

热处理方式对银耳物理特性及冻干品质的影响

范埴菲 吴冰冰 施能派 张元辉 林向阳

(福州大学生物科学与工程学院, 福建 福州 350108)

摘要: [目的] 通过系统比较 80 °C 热水热烫与蒸汽 (约 100 °C) 热烫两种工艺, 探寻能有效维持银耳 (*Tremella fuciformis*) 胶体结构并保障货架期稳定的最佳预处理方法。[方法] 设定不同的热烫处理时间梯度, 系统考察两种热烫工艺对鲜银耳吸水膨胀率、微观结构及质构特性 (TPA) 的影响, 并结合冻干制品的白度、复水比及水分活度等指标, 全方位评价不同热介质对银耳品质的调控效应。[结果] 蒸汽热烫有效抑制了组织的过度溶胀, 维持了细胞网络的致密性。经蒸汽热烫处理后的银耳冻干制品水分活度更低 (0.072 7~0.083 0), 具有更好的贮藏稳定性。同时, 其质构特性优异, 弹性和内聚性分别达到 0.039~0.051 和 0.710~0.787, 呈现出更佳的咀嚼口感。相比之下, 80 °C 热水热烫提高了产品的白度及复水率, 但会导致组织严重吸水溶胀, 破坏胶体网络, 且显著提高了制品的水分活度, 增加了贮藏期间的吸湿风险。[结论] 综合考量质构保持与货架期安全, 蒸汽热烫工艺更适合开发高品质、耐贮藏的银耳加工产品。

关键词: 银耳; 热水热烫; 蒸汽热烫; 品质; 水分活度; 组织完整

Effects of different heat treatment methods on physical properties and freeze-dried quality of *Tremella fuciformis*

FAN Yufei WU Bingbing SHI Nengpai ZHANG Yuanhui LIN Xiangyang

(College of Biological Science and Engineering, Fuzhou University, Fuzhou, Fujian 350108, China)

Abstract: [Objective] To determine the optimal pretreatment method that preserves the colloidal structure of *Tremella fuciformis* and ensures shelf-life stability via systematic comparison between hot-water blanching (80 °C) and steam blanching (about 100 °C). [Methods] A series of time gradients is set for each blanching treatment. Then, the effects of the two blanching processes on the water absorption and swelling ratio, microstructure, and texture profile (TPA) of fresh *T. fuciformis* are evaluated. Furthermore, the whiteness, rehydration ratio, and water activity of the freeze-dried products are measured to comprehensively evaluate the modulating effects of different heat media on the quality of *T. fuciformis*. [Results] Steam blanching effectively suppresses excessive structural swelling to preserve a dense cellular network. After this pretreatment, the freeze-dried products exhibit significantly lower water activity (0.072 7 to 0.083 0), indicating improved storage stability. Meanwhile, the TPA is enhanced, with springiness ranging from 0.039 to 0.051, and cohesiveness 0.710 to 0.787, resulting in a better chewing texture. In contrast, hot-water blanching at 80 °C improves product whiteness and rehydration ratio but causes severe swelling and disrupted colloidal network, as well as significantly increased water activity and risk of moisture absorption during storage. [Conclusion] Considering both texture preservation and shelf-life safety, steam blanching is more suitable for developing high-quality *T. fuciformis* products with potent storability.

Keywords: *Tremella fuciformis*; hot water blanching; steam blanching; quality; water activity; tissue integrity

银耳 (*Tremella fuciformis*) 是兼具药食同源价值与重 活性组分, 其免疫调节与抗氧化等作用已有系统阐述^[2-5]。随着健康消费升级与即食化趋势的演进, 市场对要产业基础的食药两用菌^[1]。银耳富含以多糖为主的生物

基金项目: 福建省高校产学研合作项目 (编号: 2024N5002)

通信作者: 林向阳 (1969—), 男, 福州大学教授, 博士。E-mail: xylin@fzu.edu.cn

收稿日期: 2025-11-11 改回日期: 2026-03-09

引用格式: 范埴菲, 吴冰冰, 施能派, 等. 热处理方式对银耳物理特性及冻干品质的影响[J]. 食品与机械, 2026, 42(4): 174-181.

Citation: FAN Yufei, WU Bingbing, SHI Nengpai, et al. Effects of different heat treatment methods on physical properties and freeze-dried quality of *Tremella fuciformis*[J]. Food & Machinery, 2026, 42(4): 174-181.

银耳产品在加工过程中的品质均一性、口感稳定性提出了更高要求。然而,鲜银耳富含多糖且具有胶体特性,在贮藏、运输及加工过程中易发生质地软化、色泽褐变等品质劣化问题^[6]。因此,在干燥工序前实施恰当的预处理对于保障后续产品质量和延长保质期至关重要。

热烫作为果蔬及食用菌加工中的关键前处理工序,其主要目的在于钝化酶活、控制微生物、护色及对组织进行预塑形^[7]。热水热烫与蒸汽热烫是两种主流方式,但因其传热介质与传质路径的根本差异,常对原料的含水率、色泽与质构等品质指标产生差异化效应^[8]。在当前银耳加工生产实践中,热水热烫法因其操作简便和热量传递均匀而被广泛采用。然而,现有热烫研究多集中于以细胞结构为支撑的常规果蔬及菇类,其研究目标亦多局限于酶活钝化与色泽保持^[9]。但银耳本质上是一种以多糖为基质的胶质真菌,其品质(尤其是质构与持水性)主要由其多糖基质构成的水胶体网络所主导^[10-11]。虽然热水热烫技术被广泛使用,但该工艺可能引发银耳吸收过多水分、结构变得松散,并促使水分活度上升,进而缩短产品的保质期。目前,关于不同热烫介质如何差异化地影响银耳独特的胶体网络结构及其后续冻干品质的系统比较研究仍相对有限^[12-14]。

为规避热水热烫的潜在缺陷并寻求更优工艺,试验拟采用蒸汽热烫开展对比研究,探究80℃热水与100℃蒸汽两种热烫工艺在不同时间梯度下,对银耳热烫后物性(吸水膨胀率、质构、微观结构、含水率)及冻干品质(白度、复水比、水分活度)的影响,旨在为银耳产品的品质定向控制与差异化加工工艺的建立提供依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

鲜银耳(*Tremella fuciformis*):同一批次产品,样品形态完整、朵形饱满、色泽洁白、无机机械损伤及病虫害,采后立即经冰袋进行冷链运输至实验室,并迅速置于4℃下贮藏备用,福建圣耳生物科技公司。

1.2 仪器与设备

电热恒温水浴锅:DK-S24型,上海精宏实验设备有限公司;

电子天平:HZT-A1000型,华志(福建)电子科技有限公司;

标准型超纯水机:WP-UPT-10型,四川沃特水处理设备有限公司;

高速粉碎机:FW100型,天津市泰斯特仪器有限公司;

冷冻干燥机:Xinyi-10D型,宁波新艺超声设备有限公司;

电子显微镜:Leica DM500型,精艺兴业科技有限公司;

水分测定仪:HE53型,梅特勒—托利多仪器(上海)有限公司;

多功能研磨机:mf-8888型,新飞电器有限公司;

质构仪:TA.XT plus型,英国 Stable Micro Systems

公司;

水分活度测定仪:AW-1型,柴田科学股份有限公司;

色差仪:NR10QC型,广东三恩时科技有限公司;

冰箱:BD-330WEPTU1型,青岛海尔特种电冰柜有限公司;

双层蒸锅:36 cm,潮州市粤潮鑫不锈钢制品厂;

电磁炉:CL22Q1-405J型,美的集团股份有限公司。

1.3 试验方法

1.3.1 热烫处理

(1) 热水热烫:取鲜银耳100 g,完全浸没于80℃恒温水浴中;以入水时刻计时,基于预试验结果,分别处理0, 3, 5, 7 min;立即捞出、沥干水分,室温下冷却并称重。

(2) 蒸汽热烫:取鲜银耳100 g,单层平铺于预热蒸锅蒸屉;电磁炉功率2 200 W,保持持续沸腾以提供常压饱和蒸汽(约100℃,不加压);以入蒸时刻计时,基于预试验结果,分别处理0, 20, 40, 60 min;立即捞出、沥干水分,室温下冷却并称重。

1.3.2 吸水膨胀率测定 记录样品热烫处理前后质量,按式(1)计算吸水膨胀率。

$$W = \frac{m_t - m_0}{m_0} \times 100\%, \quad (1)$$

式中:

W ——吸水膨胀率,%;

m_0 ——热烫处理前样品质量,g;

m_t ——热烫处理后样品质量,g。

1.3.3 显微结构观测 取热烫冷却后的银耳样品,用无菌镊子精确切取均匀的小组织块,置于载玻片中央。滴加20 μL去离子水浸润30 s后,用滤纸吸除多余液体。采用光学显微镜观察,物镜倍率40×。使用Capture 2.4软件调节焦距至图像清晰,进行图像采集与数据记录。

1.3.4 含水率测定 将不同热烫处理后的银耳样品,使用研磨机打浆制成细腻且均匀的银耳匀浆。称取0.5 g银耳匀浆,采用水分测定仪测定其含水率。

1.3.5 质构(TPA)测定 参照Liu等^[15]的方法稍作改动。称取匀浆后的银耳3.0 g,装入24孔板(孔径1.6 cm,深1.7 cm),抹平表面,避免空隙。采用质构仪进行测定,探头型号P5,测前速率2.0 mm/s,测试速率2.0 mm/s,测后速率2.0 mm/s;触发力0.049 N。记录并分析样品的硬度、弹性、内聚性、胶黏性及咀嚼性等指标。

1.3.6 冷冻干燥样品的制备 将匀浆后的银耳置于铺有锡纸的托盘中(厚度≤5 mm),覆盖保鲜膜并扎孔。-24℃预冻60 min后,转入真空冷冻干燥机(压力≤10 Pa, -70℃)中干燥48 h,得到饼状冻干制品。将冻干饼状制品分为两部分:一部分用高速粉碎机磨成粉末,另一部分破碎成大小均一的块状样品。

1.3.7 水分活度测定 取冻干粉末样品适量,放入水分活度测定仪的样品容器中(80%体积),测定样品的水分活度。

1.3.8 白度测定 取冻干粉末样品,置于24孔板中压实。采用色差仪(已用白板校准)测定样品的 L^* (亮度)、 a^* (红

绿度)和 b^* (黄蓝色)值。按式(2)计算亨特白度 H_w 。

$$H_w = 100 - \sqrt{(100 - L^*)^2 + a^{*2} + b^{*2}} \quad (2)$$

1.3.9 复水比测定 准确称取冻干粉末状样品 0.5 g,置于盛有 50 mL 反渗透水的烧杯中(料液比 1:100 (g/mL)),并将该烧杯置于 100 °C 沸水浴中,分别于 5, 10, 15 min 取出样品,倒入漏斗进行滤干,再记录复水后的样品质量。按式(3)计算复水比。

$$R = \frac{m_f}{m_g} \quad (3)$$

式中:

R ——复水比;

m_g ——冻干粉末样品质量, g;

m_f ——复水后样品质量, g。

1.3.10 数据处理 所有试验均设置 3 次平行,结果取平均值。采用 IBM SPSS Statistic 27 进行数据统计分析,用 Duncan 多重比较法进行显著性分析,显著性水平为 $P < 0.05$ 。采用 Origin 2021 软件绘图。

2 结果与分析

2.1 对银耳吸水膨胀率的影响

吸水膨胀率用于表征银耳在热加工过程中吸收并保持水分的能力。数值越大,表明组织在水分迁移、结合和膨胀方面的能力越强,胶体网络更加松散,可接触的亲水基团也更多;数值较小则意味着供水受限或网络更为紧密,溶胀受到抑制。由图 1 可知,随着热烫时间的延长,80 °C 热水热烫和蒸汽(约 100 °C)热烫处理下银耳的吸水膨胀率均显著上升($P < 0.05$),且经热水热烫处理后的银耳吸水膨胀率显著高于蒸汽热烫处理的。表明热水热烫更容易破坏银耳组织结构的致密性,促进水分的渗透与结合。银耳多糖不仅具有较高的“水分承载能力”和非冻

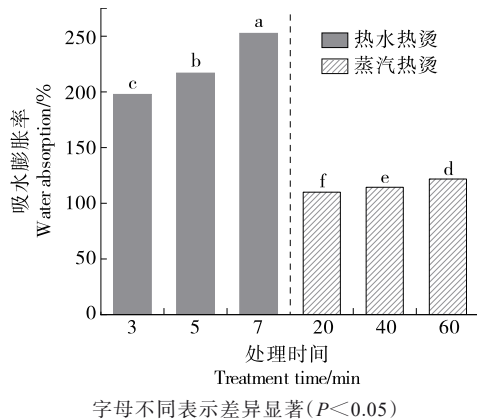


图 1 鲜银耳经不同热烫工艺处理后的吸水膨胀率
Figure 1 Water absorption and swelling ratio of fresh *T. fuciformis* after different blanching processes

结水含量,其羟基密集分布使其对水分子具有较强的结合能力^[16-17]。热水热烫下,80 °C 加热促使多糖链发生构象变化并解链,暴露的亲水基团迅速与大量水分子结合,导致组织剧烈溶胀,银耳组织的致密结构遭到破坏,水溶性多糖及风味物质向水中浸出和流失^[18]。而蒸汽热烫下,尽管温度更高,但水分来源仅限于蒸汽在银耳表面的凝结水,这种有限的水分供给在实现热传递和酶钝化目的的同时,有效限制了胶体网络的过度溶胀,从而导致其吸水膨胀率显著低于热水热烫处理。因此,从保持银耳结构稳定性的角度考虑,蒸汽热烫显示出更好的应用潜力。

2.2 对银耳微观结构的影响

由图 2 可知,未热烫银耳胞体微区轮廓较清晰、排列相对紧密,胞间隙较小,整体呈致密状态。80 °C 热水热烫

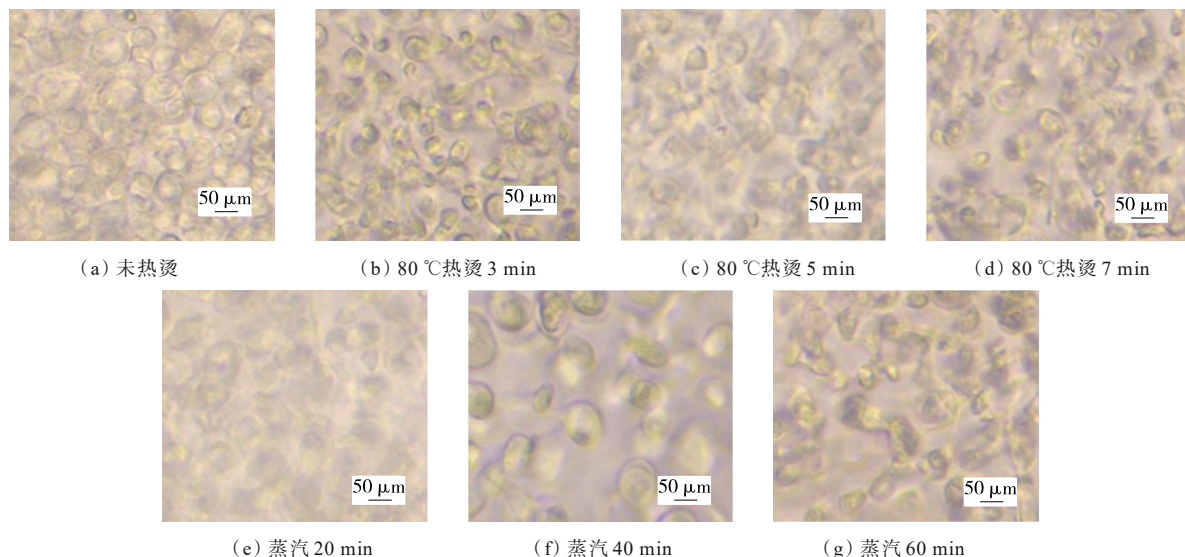


图 2 鲜银耳经不同热烫工艺处理后的微观结构

Figure 2 Microstructure of fresh *T. fuciformis* after different blanching processes

下,随着热烫时间的延长,胞间隙与视野内的透明区域逐渐增大,部分颗粒周缘出现亮晕,边界趋于模糊,呈现明显的吸水溶胀特征。热烫 7 min 时,颗粒间距显著拉大,局部出现网络断裂,表明结构已高度松散并开始离散化。热烫处理容易通过扩大细胞间隙和破坏细胞或胶体网络,引发植物或真菌组织显著膨胀,最终造成结构破坏^[8]。

相比之下,蒸汽热烫对银耳微观结构的影响呈现出更为复杂的时间梯度效应。蒸汽热烫 20 min 时,组织结构保持较好,颗粒边界分明。蒸汽热烫 40 min 时,胞间隙达到峰值,宽度明显大于热水组及蒸汽 60 min 组。蒸汽热烫 60 min 时,胞间隙较 40 min 时反而有所收缩,可能是由于长时间的高温作用导致部分水溶性多糖发生热聚合或凝胶网络结构发生局部塌缩,使疏松的结构趋向于一种新的稳定态。因此,蒸汽热烫并非线性地破坏结构,而是通过调节多糖基质的物理状态来调控品质,且 40 min 为其结构扩张的转折点。

2.3 对银耳含水率的影响

由图 3 可知,未处理银耳初始含水率最低(84.54%),两种热烫处理均显著提升样品含水率($P<0.05$)。80℃热水热烫组的含水率呈显著的时间效应:随着热烫时间的延长而持续上升,至 7 min 时达到最大值(95.19%),显著高于其他处理组($P<0.05$)。这一结果源于液相浸没时的充足供水,以及多糖基胶体网络的水化和松弛,外源水分更容易渗入并留存在组织微区,随着时间推移不断累积,从而导致整体含水率升高。相比之下,蒸汽热烫组的含水率整体明显更低(90.05%~90.58%),且随着热烫时间的延长未出现显著变化($P>0.05$)。这是由于蒸汽处理对水分迁移和组织结构的影响相对温和^[8]。蒸汽环境下,液相供水通量较为有限,组织增湿逐渐趋于平稳,进一步延长对含水率提升作用有限。结合显微结构可知,蒸汽处理后颗粒边界依然清晰,胞间隙增幅不大,说明细胞壁及多糖基胶体网络保持较好、溶胀受到限制,从而制约了总体含水率的进一步提高。

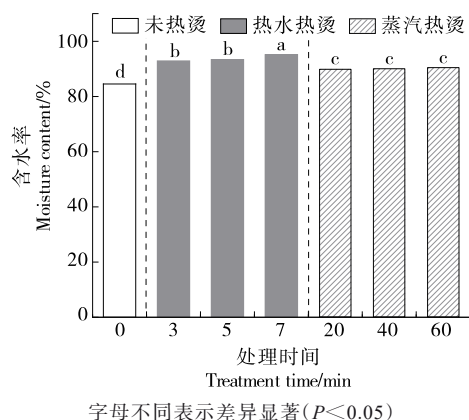


图3 鲜银耳经不同热烫工艺处理后的含水率

Figure 3 Moisture content of fresh *T. fuciformis* after different blanching processes

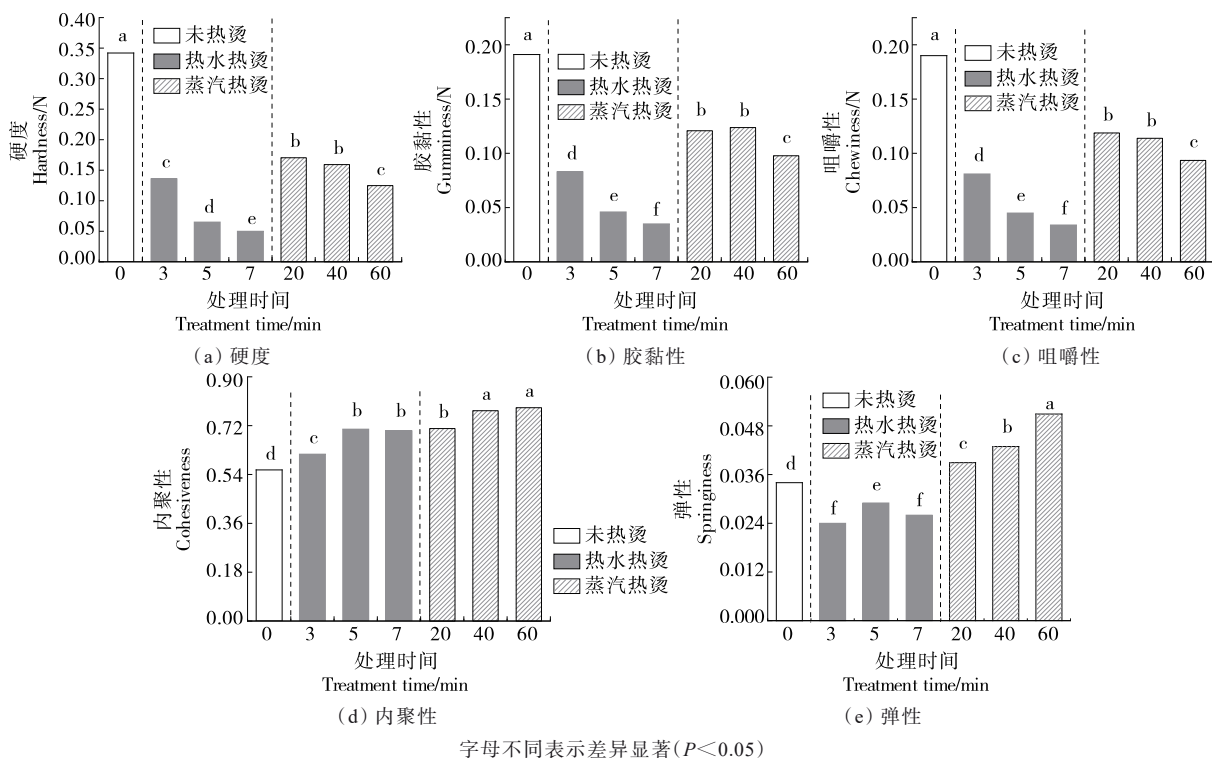
这种含水率上的显著差异,直接决定了两种工艺的加工适应性与经济性:80℃热水热烫后,银耳含水率过高,致使网络过度膨胀、结构变得松弛,且后续干燥负荷高。相比之下,蒸汽热烫的含水率更低且稳定,不仅显著降低了干燥成本,还更好地保持结构完整性、减少溶出损耗。从贮藏和货架期的角度看,银耳本身具有极高含水量且呼吸强度较高,若水分含量过高则更易发生品质劣变和腐败,明显缩短货架期^[8,19],这也从侧面印证了在预处理阶段控制含水率对银耳制品工业化加工的重要性。因此,蒸汽热烫是实现高品质、高致密、低损耗、低成本加工的更优选择。

2.4 对银耳质构的影响

硬度指样品首次压缩所需的最大作用力,数值越高表明组织结构越致密、抗变形能力越强;数值越低则质地越柔软^[20]。胶黏性表征样品对接触表面的黏附功,其绝对值越高,黏附性越强,即“黏牙”感越明显,反之则口感清爽。咀嚼性则是模拟样品咀嚼至可吞咽状态所需能量的综合指标,数值越高代表越“耐嚼”。由图 4 可知,两种热烫方法均显著降低了银耳硬度、胶黏性与咀嚼性($P<0.05$),且随着热烫时间的延长,硬度、胶黏性与咀嚼性均呈下降趋势。其中,蒸汽热烫 60 min 与热水热烫 3 min 后的银耳硬度无显著差异($P>0.05$),而蒸汽热烫 60 min 后银耳的胶黏性和咀嚼性显著低于热水热烫 3 min 的。原因主要有两点:①热水处理过程中水分渗透更充分,作为高效塑化剂的水分可降低银耳多糖网络的玻璃化转变温度,促进硬度下降^[17,21];而蒸汽处理主要依赖表层冷凝水,水分塑化作用较弱,故能更有效地维持银耳组织的结构刚性,使其成品保持更紧实的质地。②热水更易溶出银耳中的水溶性多糖等成分,导致原有网络结构强度降低^[22];蒸汽处理则能更大程度保留可溶性物质,维持结构完整性和机械强度,不仅有效降低了表面的黏腻感,还赋予了产品更佳的耐嚼性。

内聚性体现了样品在压力下维持整体性的内部黏合力,其增加意味着样品抵抗分散的能力提升,减少则表示结构疏松,易破裂、起渣、口感偏向散碎^[23]。两种热烫处理均能明显增强银耳的内聚性($P<0.05$),且热烫时间延长时,内聚性持续上升。这种效应可能源于其内部含量丰富的多糖^[24]。尽管热烫破坏了原始结构,使硬度下降,但能够使原本处于分布不均的自然状态的多糖高分子链在该过程中迅速水合,并重新相互缠结形成更均匀、连续的三维网络,这强化了其抗分散性能,进而提高了内聚性^[25]。随着热烫时间的延长,这种解旋—水合一重缠结的过程可能进行得越充分,银耳内部新形成的三维凝胶网络结构逐渐致密,内部的连接点逐渐增加,从而进一步提高内聚性。然而这一过程也存在一定限度,可能也是热水热烫 5 min 和 7 min 之间以及蒸汽热烫 40 min 和 60 min 之间内聚性无显著差异的主要原因。

弹性则衡量样品在变形后恢复原始高度的能力,升



字母不同表示差异显著 ($P < 0.05$)

图 4 鲜银耳经不同热烫工艺处理后的质构特性

Figure 4 TPA of fresh *T. fuciformis* after different blanching processes

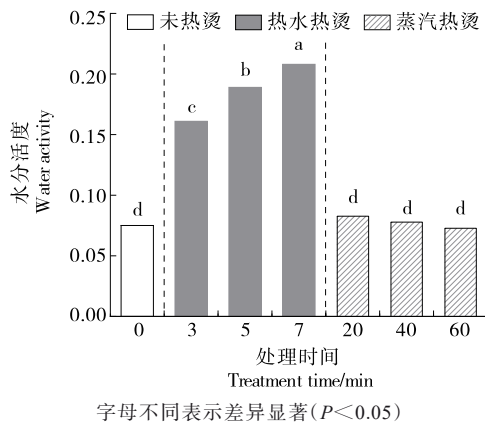
高表明网络弹性储能能力增强,韧性好,咀嚼后能回位;降低表明样品塑性形变占比增大、回复慢或不能回复,口感“绵软”。热水热烫显著降低了样品的弹性,而蒸汽热烫则显著增加了样品的弹性。这可能与两种热烫处理过程中,水溶性多糖的溶出量不同有关。热水热烫过程中,银耳完全浸没于液态水中,导致了水溶性多糖组分大量溶出,破坏了胶体网络的完整性,使其在压缩后难以恢复形变,因此弹性显著降低。而蒸汽热烫在高温高湿但非浸泡的环境下进行,水溶性多糖几乎没有溶出路径,因此保留较为完整,同时,更高的温度(约 100 °C)促进了这些被保留的多糖链更加充分的解旋、有助于形成更致密、交联更完善的三维网络结构,从而显著提升样品弹性。

综上,热水热烫能快速软化组织,但蒸汽热烫在整体质构的塑造上展现出更强的综合优势。它不仅能够维持更适宜的硬度、赋予产品清爽口感与良好耐嚼性,更重要的是能显著提升产品的内聚性与弹性,从而塑造出更具韧性与嚼劲的高品质口感。因此,若以优化质构品质为目标,蒸汽热烫是更为理想的加工选择。

2.5 对银耳水分活度的影响

水分活度是衡量冻干制品中自由水含量的关键指标,直接决定产品的货架期与贮藏稳定性;较低的水分活度不仅能有效抑制微生物生长和多数化学反应,也是限制微生物繁殖及非酶褐变、脂质氧化等劣变反应速率的核心因素,在许多低水分食品中甚至成为决定产品稳定

性的主导参数^[26-27]。由图 5 可知,热水热烫处理的水分活度显著高于蒸汽热烫处理和未处理的 ($P < 0.05$),但蒸汽热烫处理与未处理的样品之间并无显著区别。这是因为热水热烫可能导致大量水溶性多糖溶出。溶出的这部分多糖本身具有高度吸湿性,其吸附束缚水分子的能力远超已形成网络骨架的不溶性多糖^[28]。因此,其溶出会显著降低银耳对水分子的束缚能力。此外,热烫处理能够促使银耳内部形成稳定的三维网络结构,维持该结构的主要作用力是分子间氢键^[29]。这使得其一OH 基团与



字母不同表示差异显著 ($P < 0.05$)

图 5 经不同热烫工艺处理的鲜银耳冻干后的水分活度

Figure 5 Water activity of freeze-dried *T. fuciformis* after different blanching processes

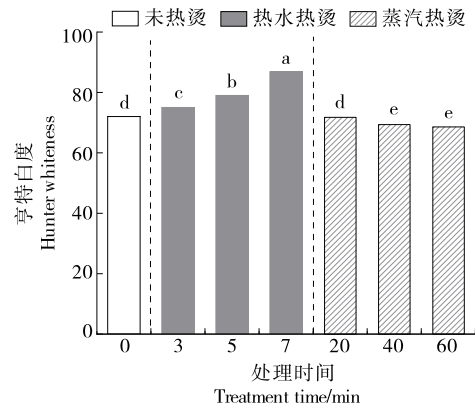
水分子间的结合减少,进而降低了对水分的束缚能力^[30]。因此,热水热烫由于引起了产品水分活度的显著增加($P<0.05$),为微生物生长提供了潜在条件,不利于长期贮藏。相比之下,蒸汽热烫处理能有效抑制水分在银耳内部的扩散以及银耳内部可溶性多糖的溶出,这样更有利于维持其天然亲水组分的稳定,进而提升内部水分束缚能力,因此在水分活度方面具有显著优越性。总体而言,热水热烫引起的水分活度升高是制约产品货架期的核心瓶颈。因此,在以延长货架期为首要目标的银耳制品开发中,蒸汽热烫是明显优于热水热烫的预处理方式。

2.6 对银耳白度的影响

白度是反映银耳干制品色泽品质、褐变程度的关键指标,数值越高表示外观越洁白。由图6可知,80℃热水热烫随热烫时间的延长表现出显著的增白效应($P<0.05$);而蒸汽热烫处理则暴露了褐变风险:尽管20 min处理组的白度与未处理组无显著差异($P>0.05$),但将热烫时间延长至40,60 min时,白度则显著下降($P<0.05$),褐变趋势加剧。这种相反的色泽变化主要源于两种热烫方式对褐变反应的不同影响机制。未处理银耳在后续的匀浆、冻干和粉碎过程中,其细胞结构被破坏,导致多酚氧化酶等褐变酶与底物接触,容易引发酶促褐变。热水热烫不仅能更快地钝化多酚氧化酶和过氧化物酶等活性,还能通过液相浸出大量可溶性褐变底物^[31],两者共同作用,有利于从源头上抑制酶促褐变,这可能是此时银耳白度提升的主要原因^[32]。而蒸汽处理的液相浸出效应微弱,因此在约100℃的较高温度与长时间的热作用下,未被去除的底物所参与的非酶褐变(如美拉德反应)的累积效应便占据主导,最终可能导致白度随热烫时间的延长而下降^[33-34]。因此,对于兼顾贮藏稳定性与色泽品质的综合需求,可考虑在蒸汽热烫20 min的基础上,辅以抗氧化护色液处理,既可维持较低水分活度,又可有效抑制褐变。

2.7 对银耳复水比的影响

复水比是评价冻干制品在复水过程中恢复其原有状态能力的关键指标^[35]。由图7可知,不同复水阶段(5,10,15 min),热水热烫样品的复水比均显著高于未热烫处理



字母不同表示差异显著($P<0.05$)

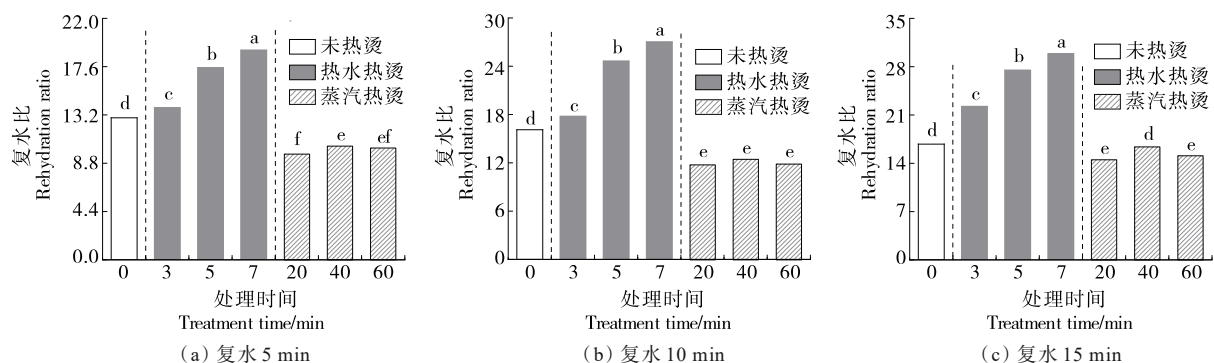
图6 鲜银耳经不同热烫工艺处理后的白度

Figure 6 Whiteness of fresh *T. fuciformis* after different blanching processes

的($P<0.05$)。这是由于热水热烫过程中,浸泡在水中的银耳内部多糖链解旋、舒展,并大量吸收水分形成一个充分水合的、膨胀的三维网络结构。预冻过程中,该结构内留存的水分凝结为冰晶并膨胀^[36]。冻干后冰晶升华,形成多孔的三维网络骨架^[37]。复水时,丰富的孔隙结构利于水分快速渗透,并有效留存自由水。然而,这种高度松散的多孔结构,正是其质构偏软、内聚性差的内在原因,且其高复水比往往伴随着高水分活度,不利于贮藏稳定。因此其复水比显著高于未处理样品。相比之下,蒸汽热烫样品在不同复水阶段其复水率均低于未热烫样品($P<0.05$)。这可能是由于蒸汽热烫过程中,水溶性多糖溶出量少,银耳内部形成的三维网络结构更加致密,且截留的结合水有限,因此冻干后复水率较低,而未处理样品由于保留了天然孔隙和毛细管通道,因此相比于蒸汽热烫样品更有利于复水^[38]。

3 结论

系统比较了80℃热水热烫与蒸汽(约100℃)热烫对鲜银耳物性及冻干品质的影响及其差异。结果表明,热



字母不同表示差异显著($P<0.05$)

图7 鲜银耳经不同热烫工艺处理后的复水比

Figure 7 Rehydration ratios of fresh *T. fuciformis* after different blanching processes

烫介质因其“水分可得性”的根本差异,对银耳组织结构产生了截然不同的调控效应。80℃热水热烫虽赋予了产品极其柔软的质地、洁白的色泽和极佳的复水性,但因液相环境供水充足引发剧烈的组织溶胀,导致冻干制品水分活度偏高,增加了产品在贮藏期间的劣变风险。相比之下,100℃蒸汽热烫因水分供给有限,使产品质地紧实,弹性与内聚性显著增强,且水分活度极低,有利于长期贮藏。当前试验参数下,蒸汽热烫工艺会导致产品白度与复水比有所下降,但相较于热水热烫工艺高水分活度的机制性缺陷,蒸汽热烫工艺的色泽与复水问题可通过工艺优化(如精准控制时间等)解决。因此,蒸汽热烫工艺更适合开发高品质、货架期稳定的银耳产品。后续可进一步研究热烫过程中多糖分子的降解动力学及氧化酶活性的精确演变规律。

参考文献

- [1] 饶克诚, 黄文, 王益, 等. 食用菌品质评价因素及保鲜技术研究进展[J]. 食品工业科技, 2023, 44(17): 454-462.
RAO K C, HUANG W, WANG Y, et al. Research advances on quality evaluation factors and preservation technology of edible mushrooms[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(17): 454-462.
- [2] MA X, YANG M, HE Y, et al. A review on the production, structure, bioactivities and applications of *Tremella* polysaccharides[J]. International Journal of Immunopathology and Pharmacology, 2021, 35: 20587384211000541.
- [3] 谭敏颖, 戴川景, 卢学敏, 等. 银耳多糖对人软骨细胞的增殖效应和抗炎作用[J]. 食品工业科技, 2024, 45(1): 1-8.
TAN M Y, DAI C J, LU X M, et al. Proliferation and anti-inflammatory effects of *Tremella fuciformis* polysaccharide on human chondrocytes[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(1): 1-8.
- [4] YANG D D, LIU Y, ZHANG L J. Tremella polysaccharide: the molecular mechanisms of its drug action[J]. Progress in Molecular Biology and Translational Science, 2019, 163: 383-421.
- [5] 张黎君. 银耳多糖的功能及应用研究进展[J]. 食品安全导刊, 2022(10): 148-150.
ZHANG L J. Research progress on function and application of *Tremella fuciformis* polysaccharide[J]. China Food Safety Magazine, 2022(10): 148-150.
- [6] CAO Y P, WU L, XIA Q, et al. Novel post-harvest preservation techniques for edible fungi: a review[J]. Foods, 2024, 13(10): 1554.
- [7] XIAO H W, PAN Z L, DENG L Z, et al. Recent developments and trends in thermal blanching - A comprehensive review[J]. Information Processing in Agriculture, 2017, 4(2): 101-127.
- [8] ZHENG Z P, WU L, LI Y B, et al. Effects of different blanching methods on the quality of *Tremella fuciformis* and its moisture migration characteristics[J]. Foods, 2023, 12(8): 1669.
- [9] KENESEI G, BOYLU-KOVÁCS M, GASHI A, et al. Effect of thermal and non-thermal pretreatments and fermentation on the amino acid and biogenic amine content of oyster mushroom[J]. Applied Sciences, 2025, 15(7): 3509.
- [10] 许欢怡, 李泉岑, 郑明锋, 等. 银耳多糖的结构、功能性及应用研究进展[J]. 食品工业科技, 2024, 45(4): 362-370.
XU H Y, LI Q C, ZHENG M F, et al. Research progress on structure, function and application of *Tremella fuciformis* polysaccharide[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(4): 362-370.
- [11] 班鑫荣, 杨焱, 李文, 等. 纳米粉碎对 3 种食用菌风味特征及减盐增鲜效果的影响[J]. 食品与机械, 2024, 40(1): 23-32, 39.
BAN X R, YANG Y, LI W, et al. Effect of flavor characteristics and salt reduction and flavor enhancement of three edible fungi by Nano-pulverization[J]. Food & Machinery, 2024, 40(1): 23-32, 39.
- [12] 黄建立. 银耳微波真空干燥机理及品质特性的研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2010: 61-62.
HUANG J L. Study on the microwave vacuum drying mechanism and quality characteristics of white fungus[D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2010: 61-62.
- [13] 姚清华, 林虬, 陈美珍, 等. 烘干方式对银耳营养品质的影响[J]. 福建农业学报, 2021, 36(7): 861-866.
YAO Q H, LIN Q, CHEN M Z, et al. Effects of drying technology on nutrition of *Tremella fuciformis*[J]. Fujian Journal of Agricultural Sciences, 2021, 36(7): 861-866.
- [14] 孟迪, 党斌, 张杰, 等. 干燥方法对黄蘑菇品质及微观结构的影响[J]. 食品与机械, 2022, 38(10): 139-145, 234.
MENG D, DANG B, ZHANG J, et al. Effects of drying methods on the quality and microstructure of *Armillaria luteovirens*[J]. Food & Machinery, 2022, 38(10): 139-145, 234.
- [15] LIU Y, TAN Z F, HUANG Y Z, et al. pH-shift strategy improving the thermal stability and oxidation stability of rice starch/casein-based high internal phase emulsions for the application in fish cake[J]. Food Chemistry: X, 2023, 18: 100694.
- [16] LIN C P, TSAI S Y. Differences in the moisture capacity and thermal stability of *Tremella fuciformis* polysaccharides obtained by various drying processes[J]. Molecules, 2019, 24(15): 2856.
- [17] IIJIMA M, MA S, ASANO-ORITANI M, et al. Thermal studies on *Tremella fuciformis* polysaccharide-water interaction[J]. Thermochimica Acta, 2024, 732: 179657.
- [18] 朱叶力. 基于热处理的银耳多糖溶出动力学研究及银耳饮料开发[D]. 南宁: 广西大学, 2024: 43-44.
ZHU Y L. Dissolution kinetics of tremella polysaccharides on heat treatment and development of *Tremella fuciformis* beverage[D]. Nanning: Guangxi University, 2024: 43-44.
- [19] SUN J Z, WEI Y Y, LI L X, et al. Investigating the respiratory and energy metabolism mechanisms behind ϵ -poly-L-lysine chitosan coating's improved preservation effectiveness on *Tremella fuciformis*[J]. Foods, 2024, 13(5): 707.

- [20] 阮鸣, 王嘉蓓, 续晨, 等. 响应面法优化红枣银耳枸杞凝胶软糖配方工艺[J]. 现代食品科技, 2024, 40(9): 238-247.
- RUAN M, WANG J B, XU C, et al. Formula optimization of the jujube, tremella, and goji berry gel gummies using the response surface method[J]. Modern Food Science and Technology, 2024, 40(9): 238-247.
- [21] 杜茜茜, 易建勇, 毕金峰, 等. 细胞壁多糖对真空冷冻干燥再造型苹果脆片质构的影响[J]. 中国食品学报, 2022, 22(1): 144-154.
- DU Q Q, YI J Y, BI J F, et al. Effects of cell wall polysaccharides on the texture of vacuum freeze-dried restructured apple chips[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2022, 22(1): 144-154.
- [22] 吴梦柯. 香蕉花水溶性多糖提取、结构分析及其生物活性研究[D]. 南宁: 广西民族大学, 2023: 42-43.
- WU M K. The extraction, structural analysis and biological activity of water-soluble polysaccharides from banana flowers [D]. Nanning: Guangxi University for Nationalities, 2023: 42-43.
- [23] 沈颖越, 宋婷婷, 蔡为明, 等. 基于质构仪质地多面分析法对香菇质地评价[J]. 菌物学报, 2021, 40(5): 1 180-1 189.
- SHEN Y Y, SONG T T, CAI W M, et al. Evaluation on fruiting body texture of *Lentinula edodes* based on texture profile analysis[J]. Mycosystema, 2021, 40(5): 1 180-1 189.
- [24] 龙慧, 李祎, 朱叶力, 等. 银耳多糖与大豆分离蛋白的相互作用及流变性能[J]. 食品科学, 2022, 43(16): 160-168.
- LONG H, LI Y, ZHU Y L, et al. Interaction between *Tremella fuciformis* polysaccharide and soybean protein isolate: rheological properties of their mixtures[J]. Food Science, 2022, 43(16): 160-168.
- [25] LIN Y, XU Q L, LI X M, et al. *Tremella fuciformis* polysaccharides as a fat substitute on the rheological, texture and sensory attributes of low-fat yogurt[J]. Current Research in Food Science, 2022, 5: 1 061-1 070.
- [26] TAPIA M S, ALZAMORA S M, CHIRIFE J. Effects of water activity (aw) on microbial stability: as a hurdle in food preservation[M]// BARBOSA-CÁNOWAS, FONTANA A J, SCHMIDT S J, et al. Water activity in foods: fundamentals and applications. Ames, Iowa: Blackwell Publishing, 2007: 239-240.
- [27] LIU S X, DONG Q, WU A, et al. Recent development in low-moisture foods: microbial safety, quality, and shelf life[J]. Trends in Food Science & Technology, 2022, 123: 254-266.
- [28] 吴丹珠. 银耳多糖对大米淀粉老化与消化特性的影响[D]. 南宁: 广西大学, 2024: 40-46.
- WU D Z. Effect of *Tremella fuciformis* polysaccharide on retrograde and digestive properties of rice starch[D]. Nanning: Guangxi University, 2024: 40-46.
- [29] XU J Y, ZOU Y, GUO L Q, et al. Rheological and microstructural properties of polysaccharide obtained from the gelatinous *Tremella fuciformis* fungus[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2023, 228: 153-164.
- [30] LU X Y, MO X Y, GUO H, et al. Sulfation modification and anticoagulant activity of the polysaccharides obtained from persimmon (*Diospyros kaki L.*) fruits[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2012, 51(5): 1 189-1 195.
- [31] 李彦丽. 热烫及干燥方式对百合微观结构及理化特性的影响[D]. 长沙: 湖南大学, 2018: 18-20.
- LI Y L. Effect of blanching and drying methods on micro structure and physicochemical properties of lily[D]. Changsha: Hunan University, 2018: 18-20.
- [32] LIN T, ZHOU Z G, XING C M, et al. Effect of color protection treatment on the browning and enzyme activity of *Lentinus edodes* during processing[J]. Food Science & Nutrition, 2022, 10(9): 2 989-2 998.
- [33] MARTINS S I F S, JONGEN W M F, VAN BOEKEL M A J S. A review of Maillard reaction in food and implications to kinetic modelling[J]. Trends in Food Science & Technology, 2000, 11(9/10): 364-373.
- [34] 尹梓如, 秦芳媛, 韩雪. 膳食多酚对美拉德反应产物化学及生物活性的影响[J]. 河北科技大学学报, 2025, 46(3): 296-303.
- YIN Z R, QIN F Y, HAN X. Effect of dietary polyphenols on chemical and biological activities of Maillard reaction products [J]. Journal of Hebei University of Science and Technology, 2025, 46(3): 296-303.
- [35] 赵雅婷, 李一寒, 高何昊, 等. 不同干燥方式对香菇干燥特性及品质的影响[J]. 农产品加工, 2024(20): 26-30.
- ZHAO Y T, LI Y H, GAO H H, et al. Effects of different drying methods on drying characteristics and quality of shiitake mushrooms[J]. Agricultural Products Processing, 2024 (20): 26-30.
- [36] WU L, CHEN S H, LI Y B, et al. Effect of heat pump drying temperature on moisture migration characteristics and quality of instant *Tremella fuciformis*[J]. Current Research in Food Science, 2024, 9: 100825.
- [37] 曹雪慧, 李倩钰, 嵯秋辰, 等. 香菇复水过程品质变化研究进展[J]. 食品科学, 2024, 45(20): 311-319.
- CAO X H, LI Q Y, ZHUO Q C, et al. Research progress on quality changes during rehydration process of shiitake mushroom[J]. Food Science, 2024, 45(20): 311-319.
- [38] 苏鑫, 吕慧威, 刘舟, 等. 黑木耳多糖对黑木耳复水特性的影响[J]. 食品与机械, 2025, 41(9): 203-208.
- SU X, LU H W, LIU Z, et al. Effects of *Auricularia auricula* polysaccharides on its rehydration characteristics[J]. Food & Machinery, 2025, 41(9): 203-208.