枣’土壤养分与果实品质间的相关性分析[J]. 经济林研究, 2017, 35(4): 105-111.
MA Y P, CAO B, WANG Y. Correlation analysis between soil nutrients and fruit quality in *Ziziphus jujuba* ‘Lingwuchangzao’[J]. *Nonwood Forest Research*, 2017, 35(4): 105-111.
- [3] MA Y, WANG Z, SONG L, et al. Fruit morphology measurements of jujube cultivar ‘Lingwu Changzao’ (*Ziziphus jujuba* Mill. cv. Lingwuchangzao) during fruit development[J]. *Horticulturae*, 2021, 7(2): 1-7.
- [4] SALADIÉ M, MATAS J A, ISAACSON T, et al. A reevaluation of the key factors that influence tomato fruit softening and integrity[J]. *Plant Physiology*, 2007, 144(2): 1012-1028.
- [5] GUNNESS P, KRAVCHUK O, NOTTINGHAM S, et al. Sensory analysis of individual strawberry fruit and comparison with instrumental analysis[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2009, 52(2): 164-172.
- [6] COSTA F, CAPPELLIN L, LONGHI S, et al. Assessment of apple (*Malus × domestica* Borkh.) fruit texture by a combined acoustic-mechanical profiling strategy[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2011, 61(1): 21-28.
- [7] 刘 莉,高 星,华德平,等. 不同的质构检测方法对甜瓜果肉质构的评价[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2016, 49(8): 875-881.
LIU L, GAO X, HUA D P, et al. Evaluation of the textural

- properties of melon flesh by different texture test methods [J]. *Journal of Tianjin University (Science and Technology)*, 2016, 49(8): 875-881.
- [8] 李三培, 华德平, 高 星, 等. 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, *et al.* Variation characteristics of flesh texture and cell microstructure of different types of melon during ripening[J]. *Acta Botany Boreali-Occidentalis Sinica*, 2017, 37(6): 1118-1125.
- [9] 阙超楠, 刘善军, 陈 明, 等. 不同采收期对‘翠冠’梨常温货架期果实色泽和质地的影响[J]. *江西农业大学学报*, 2018, 40(1): 49-55.
- KAN CH N, LIU SH J, CHEN M, *et al.* Effects of different harvest time on fruit color and texture of cuiguan pear during shelf life[J]. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis*, 2018, 40(1): 49-55.
- [10] PARMAR N, SINGH K H, SHARMA D, *et al.* Genetic engineering strategies for biotic and abiotic stress tolerance and quality enhancement in horticultural crops: A comprehensive review[J]. *Biotechnology*, 2017, 7(4): 239.
- [11] 陆胜民, 金勇丰, 张耀洲, 等. 果实成熟过程中细胞壁组成的变化[J]. *植物生理学通讯*, 2001(3): 246-249.
- LU SH M, JIN Y F, ZHANG Y ZH, *et al.* The changes of cell wall component during fruit maturation[J]. *Plant Physiology Journal*, 2001(3): 246-249.
- [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] 许 玲, 魏秀清, 章希娟, 等. 质构仪整果穿刺法评价 3 个毛叶枣品种果实质地参数[J]. *福建农业学报*, 2018, 33(6): 621-625.
- XU L, WEI X Q, ZHANG X J, *et al.* Instrumental measurements and texture evaluation on fruits from three varieties of *Zizyphus mauritiana*[J]. *Fujian Journal of Agricultural Sciences*, 2018, 33(6): 621-625.
- [14] 贾 楠, 尹勇刚, 李敏敏, 等. ‘玫瑰香’葡萄果实成熟过程中质地与解剖结构的变化[J]. *中国农业大学学报*, 2022, 27(2): 78-86.
- JIA N, YIN Y G, LI M M, *et al.* Changes in fruit texture and anatomical structure of ‘Muscat Hamburg’ grapevines during ripening[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2022, 27(2): 78-86.
- [15] 范献光. ‘瑞阳’、‘瑞雪’苹果及其亲本果实发育过程中质地差异的细胞学研究[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2017.
- FAN X G. Cytological studies on texture differences in fruit development of ‘Ruiyang’, ‘Ruixue’ and their parents [D]. Yangling Shaanxi: Northwest A&F University, 2017.
- [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 SH 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] 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.
- [18] KONSTANKIEWICZ K, ZDUNEK A. Influence of turgor and cell size on the cracking of potato tissue[J]. *International Agrophysics*, 2001, 14(2): 181-186.
- [19] 沈 颖, 李芳东, 王玉霞, 等. 甜樱桃果实发育过程中细胞壁组分及其降解酶活性的变化[J]. *果树学报*, 2020, 37(5): 677-686.
- SHEN Y, LI F D, WANG Y X, *et al.* A study on the variation of cell wall components and activities of their degradation enzymes in sweet cherry during fruit development[J]. *Journal of Fruit Science*, 2020, 37(5): 677-686.
- [20] 高溢艺, 范献光, 杨惠娟, 等. 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, *et al.* 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.
- [21] MING Q, ZE X, ZE H Z, *et al.* The down regulation of PpPG21 and PpPG22 influences peach fruit texture and softening[J]. *Planta*, 2021, 254(2): 22.
- [22] 高欢欢, 牛先前, 杨桂平, 等. 不同果肉质地枇杷果实发育过程中果胶代谢及相关基因表达分析[J]. *福建农业学报*, 2020, 35(7): 717-724.
- GAO H H, NIU X Q, YANG G P, *et al.* Pectin metabolism and related gene expressions during loquat fruit development[J]. *Fujian Journal of Agricultural Sciences*, 2020, 35(7): 717-724.
- [23] ZHANG C, FAN X C, LIU C H, *et al.* Anatomical berry characteristics during the development of grape berries with different shapes[J]. *Horticultural Plant Journal*, 2021, 7(4): 295-306.
- [24] 辛艳伟, 集 贤, 刘 和. 裂果性不同的枣品种果皮及果肉发育特点观察研究[J]. *中国农学通报*, 2006(11): 253-257.
- XIN Y W, JI X, LIU H. Observation and studies on peel and pulp growing characters of different crack in jujube fruit varieties[J]. *Agricultural Science & Technology*, 2006(11): 253-257.
- [25] 刘世鹏, 刘 申, 文 欣. 枣果肉解剖结构及其裂果性研究[J]. *北方园艺*, 2017(14): 32-38.
- LIU SH P, LIU SH, WEN X. Relations between anatomical structure and fruit cracking of jujube fruit[J]. *Northern Horticulture*, 2017(14): 32-38.
- [26] 王建宇. 枣裂果生理特征及转录组和蛋白组学分析[D].

- 新疆阿拉尔;塔里木大学,2020.
- WANG J Y. Physiological characteristics, transcriptome and proteomic analysis of jujube fruit cracking[D]. Aral Xinjiang; Tarim University, 2020.
- [27] 曹建康,姜微波,赵玉梅. 果蔬采后生理生化实验指导[M]. 北京:中国轻工业出版社,2007:24-32.
- CAO J K,JIANG W B,ZHAO Y M. Guidance on Physiological and Biochemical Experiments of Fruits and Vegetables after Harvest [M]. Beijing; China Light Industry Press,2007:24-32.
- [28] 杨植,王振磊. 基于 TPA 法评价枣果实质地及聚类分析[J]. 新疆农业科学,2019,56(10):1860-1868.
- YANG ZH,WANG ZH L. Evaluation of jujube fruit substance and cluster analysis based on TPA method [J]. *Xinjiang Agricultural Science*, 2019,56(10):1860-1868.
- [29] ALINA S S. Texture is a sensory property[J]. *Food Quality and Preference*, 2002,13(4):215-225.
- [30] 景红霞,章英才. ‘灵武长枣’果实发育结构特征研究[J]. 广西植物,2014,34(4):565-569,556.
- JING H X,ZHANG Y C. Structure characteristic of developmental fruit of *Zizyphus jujuba* cv. ‘Lingwuchangzao’ [J]. *Guhaia*, 2014,34(4):565-569,556.
- [31] 李悦,李程琛,曹兵,等. 设施栽培‘灵武长枣’果实成熟过程中品质变化规律研究[J]. 农业科学研究,2016,37(1):6-8,30.
- LI Y,LI CH CH,CAO B,*et al.* Studies on the fruit quality changes during ripening of ‘Lingwu long jujube’ under protected cultivation [J]. *Journal of Agricultural Sciences*, 2016,37(1):6-8,30.
- [32] 赵爱玲,薛晓芳,王永康,等. 质构仪检测鲜枣果实质地品质的方法研究[J]. 果树学报,2018,35(5):631-641.
- ZHAO A L,XUE X F,WANG Y K,*et al.* Measuring texture quality of fresh jujube fruit using texture analyser[J]. *Journal of Fruit Science*, 2018,35(5):631-641.
- [33] 禄彩丽,张梅,刘伟峰,等. 枣果质地发育动态分析[J]. 经济林研究,2019,37(3):119-127.
- LU C L,ZHANG M,LIU W F,*et al.* Analysis on development dynamics of jujube fruit texture[J]. *Non-wood Forest Research*, 2019,37(3):119-127.
- [34] 魏天军,窦云萍. ‘灵武长枣’果实发育成熟期生理生化变化[J]. 中国农学通报,2008,24(4):235-239.
- WEI T J,DOU Y P. Physiological-biochemical changes in developing jujube fruits (*Zizyphus jujuba* Mill. cv. Lingwuchangzao) [J]. *Agricultural Science & Technology*, 2008,24(4):235-239.
- [35] KAMAL E A,GEORGE N,SOBTI B,*et al.* Dietary fiber components, microstructure, and texture of date fruits (*Phoenix dactylifera*, L.) [J]. *Scientific Reports*, 2020, (1):21767.
- [36] 曹珂,王力荣,朱更瑞,等. 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,*et al.* Comparison of anatomical fruit structure in different types of peach during fruit development[J]. *Journal of Fruit Science*, 2009, 26(4):440-444.
- [37] JOHNSTON J W,HEWETT E W,MAARTEN L A T M H. Postharvest softening of apple (*Malus domestica*) fruit: A review[J]. *New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science*, 2002,30(3):145-160.

Changes in Pulp Texture and Anatomical Structure of ‘Lingwuchangzao’ (*Zizyphus jujuba*) during Fruit Development

YUAN Qin^{1,2}, YANG Siyu¹, QIAO Shuai¹, REN Yufeng^{1,3},
ZHOU Jun^{1,3}, ZHANG Xin^{1,3}, CHEN Weijun⁴, WAN Zhongwu⁵,
WEI Tianjun⁶, XU Wendi^{1,3} and WANG Huiran¹

(1. College of Biological Science and Engineering, North Minzu University, Yinchuan 750021, China; 2. College of Life Sciences, Shanghai Normal University, Shanghai 200234, China; 3. Ningxia Innovation Team for Genetic Improvement of Economic Forest, North Minzu University, Yinchuan 750021, China; 4. Lingwu Natural Resources Bureau, Lingwu Ningxia 750400, China; 5. Lingwu Daquan Forest Farm, Lingwu Ningxia 750400, China; 6. Ningxia Horticulture Institute of Ningxia Academy of Agricultural and Forestry Sciences, Yinchuan 750002, China)

Abstract The objective of this study was to explore the changes in fruit texture and anatomical structure and establish the correlation between them during the developmental stages of ‘Lingwuchangzao’, nationally recognized geographical indication product, was selected as the experimental material. Seven texture quality indexes and ten microstructure indexes of its fruit were analyzed and determined by using texture profile analysis (TPA) and paraffin section method. The fundamental fruit characters were also assessed. The results showed that throughout the ripening process of ‘Lingwuchang-

zao’, with the hard core stage as the turning point, there was a significant change in fruit quality from the hard core stage to the semi-red stage during the early stage of expansion, the single fruit mass increased by 412.3%, and the volume increased by 403.7%. The anatomical structure of the fruit showed significant correlations with most of the texture parameters. With the fruit ripening, the single fruit mass, vertical and horizontal diameter, and volume increased. The fruit hardness, fracture and gumminess increased at first and then decreased, springiness, chewiness and adhesiveness showed an upward trend, and the change of cohesiveness was not significant. The pericarp became thinner, the area of epidermal cells and parenchyma cells, vascular bundles and cavities increased, the arrangement of cells became more relaxed, and the taste became crisp at maturity. The stratum corneum was thickened and the fruit was more resistant to traumas. In addition, plastids in the epidermal cells of the fruit also changed greatly from chloroplasts to colored bodies during young fruit stage to semi-red stage. Further correlation analysis showed that fruit hardness, springiness, chewiness and adhesiveness were correlated with cell morphological parameters of the fruit in varying degrees, and the adhesiveness and most of the morphological parameters of the fruit cells reached a very significant level. For instance, there was a significantly positive correlation between adhesiveness and cavity area ($r = 0.979$). The fruit quality of ‘Lingwuchangzao’ changed significantly during fruit development, in which the dynamic changes of fruit cell morphology significantly affected its texture quality (hardness, springiness, chewiness and adhesiveness).

Key words *Ziziphus jujuba*; Pulp texture; Anatomical structure; Cell morphology

Received 2022-12-31

Returned 2023-03-21

Foundation item The Scientific and Technological Innovation and Demonstration Project for High-quality Agricultural Development and Ecological Protection of Ningxia Academy of Agricultural Sciences (No. NGSB-2021-1-02); Fund for Economic Forest Genetic Improvement Innovation Team of Ningxia Hui Autonomous Region (No. 2022QCXTD04).

First author YUAN Qin, male, master student. Research area: botany. E-mail: 2976181029@qq.com

Corresponding author REN Yufeng, female, professor, master supervisor. Research area: biological technology of postharvest fruit. E-mail: ren_yufeng@163.com

WEI Tianjun, male, research fellow. Research area: demonstration and breeding of new jujube varieties, efficient cultivation technology, storage and preservation technology of jujube fruit. E-mail: wtjunnx@qq.com

(责任编辑:潘学燕 Responsible editor: PAN Xueyan)