

气体射流冲击干燥对脱盐海参理化特性和微观结构的影响

林雅文¹, 李艾青¹, 谭卓弘¹, 崔方超¹, 李英美², 谢永康³, 李星仪³, 励建荣¹,
李学鹏^{1*}

(1. 渤海大学食品科学与工程学院/海洋研究院, 锦州 121013; 2. 凌海市达莲海珍品养殖有限责任公司, 锦州 121209; 3. 河南省
农业科学院农副产品加工研究中心, 郑州 450002)

摘要: 为改善脱盐海参干燥时间长、干制品品质差的问题, 该研究将气体射流冲击干燥 (Air impingement drying, AID) 技术应用
于脱盐海参干燥, 研究了干燥温度 (50、60 和 70 °C) 和气流速度 (4、6 和 8 m/s) 对脱盐海参干燥速率及干制品水分分布及状态、
微观结构、硬度和皂苷含量的影响, 并与热风干燥 (Hot air drying, HAD) 进行对比。结果表明, 随着干燥温度的增加, 脱盐海参
的干燥速率增加。AID 不同干燥温度下脱盐海参的干燥时间比 HAD 60 °C 的海参干燥时间缩短了 6.67%~33.33%。温度为 60 °C 时,
风速对脱盐海参的干燥时间影响不显著 ($P>0.05$)。微观结构分析表明, 温度升高有利于增加物料表面的多孔结构, 相同条件下
AID 海参样品的表面比 HAD 海参具有更多更大的多孔结构, 使得 AID 海参干燥速率快于 HAD。但随着风速的增加, 脱盐海参表
面因发生结壳现象阻止了形变, 使得干海参孔洞结构变小, 干燥速率降低。与 HAD 相比, AID 海参的不易流动水弛豫时间向短弛
豫时间移动更快, 且峰幅度显著降低; 干燥相同时间时 (6 h), AID 海参的质子密度信号比 HAD 减少更多, 表明 AID 海参的水
分迁移速率快于 HAD 的海参。随着 AID 温度和风速的升高, 干海参的硬度呈先增加后减小的趋势。AID 海参皂苷含量 (1.36~1.79
μg/g) 随着温度的升高而升高。AID 海参的多孔结构不仅加速了水分迁移, 而且利于营养成分渗出, 提高了营养成分含量, 相同条
件下, AID 海参的皂苷含量比 HAD 的海参增加了 50.00%。综合考虑干燥效率和品质, 温度为 70 °C, 风速为 6 m/s 为脱盐海参
AID 的较好条件。研究结果有助于阐明 AID 提高脱盐海参干燥速率和营养成分保留率的机理, 为生产高品质干海参品质提供理论
依据和技术参考。

关键词: 气体射流冲击干燥; 脱盐海参; 水分迁移; 微观结构; 硬度; 皂苷

中图分类号: S986.1 **文献标识码:** A **doi:** 10.11975/j.issn.1002-6819.202309031

收稿日期: 2023-09-05

修订日期: 2023-10-16

基金项目: 辽宁省海洋经济发展专项 (2021-84); 锦州市指导性计划项目 (JZ2022B030);

国家自然科学基金青年科学基金项目 (32202102); 河南省农业科学院优秀青年科技基金

项目 (2022YQ23)

作者简介: 林雅文, 博士, 讲师, 主要研究方向为水产品加工与贮藏。Email: linyawen2020@163.com

***通信作者:** 李学鹏, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为水产品加工与贮藏。Email: xuepengli8234@163.com

0 引言

海参富含多种营养成分和生物活性化合物,具有很高的药用价值和营养价值^[1-3],其需求量逐年上升。2021 年中国海参养殖产量达到 22.27 万 t^[4],比 2020 年 (19.65 万 t) 增长了 13.3%。但是新鲜海参在受到环境和外界因素的影响时,会吐出肠内成分,发生自溶现象。这可能导致海参在加工和贮藏过程中品质严重恶化,从而造成重大经济损失。盐渍是海参的保鲜方法,可以快速降低海参水分、杀灭微生物,延长货架期。盐渍海参常作为干制海参原料,因其含盐量过高,在干制前需进行脱盐处理。脱盐后的海参水分含量较高,常通过干燥降低含水率,延长贮藏期。

干燥是食品保鲜的有效方法之一,可通过去除水产品中的水分,降低水分活度,抑制酶活性及微生物生长繁殖,从而防止水产品腐败变质,延长保藏期^[5]。水产干制品具有质量轻、体积小、保藏期长、不需冷链、便于贮藏运输等特点,因此水产品干燥是国内外企业加工水产品的重要方法。如今,超过 80% 的新鲜海参被加工成脱水产品,以延长其贮藏时间。海参传统干制方法主要有盐干、晒干^[7]、热风干燥 (Hot air drying, HAD)^[6] 和冷风干燥^[7] 等,不仅耗时长,还会造成营养成分的流失和破坏,尤其是对海参中富含的多种活性物质破坏严重,其中真空冷冻干燥对营养物质破坏较小,但是能耗大以及成本较高^[8]。

气体射流冲击干燥 (Air impingement drying, AID) 是将加热加压气体通过热导管直接冲击物料表面进行加热干燥的一种干燥方法。高速热气流直接冲击物料表面,降低了热边界层和热质转换阻力,从而提升热交换速率,缩短干燥时间^[9]。相比传统的热风干燥,在保证品质的基础上具有更高的对流换热系数和干燥速度,以及更低的能耗。已有研究表明, AID 的对流换热系数比普通热风高出数倍甚至一个数量级^[10]。在农产品干燥领域中,气体射流冲击干燥作为一种新型干燥技术,具有干燥速率高、能耗低的优点^[11]。气体射流冲击干燥技术已成功应用于柠檬^[12]、红枣^[13]、茎瘤芥^[14]、番茄^[15]、甘蓝^[16] 及葡萄^[17] 等的干燥,且效果显著。LI 等^[14] 在茎瘤芥的干燥研究中发现,与热风干燥相比, AID 的茎瘤芥具有更高的干燥效率,且所干燥的茎瘤芥褐变程度更轻。XUE 等^[18] 在苦瓜片的 AID 研究中发现,与风速和切片厚度相比,风温是影响干燥速率的最大因素,苦瓜片的 AID 干燥过程为降速干燥。但是,针对脱盐后的海参, AID 温度和风速对干燥速率和品质影响的研究尚未见报道。

因此,本文以 HAD 为对比,研究 AID 干燥温度 (50、60 和 70 °C) 和风速 (4、6 和 8 m/s) 对脱盐海参干燥特性和理化特性的影响。通过低场核磁共振 (low field nuclear magnetic resonance, LF-NMR) 和磁共振成像 (magnetic resonance imaging, MRI) 分析脱盐海参内部的水分状态和分布,以揭示脱盐海参内部水分迁移规律,并结合脱盐海参内部微观孔道结构,揭示 AID 相比于 HAD 提高脱盐海参干燥速率的机理,为缩短脱盐海参干燥时间,提高海

参干制品品质提供理论依据和技术支持。

1 材料与方法

1.1 试验材料

盐渍海参,购于辽宁省锦州市水产市场。挑选质量均一 (7.90 ± 0.83) g 的盐渍海参置于 -18 °C 保存,不超过 60 d。试验前,将盐渍海参取出,在室温下解冻 1 h。根据 GB 5009.3-2016,测定样品的含水率 (在 105 °C 烘箱中干燥至恒量后),盐渍海参的湿基含水率为 $59.10\% \pm 1.00\%$ 。

1.2 试验试剂

乙醇、正丁醇、甲醇均为分析纯,购于天津福晨化学试剂有限公司;香草醛、冰醋酸、硫酸,购于阿拉丁试剂有限公司;2.5%戊二醛,购于北京索莱宝科技有限公司。

1.3 仪器与设备

zz-tp001 精密电子天平,永康市戎睿商贸有限公司;气体射流冲击干燥设备,河南省农业科学院农副产品加工研究中心;Biofuge Stratos 高速冷冻离心机,美国 Thermo 公司;SH200N TMS-PRO 质构仪,美国 FTC 公司;ReadMax 1200 光吸收全波长酶标仪,上海闪谱生物科技有限公司;NMI20-040H-I 低场核磁共振仪,上海纽迈电子科技有限公司;JSM-IT200 扫描电镜,日本电子株式会社有限公司。

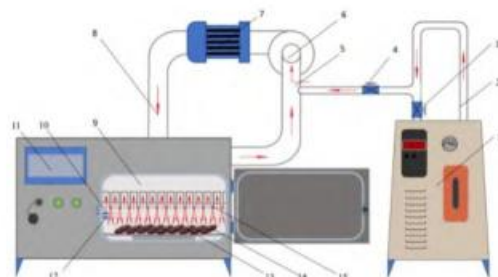
1.4 试验方法

1.4.1 脱盐预处理

选择体型完整,大小均匀一致的海参,每只质量约为 (7.90 ± 0.83) g,长度约为 (6.65 ± 0.44) cm。样品于试验前取出在室温下解冻 1 h,湿基含水率为 $59.10\% \pm 1.00\%$,盐渍海参干燥前需进行脱盐预处理。根据前期预试验,解冻后进行真空脉动浸渍脱盐,料液比 (盐渍海参与纯水之间的质量比) 1:100,脉动比 (真空保持时间:常压保持时间) 为 45:3,循环 3 次。浸渍完成后吸去脱盐海参表面水分,湿基含水率为 $69.31\% \pm 1.52\%$ 。

1.4.2 气体射流冲击干燥

气体射流冲击干燥设备图如图 1 所示。试验过程中,首先将仪器预热至所需温度 50、60 和 70 °C,并设置风速分别为 4、6 和 8 m/s,将脱盐海参 (约 90 g) 平铺于托盘上进行干燥,物料干燥密度为 0.27 g/cm^3 。干燥过程前 2 h 每 30 min 进行称量,之后每隔 1 h 称量,直至脱盐海参干基含水率降到 10% 为干燥终点^[19]。



1. 蒸汽发生器 2. 蒸汽导管 3. 常开阀 4. 常闭阀 5. 回风管道 6. 离心风机 7. 电加热管 8. 进风管道 9. 气流分配室 10. 温度和湿度传感器 11. 控制面板 12. 温度风速控制器 13. 物料托盘 14. 物料 (海参) 15. 干燥室

1. Steam generator 2. Steam duct 3. Normally open valve 4. Normally closed valve 5. Recirculating air duct 6. Centrifugal fan 7. Electric heating tube 8. Air intake duct 9. Air distribution chamber 10. Temperature and humidity sensor 11. Control panel 12. Temperature and air velocity controller 13. Material tray 14. Materials (desalted sea cucumber) 15. Drying chamber

图1 气体射流冲击干燥设备图

Fig.1 Air impingement drying equipment diagram

1.4.3 热风干燥

首先将仪器预热至所需温度 60 °C，并设置风速 6 m/s，将脱盐海参（约 90 g）平铺于托盘上进行干燥^[20]。干燥过程前 2 h 每 30 min 进行称量，之后每隔 1 h 称量，直至脱盐海参干基含水率降到 10% 为止。

1.5 干燥参数

1.5.1 干基含水率

用电子天平进行称量，干基含水率计算如式（1）^[21]所示。

$$\omega_t = \frac{m_t - m_d}{m_d} \quad (1)$$

式中 ω_t 为海参在 t 时刻的干基含水率，g/g； m_t 为 t 时刻的海参质量，g； m_d 为干燥处理至恒量时样品质量，g。

1.5.2 干燥速率（DR）

干燥速率（drying rate, DR）计算如式（2）所示。

$$DR = \frac{\omega_{t1} - \omega_{t2}}{t_2 - t_1} \quad (2)$$

式中 DR 为干燥速率； ω_{t1} 为 t_1 时刻的干基含水率，g/g； ω_{t2} 为 t_2 时刻的干基含水率，g/g； $t_2 - t_1$ 为干燥时间，h。

1.6 水分分布状态测定

利用低场核磁共振分析仪测定样品的横向弛豫时间（ T_2 ）和质子密度分布图像，以表征样品中的水分状态。将样品放入直径 40 mm 玻璃管中，然后置于射频线圈中心位置，进行 Carr-Purcell-Meiboom-Gill（CPMG）脉冲序列扫描测试。测试具体参数设置为：主频=23.3 MHz，磁场强度=0.5 T，测量温度=32 °C，90°脉冲时间=18 ms，180°脉冲时间=36 ms，回波时间=1 500 ms，累加次数=4^[22]。每组样品重复测定 3 次。

通过自旋回波（Spin Echo, SE）成像序列获取样品中氢质子的密度分布图像。主要参数为：切片扫描视角为 90.0°，切片宽度为 3.4 mm，累加次数 4 次，回波时间（Echo time, TE）为 50 ms，重复时间（Repetition time, TR）为 1 800 ms^[23]。

1.7 微观结构观察

根据 GE 等^[24]的方法略作修改。将脱盐后的海参切成薄片，置于 2.5% 戊二醛溶液中 24 h，再使用（0.1 mol/L，pH 值 6.8）的磷酸盐缓冲液漂洗 4 次，每次 10 min，然后依次利用体积分数为 50%、70%、80% 和 90% 乙醇溶液各冲洗 10 min，最后使用 100% 乙醇继续冲洗 3 次，脱水，待样品脱水完毕，冷冻干燥 15 h 后进行真空离子溅射仪喷金。利用扫描电子显微镜（scanning electron microscopy, SEM）观察其微观结构，加速电压为 15 kV，放大倍数×500 和 ×2000。

1.8 硬度测定

分别从不同条件干燥海参背面切下 1 cm×1 cm×1 cm 大小的海参块，采用 TA-XT-PLUS 质构仪对海参进行硬度分析。将 P/50 圆柱形测头垂直移动到海参块上，测前速度 2.0 mm/s、测试速度和测后速度均为 1.0 mm/s。触发力和压缩程度分别为 50 N 和 50%，间隔时间为 5 s，连续压缩 2 次^[25]。每个样品平均测定 3 次。

1.9 皂苷含量测定

根据 MAMATOV 等的方法稍作修改^[26]。将海参样品粉碎，准确称取 2 g 至 250 mL 烧瓶中，加入 80% 无水乙醇 150 mL，分 3 次在 60 °C 摇床浸提，每次浸提 1 h，合并浸提液，将浸提液用旋转蒸发仪蒸干后加入 25 mL 去离子水溶解。使用等体积饱和正丁醇萃取 3 次，合并正丁醇部分并用旋转蒸发仪蒸干；用 60% 甲醇溶解，转移至 25 mL 容量瓶中，定容摇匀，得到皂苷提取液。

采用香草醛-冰醋酸法^[27]测定皂苷含量。吸取待测溶液 1 mL，至 10 mL 试管中，水浴蒸干溶剂，向试管中依次加入 5% 香草醛-冰醋酸溶液 0.2 mL，60% 硫酸 5 mL，摇匀。60 °C 水浴加热 20 min，室温放置 10 min，在波长 560 nm 下测定吸光度值。通过标准曲线（ $y=1.3295x-0.0026$ ， $R^2=0.9997$ ， x 为皂苷含量 μg ， y 为吸光度值）计算皂苷含量。

1.10 数据分析

使用软件 Excel2016 处理数据，采用统计软件 SPSS16.0 分析数据，利用单因素方差分析（ANOVA），基于 Duncan 检验进行显著性比较（ $P<0.05$ ），采用 Origin 2021 作图，所有试验平行 3 次，试验结果以平均数±标准差表示。

2 结果与讨论

2.1 干燥条件对脱盐海参干燥速率的影响

对脱盐海参进行 AID 试验，先将风速固定为 6 m/s，风速对干燥速率的影响如图 2a 所示。提高干燥温度通常会缩短干燥时间，因为高温增加了样品与干燥介质之间的温度梯度，从而增加了传热传质速率^[28]。脱盐海参整个 AID 过程主要为降速干燥，这与大多数水产品的干燥过程相一致^[29]。AID 温度越高，脱盐海参的干燥速率越快。不同温度下脱盐海参的干燥时间如图 2b 所示。AID 不同温度下干燥时间分别为 14、13 和 10 h，HAD 的干燥时间为 15 h。AID 不同干燥温度下脱盐海参的干燥时间比 HAD 60 °C 的海参干燥时间缩短了 6.67%~33.33%。60 °C 条件下，AID 达到最终含水率的干燥时间比 HAD 缩短了 13.33%，表明 AID 可有效提高脱盐海参干燥速率。HAD 过程主要为降速干燥阶段，但前期存在短暂的升速干燥期，可能是因为当湿物料与热空气相接触时，物料温度升高，表面的水分开始汽化，内部蒸汽压逐渐升高，导致干燥速率逐渐增大。当物料温度达到干燥温度后，蒸汽压不再升高，干燥速率随时间的增加和干基含水率的降低而逐渐降低^[30]。干燥速率由升速期向降速期的变化表明，传质机制由表面扩散向内部扩散转变，而干燥过程主要由内部水分扩散控制^[31]。

当温度固定为 60 °C 时，风速对脱盐海参干燥速率和干燥时间的影响如图 2c 和 2d 所示。风速升高对干燥时间的影响不显著。这是因为风速对干燥速率的影响主要体现在

促进物料表面水分蒸发, 而干燥主要是由后期自由水含量降低引起的内部水分扩散控制的^[31]。与温度为 60 °C, 风速为 6 m/s 的 HAD 相比, 相同温度和风速下, AID 海参的干燥速率更快。这是因为 AID 海参具有更多的孔洞结构(图 4), 更有利于水分散失, 从而加快干燥的进行。而 HAD 海参较少的孔洞结构阻碍了水分快速扩散, 导致干燥速率较慢。

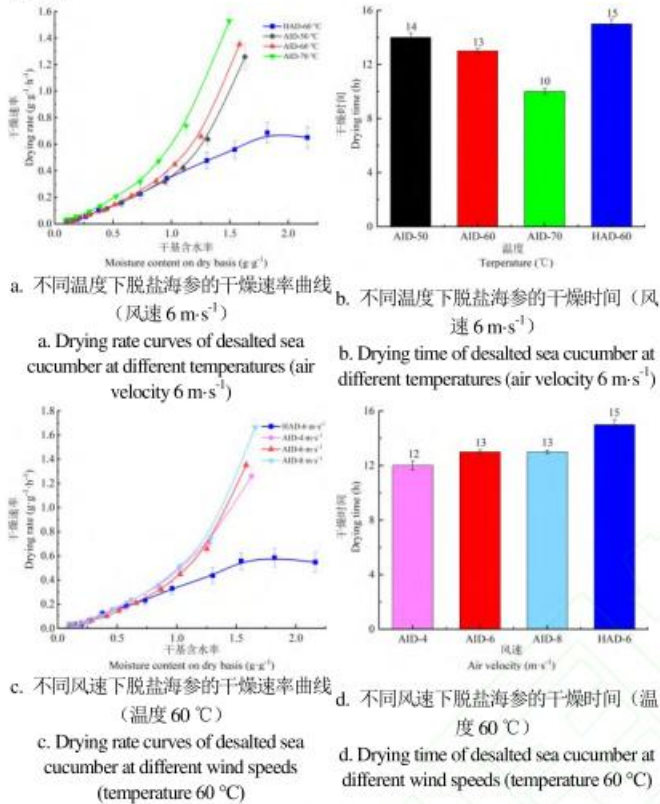


图2 干燥条件对脱盐海参干燥速率和干燥时间的影响

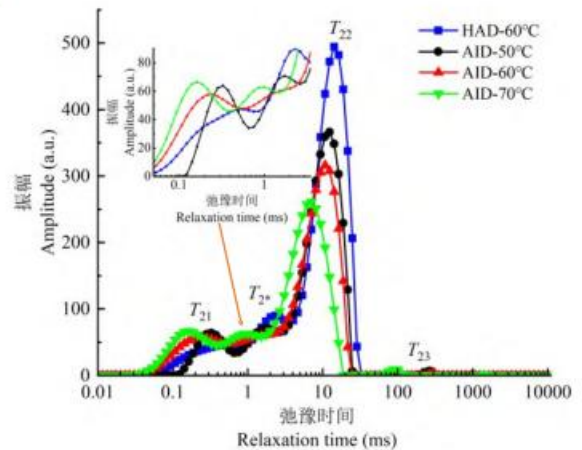
Fig.2 Effects of drying conditions on drying rate and drying time of desalted sea cucumber

2.2 干燥条件对脱盐海参水分分布和状态的影响

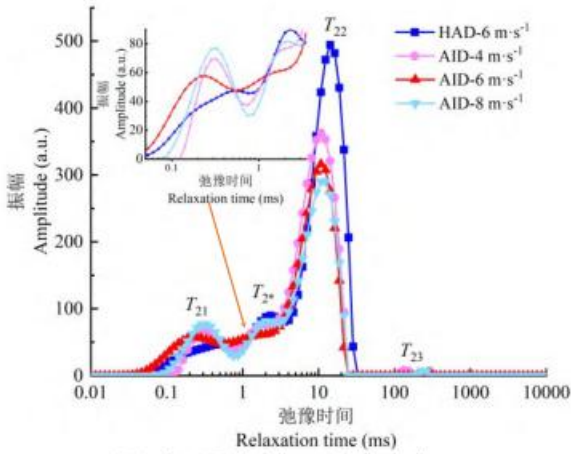
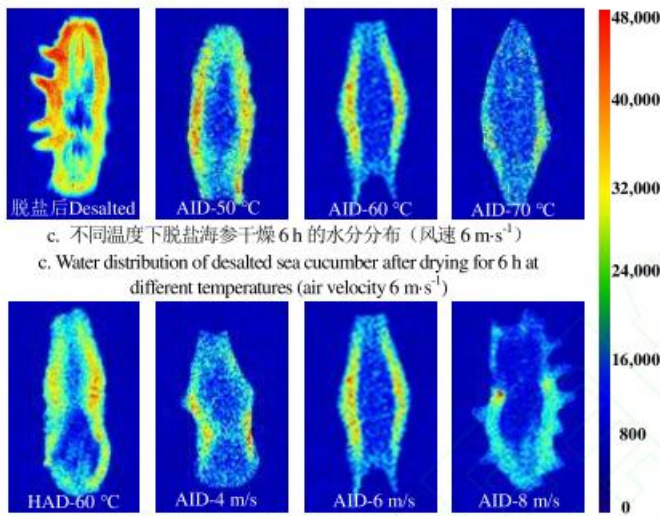
水分是水产品的主要组成部分, LF-NMR 是一种无损检测技术, 已被广泛应用于研究样品水分状态^[32]。横向弛豫时间 T_2 反映了氢质子的化学状态以及物料中水分的自由度, 根据水分子流动性强弱, 通常可分为 T_{23} 、 T_{22} 和 T_{21} 。 T_{21} (0.1~10 ms) 被认为是存在于细胞间隙和细胞壁中与蛋白质等大分子结合的结合水。 T_{22} (10~100 ms) 被认为是存在于细胞质中的不易流动水。最后, 具有最长弛豫时间的水组分 T_{23} (100~1,000 ms) 被认为是存在于液泡中的自由水^[33]。为观察干燥条件对海参水分状态的影响, 采用 LF-NMR 测定了干燥相同时间(6 h)的脱盐海参 T_2 弛豫谱, 如图 3a 和 3b 所示。与 HAD 相比, AID 处理导致脱盐海参的 3 个峰均向短弛豫时间移动, 不易流动水的峰幅度显著降低。AID 海参的 T_{22} 弛豫时间随温度的升高而缩短, 随风速的升高峰幅度降低, 这与干燥特性相吻合。该结果表明, 由于水分蒸发引起的胶原纤维收缩导致水组分的自由度下降。AID 和 HAD 的海参组织内出现了第 4 个峰 T_{2*} (0.4~1.4 ms), 这可能是由于热加工破坏了细胞结构的完整性, 使原本被质膜束缚的水分游离出来, 促进了羟基质子与水分之间的化学交换, 膜通透性的改变将弛豫时间的峰分配变

得复杂^[34]。HE 等^[25]在海参的微波干燥过程中发现干燥后海参的 T_2 弛豫谱同样出现了第 4 个峰。相比于 HAD, 在相同干燥条件下 AID 过程中海参的横向弛豫曲线向短弛豫时间迁移更快, 说明在相同干燥时间内, AID 海参要比 HAD 脱除更多的水分, 海参微观结构图(图 4)同样证明了这一结论。

采用质子密度加权成像研究了脱盐海参水分分布。质子密度越高意味着水分含量越高^[35]。图 3c 和 3d 显示了脱盐海参在不同干燥条件下干燥 6 h 的 MRI 图像。脱盐后海参样品的 MRI 图像颜色呈明亮的红色, 有着较高的信号强度, 表明样品中的水分含量很高, 且其水分在样品中的分布清晰可见, 水分主要集中在海参体壁。经干燥后, 脱盐海参在两种干燥方式下的 MRI 图像亮度降低, 表明脱盐海参内部水分含量减少。脱盐海参头部和尾部水分含量明显比体壁蒸发更快。由图 3c 可知, 脱盐海参在 AID50、60 和 70 °C 下分别干燥 6 h 后, 随着温度升高, 红色和黄色区域减小, 蓝色区域增加, 质子密度信号减弱越明显, 水分散失越多, 干燥速率越快。ZANG 等^[36]在 HAD 海参的研究中发现了类似现象。由图 3d 可知, 海参在 AID 风速为 4、6 和 8 m/s 下分别干燥 6 h 后, 脱盐海参样品的亮度同样降低, 质子密度信号减弱, 但随着风速升高, 质子密度信号减弱不明显, 这与脱盐海参的干燥特性一致。与 HAD 相比, AID 海参的红色和黄色区域更小, 质子密度明显减少的更快。由于 AID 海参较大的孔洞结构有利于水分散失, 加快了脱盐海参中水分迁移速率, 使得在干燥相同时间时, AID 海参比 HAD 海参的水分散失更多。



a. T_2 relaxation spectra of desalted sea cucumbers at different temperatures (air velocity 6 m·s⁻¹)

b. 不同风速下脱盐海参的 T_2 弛豫谱 (温度 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$)b. T_2 relaxation spectra of desalted sea cucumbers at different air velocities (temperature $60\text{ }^{\circ}\text{C}$)c. 不同温度下脱盐海参干燥 6 h 的水分分布 (风速 $6\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)c. Water distribution of desalted sea cucumber after drying for 6 h at different temperatures (air velocity $6\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)d. 不同风速下脱盐海参干燥 6 h 的水分分布 (温度 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$)d. Water distribution of desalted sea cucumber after drying for 6 h at different air velocities (temperature $60\text{ }^{\circ}\text{C}$)

注: T_{21} 、 T_{2*} 、 T_{22} 和 T_{23} 分别表示强结合水、弱结合水、不易流动水和自由水。质子密度加权成像图中不同颜色代表不同的质子密度, 图像中每个像素体的颜色由红色到蓝色表示样品质子密度由高到低变化。

Note: Note: T_{21} , T_{2*} , T_{22} and T_{23} represent strongly bound water, weakly bound water, immobilized water and free water respectively. Different colors in the proton density weighted image represent different proton densities. The color of each pixel in the image varies from red to blue, indicating that the proton density of the sample changes from high to low, and the higher the proton density means the higher the water content.

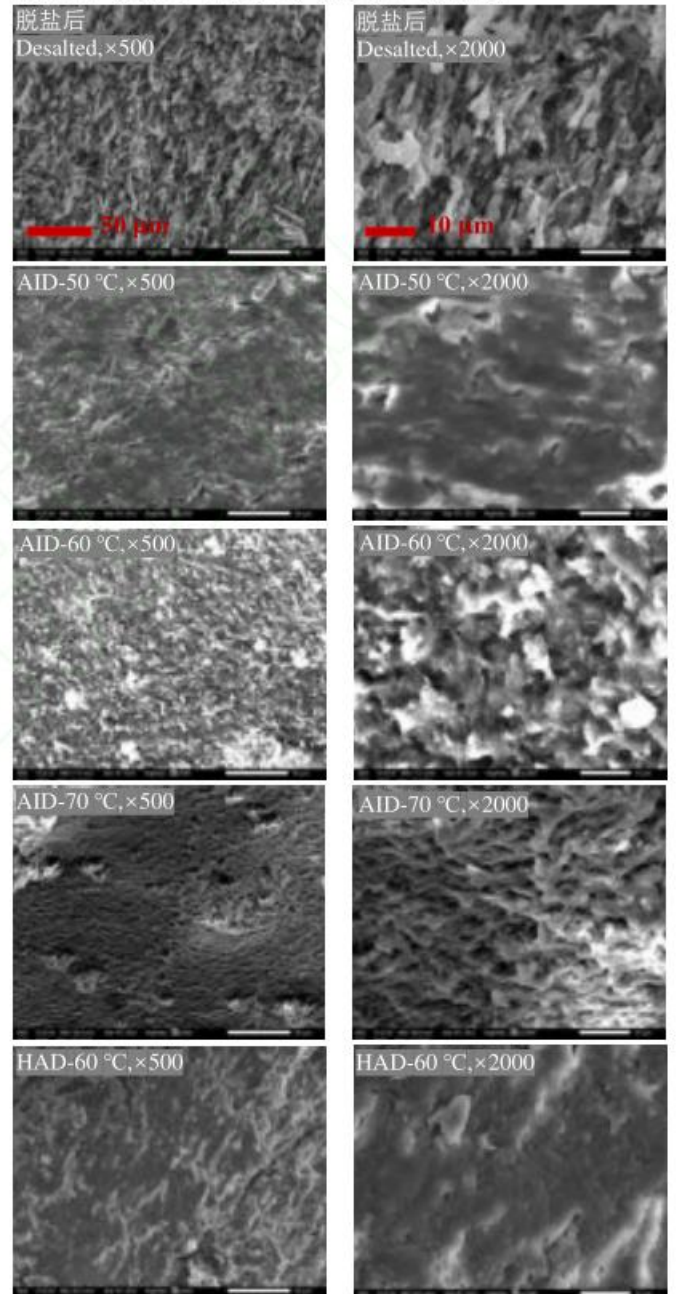
图 3 不同干燥条件下脱盐海参的水分状态和分布

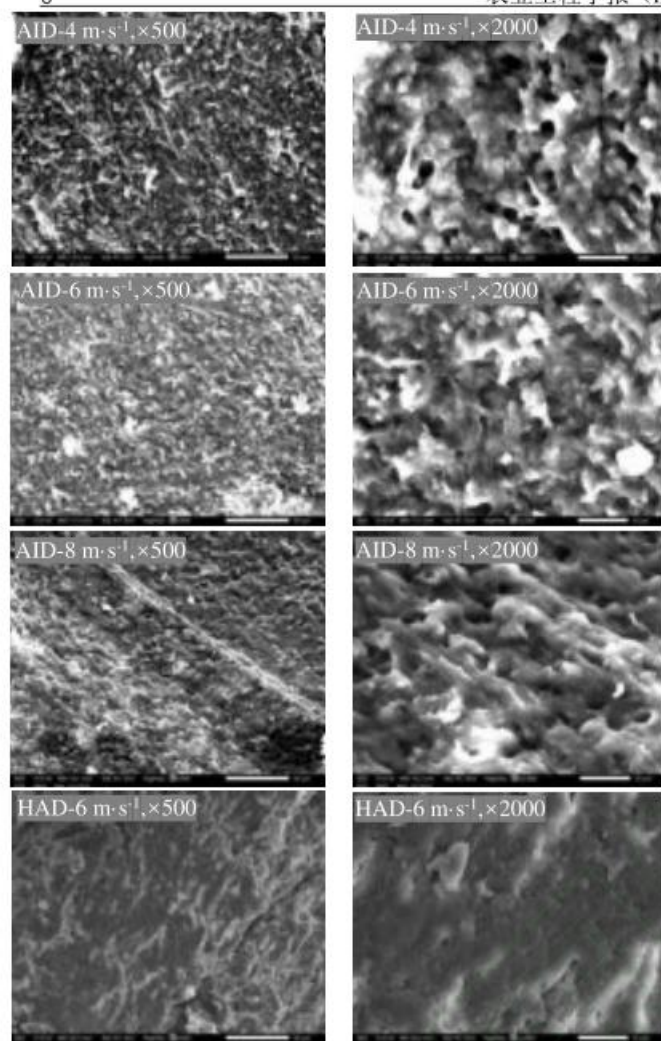
Fig.3 Water state and distribution of desalted sea cucumbers under different drying conditions

2.3 干燥条件对脱盐海参微观结构的影响

图 4 显示了不同干燥条件下干海参的 SEM 图像。由图 4 可知, 不同干燥方式和干燥条件对脱盐海参微观结构的变化有显著影响。由图 4a 可知, 脱盐海参的胶原纤维结构表面光滑, 排列均匀, 纤维的分布具有一定的方向性, 结构完整。干燥后的海参中胶原纤维之间有一定程度的断裂和收缩, 整体空间结构不再致密, 形成大小不一的孔洞结构。AID $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的海参表面较为光滑, 出现了一些细小裂纹。随着干燥温度的升高, 干海参表面的孔洞逐渐增多, 结构不再致密。这是因为在 AID 过程中海参胶原纤维随着温度升高发生热降解导致其发生聚集^[25]。由图 4b 可知, 当干燥温度为 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 不同风速条件下干燥的海参表面较为粗糙, 且出现了较为均匀的孔洞结构。随着风速的增加, 海参的

孔洞变小。可能是因为硬壳的形成阻止了部分胶原纤维的降解, 使得风速为 6 m/s 和 8 m/s 干燥的海参表面孔洞小于风速为 4 m/s , 增加了干燥时间。相同温度下, AID 样品的微观结构没有 HAD 样品紧密。AID 海参结构疏松, 具有较多的孔洞结构, 而 HAD 海参样品孔洞较少。因此, HAD 过程中海参水分迁移速率较慢, 干燥耗时较长^[2]。总的来说, AID 使脱盐海参的微观结构发生变化, 发生皱缩, 使其品质发生改变, AID 海参的孔隙结构变多, 增加了水分的迁移速率, 提高了干燥速率, 减少了干燥时间。

a. 不同温度下脱盐海参的微观结构 (风速 $6\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)a. Microstructure of desalted sea cucumbers at different temperatures (air velocity $6\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)



b. 不同风速下脱盐海参的微观结构 (温度 60 °C)

b. Microstructure of desalted sea cucumber at different air velocities (temperature 60 °C)

图 4 不同干燥条件下脱盐海参的微观结构

Fig.4 Microstructure of desalted sea cucumber under different drying conditions

2.4 干燥条件对脱盐海参硬度的影响

表 1 不同干燥条件下脱盐海参的硬度

Table 1 Hardness of sea cucumber under different drying conditions

干燥条件		硬度
Drying conditions		Hardness/N
脱盐后		110.60±13.22 ^d
AID	50 °C, 6 m·s ⁻¹	347.30±16.40 ^{bc}
	60 °C, 6 m·s ⁻¹	494.25±35.28 ^a
	70 °C, 6 m·s ⁻¹	444.45±47.73 ^{ab}
	60 °C, 4 m·s ⁻¹	322.40±86.97 ^c
	60 °C, 6 m·s ⁻¹	494.25±35.28 ^a
	60 °C, 8 m·s ⁻¹	469.50±53.88 ^d
HAD	60 °C, 6 m·s ⁻¹	459.85±23.97 ^a

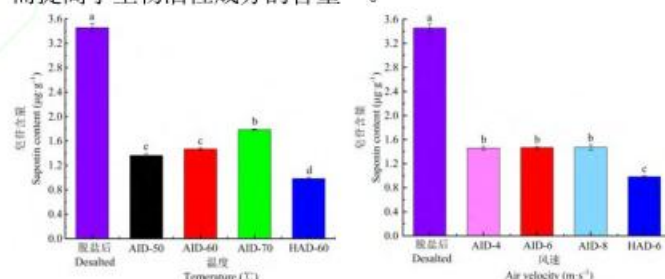
注: 上标不同小写字母表示在同一水平差异显著 ($P<0.05$)。下同Note: Different lowercase letters of superscript indicate significant difference at the same level ($P<0.05$). The same as below.

不同干燥条件下干海参的硬度如表 1 所示。结果表明, 在高温和高风速时干燥方式和干燥条件对干海参硬度的影响不显著 ($P>0.05$)。与脱盐海参相比, 干燥后海参的硬度显著提升 ($P<0.05$)。这主要由于在干燥过程中从内部扩散到表面的液体随着表面水分蒸发, 溶质浓缩并沉淀, 形成坚硬的外表面^[37]。从微观结构图也可以看出, 干燥增加了脱盐海胶原纤维的收缩, 改变了海参的硬度。随着

AID 干燥温度的升高, 脱盐海胶原纤维收缩程度增大, 硬度升高, 但温度持续升高时, 水分的快速蒸发导致脱盐海胶原纤维发生膨胀, 结构变得疏松, 硬度下降^[38]。随着风速的升高, 海参硬度增大, 风速为 6 m/s 和 8 m/s 干燥的海参硬度差异不显著。相同温度下, AID 和 HAD 两种干燥方式对脱盐海参的硬度影响不显著 ($P>0.05$)。但是, AID 海参的硬度高于 HAD 海参。这是因为 AID 对海胶原纤维结构破坏更严重, 胶原纤维的收缩程度更高导致硬度更高。

2.5 干燥条件对脱盐海参皂苷含量的影响

皂苷是海参中重要的功效成分, 其含量越高海参品质越好。图 5 显示了在不同干燥条件处理后脱盐海参皂苷含量的变化。由图 5 可知, 脱盐海参经干燥处理后皂苷含量显著降低。干燥温度对皂苷含量影响显著 ($P<0.05$)。风速固定时 (6 m/s), AID50、60 和 70 °C 处理的海参皂苷含量分别为 1.36 ± 0.03 μg/g、 1.47 ± 0.02 μg/g 和 1.79 ± 0.01 μg/g, 皂苷含量随着温度的升高而升高, 可能是因为温度升高, 海参体内的自溶酶活性降低, 减少了皂苷的酶解^[39]。当干燥温度为 60 °C 时, AID 在风速为 4、6 和 8 m/s 干燥的海参皂苷含量分别为 1.46 ± 0.03 μg/g、 1.47 ± 0.02 μg/g 和 1.47 ± 0.04 μg/g, 差异不显著 ($P>0.05$), 说明风速对脱盐海参的皂苷含量影响较小。相同温度和风速下, AID 脱盐海参的皂苷含量高于 HAD。这是由于皂苷易被酶解, HAD 干燥时间较长, 皂苷在 HAD 过程中降解较多^[40]。此外, AID 期间脱盐海参产生的多孔结构不仅加速了在干燥过程中的水分迁移, 而且增强了物料中化学成分的渗出率, 从而提高了生物活性成分的含量^[41]。

a. 不同风温下脱盐海参的皂苷含量 (风速 6 m·s⁻¹)a. Saponins content of desalted sea cucumber at different temperatures (air velocity 6 m·s⁻¹)

b. 不同风速下脱盐海参的皂苷含量 (温度 60 °C)

b. Saponins content of desalted sea cucumber at different air velocities (temperature 60 °C)

图 5 干燥条件对脱盐海参皂苷含量的影响

Fig.5 Effects of drying conditions on saponin contents of desalted sea cucumber

3 结论

气体射流冲击干燥 (air impingement drying, AID) 能够显著缩短脱盐海参的干燥时间 ($P<0.05$)。在相同温度 (60 °C) 和风速 (6 m/s) 下, AID 脱盐海参的干燥时间 (13 h) 比热风干燥 (hot air drying, HAD) (15 h) 缩短了 13.33%。提高干燥温度可显著缩短干燥时间 ($P<0.05$), AID 风速对干燥时间的影响不显著 ($P>0.05$)。

低场核磁共振 (low field nuclear magnetic resonance, LF-NMR) 和磁共振成像 (magnetic resonance imaging, MRI)

观测结果表明, 相同条件下 AID 比 HAD 的 T_2 横向弛豫曲线向短弛豫时间迁移更快, 质子密度信号减少的也更快。扫描电子显微镜 (scanning electron microscopy, SEM) 观测结果也表明, AID 对脱盐海参结构的破坏比 HAD 更严重。相同条件下, AID 脱盐海参的皂苷 ($1.47 \mu\text{g/g}$) 含量高于 HAD ($0.98 \mu\text{g/g}$) 海参。

综上所述, AID 可以通过改变微观结构、水分状态和分布提高干燥效率、缩短干燥时间, 且能保持较高的皂苷含量。本研究结果有助于揭示 AID 提高脱盐海参干燥速率和有效营养成分保留率的机理, 从而为加工高品质干海参提供理论依据和技术支持。

[参考文献]

- [1] TAMARIT-PINO Y, BATIAS-MONTES J M, SEGURA-PONCE L A, et al. Shelf-life prediction and quality changes in dried Chilean sea cucumber (*Athyridium chilensis*) during accelerated storage[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2020, 44(9): 1-12.
- [2] JIANG P F, JIN W G, LIU Y, et al. Hot-air drying characteristics of sea cucumber (*Apostichopus japonicus*) and its rehydration properties[J]. Journal of Food Quality, 2022, 2022: 1-9.
- [3] NURSID M, PATANTIS G, OKTAVIA D A, et al. Comparison of metabolite profiles and cytotoxicity of the black sea cucumber (*Holothuria atra*) dried with different drying techniques[J]. International Food Research Journal, 2022, 29(5): 1179-1187.
- [4] 汪子涵, 安俊文, 郑杰, 等. 不同泡发方式对海参品质特性的影响[J]. 中国食品添加剂, 2023, (4): 135-141.
- [5] BU Y, ZHAO Y, ZHOU Y, et al. Quality and flavor characteristics evaluation of red sea bream surimi powder by different drying techniques[J]. Food Chemistry, 2023, 428(2023): 136714-136723.
- [6] 王恒鹏, 王引兰, 姜松松, 等. 不同干燥方式下调理猪肉干品质变化及其机制[J]. 农业工程学报, 2021, 37(24): 317-326.
- [7] 谢焕雄, 胡志超, 王海鸥, 等. 真空冷冻干燥对柠檬挥发性风味化合物保留的影响[J]. 农业工程学报, 2018, 34(22): 282-290.
- [8] XIE Huanxiong, HU Zhichao, WANG Haiou, et al. Effect of vacuum freeze-drying methods on retention of volatile flavor compounds of lemon[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(22): 282-290.
- [9] ÖZTÜRK F, GÜNDÜZ H. The effect of different drying methods on chemical composition, fatty acid, and amino acid profiles of sea cucumber (*Holothuria tubulosa* Gmelin, 1791)[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2018, 42(9): 2-10.
- [10] HUANG D, LI W F, SHAO H J, et al. Colour, texture, microstructure and nutrient retention of kiwifruit slices subjected to combined air-impingement jet drying and freeze drying[J]. International Journal of Food Engineering, 2017, 13(7): 344-357.
- [11] 付露莹, 张润光, 赵珂, 等. 气体射流冲击技术在果蔬干燥中的应用[J]. 保鲜与加工, 2019, 19(6): 204-210.
- [12] FU Luying, ZHANG Runguang, ZHAO Ke, et al. Applications of air-impingement jet technology in the fruits and vegetables drying[J]. Storage and Process, 2019, 19(6): 204-210.
- [13] 刘嫣红, 李梦佳, 艾子平, 等. 倾斜料盘式气体射流冲击干燥机优化设计及试验验证[J]. 农业工程学报, 2022, 38(5): 269-278.
- [14] LIU Yanhong, LI Mengjia, AI Ziping, et al. Optimal design and experimental verification of tilted tray air-impingement dryers[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of CSAE), 2022, 38(5): 269-278.
- [15] 王海鸥, 谢焕雄, 陈守江, 等. 不同干燥方式对柠檬片干燥特性及品质的影响[J]. 农业工程学报, 2017, 33(14): 292-299.
- [16] WANG Haiou, XIE Huanxiong, CHEN Shoujiang, et al. Effect of different drying methods on drying characteristics and qualities of lemon slices[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of CSAE), 2017, 33(14): 292-299.
- [17] 王立霞, 兰昊, 郑倩雨, 等. 红枣气体射流冲击干燥特性及干燥模型[J]. 食品科学技术学报, 2022, 40(2): 131-140.
- [18] WANG Lixia, LAN Hao, ZHENG Qianyu, et al. Drying characteristics and model of jujube in air jet impingement[J]. Journal of Food Science and Technology, 2022, 40(2): 131-140.
- [19] 李文峰, 张向阳, 王翠, 等. 茎瘤芥的气体射流冲击干燥动力学及多酚降解动力学特征[J]. 食品科学, 2021, 42(5): 106-114.

- LI Wenfeng, ZHANG Xiangyang, WANG Cui, et al. Drying kinetics and polyphenol degradation kinetic characteristics in the swollen succulent stem of tumorous stem mustard during air-impingement jet drying[J]. Food Science, 2021, 42(5): 106-114.
- [15] TAN S, MIAO Y W, XIANG H X, et al. Effects of air-impingement jet drying on drying kinetics and quality retention of tomato slices[J]. Food Science and Biotechnology, 2021, 30(5): 691-699.
- [16] LI W F, GOU G F, HE Y L, et al. Innovative air-impingement jet drying of red cabbage: Kinetic description and prediction of the degradation of cyanidin-3-diglucoside-5-glucoside and cyanidin[J]. Food Chemistry: X, 2022, 15(2022): 100422-100430.
- [17] YANG H, JIA W T, JIN X W, et al. Study on pilot technology research of air impingement drying for seedless purple grapes[J]. Food Research and Development, 2020, 41(22): 113-117.
- [18] 薛珊, 赵武奇, 高贵田, 等. 苦瓜片气体射流冲击干燥特性及干燥模型[J]. 中国农业科学, 2017, 50(4): 743-754. XUE Shan, ZHAO Wuqi, GAO Guitian, et al. Drying characteristics and model of bitter melon slice in air-impingement jet dryer[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2017, 50(4): 743-754.
- [19] 张静峰, 赵海波, 乔玲敏, 等. 仿刺参热泵干燥特性及动力学模型[J]. 水产科学, 2022, 41(3): . ZHANG Jingfeng, ZHAO Haibo, QIAO Lingmin, et al. Heat pump drying characteristics and kinetic model of sea cucumber *Apostichopus japonicus* [J]. Fisheries Science, 2022, 41(3).
- [20] 张凡伟, 张小燕, 李少萍, 等. 干燥方式对刺参品质的影响[J]. 食品与机械, 2018, 34(1): 209-212. ZHANG Fanwei, ZHANG Xiaoyan, LI Shaoping, et al. Effect of different drying methods on quality of Stichopus japonicas[J]. Food and Machinery, 2018, 34(1): 209-212.
- [21] LI W F, YUAN L, XIAO X L, et al. Dehydration of kiwifruit (*Actinidia deliciosa*) slices using heat pipe combined with impingement technology[J]. International Journal of Food Engineering, 2016, 12(3): 265-276.
- [22] WANG H, KARIM M A, VIDYARTHI S K, et al. Vacuum-steam pulsed blanching (VSPB) softens texture and enhances drying rate of carrot by altering cellular structure, pectin polysaccharides and water state[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2021, 74(2021): 102801-102810.
- [23] WEI L B, QIU W Q, JIN Y S, et al. Effects of different drying methods on quality changes and energy characteristics of tilapia fillets[J]. Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy, 2020, 54(3): 186-209.
- [24] GE X T, WANG H L, YIN M Y, et al. Effect of different thawing methods on the physicochemical properties and microstructure of frozen instant sea cucumber[J]. Foods, 2022, 11(17): 2616-2629.
- [25] HE X, LIN R, CHENG S S, et al. Effects of microwave vacuum drying on the moisture migration, microstructure, and rehydration of sea cucumber[J]. Journal of Food Science, 2021, 86(6): 2499-2512.
- [26] MAMATOV S, ZHANG M S, JIA A R, et al. Effect of infrared radiation (IR) pre-treatment on the freeze-drying of sea cucumber[J]. International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering, 2019, 8(12): 475-478.
- [27] 井君, 陈山乔, 郭锐华, 等. 美洲不同品种海参营养成分的比较分析[J]. 中国海洋药物, 2017, 36(6): 60-66. JING Jun, CHEN Shanqiao, GUO Ruihua, et al. Comparative analysis of nutrients in different American varieties of sea cucumber[J]. Chinese Journal of Marine Drugs, 2017, 36(6): 60-66.
- [28] BASSEY E J, CHENG J H, SUN D W. Improving drying kinetics, physicochemical properties and bioactive compounds of red dragon fruit (*Hylocereus* species) by novel infrared drying[J]. Food Chemistry, 2022, 375(2022): 131886-131896.
- [29] 赵洪雷, 孟德飞, 徐永霞, 等. 鲈鱼热风干燥动力学及品质变化研究[J]. 包装与食品机械, 2022, 40(6): 8-14. ZHAO Honglei, MENG Defei, XU Yongxia, et al. Study on hot air drying kinetics and quality changes of scomber japonicus[J]. Packaging and Food Machinery, 2022, 40(6): 8-14.
- [30] 张鹏飞, 薛东晓, 程春, 等. 人造米热风干燥特性及干基含水率预测模型[J]. 包装与食品机械, 2022, 40(3): 33-38. ZHANG Pengfei, XUE Dongxiao, CHENG Chun, et al. Hot air drying characteristics of artificial rice and prediction model of dry base moisture content[J]. Packaging and Food Machinery, 2022, 40(3): 33-38.
- [31] DORNELES L N S, GONELI A L D, CARDOSO C A L, et al. Effect of air temperature and velocity on drying kinetics and essential oil composition of *Piper umbellatum* L. leaves[J]. Industrial Crops and Products, 2019, 142(2019): 111846-111855.
- [32] SONG Y, HUANG F, LI X, et al. Water status evolution of

- pork blocks at different cooking procedures: A two-dimensional LF-NMR T(1)-T(2) relaxation study[J]. Food Research International, 2021, 148(2021): 110614-110622.
- [33] SUN J J, ZHANG X Y, QIU X J, et al. Hyperspectral data for predicting moisture content and distribution in scallops during continuous and intermittent drying[J]. Drying Technology, 2020, 40(5): 924-937.
- [34] LIU Z L, XIE L, ZIELINSKA M, et al. Pulsed vacuum drying enhances drying of blueberry by altering micro-, ultrastructure and water status and distribution[J]. LWT-Food Science and Technology, 2021, 142(2021): 111013-111021.
- [35] GAO Y, QIAO S Y, LIN Y W, et al. Effects of high-humidity hot air impingement cooking on physicochemical properties and microstructure of Pacific white shrimp (*Penaeus vannamei*)[J]. LWT-Food Science and Technology, 2023, 182(2023): 114836-114845.
- [36] ZANG X, ZU Y X, ZHANG T, et al. Dynamic water mobility in sea cucumber (*Stichopus japonicus*) during drying process assessed by LF-NMR and MRI in situ[J]. International Journal of Food Engineering, 2017, 13(9): 1-12.
- [37] JIA Y Y, KHALIFA I, HU L L, et al. Influence of three different drying techniques on persimmon chips' characteristics: A comparison study among hot-air, combined hot-air-microwave, and vacuum-freeze drying techniques[J]. Food and Bioproducts Processing, 2019, 118(2019): 67-76.
- [38] PANKYAMMA V, MOKAM S Y, DEBBARMA J, et al. Effects of microwave vacuum drying and conventional drying methods on the physicochemical and microstructural properties of squid shreds[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2019, 99(13): 5778-5783.
- [39] BI J R, LI Y, CHENG S S, et al. Changes in body wall of sea cucumber (*Stichopus japonicus*) during a two-step heating process assessed by rheology, LF-NMR, and texture profile analysis[J]. Food Biophysics, 2016, 11(3): 257-265.
- [40] ZHAO Y C, XUE C H, ZHANG T T, et al. Saponins from sea cucumber and their biological activities[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2018, 66(28): 7222-7237.
- [41] AI Z P, REN H F, LIN Y W, et al. Improving drying efficiency and product quality of *Stevia rebaudiana* leaves using innovative medium-and short-wave infrared drying (MSWID)[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2022, 81(2022): 103154-103166.

Effect of air impingement drying on physicochemical characteristics and microstructure of desalted sea cucumber

LIN Yawen¹, LI Aiqing¹, TAN Zhuohong¹, CUI Fangchao¹, LI Yingmei², XIE Yongkang³, LI Xingyi³, LI Jianrong¹, LI Xuepeng^{1*}

(1. College of Food Science and Technology/Institute of Ocean Research, Bohai University, Jinzhou 121013, China; 2. Linghai Dalian Seafoods Breeding Co., Ltd, Jinzhou 121209, China; 3. Agricultural Products Processing Center, Henan Academy of Agricultural Sciences, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: To shorten the long drying time and improve the poor quality of dried sea cucumber, air impingement drying (AID) technology was introduced for desalted sea cucumber drying. The impacts of AID temperature (50, 60, and 70 °C) and air velocity (4, 6, and 8 m/s) on moisture distribution, moisture state, microstructure, hardness, and saponin content of desalted sea cucumber were studied, and conventional hot air drying (HAD) was considered as a control. The results revealed that as the drying temperature increased, the drying rate of desalted sea cucumbers increased, leading to a reduction in drying time. At 6 m/s air velocity, the drying time of desalted sea cucumber at various AID temperatures decreased by 6.67%-33.33% compared to HAD at 60 °C. At the same temperature (60 °C), the air velocity had an insignificant effect on the drying time of desalted sea cucumbers ($P>0.05$) despite the extended drying time (12-13 h) with the increased air velocity (4-8 m/s). The microstructure showed that the increase in AID temperature was beneficial to increase the porous structure of the material surface, which could accelerate the water migration. Under the same conditions (the temperature was 60 °C and the air velocity was 6 m/s), the surface of AID sea cucumber samples had more and larger porous structures than those of HAD sea cucumbers, accelerating the AID drying rate. However, the increase in air velocity

prevented the desalted sea cucumber surface deformation due to the crusting phenomenon, reducing the dried sea cucumber structure porosity, which hindered the water migration and lowered the drying rate. Compared with HAD, the relaxation time of immobilized water of AID sea cucumbers moved faster toward the short relaxation time, and the peak amplitude decreased significantly. With the extension of drying time, the decrease of water molecular freedom led to the decrease of drying rate. Under the same conditions (drying time was 6 h), the proton density signal of AID sea cucumbers was weaker and the water content was lower. This phenomenon indicated that the water migration rate of AID sea cucumbers was faster than that of HAD, and AID was beneficial to shorten the drying time. With the increase in AID temperature and air velocity, the hardness of dried sea cucumber increased first and then decreased. The maximum hardness (494.25 N) was recorded at an AID temperature of 60 °C and 6 m/s air velocity. The saponin content (1.36-1.79 µg/g dry matter) of AID sea cucumbers increased with the increase in temperature while it was not significantly affected by the air velocity. Under the same conditions, the saponin content of AID sea cucumber samples increased by 50% compared with HAD. Considering the drying efficiency and quality, the temperature of 70 °C and the air velocity of 6 m/s were the better conditions for AID sea cucumbers. This study elucidated the mechanism that AID improved the drying efficiency and effective ingredient retention rate of desalted sea cucumbers, which could provide theoretical reference and technology support for improving their drying process and quality.

Keywords: air impingement drying, desalted sea cucumber, moisture diffusion, microstructure, hardness, saponin