不同解冻技术对冷冻香菇（*L. edodes*）品质的影响

张瑜，赵金红，丁洋，聂莹，朱珍，唐选明

（中国农业科学院，农产品加工研究所，农业部农产品加工重点实验室，北京 100193）

摘要：本文研究常温空气、冷藏、微波（119、259 和 280 W）以及超高压（100、150 和 200 MPa）解冻对香菇品质（色泽、汁液流失率、硬度、离子渗透率以及总酚含量）和解冻时间的影响。结果表明：与常温空气和冷藏解冻相比，微波和超高压解冻能够显著缩短香菇的解冻时间，并且随着微波功率和压强的增大，解冻时间逐渐缩短。但超高压解冻后香菇色泽与硬度显著下降，离子渗透率显著上升，从而使得香菇品质显著降低；而微波解冻在色泽（总色差降低 19.9~44.1%）、硬度（升高 18.9~38.0%）、汁液流失率（降低 45.7~42.0%）、总酚含量（升高 21.1~25.2%）和其他生理指标方面都优于常温空气解冻技术。其中，259 W 的微波功率是香菇解冻的最优条件，同时该条件的感官评价分值最高(7.1)。本文表明微波解冻能够显著提高香菇的解冻速率和品质，这对香菇加工具有一定意义。

关键词：香菇；微波解冻；超高压解冻；品质

文章篇号：1673-9078(2016)9-241-247 DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2016.9.035

Effects of Different Thawing Methods on the Quality Attributes of Frozen *Lentinus edodes* Cubes

ZHANG Yu, ZHAO Jin-hong, DING Yang, NIE Ying, ZHU Zhen, TANG Xuan-ming

(Institute of Agro-Products Processing Science and Technology, Key Laboratory of Agro-products Processing, Ministry of Agriculture, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100193, China)

Abstract: Different thawing methods (air ambient temperature thawing; refrigerator thawing; microwave thawing at 119, 259, and 280 W; and high-pressure thawing at 100, 150, and 200 MPa) were tested for their effects on the thawing time and quality attributes (color, drip loss, hardness, total phenolic content, and ion permeability) of frozen *Lentinus edodes* cubes. Both microwave thawing and high-pressure thawing could significantly shorten the thawing time of the frozen samples compared with air or refrigerator thawing, with the thawing time decreasing with increasing microwave power or processing pressure. The sample thawed by high pressure exhibited a dramatic decrease in color and hardness and a pronounced increase in ion permeability, thus resulting in a dramatic decrease in the quality of *Lentinus edodes*. However, microwave thawing significantly improved the quality attributes of the mushroom samples in terms of color (total color difference reduced by 19.9~44.1%), hardness (increased by 18.9~38.0%), drip loss (reduced by 45.7~42.0%), and total phenolic content (increased by 21.1~25.2%) compared with air ambient temperature thawing. The result suggests that microwave thawing at 259 W is the best method for thawing *Lentinus edodes* cubes with the highest sensory score (7.1). This study indicates that microwave thawing can significantly enhance both the thawing rate and quality attributes for *Lentinus edodes*, and shows a certain value to the processing of this mushroom species.

Key words: *Lentinus edodes*; microwave thawing; high-pressure thawing; quality attributes

香菇（*Lentinus edodes*）是世界第二大食用菌，也是我国特产之一；根据文献报道，中国的香菇产量占世界产量的 70%以上[1]。香菇富含多种营养成分和功能性成分，具有抗肿瘤、降血脂等功效，被誉为“菇中皇后”[2~3]。由于新鲜香菇含水率高达 90%以上，采后容易发生腐烂变质，从而给生产和贮运造成很大的经济损失[4~5]。冷冻是香菇保藏、延长贮藏期的有效方法之一，在生产中约有 20~30%的香菇采用冷冻保藏，如速冻香菇[6]。

冷冻保藏能够有效保持食品品质，延长贮存期[6]。但食品在冻结和解冻后，常出现品质下降。由于解冻时间长于冻结时间，因此对于冷冻食品而言解冻过程更关键，解冻方法的好坏，直接影响食品的最终品质[7]。所以，选择一种合适的解冻方法至关重要。目前，

收稿日期：2015-11-09

基金项目：公益性行业（农业）科研专项经费项目“食用菌保鲜加工与循环利用技术研究与示范（201303080）”

作者简介：张瑜（1992-），女，硕士研究生，研究方向：果蔬加工与贮藏

通讯作者：唐选明（1963-），男，博士，副研究员，研究方向：农产品加工与贮藏

传统解冻方法有常温空气解冻和冷藏解冻，常温空气解冻操作简便、成本低，但解冻速率慢，微生物的繁殖速率及酶活性较高，对细胞结构和食品品质破坏较大，如金枪鱼在常温空气中解冻，解冻时间长，且品质发生较大劣变[8]；而冷藏解冻则可实现低温解冻，能够避免微生物的繁殖以及酶促褐变反应的发生，但由于冷藏解冻速率慢，导致冰晶对细胞结构的破坏较严重。因此，为了提高解冻速率和食品品质，需要应用解冻新技术来代替传统解冻方法，这对于冷冻香菇加工有重要意义。

微波解冻作为新技术之一，是通过高频电场改变分子的分布状态，促使分子高速运动和相互摩擦从而产生热量。因此，微波解冻技术的解冻效率高、时间短，对食品品质及细胞结构破坏较小[9]。例如，Delgado等[10]的研究表明微波解冻草莓，汁液流失较低，可以较好地保持草莓的品质；Wen 等[9]采用微波解冻哈密瓜，得到相似结果。超高压解冻作为另一种加工新技术，在食品行业的应用发展方面同样具有较好的前景。超高压解冻以液体作为压力传递介质，可降低食品的冻结温度，增大环境与食品之间的温差，从而确保食品在低温环境下实现快速解冻[11~12]，超高压解冻的研究主要包括肉类和海产品[12]。然而，对于微波或超高压解冻技术应用于食用菌方面的研究，国内外相关报道甚少。

本文研究通过比较解冻新技术（微波解冻和超高压解冻）以及传统解冻方法（常温空气解冻和冷藏解冻），对香菇解冻时间、色泽、汁液流失率、硬度、离子渗透率以及总酚含量的影响，以期得到香菇解冻的最适加工技术，并为香菇加工方法提供理论依据和技术支持。

1 材料与方法

1.1 实验材料

表 1 新鲜香菇的理化指标

Table 1 Physicochemical properties of fresh *Lentinus edodes*

理化指标	均值±标准差
色泽指标	
亮度 L^*	84.71±0.89
红度 a^*	1.89±0.28
黄度 b^*	15.23±3.44
硬度/g	402.46±22.55
离子渗透率/%	12.07±1.95
总酚含量/(mg/g)	1.18±0.05

新鲜香菇（*Lentinus edodes*）：市售，挑选成熟度一致，无机械损伤的子实体进行试验。新鲜香菇的色差、硬度、离子渗透率以及总酚含量如下表 1 所示。

1.2 主要试剂

福林酚，分析纯，购于美国 Sigma 公司；氯化钠、无水碳酸钠及没食子酸，分析纯，购于国药集团化学试剂有限公司。

1.3 仪器与设备

YP502N 电子天平，上海精密科学仪器有限公司；HH-2 数显恒温水浴锅，江苏省金坛市荣华仪器有限责任公司；TU-1901 双光束紫外可见分光光度计，北京普析通用有限责任公司；TA-XT2i 物性质构仪，英国 Stable Micro System 公司；CR-400 美能达色度计，日本柯尼卡美能达控股公司；BCD-226SDCZ 冰箱，青岛海尔股份有限公司；P70D20TL-D4 微波炉，格兰仕微波电器有限公司；WS-105 防水中心温度计；DZ-300A 多功能真空封装机，温州市兴业机械设备有限公司；MP 513 型实验室电导率仪，上海三信仪表厂；HPP.L2-600/2 超高压设备，天津市华泰森淼生物工程技术有限公司。

1.4 实验方法

1.4.1 实验方法

实验前将香菇去柄，取香菇菌盖，并切割成形状为 2 cm×2 cm×2 cm 的香菇丁，每十块放入一个真空袋中，密封包装，放置于-20 ℃的冰箱中冷冻 24 h，即为样品。本实验采用四种不同的解冻方法，分别为：（1）常温空气解冻：将处理好的样品从-20 ℃的冰箱中取出，放置于室温（25±1 ℃）环境中进行空气解冻；（2）冷藏解冻：将处理好的样品从-20 ℃的冰箱中取出，放置于 4 ℃的冷藏室中解冻；（3）微波解冻：将处理好的样品从-20 ℃的冰箱中取出，放置于微波炉中，调节功率为 119 W（17%功率输出，“解冻”档位）、259 W（37%功率输出，“中低火”档位）和 280 W（40%功率输出，“中火”档位），分别解冻。（4）超高压解冻：将处理好的样品从-20 ℃的冰箱中取出，放置于超高压设备（有效体积为 2 L，腔内水温 20 ℃，升压速率 100 MPa/min，降压过程迅速完成）中，调节压强为 100、150 和 200 MPa，分别解冻，解冻时间不包括设备的升压和降压时间。每种解冻方法均以香菇块的中心温度达到 0±1 ℃为解冻终点，解冻完成后，分别测量香菇的解冻时间、色泽、汁液流失率、硬度、离子渗透率以及总酚含量。

1.4.2 解冻时间的测定

采用温度计记录从解冻开始到香菇样品中心温度达到 0±1 ℃的时间，即为解冻时间。

1.4.3 色泽的测定

使用色差仪测定新鲜香菇以及解冻之后香菇的色泽，选取香菇菌盖背面进行测量，得到 L^*值、a^*值和 b^*值，并由公式（1）计算ΔE。

$$\Delta E = \left[\left(L^* - L_0\right)^2 + \left(a^* - a_0\right)^2 + \left(b^* - b_0\right)^2\right]^{1/2} \quad (1)$$

其中，L_0、a_0、b_0是新鲜香菇的色差值。

1.4.4 汁液流失率的测定

分别称取解冻前后香菇的重量，并由公式（2）计算汁液流失率。

$$\text{汁液流失率}(\%) = \frac{\text{解冻前重量 - 解冻后重量}}{\text{解冻前重量}} \times 100\% \quad (2)$$

1.4.5 硬度的测定

采用 TA-XT2i 物性质构仪测定样品硬度，硬度值是以其物性曲线最高峰值来表示。测定参数：样品尺寸为 2 cm×2 cm×2 cm，最大量程 100 g，采用 P/2E 圆柱平板探头，测试速度 1.0 mm/s，压缩比例 70 %，环境温度 25 ℃。

1.4.6 离子渗透率的测定

参考 Kang[14]等和 Zhang 等[15]的方法，略有改动。

取香菇切片用打孔器切成直径 1 cm，厚度 0.3 cm 的圆片，用去离子水洗涤后每 6 片置于烧杯中，加入 40 mL 去离子水，立即测定电导率 p_0；室温置于摇床上震荡 2 h 后，测定电导率 p_1；煮沸 10 min，并冷却至室温，测电导率 p_2。按公式（3）计算离子渗透率。

$$\text{离子渗透率}(\%) = \frac{p_1 - p_0}{p_2 - p_0} \times 100\% \quad (3)$$

1.4.7 总酚含量的测定

总酚含量测定参照 Singleton[16]的方法。称取香菇样品 10 g，加入 4 倍水匀浆（*m/V*），移入 100 mL 容量瓶中，沸水浴 30 min，冷却至室温并定容。吸取 0.4 mL 上清液于 10 mL 离心管中，加入 5.6 mL 蒸馏水，1 mL 福林酚显色剂，3 mL 7.5% Na_2CO_3 溶液，混匀，室温避光显色 1 h，测定 765 nm 下的吸光度。以没食子酸绘制标准曲线，根据吸光值计算香菇样品中的总酚含量（mg/g）。总酚含量以每克新鲜香菇含有相当于 mg 焦性没食子酸表示。

1.4.8 感官评价

香菇的感官品质根据整体可接受性方法来评价，选用受培训过的人员进行实验，一组 10 人[17]。施行9分制打分法，1 分表示极度不喜欢；2 分表示很不喜欢；3 分表示一般不喜欢；4 分表示稍微不喜欢；5 分表示既不喜欢也不讨厌；6 分表示有点喜欢；7 分表示一般喜欢；8 分表示很喜欢；9 分表示极度喜欢。

1.5 数据统计及分析方法

所有指标重复测定 3 次，数据为测定的平均值±标准差。采用 SAS 9.2 统计软件对结果进行 Duncan Multiple Range Test（p=0.05）方差分析，比较差异显著性。

2 结果与讨论

2.1 不同解冻方法对解冻时间的影响

由表 2 可以看出，不同解冻方法加工香菇，解冻时间依次为：超高压解冻<微波解冻<常温空气解冻<冷藏解冻，并且不同解冻方法的解冻时间差异显著（p<0.05）。空气解冻和冷藏解冻均为外部加热法，即由温度较高的介质向冻结样品表面传热，热量再由表面逐渐向中心传递[18]。而冷藏解冻（4 ℃）比常温空气解冻温度（25 ℃）低，从而与香菇表面温差小，换热量低，传热慢，因此冷藏解冻时间显著大于空气解冻[18]（p <0.05）。

表 2 不同解冻方法对香菇解冻时间的影响

Table 2 Effects of different thawing methods on the thawing time of *Lentinus edodes*

解冻方法	空气解冻	解冻	微波解冻			超高压解冻		
			119 W	259 W	280 W	100 MPa	150 MPa	200 MPa
解冻时间/s	1440±5^{b}	7207±21^{a}	90±2^{c}	41±1^{d}	29±1de	30±2de	19±1^{ef}	12±1^{f}

注：表中每个数值都是三组重复试验得到的平均值；不同字母表示不同解冻方法的解冻时间差异显著（p<0.05）。

与常温空气解冻相比，微波解冻时间缩短了 90%以上，并且随着功率的增大，解冻时间显著缩短（p<0.05）。这是由于微波解冻是利用物料的介电特性进行解冻，可达到表面和内部同时加热的效果，即香菇中的许多极性分子在高频电场的作用下发生极化[20]，并随着电场的变化而发生转向，靠分子的振动、分子间的碰撞、摩擦而产生巨大热量，从而使香菇迅速解冻[21~22]。微波功率越大，分子间碰撞摩擦产生的热量越大，因此解冻时间越短。但当微波功率大于 280 W 时，部分香菇样品出现了严重的局部过热现象（数据未列出）。这是由于样品中包括冻结相与非冻结相，以及一些分布不均一的成分，而这些成分在吸收射频

能量方面有很大不同，因此导致过热现象[22]。

超高压解冻与常温空气解冻相比，解冻时间缩短了 97%以上，并且随着压强逐渐增大，解冻时间逐渐缩短，当压强为 200 MPa 时，解冻时间最短为 12 s。超高压通过借助流体介质进行压力传递，能够降低水的相变温度，使样品的冻结温度显著下降，从而增大环境与香菇间的温差，因此有效增大了传热的推动力，使得解冻效率大大提升[12,23]。

2.2 不同解冻方法对色泽的影响

不同解冻方法对香菇色泽的影响如表 3 所示。由表可知，解冻之后香菇的 L^*值均有不同程度的降低。其中，微波解冻后香菇的 L^*值大于空气解冻，当微波解冻功率为 259 W 时，香菇的 L^*值与新鲜样品的 L^*值（84.71）最接近，并且显著高于其他解冻方法（p<0.05），说明微波解冻能够较好地保持香菇的色泽。这可能是由于微波解冻时间较短，缩短了香菇中多酚氧化酶与底物接触的时间，因此褐变程度较低，香菇色泽较好[22]。这与 Wen 等[9]对冷冻哈密瓜解冻的研究结果相似。

常温空气解冻后香菇的 L^*值较低，色泽较差，这主要是由于常温空气解冻速率较慢，冰晶解冻时间较长，导致香菇细胞组织破坏较严重，加大了多酚氧化酶与底物接触面积与时间，从而加剧了香菇的褐变[19]。此外，冷藏解冻后香菇的 L^*值显著高于空气解冻 L^*值（p<0.05），这是由于冷藏解冻温度较低（4 ℃），此时多酚氧化酶活性较低，氧化速率较慢，因此能够较好地保持香菇的色泽。

超高压解冻后香菇的 L^*值显著低于其他解冻方法（p<0.05），与新鲜香菇相比，L^*值降低 18%以上。这是由于一方面，在压力作用下，香菇的细胞膜和细胞壁受到破坏，使细胞壁因机械断裂而松懈，细胞膜则表现出通透性的变化，从而增大了多酚氧化酶与底物的接触面积[24]；另一方面，超高压可能激活了细胞中潜在的多酚氧化酶的活性，或增加了膜结合多酚氧化酶的释放，从而促进了酶促褐变反应的发生[25~26]。

不同解冻方法对香菇色差（ΔE）的影响如表 3 所示。ΔE 值越小，表示样品与新鲜香菇的色泽越接近。微波解冻后，香菇的ΔE 值较小，当功率为 259 W 时，香菇的ΔE 达到最小值，说明微波解冻能够较好地保持香菇的色泽。相反，空气解冻与超高压解冻后香菇的ΔE 值较大，差异显著（p<0.05），说明空气解冻与超高压解冻对香菇色泽破坏较大。这与上述 L^*值的结果一致。

表 3 不同解冻方法对香菇色泽的影响

Table 3 Effects of different thawing methods on the total color difference and *L values of *Lentinus edodes***

解冻方法	空气解冻	冷藏解冻	微波解冻			超高压解冻		
			119 W	259 W	280 W	100 MPa	150 MPa	200 MPa
L^*	69.0±0.3^{cd}	71.5±1.2^{b}	72.0±0.4^{b}	76.1±0.2^{a}	75.1±0.9^{a}	68.0±1.0^{d}	69.7±0.4^{c}	68.7±0.8^{cd}
ΔE	16.1±0.3^{a}	13.5±1.2^{b}	12.9±0.4^{b}	9.0±0.3^{c}	10.0±0.8^{c}	17.0±1.1^{a}	16.4±0.2^{a}	16.8±1.1^{a}

注：表中每个数值都是三组重复试验得到的平均值；不同字母表示不同方法解冻后香菇的色泽差异显著（p<0.05）。

2.3 不同解冻方法对汁液流失率的影响

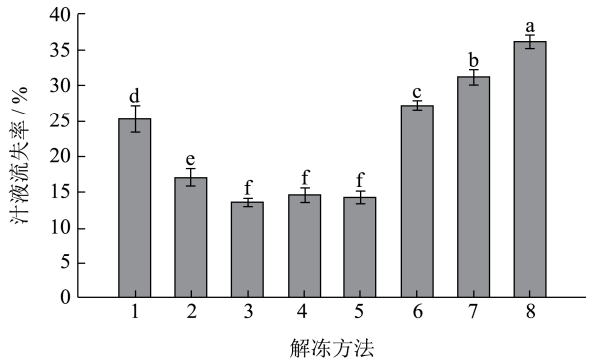


图 1 不同解冻方法对香菇汁液流失率的影响

Fig.1 Effects of different thawing methods on the drip loss of *Lentinus edodes*

注：1、常温空气解冻；2、冷藏解冻；3、微波 119 W；4、微波 259 W；5、微波 280 W；6、超高压 100 MPa；7、超高压 150 MPa；8、超高压 200 MPa。

由图 1 可知，经过不同解冻方法处理后，香菇的汁液流失率差异显著（p<0.05）。其中，微波解冻后香菇的汁液流失率最小，不同功率之间无显著差异（p≥0.05）。这是由于微波解冻采用内部加热方式，使得香菇内外同时加热，解冻效率高，有效加速冰晶的融化和细胞的复水，使细胞快速恢复持水能力，从而减少汁液流失[27]。相反，超高压解冻后，香菇的汁液流失率最高，并且随着压强的增大，汁液流失率显著增大（p<0.05），当压强为 200 MPa 时，香菇的汁液流失率最高，这与 Van Buggenhout[28]的研究结果相似，这是因为在超高压作用下，香菇的细胞壁断裂松懈程度较大，细胞膜也发生通透性的变化，从而细胞持水能力迅速下降，因此汁液流失最为严重。此外，经过常温空气解冻和冷藏解冻后，香菇的汁液流失率显著高于微波解冻（p<0.05），可能是这两种方法解冻时间

较长，冰晶对细胞膜和细胞壁的破坏较大，因此导致汁液流失率较高。

2.4 不同解冻方法对硬度的影响

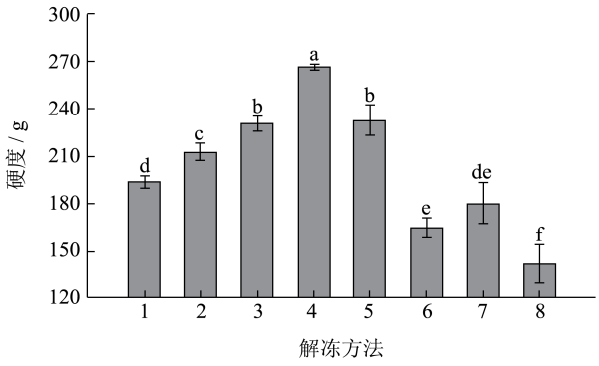


图 2 不同解冻方法对香菇硬度的影响

Fig.2 Effects of different thawing methods on the hardness of *Lentinus edodes*

注：1，常温空气解冻；2，冷藏解冻；3，微波 119 W；4，微波 259 W；5，微波 280 W；6，超高压 100 MPa；7，超高压 150 MPa；8，超高压 200 MPa。

如图 2 所示，与新鲜香菇相比，经过解冻之后，香菇硬度有不同程度的下降，这与芒果[29]、哈密瓜[9]和草莓[10]解冻之后的研究结果相似。微波解冻之后，香菇的硬度值比其他方法较高，且当微波功率为 259 W 时，硬度达到最高值，这是由于微波解冻时间短，效率高，对细胞的破坏较小，可以使香菇细胞快速复水，膨压有所回升，从而能够较好地保持样品的硬度[28]。

常温空气解冻和冷藏解冻之后，香菇的硬度值均显著低于微波解冻（p<0.05），这是由于常温空气解冻和冷藏解冻传热较慢，解冻时间较长，对香菇细胞结构破坏较大，细胞保水性及胀压下降，从而硬度较低。此外，超高压解冻之后，香菇的硬度显著低于其他方法（p<0.05），其中，当超高压压强为 200 MPa 时，香菇的硬度值最低。这是由于一方面，超高压较严重地破坏了香菇的细胞膜和细胞壁，导致汁液流失过多，细胞膨压急速下降；另一方面，超高压可能激活了细胞壁水解酶，如多聚半乳糖醛酸酶和果胶甲酯酶，从而导致硬度降低[30]。

2.5 不同解冻方法对离子渗透率的影响

离子渗透率是指细胞膜的渗透性发生变化时，细胞中的电介质向外渗透的速率，可以表示细胞膜被破坏的程度。不同解冻方法对香菇离子渗透率的影响如图 3 所示，解冻之后香菇的离子渗透率均高于新鲜香菇（12.07%），这说明不同方法解冻后香菇细胞受到不同程度的损伤。与其他解冻方法相比，微波解冻后香菇的离子渗透率较低，当微波功率为 259 W 时，香菇离子渗透率最小（46.76%），表明此时香菇细胞损伤最小。而超高压解冻后，香菇的离子渗透率最高，这与汁液流失率结果一致。这是由于超高压解冻对香菇的结构破坏较严重，解冻之后细胞失去复水能力，造成细胞内的离子伴随汁液流失，因此导致离子渗透率增大。

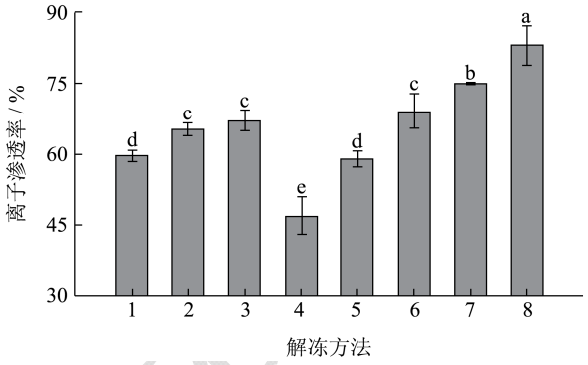


图 3 不同解冻方法对香菇离子渗透率的影响

Fig.3 Effects of different thawing methods on the electrolyte leakage of *Lentinus edodes*

注：1，常温空气解冻；2，冷藏解冻；3，微波 119 W；4，微波 259 W；5，微波 280 W；6，超高压 100 MPa；7，超高压 150 MPa；8，超高压 200 MPa。

2.6 不同解冻方法对总酚含量的影响

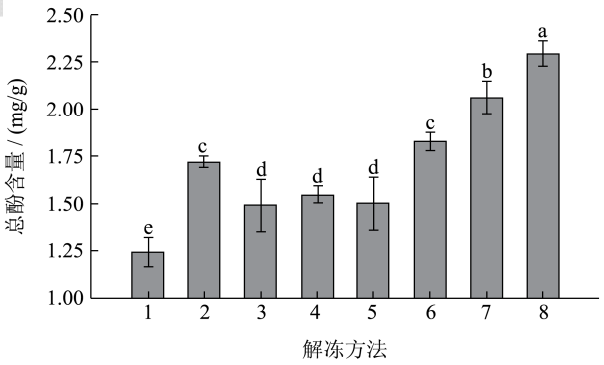


图 4 不同解冻方法对香菇总酚的影响

Fig.4 Effects of different thawing methods on the total phenolic content of *Lentinus edodes*

注：1、常温空气解冻；2、冷藏解冻；3、微波 119 W；4、微波 259 W；5、微波 280 W；6、超高压 100 MPa；7、超高压 150 MPa；8、超高压 200 MPa。

植物组织中的酚类物质与果蔬的风味、褐变和抗病性相关。香菇中含有多种酚类物质，其能有效清除自由基，防止组织发生氧化褐变。不同解冻方法对香菇总酚含量的影响如图 4 所示，与新鲜香菇（总酚含量为 1.18 mg/g）相比，解冻之后总酚含量均有不同程

度的升高，并且不同解冻方法之间差异显著（p<0.05）。其中，超高压解冻之后香菇中总酚含量显著高于其他解冻方法（p<0.05），这可能是由于超高压解冻对香菇细胞结构破坏较大[22~23]，致使解冻过程中细胞内酚类物质溶出较多，因此总酚含量较高[31]。此外，与常温空气解冻相比，微波解冻之后香菇中总酚含量较高，这主要是由于微波解冻时间较短，缩短了多酚氧化酶与酚类物质的接触时间，从而减缓了氧化反应。而常温空气解冻时间长，可能导致多酚氧化酶与酚类物质反应较充分，因此，微波解冻之后总酚含量较高。

2.7 不同解冻方法对感官评价的影响

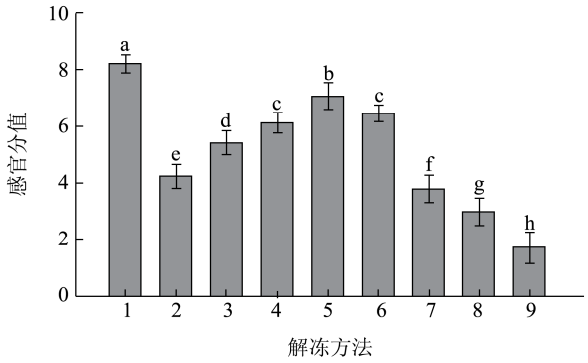


图 5 新鲜和不同解冻样品的整体感观评定分值

Fig.5 Sensory scores for the overall acceptance of fresh samples and of frozen samples thawed with different methods

注：1，新鲜香菇；2，常温空气解冻；3，冷藏解冻；4，微波 119 W；5，微波 259 W；6，微波 280 W；7，超高压 100 MPa；8，超高压 150 MPa；9，超高压 200 MPa。

图 5 为新鲜香菇和不同解冻方法加工后香菇的感官评价结果。评价结果表明，与新鲜香菇（8.2±0.3）相比，解冻之后香菇的感官分值显著降低（p<0.05）。在所有解冻样品中，微波解冻加工后香菇的感官评价分值较高，其中，当微波功率为 259 W 时，香菇的感官分值（7.1±0.5）最高。因此，功率 259 W 的微波加工是香菇解冻的最优条件。

3 结论

3.1 本文研究了常温空气解冻、冷藏解冻、微波解冻（119、259 和 280 W）和超高压解冻（100、150 和 200 MPa）对香菇解冻时间以及品质的影响。实验表明，与常温空气和冷藏解冻相比，微波和超高压解冻能够显著缩短香菇的解冻时间，并且随着微波功率和压强增大，解冻时间逐渐缩短，但由于超高压解冻导致香菇细胞结构破坏较严重，因此造成品质显著下降。

3.2 微波解冻可以有效保持香菇的品质，如色泽、硬度、汁液流失率、离子渗透率及感官品质。其中，微波 259 W 解冻效果最佳，与感官评定分值一致。

3.3 本研究表明：微波解冻作为一种简单、有效的加工技术，能够显著提高香菇的解冻速率和品质。这为香菇解冻加工提供了理论依据和技术支持。

参考文献

[1] 高虹,史德芳,何建军,等.超微粉碎对香菇柄功能成分和特性的影响[J].食品科学,2010,31(5):40-43
GAO Hong, SHI De-fang, HE Jian-jun, et al. Effect of superfine grinding on functional components and properties of *Lentinus edodes* Stems [J]. Food Science, 2010, 31(5): 40-43

[2] 安晶晶,王成涛,刘国荣,等.鲜香菇与干香菇挥发性风味成分的 GC-MS 分析[J].食品工业科技,2012,33(14):68-71
AN Jing-jing, WANG Cheng-tao, LIU Guo-rong, et al. Analysis of volatile aroma components of fresh and dry *Lentinus Edodes* with gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS) [J]. Science and Technology of Food Industry, 2012, 33(14): 68-71

[3] 谢静,赵阿丹,熊善柏,等.干燥方式对酥脆香菇品质的影响[J].食品科学,2012,33(13):87-91
XIE Jing, ZHAO A-dan, XIONG Shan-bai, et al. Effect of drying methods on the quality of crispy mushroom [J]. Food Science, 2012, 33(13): 87-91

[4] 张剑峰,张憋,陈黎明.香菇的涂膜保鲜[J].无锡轻工大学学报,2004,23(1):65-70
ZHANG Jian-feng, ZHANG Han, CHEN Li-ming. Study on coating preservation of *Lentinus Edodes* [J]. Journal of Wuxi University of Light Industry, 2004, 23(1): 65-70

[5] 姜天甲,陆仙英,蒋振晖,等.短波紫外线处理对香菇采后品质的影响[J].农业机械学报,2010(2):108-112
JIANG Tian-jia, LU Xian-ying, JIANG Zhen-hui, et al. Effect of UV-C treatment on post-harvest storage quality of shiitake mushrooms [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010 (2): 108-112

[6] Islam M N, Zhang M, Adhikari B, et al. The effect of ultrasound-assisted immersion freezing on selected physicochemical properties of mushrooms [J]. International Journal of Refrigeration, 2014, 42: 121-133

[7] Li B, Sun D W. Novel methods for rapid freezing and thawing of foods-a review [J]. Journal of Food Engineering, 2002, 54(3): 175-182

[8] Mousakhani-Ganjeh A, Hamdami N, Soltanizadeh N. Impact of high voltage electric field thawing on the quality of frozen tuna fish (*Thunnus albacares*) [J]. Journal of Food

Engineering, 2015, 156: 39-44

[9] Wen X, Hu R, Zhao J H, et al. Evaluation of the effects of different thawing methods on texture, colour and ascorbic acid retention of frozen hami melon (*Cucumis melo* var. *saccharinus*) [J]. International Journal of Food Science & Technology, 2015, 50(5): 1116-1122

[10] Delgado A E, Rubiolo A C. Microstructural changes in strawberry after freezing and thawing processes [J]. LWT-Food Science and Technology, 2005, 38(2): 135-142

[11] 邱伟芬,江汉湖.食品超高压杀菌技术及其研究进展[J].食品科学,2001,5:81-84
QIU Wei-fen, JIANG Han-hu. The mechanism and the update research of ultra-high pressure sterilization of foods [J]. Food Science, 2001, 5: 81-84

[12] Zhu S M, Su G M, He J S, et al. Water phase transition under pressure and its application in high pressure thawing of agar gel and fish [J]. Journal of Food Engineering, 2014, 125(1): 1-6

[13] 李莉,田建文,关海宁.微波加热技术在食品贮藏中的应用与发展[J].保鲜与加工, 2006,3:13-15
LI Li, TIAN Jian-wen, GUAN Hai-ning. Application and development of microwave heating technology in food storage [J].Storage and Process, 2006, 3: 13-15

[14] Kang H M, Park K W, Saltveit M E. Elevated growing temperatures during the day improve the postharvest chilling tolerance of greenhouse-grown cucumber (*Cucumis sativus*) fruit [J]. Postharvest Biology and Technology, 2002, 24(1): 49-57

[15] Zhang X, Shen L, Li F, et al. Arginase induction by heat treatment contributes to amelioration of chilling injury and activation of antioxidant enzymes in tomato fruit [J]. Postharvest Biology and Technology, 2013, 79: 1-8

[16] Singleton V L, Orthofer R, Lamuela-Raventos R M. Analysis of total phenols and other oxidation substrates and antioxidants by means of folin-ciocalteu reagent [J]. Methods in Enzymology, 1999, 299: 152-178

[17] Dermesonlouoglou E K, Pourgouri S, Taoukis P S. Kinetic study of the effect of the osmotic dehydration pre-treatment to the shelf life of frozen cucumber [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2008, 9(4): 542-549

[18] 李修渠.食品解冻技术[M].北京:食品科技出版社,2002
LI Xiu-qu. Food thawing technology [M]. Beijing: Food Science and Technology Press, 2002

[19] 华泽钊.食品冷冻冷藏原理与技术[M].北京:机械工业出版社,1991
HUA Ze-zhao. Food refrigeration principle and technology [M]. Beijing: China Machine Press, 1991

[20] 肖菲.微波杀菌对香菇品质影响研究[D].上海:上海交通大学,2012
XIAO Fei. Microwave sterilization on mushroom qualityimpact study [D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2012

[21] 刘雪梅,孟宪军,李斌,等.不同解冻方法对速冻草莓品质的影响[J].食品科学,2014,22:276-281
LIU Xue-mei, MENG Xian-jun, LI Bin, et.al. Effects of different thawing methods on quality characteristics of quick-frozen strawberries [J]. Food Science, 2014, 22: 276-281

[22] Boonsumrej S, Chaiwanichsiri S, Tantratian S, et al. Effects of freezing and thawing on the quality changes of tiger shrimp (*Penaeus monodon*) frozen by air-blast and cryogenic freezing [J]. Journal of Food Engineering, 2007, 80(1): 292-299

[23] Knorr D, Schlueter O, Heinz V. Impact of high hydrostatic pressure on phase transitions of foods [J]. Food Technology, 1998, 52(9): 42-45

[24] Hendrickx M, Ludikhuyze L, Van den Broeck I, et al. Effects of high pressure on enzymes related to food quality [J]. Trends in Food Science & Technology, 1998, 9(5): 197-203

[25] Asaka M, Aoyama Y, Nakanishi R, et al. Purification of a latent form of polyphenoloxidase from La France pear fruit and its pressure-activation [J]. Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry, 1994, 58(8): 1486-1489

[26] Terefe N S, Yang Y H, Knoerzer K, et al. High pressure and thermal inactivation kinetics of polyphenol oxidase and peroxidase in strawberry puree [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2010, 11(1): 52-60

[27] 阚建全.食品化学[M].北京:中国农业大学出版社,2008

[28] KAN Jian-quan. Food Chemistry [M]. Beijing: China Agricultural University Press, 2008

[29] Van Buggenhout S, Messagie I, Maes V, et al. Minimizing texture loss of frozen strawberries: effect of infusion with pectinmethylesterase and calcium combined with different freezing conditions and effect of subsequent storage/thawing conditions [J]. European Food Research and Technology, 2006, 223(3): 395-404

[30] Sirijariyawat A, Charoenrein S, Barrett D M. Texture improvement of fresh and frozen mangoes with pectin methylesterase and calcium infusion [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2012, 92(13): 2581-2586

[31] Huber D J. Polyuronide degradation and hemicellulose modifications in ripening tomato fruit [J]. Journal-American Society for Horticultural Science (USA), 1983

[32] Syamaladevi R M, Sablani S S, Tang J, et al. Stability of anthocyanins in frozen and freeze-dried raspberries during long-term storage: In relation to glass transition [J]. Journal of Food Science, 2011, 76(6): E414-E421

现代食品科技