

不同超声波处理时间下蓝莓理化性质 及干燥品质变化的比较

刘凯^{1*}, 王菁¹, 张玲²

(1. 许昌职业技术学院园林与食品工程学院, 河南许昌 461000) (2. 河南水产科学研究院, 河南郑州 450040)

摘要: 为提高蓝莓的干燥速率及品质, 探究了不同超声时间 (400 W; 10、20 及 30 min) 对蓝莓的质地、细胞壁结构、果胶及纤维素酶活性、细胞壁多糖含量、水分状态及干燥特性与品质的影响。结果表明, 超声处理 20 min 及 30 min 蓝莓果实的硬度值明显下降 (其值分别为 4.33 N 及 3.99 N), 细胞壁变皱褶疏松, 果胶及纤维素酶活性明显下降。超声预处理促进了螯合态及碱溶态果胶向水溶态果胶转化, 水溶态果胶含量提高了 12.64%~34.36%。此外, 超声预处理提高了蓝莓自由水的自由度, T23 值由 231.88 ms (对照组) 提高至 344.56 ms (超声处理 20 min), 这促进了水分的向外迁移。相比于对照组, 超声预处理显著缩短了蓝莓中短波红外干燥时间 (缩短了 10.90%~27.24%), 提高了酚类物质的保留及抗氧化能力。此外, 超声处理 20 min 蓝莓的干燥时间最短 (22.7 h), 酚类物质保留率较高, 抗氧化能力较强, 是较为优良的超声预处理条件。综上, 超声波能够有效的提高蓝莓的干燥速率及产品品质, 对于蓝莓干燥具有一定的参考价值。

关键词: 蓝莓; 超声预处理; 理化特性; 干燥特性; 干燥品质

文章编号: 1673-9078(2026)2-247-254

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2026.2.1853

Comparison of the Physicochemical Properties and Drying Quality of Blueberry under Different Ultrasonic Treatment Times

LIU Kai^{1*}, WANG Jing¹, ZHANG Ling²

(1.College of Garden and Food Engineering, Xuchang Vocational and Technical College, Xuchang 461000, China)

(2.Henan Academy of Fisheries Science, Zhengzhou 450040, China)

Abstract: To enhance the drying rate and quality of blueberries, the effects of different ultrasonic treatment times (400 W; 10, 20, and 30 min) on the texture, cell wall structure, pectin and cellulase activities, cell wall polysaccharide content, moisture status, and drying characteristics and quality of blueberries were investigated. The results indicated that the hardness values of blueberries treated with ultrasound for 20 and 30 min significantly decreased (4.33 and 3.99 N, respectively); cell walls became wrinkled and loose, and the activities of pectin and cellulase were markedly reduced. Ultrasonic pretreatment facilitated the conversion of chelated and alkali-soluble pectin into water-soluble pectin, increasing its content by 12.64%~34.36%. Furthermore, ultrasonic pretreatment increased the mobility of free water in blueberries. The T23 value increased from 231.88 ms (control group) to 344.56 ms (ultrasonic treatment for 20 min), thereby promoting the outward migration of moisture. Compared with the control group, ultrasonic pretreatment significantly reduced the medium- and short-wave infrared drying time of blueberries by 10.90%~27.24%, and improved the retention of phenolic substances and antioxidant capacity. The optimal ultrasonic pretreatment time was 20 min,

引文格式:

刘凯,王菁,张玲.不同超声波处理时间下蓝莓理化性质及干燥品质变化的比较[J].现代食品科技,2026,42(2):247-254.

LIU Kai, WANG Jing, ZHANG Ling. Comparison of the physicochemical properties and drying quality of blueberry under different ultrasonic treatment times [J]. Modern Food Science and Technology, 2026, 42(2): 247-254.

收稿日期: 2024-12-13; 修回日期: 2025-02-05; 接受日期: 2025-02-14

基金项目: 河南省精品在线开发课程项目 (2022360208)

作者简介: 刘凯 (1979-), 女, 硕士, 副教授, 研究方向: 农产品加工及贮藏工程, E-mail: liukai7904@163.com

resulting in the shortest drying time (22.7 h), a higher retention rate of phenolic compounds, and stronger antioxidant capacity. In conclusion, ultrasonic treatment can effectively improve the drying rate and product quality of blueberries. The results of this study will facilitate future research on blueberry drying.

Key words: blueberry; ultrasonic pretreatment; physicochemical characteristics; drying characteristics; drying quality

蓝莓, 又名越橘, 属于杜鹃花科 (Ericaceae) 越橘属 (*Vaccinium* spp)^[1], 其果实富含维生素、花青素等多种营养成分, 同时还富含抗氧化活性成分, 被誉为“浆果之王”^[2]。蓝莓富含生物活性化合物, 主要是类黄酮和其他多酚化合物, 这些化合物赋予蓝莓强大的抗氧化特性, 具有广泛的生物功能活性^[3]。然而, 蓝莓具有明显的季节性, 其保质期较短, 极易腐烂变质, 干制能够延长其保存期, 是其重要的加工方式。

传统的热风干燥模式存在干燥时间较长, 热敏性活性成分降解严重等问题^[4]。因此, 为了解决这一问题, 开发了诸多先进的干燥方式, 如微波干燥、热泵干燥、真空冷冻干燥及红外干燥等^[5]。中短波红外干燥是利用 1~4 μm 的红外线, 基于物料中水分吸收红外线升温的原理, 对物料进行干制的一种新型干制技术。目前该技术已广泛应用至桑葚^[6]、红枣^[7]及苹果^[8]等的干燥中, 具有提高干燥速率及干燥品质的潜力。然而, 该干燥方式下物料与热源接触时间较长, 造成产品活性成分下降等问题仍不能忽视。因此需要引入合适的预处理方式进一步提高其干燥速率及产品品质。

在此背景下, 超声波成为食品干制领域一种良好的非热预处理方式。研究表明, 超声波利用产生的机械振动及空化效应, 通过解离细胞组织与水分的结合, 促进干燥过程中的水分迁移, 进而提高了干制品活性成分的保留。Zhang 等^[9]研究表明, 超声波能够促进草莓组织微孔道的形成, 这促进了水分的向外扩散。另一项针对桑葚的研究表明, 超声波通过破坏桑葚细胞壁结构, 提高了果实内部水分自由度, 促进了桑葚的干燥进程, 提高了干制品酚类物质的保留^[10]。果实组织软化与细胞通透性和物质传递速率密切相关, 细胞壁疏松能够促进水分迁移, 但组织结构过度破坏又会对其水分迁移产生负作用^[10]。目前, 关于超声波促进蓝莓干燥及其相关机制研究较少。基于此, 本研究利用超声波 (400 W, 40 kHz) 对蓝莓进行干燥前预处理, 探究不同干燥时间 (10、20 及 30 min) 对蓝莓果实结构、果胶酶及纤维素酶活性、细胞组织结构、细胞壁多糖含量、水分状态、干燥特性的影响, 并进一步对干制品酚类物质含量及抗氧化活性进行评价, 旨在为提高蓝莓干燥速率及品质, 促进蓝莓干制产业发展提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

蓝莓购自当地农贸市场, 品种为蓝丰, 挑选大小及色泽均匀的果实进行后续试验。

戊二醛、叔丁醇、乙醇、氢氧化钠、环己烷二胺四乙酸、碳酸钠、硼氢化钠、蒽酮、吡啶、乙酸钠、氯化钠、3,5-二硝基水杨酸、福林酚、1,1-二苯基-2-三硝基苯肼 (2,2-Diphenyl-1-picrylhydrazyl, DPPH) 及 2,2'-连氮基-双-(3-乙基苯并二氢噻唑啉-6-磺酸) 二铵盐 (2,2'-Azino-bis(3-ethylbenzthiazoline-6-sulfonic acid), diammonium salt; ABTS) 为分析纯 (纯度 > 99.2%), 购自天津市科密欧化学试剂有限公司; 没食子酸标准品为色谱纯 (纯度 > 99.7%), 购自阿拉丁试剂公司。

TA.XT Plus 型质构仪, 英国稳定微系统公司; JC-TP80-5A 型电子天平, 青岛精诚仪器仪表有限公司; S-3400N 型扫描电子显微镜, 日本日立公司; UV-1100 型紫外分光光度计, 日本岛津公司; NMI20 型低场核磁分析仪, 苏州纽迈分析仪器股份有限公司; KQ-700DE 型超声波处理机, 昆山超声波仪器有限公司; TC 型中短波红外干燥设备, 秦州圣泰科红外科技有限公司。

1.2 试验方法

1.2.1 超声预处理条件

将 8 kg 的蓝莓果实随机分为 4 组, 未经任何处理的果实为对照组记为 CK 组, 其余 3 组为超声波处理组。超声条件: 频率为 40 kHz, 功率为 400 W, 温度为 25 $^{\circ}\text{C}$, 使用 6 L 蒸馏水作为处理介质, 分别处理 10、20 及 30 min, 超声处理组分别记为 US-10、US-20 及 US-30。超声波参数根据前期试验优化得出, 所有处理组均进行了三次独立试验。

1.2.2 果实质构测定

蓝莓质构参数的测定参考 Wang 等^[11]方法进行, 简言之, 利用压缩模式, 使每个样品经过两次压缩循环, 得到蓝莓果实的硬度 (N)、胶着性 (N) 及咀嚼性 (N) 参数。每次测定随机选择 30 枚蓝莓样品, 以确保结果可靠并具有代表性。

1.2.3 果肉组织细胞微观结构表征

利用扫描电子显微镜对蓝莓果皮及果肉组织微观结构进行观察,样品的固定、干燥及观察的具体步骤参考 Yao 等^[12]报道的方法进行。

1.2.4 果胶酶及纤维素酶活性测定

多聚半乳糖醛酸酶 (Polygalacturonase, PG)、 β -半乳糖苷酶 (β -galactosidase, β -gal) 及纤维素酶 (Cellulase, Cel) 的提取及测定步骤参考 Jia 等^[13]方法进行。利用紫外分光光度计分别在 540、400 和 540 nm 处测定样品吸光度,以每小时分别生成 1 g 半乳糖醛酸、1 mol 对硝基苯酚和 1mg D-葡萄糖所需的酶量为 PG、 β -gal 及 Cel 活性单位。果胶甲酯酶 (Pectin methylesterase, PME) 的提取及测定步骤参考 Wang 等^[14]方法进行,利用紫外分光光度计在 620 nm 处测定样品吸光度,以 $\Delta\text{OD}\cdot\text{min}^{-1}$ 为一个 PME 活性单位。PG、 β -gal、Cel 及 PME 活性单位以 $\text{U}\cdot\text{g}^{-1}$ 表示。

1.2.5 细胞壁多糖含量测定

参照 Wang 等^[14]描述的方法,从蓝莓果肉中提取果胶、半纤维素和纤维素。首先提取的是醇不溶性残渣,后依次提取水溶态果胶 (Water-soluble Pectin, WSP)、螯合态果胶 (Chelating-soluble Pectin, CSP)、碱溶态果胶 (Na_2CO_3 -soluble Pectin, NSP)、半纤维素及纤维素。

利用紫外分光光度计在 520 nm 的波长处测定样品的果胶含量;使用蒽酮比色法在 620 nm 的波长处测定纤维素和半纤维素含量,测定具体步骤参考 Zhang 等^[15]报道方法进行。

1.2.6 水分状态测定

利用低场核磁分析仪 (20 MHz) 对蓝莓水分状态进行分析^[16],磁场强度为 0.5 T,分析温度为 35 $^{\circ}\text{C}$,将蓝莓完整地放入扫描仪内进行分析。利用 Carr-Purcell-Meiboom-Gill 脉冲序列评估质子横向弛豫时间 (T_2) 的衰减。

1.2.7 干燥条件

依据前期预实验结果,在最佳干燥条件下对蓝莓进行中短波红外干燥,干燥机预热至所设温度后,将不同处理组蓝莓平铺于干燥室内进行干燥,干燥终止条件为果实水分比 (Moisture Ratio, MR) 低于 0.15^[6]。干燥条件:仪器功率为 1 125 W;干燥温度为 60 $^{\circ}\text{C}$;干燥风速为 2 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$;辐射距离为 12 cm。利用电子天平每隔 3 h 对果实进行称量来监测蓝莓干燥过程中水分的损失。将蓝莓置于 105 $^{\circ}\text{C}$ 烘箱中干制至恒重,测得蓝莓初始湿基含水率为 85.3%。

干燥过程中蓝莓的含水量 (M_t) 计算公式见公式 (1); MR 计算如公式 2 所示^[6]。干制结束后,样品利用风扇快速冷却至室温并置于 -80 $^{\circ}\text{C}$ 冰箱中进行进一步的品质分析。

$$M_t = \frac{W_t - G}{G} \quad (1)$$

$$M_R = \frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e} \quad (2)$$

式中:

W_t ——蓝莓干燥至 t 时刻的总质量, g;

M_R ——果实水分比 (MR);

G ——蓝莓干物质质量, g;

M_0 、 M_t 、及 M_e ——分别为初始时间、干燥至 t 时间及干燥至平衡时的蓝莓含水量, $\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 。

1.2.8 总酚、总花青素含量及抗氧化能力测定

酚类物质提取参考 Wang 等^[10]描述的方法进行。总酚和总花青素含量的测定分别采用福林酚比色法和 pH 差示法进行^[10]。蓝莓抗氧化能力的测定采用 DPPH 自由基清除法及 ABTS⁺ 自由基清除法进行,具体测定步骤参考刘威良等^[17]方法进行。

1.2.9 数据分析

数据结果以三次及以上独立试验的平均值 $\pm$ 标准差表示。利用 SPSS 17.0 进行数据处理,方差分析采用邓肯检验进行分析,其中 $P < 0.05$ 表示差异显著。

2 结果与分析

2.1 超声预处理对蓝莓果实质构参数的影响

果实质构参数是影响其加工特性的关键因素。超声预处理前后蓝莓果实的硬度、胶着性及咀嚼性如图 1 所示。未处理蓝莓的硬度、胶着性及咀嚼性值最高,其值分别为 6.55、3.19 及 1.83 N。随着超声处理时间的延长,蓝莓的硬度、胶着性及咀嚼性值呈现下降趋势。US-20 及 US-30 处理组蓝莓的硬度值、胶着性及咀嚼性值显著低于对照组 ($P < 0.05$)。相较于对照组而言,超声处理组果实的硬度、胶着性及咀嚼性值分别下降了 10.38%~52.82%、5.64%~33.86%、4.37%~36.07%。肖亚冬等^[1]研究表明蓝莓果实经超声波处理后其细胞膜渗透率为 85% 以上,这表明蓝莓果肉细胞经超声处理后细胞明显损伤,这也会导致果实硬度的降低。此外,研究表明,超声波能够破坏细胞组织结构而影响果实质地,这与处理时间密切相关^[10]。对于蓝莓而言,超声波引起的质地变化可能与空化效应引起的细胞壁损伤有关^[18]。超声波空化效应促进了果实细胞壁的软化和结构破坏,导致果肉组织中果胶类物质的转化,从

而影响了胶着性^[10]。而在咀嚼性方面，超声波处理同样表现出改善的趋势，尤其是较长时间的超声波处理能有效减少果实的硬度，使其口感更加柔软易咀嚼。

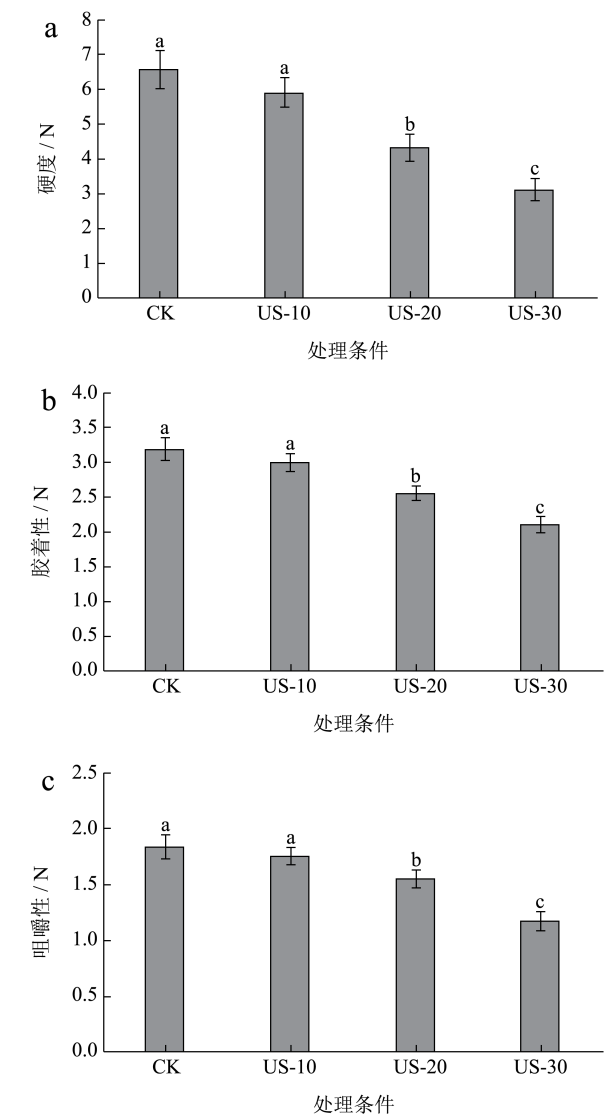


图 1 超声预处理对蓝莓果实质构的影响

Fig.1 The effect of ultrasonic pretreatment on texture of blueberries
注：(a) 硬度；(b) 胶着性；(c) 咀嚼性。柱上不同小写字母代表数据具有显著性差异 ($P<0.05$)。图 3、4 同。

2.2 超声预处理对蓝莓组织微观结构的影响

超声处理前后蓝莓果皮(图 a~d)及果肉(图 e~h)微观结构变化如图 2 所示。新鲜蓝莓的果皮覆盖着一层较厚的蜡质层，呈现凹凸不平的结构，蜡质层的存在能够有效保护内部果肉减少病原微生物侵害。不同超声时间下蓝莓果皮微观结构并未出现明显变化，这表明果实蜡质层能够很好地抵抗超声波的空化作用。相关研究表明，桑葚经超声处理后其表皮出现明显褶皱，但未观察到表皮破损^[10]。农产品原料的差异能够

解释蓝莓与桑葚处理效果的不同。

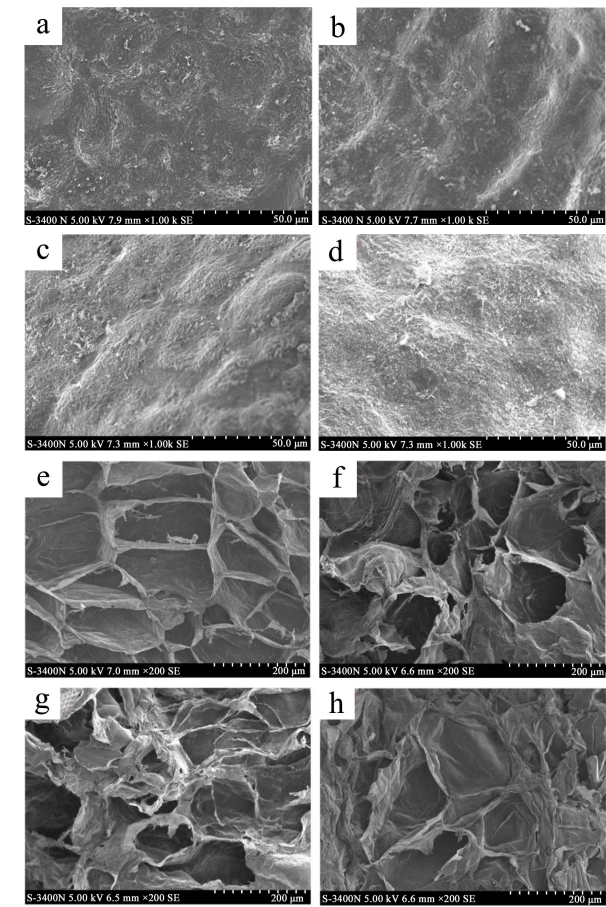


图 2 超声预处理对蓝莓组织微观结构的影响

Fig.2 Effect of ultrasound pretreatment on the microstructure of blueberry tissue

注：a 为 CK 组，b~d 分别为 US-10、US-20、US-30 组；e 为 CK 组，f~h 分别为 US-10、US-20、US-30 组。图 a~d 为蓝莓果皮组织微观结构 ($\times 1\,000$ 倍)；图 e~h 为蓝莓果肉组织微观结构 ($\times 200$ 倍)。CK 为未处理对照组；US-10 为超声波处理 10 min；US-20 为超声波处理 20 min；US-30 为超声波处理 30 min。

未经处理蓝莓果肉组织结构致密，细胞壁紧密连接呈现出蜂窝状结构，细胞内壁皱褶较少。随着超声处理时间的延长，细胞壁逐渐变疏松，并产生大量的褶皱结构，这预示着细胞壁支撑能力减弱。值得注意的是，US-30 处理组细胞结构皱褶严重，并出现塌陷，几乎观察不到其果肉组织呈现的典型蜂窝状结构。先前研究表明，蓝莓果实经超声处理后内部细胞结构破损严重，细胞壁断裂，形成较大微通道^[1]。相关研究表明，果实细胞壁适当破坏会降低组织与水的结合能力，促进水分向外扩散，但过度塌陷会影响水分在干燥过程中的向外迁移进程，降低干燥速率^[19]。超声处理后细胞壁产生的明显变化预示着其支撑能力下降，这也符合超声后果实硬度下降的规律。

2.3 超声预处理对蓝莓果胶酶及纤维素酶活性的影响

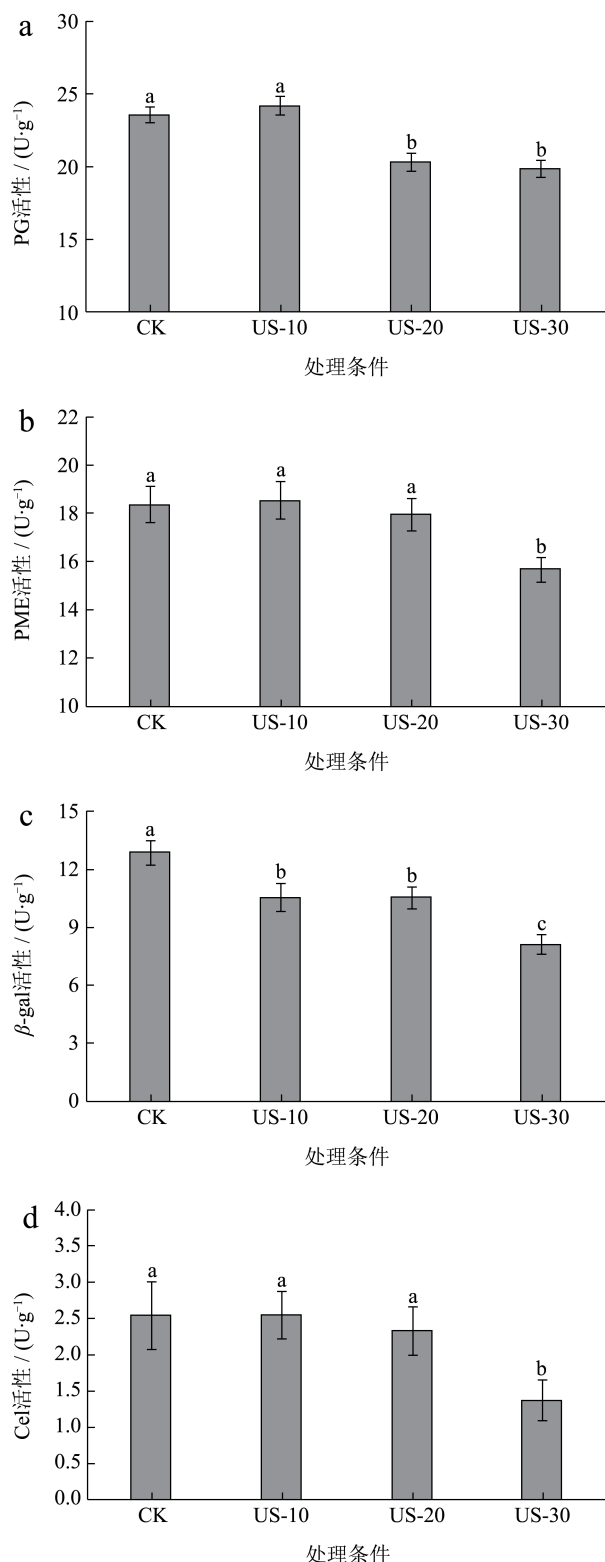


图3 超声预处理对蓝莓果肉果胶酶及纤维素酶活性的影响

Fig.3 Effect of ultrasound pretreatment on pectinase and cellulase activity of blueberry pulp

超声预处理对蓝莓果肉果胶酶及纤维素酶活性的

影响如图3所示。PG、PME、 β -gal和Cel是调节细胞壁代谢的关键酶类，在诱导细胞壁多糖降解的过程中扮演重要角色。首先PME通过将果胶去甲酯化为PG提供合适的底物，PG通过损伤细胞壁中胶层的完整性来特异性的影响果实质地^[20]。 β -gal作为一种糖苷水解酶，可以降解果胶侧链半乳糖残基和 β -1,4-半乳糖键，导致细胞壁结构的进一步损伤。此外，Cel是一种能够降解纤维素和半纤维素的酶。这些酶互相协同影响果实质地。随着超声处理时间的延长，PG、PME、 β -gal和Cel活性呈现总体下降趋势，其活性分别由23.56 U·g⁻¹下降至19.89 U·g⁻¹，由18.36 U·g⁻¹下降至15.67 U·g⁻¹，由12.88 U·g⁻¹下降至8.12 U·g⁻¹，由2.54 U·g⁻¹下降至1.37 U·g⁻¹。对于PG活性而言，超声处理20 min及30 min后其活性显著下降($P < 0.05$)，而PME及Cel活性则在处理30 min时下降明显($P < 0.05$)。所有超声处理组果实的 β -gal活性均低于未处理对照组。相关研究表明，超声波空化效应能够促使酶多肽链中氨基酸残基改变及氢键断裂，这导致蛋白质构象发生变化，这导致了酶催化活性的改变^[21]。值得注意的是，与对照组相比，US-10处理组蓝莓果实PG及PME活性略有升高。Lena等^[21]研究结果表明，低强度超声处理能够提高部分果胶酶的活性，这与其处理后 β 折叠构象增加，活性位点暴露有关。此外，长时间超声波处理则会显著降低果胶酶及纤维素酶活性。盖芸芸等^[22]针对猕猴桃的相关研究表明，超声处理(300 W, 30 min)使得猕猴桃的PG及PME活性下降了10%以上，这与超声空化效应带来的强剪切力及产生的自由基能够破坏酶的结构，造成其活性下降有关^[22]。因此，前期观察到蓝莓细胞壁结构的变化主要原因为超声空化效应造成的机械损伤，而非超声造成果胶及纤维素酶活性升高所致。

2.4 超声预处理对蓝莓细胞壁多糖含量的影响

果胶、纤维素及半纤维素是细胞壁最主要的组成成分，这三类多糖含量的变化与细胞壁结构特性密切相关。根据果胶的溶解性，可分为三种类型(WSP、CSP及NSP)。WSP是指通过非共价或非离子相互作用与其他细胞壁形成松散结合的果胶聚合物，而CSP和NSP分别表示与细胞壁通过离子和共价键连接的果胶多糖^[23]。超声波预处理对蓝莓细胞壁多糖含量的影响如表1所示。与超声处理组相比，未经处理对照组中CSP及NSP含量较高，WSP含量较低。随着超声时间的延长，WSP含量迅速升高，由176.82 mg·kg⁻¹ FW升高至237.57 mg·kg⁻¹ FW，而CSP及NSP含量迅速降低，CSP含量由85.29 mg·kg⁻¹ FW降低至64.37 mg·kg⁻¹ FW，NSP

含量由 258.66 mg·kg⁻¹ FW 降低至 175.59 mg·kg⁻¹ FW。关于桑葚的一项研究表明, 超声处理 (300 W, 30 min) 显著提高了果实的 WSP 含量 (提高了 25% 以上), 并降低了 CSP 及 NSP 含量^[10]。Xing 等^[24]研究结果表明, WSP 含量与 CSP 和 NSP 含量之间存在显著负相关性, 这预示着超声处理促进了与细胞壁组织紧密结合的果胶向连接松散的果胶转化, 这是超声波处理后细胞壁结构变疏松, 果实硬度值下降的主要原因。此外, 与对照组相比, 仅在 US-30 处理组中观察到了半纤维素含量的显著降低 ($P<0.05$), 而所有处理组纤维素含量均无显著性变化 ($P>0.05$), 这表示半纤维素及纤维素抵抗超声波空化效应的能力较强。

2.5 超声预处理对蓝莓果实水分状态的影响

低场核磁技术是一种快速、有效、非侵入性的解析食品内部水分状态的新型技术。质子横向弛豫时间 T2 主要用于表征蓝莓果实内部水分的状态及其变化^[1]。T2 反映了果实中水分分布的异质性, T2 值越高代表水分自由度越高, 通过测量 T2, 能够区分自由水、半结合水以及结合水的变化^[24], 这为理解超声波处理过程中蓝莓果实的水合作用和结构变化提供了重要的依据。研究表明, 蓝莓中自由水含量较高 (>90%), 而 T23 值则对应自由水的弛豫时间^[24], 因此探究超声处理前后 T23 值的变化能够很好的反应蓝莓果实水分状态的改变。超声预处理对蓝莓果实 T23 值的影响如图 4 所示。随着超声处理时间的延长, 蓝莓果实 T23 值呈现总体升高的趋势, CK 组 T23 值最低为 231.88 ms, US-20 组 T23 值最高为 344.56 ms。相关研究表明, 超声波处理能够显著提高蓝莓果实的 T2 值, 特别是 T23 值提高了 30% 以上^[1], 这是由于超声处理改变了蓝莓的细胞结构, 导致水分在细胞内重新分布, 且减小了蓝莓内水分的结合力, 弛豫时间整体增加。较高的 T23 值预示着氢质子的自由度较高, 自由水与细胞组织的结合力较弱, 这有助于干燥

过程中水分的脱除^[10]。此外, 相较于 US-20 处理组, US-30 处理组 T23 值显著降低 ($P<0.05$), 这可能与过度超声造成组织结构过度破坏有关。前期观察到 US-30 处理组蓝莓果肉组织细胞壁严重塌陷的结果也证实了这一点。

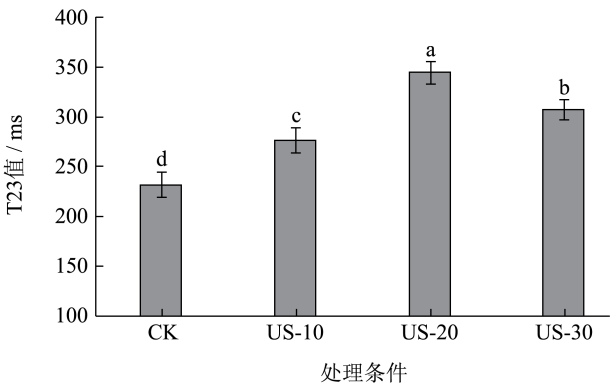


图 4 超声预处理对蓝莓 T23 值的影响
Fig.4 Effect of ultrasound pretreatment on T23 values of blueberry

2.6 超声预处理对蓝莓果实干燥特性的影响

不同超声处理时间下蓝莓果实的水分比随干燥时间的变化如图 5 所示。与未处理对照组相比, 相同干燥时间下超声处理组 MR 下降最快, 这表示其具有较快的干燥速率。CK、US-10、US-20 及 US-30 处理组的总干燥时间分别为 31.2、27.8、22.7 及 24.4 h, 其中 US-20 处理组具有最快的干燥时间。相较于对照组, 超声处理组显著缩短了 10.90%~27.24% 的干燥时间。研究表明, 超声波产生的空化效应促进了细胞壁果胶的降解, 使得细胞壁结构疏松, 水分更易向外扩散, 这是超声处理组蓝莓干燥时间较短的主要原因^[25]。值得注意的是, 相较于 US-20 处理组, US-30 处理组干燥时间较长, 这可能与过度超声引起细胞壁过度损伤造成水分自由度下降有关。Wang 等^[11]针对桑葚的研究表明, 适当的超声时间能够显著提高桑葚的干燥速率, 而过度超声则会显著增加桑葚的干燥时间, 图 2 及图 4 中观察到的结果也证实了这一猜想。

表 1 超声预处理对蓝莓细胞壁多糖含量的影响 (mg·kg⁻¹ FW)

Table 1 Effect of ultrasound pretreatment on the polysaccharide content of the blueberry cell wall (mg·kg⁻¹ FW)

处理组	WSP	CSP	NSP	半纤维素	纤维素
CK	176.82 ± 6.19 ^d	85.29 ± 7.65 ^a	258.66 ± 10.58 ^a	214.33 ± 11.37 ^a	336.89 ± 13.22 ^a
US-10	199.17 ± 4.38 ^c	80.35 ± 3.87 ^a	228.15 ± 7.56 ^b	213.66 ± 5.73 ^a	335.37 ± 12.19 ^a
US-20	217.56 ± 5.72 ^b	72.33 ± 3.45 ^b	188.66 ± 4.12 ^c	210.56 ± 4.72 ^a	334.18 ± 10.19 ^a
US-30	237.57 ± 5.66 ^a	64.37 ± 2.83 ^c	175.59 ± 5.12 ^d	185.63 ± 4.18 ^b	335.27 ± 9.18 ^a

注: 同列不同行小写字母肩标代表数据具有显著性差异 ($P<0.05$)。

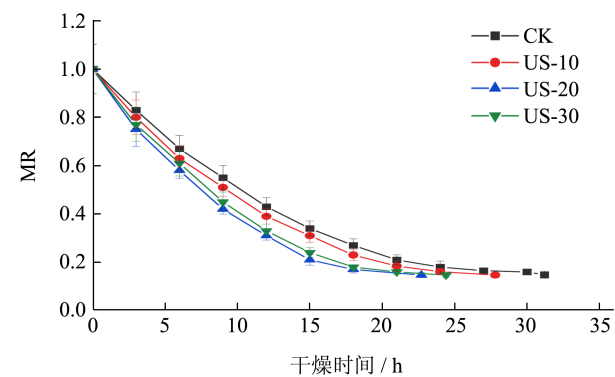


图 5 超声预处理对蓝莓干燥过程 MR 值的影响

Fig.5 Effect of ultrasound pretreatment on the MR value of the blueberry during drying

2.7 超声预处理对蓝莓果实总酚、总花青素含量及抗氧化能力的影响

超声预处理对蓝莓果实总酚、总花青素含量及抗氧化能力的影响如表 2 所示。与对照组相比，超声预处理组干燥后产品的总酚及总花青素显著提高，总酚含量提高了 16.58%~38.01%，总花青素含量提高了 5.55%~19.04%。US-20 处理组总酚及总花青素含量最高，分别达到了 25.56 mg·g⁻¹ DW 及 187.65 mg·100 g⁻¹ DW。肖亚冬等^[1]研究结果表明，蓝莓果实经超声处理后其总花色苷及维生素 C 的保留率显著高于未处理对照组，分别达到了 85% 及 70% 以上。研究表明，超声波提高干制品酚类物质的可能机制为一方面其产生的空化效应降低了组织中的含氧量，抑制了酚类物质的氧化分解^[26]；另一方面，超声波具有抑制多酚氧化酶活性的作用，从而降低了酚类物质的酶促降解^[27]。此外，超声预处理显著缩短了蓝莓的干燥时间，减少了热敏性物质与热源及氧气的接触时间，因此超声处理组蓝莓果干酚类物质保留率较高。

蓝莓干制品中抗氧化能力的变化与酚类物质含量变化趋势一致，即超声预处理组干制品的抗氧化能力较强，超声预处理显著提高了蓝莓干制品的抗氧化能力，US-20 处理组蓝莓果干 DPPH 及 ABTS⁺ 自由基清除能力最强。相较于对照组而言，US-20 处理组蓝莓干制品的 DPPH 自由基清除能力提高了 11.82%，ABTS⁺ 自由基清除能力提高了 7.87%。一项针对桑葚的相关研究表明，超声处理显著提高了其果干的抗氧化能力，最佳超声条件下（300 W, 30 min）桑葚干的 DPPH 自由基清除能力提升了 20% 以上^[10]，这与超声波预处理提高了干制品中热敏性酚类物质的保留有关。研究表明在果实的干燥过程中，抗氧化能力与干燥时间及总酚含量存在显著相关性^[10]。因此 US-20 处理组干制品抗氧化能力较强的原因可能与超声波预处理缩

短了其干燥时间，提高了酚类物质保留率有关。

表 2 超声波预处理对蓝莓干制品酚类物质含量及抗氧化能力的影响

Table 2 Effect of ultrasonic pretreatment on the phenolic content and antioxidant capacity of dried blueberry products

样品组别	总酚/ (mg·g ⁻¹ DW)	总花青素/ (mg·100 g ⁻¹ DW)	DPPH/%	ABTS/%
CK-D	18.52 ± 0.75 ^c	157.63 ± 4.19 ^d	71.66 ± 0.74 ^d	69.51 ± 1.39 ^b
US-10-D	21.59 ± 0.85 ^b	166.38 ± 3.72 ^c	73.69 ± 0.72 ^c	70.82 ± 0.83 ^b
US-20-D	25.56 ± 1.12 ^a	187.65 ± 3.21 ^a	80.13 ± 0.86 ^a	74.98 ± 0.73 ^a
US-30-D	22.18 ± 0.81 ^b	171.32 ± 2.88 ^b	76.24 ± 0.67 ^b	71.03 ± 0.67 ^b

注：CK-D 为未处理对照组蓝莓干制品；US-10-D 为超声预处理 10 min 后蓝莓干制品；US-20-D 为超声预处理 30 min 后蓝莓干制品；DPPH 为 DPPH 自由基清除能力；ABTS 为 ABTS⁺ 自由基清除能力；同列不同行小写字母肩标代表数据具有显著性差异（*P* < 0.05）。

2.8 相关性分析

蓝莓果实理化指标相关性分析结果如图 6 所示。蓝莓的干燥时间与 T23 值呈现显著负相关关系（*P* < 0.05），这表明果实内部水分状态是影响蓝莓干燥特性的重要影响因素。此外，干燥时间与总酚及总花青素含量、DPPH 自由基清除能力之间呈现显著负相关关系（*P* < 0.05），这表明缩短干燥时间有助于酚类物质的保留及抗氧化能力的提升。超声波空化效应通过产生微小气泡并迅速爆裂，导致局部高温高压环境的形成，从而对细胞壁产生强烈的机械冲击，促进了果实细胞壁中多糖的降解^[10]。同时，空化效应改变了蓝莓果实内部水分的状态，减小了蓝莓内水分的结合力，这有助于干燥过程中水分的脱除，提升了水分迁移速率，提高了干燥品质^[25]。

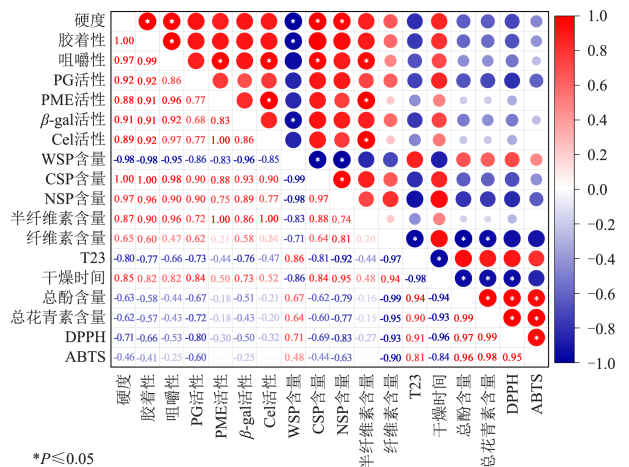


图 6 蓝莓果实理化指标相关性分析

Fig.6 Correlation analysis of physicochemical indexes of blueberries

3 结论

研究表明, 超声频率为 40 kHz, 功率为 400 W 下, 不同超声处理时间(10、20 及 30 min)会对蓝莓的质地、细胞超微结构、果胶及纤维素酶活性、细胞壁多糖含量、水分状态、干燥特性及干燥品质产生明显影响。超声波引起空化效应, 导致原果胶降解、细胞壁结构受损并降低了蓝莓果实的硬度。随着超声预处理时间的延长, 蓝莓果实硬度、果胶酶及纤维素酶活性、CSP 及 NSP 组分含量显著降低, WSP 组分含量明显升高。超声预处理提高了蓝莓果实自由水的自由度, 促进了水分在干燥过程中向外扩散的速率, 明显缩短了蓝莓的干燥时间。缩短干燥时间有助于提高蓝莓酚类物质保留及抗氧化能力。此外, 超声处理 20 min 蓝莓果实的干燥时间最短(22.7 h), 干制品总酚($25.56 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1} \text{ DW}$)及总花青素($187.65 \text{ mg} \cdot 100 \text{ g}^{-1} \text{ DW}$)含量较高, 抗氧化能力较强。本研究为提升蓝莓干燥速率及品质提供了理论依据。

参考文献

- [1] 肖亚冬, 杨慧珍, 李大婧, 等. 3种超声方式对蓝莓蜡质层和细胞结构及真空冷冻干燥特性的影响[J]. 食品科学技术学报, 2024, 42(3): 159-170.
- [2] 孙也, 周红利, 罗璇, 等. 气调包装对H3蓝莓采后贮藏品质的影响[J]. 中国果树, 2024, 6: 57-61, 113.
- [3] ZENG F, ZENG H S, YE Y, et al. Preparation of acylated blueberry anthocyanins through an enzymatic method in an aqueous/organic phase: Effects on their colour stability and pH-response characteristics [J]. Food & Function, 2021, 12(15): 6821-6829.
- [4] BOATENG I D. Recent processing of fruits and vegetables using emerging thermal and non-thermal technologies. A critical review of their potentialities and limitations on bioactives, structure, and drying performance [J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2024, 64(13): 4240-4274.
- [5] KUMAI S, JADHAV S V, THORAT B N. Life cycle assessment of tomato drying in heat pump and microwave vacuum dryers [J]. Materials Today: Proceedings, 2022, 57: 1700-1705.
- [6] 刘启玲, 王庆卫. 中短波红外干燥对桑葚干燥特性、营养品质及抗氧化活性的影响[J]. 食品工业科技, 2021, 42(12): 39-45.
- [7] 李栋, 薛瑞婷. 高温高湿气体冲击处理对中短波红外干燥红枣品质的影响[J]. 食品研究与开发, 2020, 41(22): 107-112.
- [8] WANG X, GAO K, CHEN Q, et al. Water diffusion characteristics of apple slices during short and medium-wave infrared drying [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(12): 275-281.
- [9] ZHANG L, LIAO L, QIAO Y, et al. Effects of ultrahigh pressure and ultrasound pretreatments on properties of strawberry chips prepared by vacuum-freeze drying [J]. Food Chemistry, 2020, 303: 125386.
- [10] WANG K, HE P, WANG Q, et al. Ultrasound pretreatment enhances moisture migration and drying quality of mulberry via microstructure and cell-wall polysaccharides nanostructure modification [J]. Food Research International, 2024, 184: 114245.
- [11] WANG J, CHEN Y, WANG H, et al. Ethanol and blanching pretreatments change the moisture transfer and physicochemical properties of apple slices via microstructure and cell-wall polysaccharides nanostructure modification [J]. Food Chemistry, 2022, 381: 132274.
- [12] YAO Y, WEI X, PANG H, et al. Effects of radio-frequency energy on peroxidase inactivation and physicochemical properties of stem lettuce and the underlying cell-morphology mechanism [J]. Food Chemistry, 2020, 322: 126753.
- [13] JIA L, LI Y, LIU G, et al. Acidic electrolyzed water improves the postharvest quality of jujube fruit by regulating antioxidant activity and cell wall metabolism [J]. Scientia Horticulturae, 2022, 304: 111253.
- [14] WANG H, WANG J, MUJUMDAR A S, et al. Effects of postharvest ripening on physicochemical properties, microstructure, cell wall polysaccharides contents (pectin, hemicellulose, cellulose) and nanostructure of kiwifruit (*Actinidia deliciosa*) [J]. Food Hydrocolloids, 2021, 118: 106808.
- [15] ZHANG W, XU S, GAO M, et al. Profiling the water soluble pectin in clear red raspberry (*Rubus idaeus* L. cv. *Heritage*) juice: Impact of high hydrostatic pressure and high-temperature short-time processing on the pectin properties [J]. Food Hydrocolloids, 2022, 125: 107439.
- [16] LI M, CHEN Y, GENG Y, et al. Convenient use of low field nuclear magnetic resonance to determine the drying kinetics and predict the quality properties of mulberries dried in hot-blast air [J]. LWT-Food Science and Technology, 2021, 137: 110402.
- [17] 刘威良, 高秀, 徐晴芳, 等. 超声辅助提取火棘干果的总黄酮及其体外抗氧化作用[J]. 甘肃农业大学学报, 2024, 59(2): 304-312.
- [18] RANGANATHAN K, SUBRAMANIAN V, SHANMUGAM N. Effect of thermal and nonthermal processing on textural quality of plant tissues [J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2016, 56(16): 2665-2694.
- [19] LI D, DENG L, DAI T, et al. Ripening induced degradation of pectin and cellulose affects the far infrared drying kinetics of mangoes [J]. Carbohydrate Polymers, 2022, 291: 119582.
- [20] LIU J, ZHAO Y, XU H, et al. Fruit softening correlates with enzymatic activities and compositional changes in fruit cell wall during growing in *Lycium barbarum* L [J]. International Journal of Food Science & Technology, 2021 56(6): 3044-3054.
- [21] LENA L R, WEEM J V D, CASPERS-WEIFFENBACH R, et al. Effects of ultrasound on the enzymatic degradation of pectin [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2021, 72: 105465.
- [22] 盖芸芸, 何婵, 李娜, 等. 超声波预处理对贮藏过程中猕猴桃质构、果胶特性及果胶酶活性的影响[J]. 食品科技, 2024, 49(5): 26-34.
- [23] MUNIR M, NADEEM M, QURESHI T M, et al. Effects of high pressure, microwave and ultrasound processing on proteins and enzyme activity in dairy systems-A review [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2019, 57: 102192.
- [24] XING Y, WANG K, ZHANG M, et al. Pectin-interactions and the digestive stability of anthocyanins in thermal and non-thermal processed strawberry pulp [J]. Food Chemistry, 2023, 424: 136456.
- [25] SHICHENG Q, YOUWEN T, QINGHU W, et al. Nondestructive detection of decayed blueberry based on information fusion of hyperspectral imaging (HSI) and low-field nuclear magnetic resonance (LF-NMR) [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2021, 184: 106100.
- [26] ZHANG L, LIAO L, QIAO Y, et al. Effects of ultrahigh pressure and ultrasound pretreatments on properties of strawberry chips prepared by vacuum-freeze drying [J]. Food Chemistry, 2020, 303: 125386.
- [27] ASLAM R, ALAM M S, ALI A, et al. A chemometric approach to evaluate the effects of probe-type ultrasonication on the enzyme inactivation and quality attributes of fresh amla juice [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2023, 92: 106268.