

干燥条件对干海参复水动力学及品质的影响

林雅文¹, 李艾青¹, 谭卓弘¹, 可长浩¹, 李英美², 马荣荣³, 励建荣¹, 李学鹏^{1*}

¹渤海大学食品科学与工程学院 辽宁锦州 121013

²凌海市达蓬海珍品养殖有限责任公司 辽宁锦州 121209

³荣成市技术转移服务中心 山东威海 264300

摘要 为探究真空脉动干燥(PVD)对干海参复水动力学及复水后品质的影响,以热风干燥(HAD)的海参为对照,研究 PVD 常压保持 5 min 时,不同真空保持时间(10 min 和 20 min)对干海参复水动力学、持水力、水分状态和分布、微观结构、质构、海参多糖和海参皂苷的影响。结果表明,与 HAD 处理的干海参相比,PVD 的干海参具有更高的复水能力(提高了 3.24%~16.08%)和持水力(提高了 5.06%~5.20%)。低场核磁共振及其成像结果表明,PVD 处理的干海参不易流动水的弛豫时间较短,复水后质子信号强度更高。微观结构表明,PVD 处理的干海参复水后具有更大的多孔组织结构。PVD 真空保持 10 min 干燥的海参复水后具有较高的多糖和皂苷含量(1.17 $\mu\text{g/g}$ 和 0.23 $\mu\text{g/g}$),最高的氨基酸含量(68.56 g/100 g),最低的硬度(377.44 N)且弹性较好。与 HAD 的海参相比,PVD 海参通过改变海参的组织多孔结构提高复水比,PVD 的海参具有更高的复水能力以及较高的营养成分。研究结果有助于阐明 PVD 提高海参复水特性和营养成分保留率的机理,并为寻找合适的 PVD 条件及获得高品质复水海参提供理论依据。

关键词 干海参; 复水动力学; 水分迁移; 微观结构; 多糖; 皂苷

文章编号 1009-7848(2025)02-0280-10 **DOI:** 10.16429/j.1009-7848.2025.02.025

海参属棘皮动物门海参纲,是海珍品的一种,2021 年中国海参养殖产量高达 22.27 万 t^[1]。海参具有高蛋白、低脂肪的特点,体内含有酸性黏多糖和皂苷等生物活性物质^[2],具有降血糖、抗氧化和增强人体免疫力作用^[3-5]。由于海参自身酶的特殊性,新鲜海参会自溶^[6],导致海参加工品质显著下降,进而造成严重的经济损失,因此,需对海参进行及时的加工处理,制成盐渍海参、干海参和即食海参等产品,其中,超过八成的海参被加工成干制品用于保存和销售^[7]。目前,市场上主要有淡干海参、盐干海参和冻干海参等不同种类的海参干制品^[1]。其特殊的加工方式,使干制海参必须经过复水才可烹调食用^[8]。

复水是使干制品化学组成、质地尽可能恢复到原有状态的过程^[9],而干制品的营养成分在复水过程中会受到不同程度的破坏。现有报道了

不同复水条件对海参品质和组织结构的影响。海参的复水方式通常包括冷水和热水复水 2 种。有研究表明,热水复水会导致营养成分大量流失,比冷水复水的损失率高出近 5 倍。此外,热水复水也可能导致海参的持水性能降低^[10-11]。杜婕好等^[12]研究表明,微波-真空辅助复水方式能够降低海参中蛋白质和多糖损失率,且其质构特性更佳。目前,学者们对干海参的复水工艺开展了大量研究。Zhang 等^[13]在超声波对干海参复水能力的研究中提出,随着超声功率的增加,干海参的复水比和持水力也随之增加;此外,超声也能促进干海参更好地吸收水分,从而缩短干海参的复水时间。不同干燥方法对海参复水比的影响也有大量研究。张凡伟等^[14]在干燥方式对刺身品质的影响研究发现,真空冷冻干燥的海参具有最高的复水比,远高于热风、微波和微波真空冷冻干燥的海参。Öztürk 等^[15]研究了热风、微波和冷冻 3 种干燥方式对海参干制后复水比的影响,结果表明,冷冻干燥海参的复水比最高,而干燥方式对海参干制后复水比的影响不显著。He 等^[16]对微波真空干燥海参的研究发现,复水比随微波功率的增加而增加。微波功率为 150,200,250 W 处理的海参复水比分别为

收稿日期: 2024-02-22

基金项目: 辽宁省海洋经济发展专项(2021-84);国家自然科学基金青年科学基金项目(32202102);锦州市指导性计划项目(JZ2022B030)

第一作者: 林雅文,女,博士,副教授

通信作者: 李学鹏 E-mail: xuepengli8234@163.com

4.68, 6.02 和 6.57。

水分在水产品加工和贮藏过程中对其制品有很大影响。刁华玉等^[17]在南极磷虾肉解冻研究中发现,不易流动水峰面积与保水性呈显著正相关关系。Zhang 等^[18]研究了水分含量对海参贮藏期间稳定性的影响,发现含水量降低可以减少海参体壁凝胶变质和质构特性变化,且水分含量与水活度、硬度和氮含量变化率显著相关。水分对复水海参品质有重要影响,且直接影响其感官品质。Geng 等^[19]研究了干海参在复水过程中水分与结构的变化,并探讨了核磁共振与质构指标间的联系,结果表明二者间呈良好的线性相关性。目前,不同干燥条件的海参复水后特性、水分状态及分布和品质的变化研究鲜有报道。

本研究以HAD处理的海参为对比,根据预试验研究,将PVD干燥时间最长和最短2个条件处理的干海参进行复水,分析不同干燥条件对复水后海参的持水力、微观结构以及水分状态和分布的影响,揭示复水机理。同时测定质构以及营养成分(如多糖和皂苷含量),以期为干海参的精细化加工及科学食用提供理论依据。

1 材料与方 法

1.1 材料与试剂

盐渍海参,辽宁省锦州市太和区水产市场,购入后置于-18℃保存。

冰醋酸、香草醛、硫酸和苯酚,均为分析纯级,上海阿拉丁试剂生化科技有限公司;浓盐酸、磷酸氢二钠、乙醇、正丁醇、磷酸二氢钠、甲醇,均为分析纯级,天津福晨化学试剂有限公司;戊二醛、中性蛋白酶,北京索莱宝科技有限公司。

1.2 仪器与设备

L-8900全自动氨基酸分析仪,日本日立公司;ReadMax全波长酶标仪,上海闪谱生物科技有限公司;JSM-IT200扫描电镜,日本电子株式会社有限公司;SH200N TMS-PRO质构仪,美国FTC公司;NMI20-040H-I低场核磁共振仪,上海纽迈电子科技有限公司;真空脉动干燥设备,定制;FX101-0型电热鼓风干燥箱,上海树立仪器仪表有限公司;Biofuge Stratos高速冷冻离心机,美国Thermo公司。

1.3 方 法

1.3.1 复水前处理 根据前期研究,采用真空脉动干燥海参时,当温度为60℃,脉动比为10:5时干燥时间最短;相同温度下,脉动比为20:5时干燥时间最长。本文拟探究以上2个条件对干海参复水特性以及复水后品质的影响。

1.3.2 复水方法 根据汪子涵等^[20]的方法,并稍作修改。将干燥后的海参置于自来水中浸泡24h,期间换水2次,每次间隔12h;在不锈钢锅中加入没过海参约8cm的纯净水,水沸后放入已浸泡24h的海参,等待第2次沸腾后调整火候,使其维持微沸腾状态60min,关闭电源后静置45min。将海参清洗后在4℃条件下用纯净水进行复水处理,期间换水4次,每次间隔12h。

1.3.3 复水比(RR)测定 复水过程中,前2h时每1h记录1次海参质量,之后每2h记录一次。

干制海参复水比计算如公式(1)所示:

$$RR = m_t/m_0 \quad (1)$$

式中:RR为干制海参复水比; m_t 为干制海参复水后的质量,g; m_0 为干制海参复水前的质量,g。

1.3.4 持水力(WHC)测定 持水力测定采用Lakshmanan等^[21]的方法,并略作修改,将复水后的海参切成小块,每份质量约为(2.0±0.1)g,将其包裹于2层过滤纸内,置于50mL离心管。在转速500×g常温条件下离心15min。称取离心前、后样品的质量,复水海参持水力计算如公式(2)所示:

$$WHC(\%) = [1 - (m_1 - m_2)/m_1] \times 100 \quad (2)$$

式中: m_1 为离心前样品的质量,g; m_2 为离心后样品的质量,g。

1.3.5 水分分布状态测定 在室温条件下使用低场核磁共振分析仪进行测试。调取Carr-Purcell-Meiboom-Gill(CPMG)脉冲序列测定横向弛豫时间,其中90°脉冲、180°脉冲和回波时间分别为18,36ms和1500ms,累加次数为4^[22]。

调取自旋回波成像序列来扫描氢质子的密度分布图像,其中样品切片厚度为3.4mm,回波和重复时间分别设定为50ms和1800ms,累加次数为4,观测视角为90°^[23]。

1.3.6 微观结构观察 根据Ge等^[24]的方法,并稍作修改。将不同干燥条件下的复水海参切成薄片后在戊二醛溶液(2.5%)中浸泡1d,用磷酸盐缓冲

液(0.1 mol/L, pH 6.8)冲洗4次,再依次用不同体积分数的乙醇溶液(50%、70%、80%和90%)冲洗1次,最后用无水乙醇继续冲洗3次,每次冲洗10 min。脱水后再进行冷冻干燥15 h以制备待测样品。将样品在真空条件下进行喷金,在加速电压为3 kV,放大倍数为2 000×的条件下利用扫描电子显微镜观察其微观结构。

1.3.7 质构测定 从复水后海参背部取样(1 cm×1 cm×1 cm),采用TA-XT-PLUS质构仪进行质构分析。其中选取P/50探头,触发力和压缩程度分别为5.0 g和50%,连续压缩2次,间隔5 s,测前、测试和测后速度分别为2.0,1.0 mm/s和1.0 mm/s进行测试^[16]。

1.3.8 多糖含量测定 根据Mamatov等^[25]的方法,稍作修改。将复水后的海参切块后置于破碎机中打碎,取5 g海参碎与25 mL蒸馏水混合后用0.1 mol/mL盐酸将混合液pH值调到7.0,加入0.5 g中性蛋白酶(50 000 U/g)后在45℃下酶解9 h,最后在95℃下灭酶5 min得到海参酶解液。将酶解液在4 100×g下离心5 min后取上清液,加入2倍体积95%乙醇溶液后在4℃条件下静置12 h,取其上清液继续离心后得到沉淀。用95%乙醇冲洗沉淀2次后将其放置在60℃烘箱中干燥2 h,将粉末冷却后用蒸馏水定容至100 mL以制备多糖溶液。

采用苯酚-硫酸法^[26]测定多糖含量,在2 mL海参多糖溶液中加入1 mL 6%苯酚和5 mL浓硫酸混合均匀,室温静置20 min后采用酶标仪在波长490 nm处测定吸光值。代入标准曲线 $[y=9.0860x+0.0315, R^2=0.9988, y$ 为吸光度值, x 为多糖含量(μg)]计算多糖含量。

1.3.9 皂苷测定 根据Mamatov等^[25]的方法,稍作修改。取2 g复水的海参碎与150 mL 80%乙醇混合后在摇床上浸提3次(60℃,1 h),用旋转蒸发仪将浸提液蒸干后加入25 mL去离子水。再加入等体积饱和正丁醇萃取3次,继续蒸干。最后加入25 mL 60%甲醇以制备提取液。

采用香草醛-冰醋酸法^[27]测定海参皂苷含量,将1 mL提取液水浴蒸干后依次加入0.2 mL 5%香草醛-冰醋酸溶液,5 mL 60%硫酸。将上述混合液在60℃水浴20 min后再室温反应10 min,最后

测定560 nm波长下的吸光值。代入标准曲线 $[y=1.3295x-0.0026, R^2=0.9997, y$ 为吸光度值, x 为皂苷含量(μg)]计算皂苷含量。

1.3.10 氨基酸测定 复水海参的氨基酸含量按照《食品安全国家标准 食品中氨基酸的测定》(GB 5009.124-2016)测定。将待测样品溶液用0.22 μm 的过滤器过滤后放入全自动氨基酸分析仪进行测定。

1.3.11 数据分析 所有试验重复3次,用平均值±标准差表示结果。用SPSS 16.0软件进行单因素方差分析(ANOVA),Duncan检验进行显著性比较($P<0.05$)。用Origin 2021软件作图。

2 结果与讨论

2.1 干燥条件对海参复水特性的影响

复水特性能够反映物料在干燥过程中内部组织与微观结构的变化^[28],是衡量干制海参品质的重要指标之一。图1展示了干海参的复水动力学特征。由图1可知,当温度为60℃,常压保持时间为5 min时,复水海参的复水比随真空时间的延长而减小。图2为不同干燥条件下海参的最终复水比。由图2可知,真空时间为10 min和20 min时的最终复水比分别为8.95和7.96。这可能是由于真空保持时间为10 min干燥的海参具有更大的组织多孔结构,这为水的吸附提供了更多的结合位点,从而更有利于复水过程,微观结构的变化(图3)佐证了这一结论。这与Liu等^[29]在PVD蓝莓的研究中得到的结论相反,可能是由于海参内部特殊质地造成的。在相同的复水时间里,HAD海参在复水过程中的复水比均比PVD的海参更低,且最终复水比为7.71。这是因为HAD过程中海参内部水分蒸发速率大于水分迁移速率,导致物料表面结壳,水分难以进入海参内部,导致其复水比小于PVD海参。Liu等^[29]在PVD蓝莓的研究中也得出PVD蓝莓干复水比大于HAD蓝莓干。同时,在PVD过程中,真空和常压的循环变化会产生空化效应,有利于干海参复水。

2.2 干燥条件对海参持水力的影响

持水力是指食品中的基质通过物理作用能够有效保留水分的能力^[30]。通常,持水力与复水比成正比。干燥条件对复水海参持水力的影响如表1

所示。相较于经过 HAD 后的复水海参,经过 PVD 后的复水海参其持水力有所提升。当常压保持时间为 5 min,真空保持时间为 10 min 和 20 min,复水海参的持水力分别达到了 63.00%和 62.92%。干燥条件对复水海参持水力并没有显著影响 ($P>0.05$)。干海参经复水后,胶原纤维吸水膨胀会导致纤维之间的孔隙结构减小,影响水分分布,从而影响持水力。然而,随真空保持时间延长,复水海参持水力下降($P>0.05$)。胶原纤维收缩和膨胀是影响持水力的重要因素,干海参的复水比越大,胶原纤维吸水膨胀越大,则持水力越高^[31]。LF-NMR 测试结果(图 3a)也表明 PVD 复水海参不易流动

水弛豫时间更短,水分与物质之间结合更紧密,导致其具有更高持水力。然而,真空保持时间的延长导致复水海参内部的内应力增加,破坏了海参纤维结构,导致原有毛细管力不足以继续维持海参肌肉中水分的稳定。在真空保持时间为 10 min 条件下,由于干海参此时的组织较为疏松,增大了比表面积,在复水过程中能够与更多的水分结合并相互作用,因此真空保持时间为 10 min 处理的干海参复水后持水力更高。刘文涛^[32]在海参复水研究中也表明,组织结构较为松散的海参可以结合更多的水分,持水力也更高。

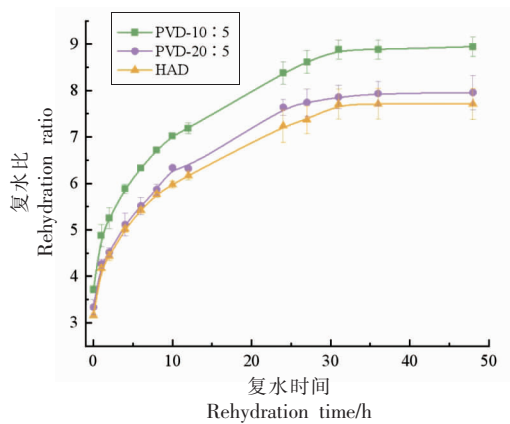


图 1 干海参在不同干燥条件下的复水动力学

Fig.1 Rehydration kinetics of dried sea cucumber under different drying conditions

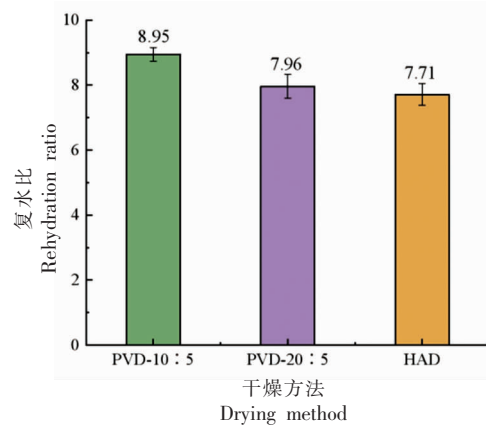


图 2 干海参在不同干燥条件下的最终复水比

Fig.2 Final rehydration ratio of dried sea cucumber under different drying conditions

表 1 不同干燥条件处理的干海参复水后的质构特性和持水力

Table 1 The texture characteristics and water holding capacity (WHC) of dried sea cucumbers treated under different drying conditions after rehydration

条件	硬度/N	弹性/mm	胶着性/N	咀嚼性/mJ	WHC/%
PVD-10:5	377.44 ± 10.84 ^b	1.05 ± 0.08 ^a	449.97 ± 3.04 ^a	347.59 ± 3.96 ^a	63.00 ± 3.87 ^a
PVD-20:5	440.80 ± 20.26 ^b	1.22 ± 0.32 ^a	455.28 ± 1.70 ^a	457.85 ± 1.89 ^a	62.92 ± 1.54 ^a
HAD	576.61 ± 32.63 ^a	0.94 ± 0.07 ^a	526.63 ± 1.52 ^a	511.09 ± 2.55 ^a	59.89 ± 0.93 ^a

2.3 干燥条件对复水海参水分状态和分布的影响

为观察复水后海参水分分布及状态,利用 LF-NMR 的弛豫时间(T_2)研究了干燥条件对干海参复水后水分状态的影响。 T_{21} 为在 1~10 ms 范围内具有最短弛豫时间的结合水, T_{22} 为在 10~100 ms 范围内代表细胞质中的不易流动水, T_{23} 为在 100~1 000 ms 范围内具有最长弛豫时间和较高流动性的自由水^[33]。由图 3a 可知,复水海参含量最多

且弛豫时间最长的为自由水(T_{23}),其次为不易流动水(T_{22}),结合水(T_{21})含量最少。与 HAD 处理后复水海参相比,PVD 不同真空保持时间处理的复水海参不易流动水(T_{22})和自由水(T_{23})的弛豫时间较短,说明海参组织对水分的束缚能力更高,水分子与复水海参组织结构结合地更加紧密,从而具有更高的持水性。PVD 真空保持时间为 10 min 处理的复水海参自由水峰幅度最高,其次为真空保

持时间为 20 min 处理的复水海参, HAD 处理后复水海参自由水峰幅度最低。真空常压的频繁变化产生的空化效应更加明显, PVD 处理后海参多孔结构的形成更有利于水分进入^[34]。何秀^[35]在干海参的复水研究中也表明, 多孔结构有利于水分的吸收, 从而导致更高的复水率和持水力。

图 3b 显示了不同干燥条件处理后干海参复水过程中的核磁共振图像(MRI)。红色表示高质子密度, 蓝色表示低质子密度, 质子密度越大, 水分含量也就越多。随着复水时间延长, 3 种方式干

燥的海参亮度从外层到内层逐渐增强, 外层信号强度较高, 内层信号强度较低, 说明海参含水量逐渐升高。Geng 等^[19]在干海参复水研究中也得出海参在复水过程中水分含量升高, 海参外层质子密度信号更高的结论。与 HAD 处理后的复水海参相比, PVD 不同真空保持时间处理的海参红色区域更大, 亮度更高, 且真空保持时间为 10 min 干燥的海参复水后亮度高于真空保持时间为 20 min 干燥的复水海参, 这与干海参的复水动力学 (图 1) 结果一致。

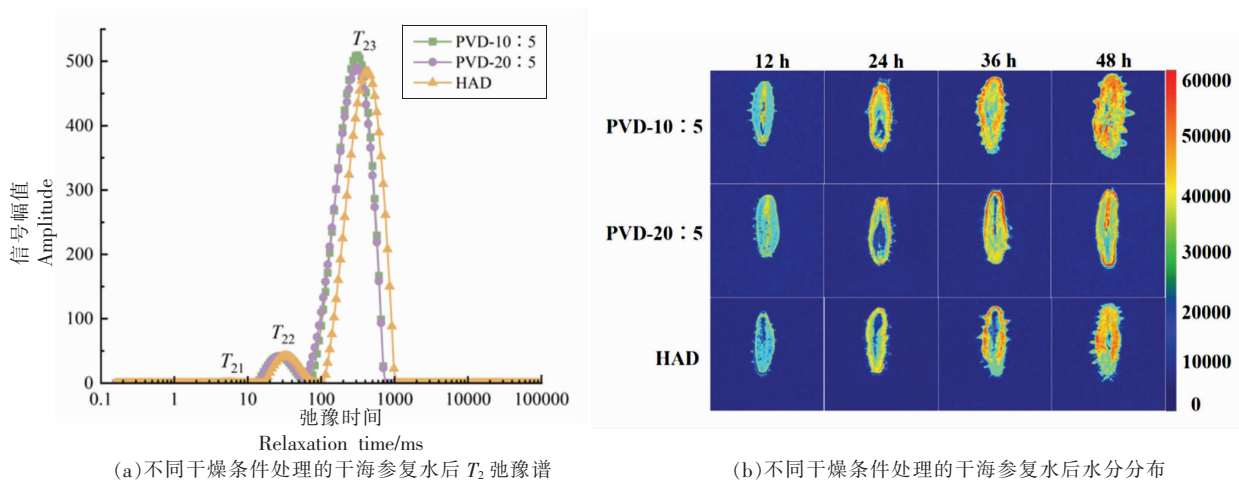


图 3 不同干燥条件处理的干海参复水后水分状态和分布

Fig.3 Water states and distribution of dried sea cucumbers treated under different drying conditions after rehydration

2.4 干燥条件对干制海参复水后微观结构的影响

不同干燥条件处理的干海参复水后微观结构如图 4 所示, 干燥条件显著影响了复水海参的微观结构。在 PVD-10:5、PVD-20:5 和 HAD 处理下, 复水海参胶原纤维之间有一定程度的断裂且表面均出现了大小不一的孔洞结构。在 PVD-10:5 条件

下, 干燥海参复水后孔洞结构比 PVD-20:5 和 HAD 条件下处理的海参更大, 从而导致其更高的复水比和较小的硬度, 这与图 1 所示的复水动力学结果一致。HAD 的海参表面有硬壳状结构, 孔洞结构较小, 较小的孔洞结构不利于水分进入, 导致其复水比较小。在 PVD 处理过程中海参胶原纤

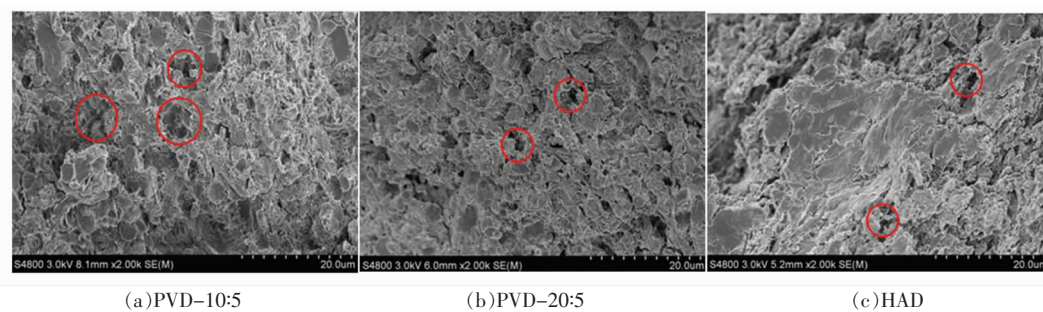


图 4 不同干燥条件处理的干海参复水后微观结构

Fig.4 Microstructure of dried sea cucumbers treated under different drying conditions after rehydration

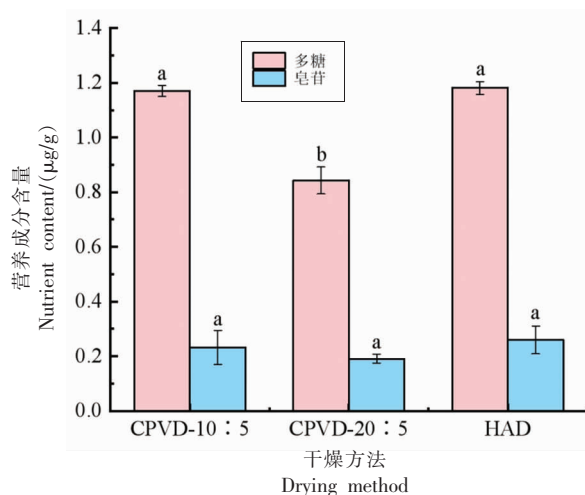
维不断发生膨胀和降解,且内部水分受热后快速蒸发,导致海参疏松多孔的结构特点^[36]。Xie 等^[34]在枸杞 PVD 研究中也发现,PVD 枸杞比 HAD 枸杞具有更多多孔结构,可促进其复水过程中水分向内部迁移。因此,PVD 可更大程度地降低胶原纤维对水分迁移的阻力,从而提高复水能力。

2.5 干燥条件对海参质构特性的影响

质构特性主要包括硬度、弹性、黏附力以及咀嚼能力,均可表征食品的组织属性^[37]。表 1 显示了不同干燥条件处理后复水海参的质构特性。与 HAD 处理的复水海参相比,PVD 处理的复水海参硬度显著降低($P < 0.05$)。这是因为干燥过程中真空-常压的循环变化产生的组织多孔结构,为水分吸附提供了更多的结合位点,且持水力较高,从而硬度降低。干燥条件对复水海参弹性、胶着性和咀嚼性影响不显著($P > 0.05$)。与 HAD 处理的复水海参相比,PVD 不同真空保持时间干燥后的复水海参有更大的弹性。在干海参的复水过程中,其体积持续吸水膨胀。通常来说,胶原纤维的膨胀程度决定了弹性大小^[13],这也间接表明,真空环境下的压力变化能够促进水分迁移,推动海参结构变得疏松多孔,进一步降低硬度、提高弹性。HAD 后复水海参硬度较大、弹性较小。因此,PVD 的应用能促进干海参复水过程,同时还能改善海参的质构特性,从而提高海参的食用品质。

2.6 干燥条件对海参多糖和皂苷含量的影响

海参中以硫酸软骨素和海参盐藻聚糖硫酸脂为主的多糖主要存在于其体壁^[38]。皂苷作为海参中有效的活性成分,也影响着海参的品质。不同干燥条件处理后复水海参的多糖和皂苷含量如图 5 所示。HAD 处理的海参复水后多糖含量和皂苷含量分别为 $1.18 \mu\text{g/g}$ 和 $0.26 \mu\text{g/g}$,PVD 真空保持时间为 10 min 和 20 min 处理的海参复水后多糖含量分别为 $1.17 \mu\text{g/g}$ 和 $0.84 \mu\text{g/g}$,皂苷含量分别为 $0.23 \mu\text{g/g}$ 和 $0.19 \mu\text{g/g}$ 。与 HAD 处理后复水海参的多糖和皂苷含量相比,PVD 后复水海参的多糖和皂苷含量减少。这可能是由于复水相同时间时,HAD 海参形成的硬壳阻止了营养成分的流失。同时,PVD 海参形成的多孔结构加速了溶液和溶质的交换,使 PVD 海参在复水过程中皂苷和多糖含量损失较多。刘文涛^[32]在研究海参的复水过程时



注:不同小写字母表示营养成分含量差异性显著($P < 0.05$)。

图 5 不同干燥条件处理的干海参复水后多糖和皂苷含量
Fig.5 Contents of polysaccharides and saponins in dried sea cucumbers treated under different drying conditions after rehydration

也发现,当复水比例不再变化时,海参内部的水分会接近饱和状态。继续泡发会使海参体壁内外的水分持续交换,从而导致可溶性物质的损失。真空保持时间为 10 min 干燥的海参复水后多糖和皂苷含量大于真空保持时间为 20 min 干燥的复水海参,且真空保持时间为 20 min 干燥的复水海参多糖含量显著降低。多孔结构不仅有利于复水,也加速了营养物质渗出。Ai 等^[39]也证明多孔结构可以提高水分迁移速率及化学物质的渗出率,从而使物料中有效成分含量增多。

2.7 干燥条件对海参氨基酸含量的影响

氨基酸组成的差异以及氨基酸协同调味能够为海参带来不同的风味口感^[40]。表 2 显示了不同干燥条件下干海参复水后的氨基酸含量,在复水海参样品中共发现 16 种氨基酸。其中,复水海参中含量较高的氨基酸为甘氨酸、丙氨酸和脯氨酸等甜味氨基酸,含量较低的为蛋氨酸、酪氨酸和组氨酸等苦味氨基酸。与 HAD 海参复水后总氨基酸含量 $[(65.42 \pm 0.88) \text{g}/100 \text{g}]$ 相比,PVD 真空保持时间为 10 min $[(68.56 \pm 0.08) \text{g}/100 \text{g}]$ 和 20 min $[(67.07 \pm 0.18) \text{g}/100 \text{g}]$ 复水海参氨基酸含量增加($P > 0.05$),结果表明 PVD 处理条件下的海参复水后氨基酸丰富。由图 3 微观结构可知,与 HAD 相比,PVD 处理后海参结构破坏更严重,更多胶原蛋

表2 不同干燥条件处理的干海参复水后的氨基酸含量

Table 2 Amino acid contents of dried sea cucumbers treated under different drying conditions after rehydration

种类	氨基酸	含量/[g/(100 g)]		
		PVD-10:5	PVD-20:5	HAD
鲜味	天冬氨酸	6.90 ± 0.00 ^a	6.75 ± 0.00 ^{ab}	6.70 ± 0.10 ^b
	谷氨酸	10.43 ± 0.00 ^a	10.16 ± 0.03 ^b	9.94 ± 0.13 ^b
甜味	苏氨酸	3.34 ± 0.02 ^a	3.28 ± 0.02 ^a	3.26 ± 0.03 ^a
	丝氨酸	2.96 ± 0.01 ^a	2.94 ± 0.05 ^a	2.84 ± 0.00 ^b
	甘氨酸	11.50 ± 0.11 ^a	10.99 ± 0.14 ^b	10.42 ± 0.14 ^c
	丙氨酸	5.12 ± 0.02 ^a	4.94 ± 0.02 ^b	4.70 ± 0.08 ^c
	赖氨酸	2.26 ± 0.04 ^a	2.28 ± 0.04 ^a	2.32 ± 0.04 ^a
	脯氨酸	6.44 ± 0.05 ^a	6.25 ± 0.02 ^b	5.90 ± 0.06 ^c
苦味	缬氨酸	2.78 ± 0.01 ^a	2.76 ± 0.02 ^a	2.78 ± 0.04 ^a
	蛋氨酸	1.33 ± 0.00 ^a	1.36 ± 0.04 ^a	1.33 ± 0.01 ^a
	异亮氨酸	2.17 ± 0.01 ^a	2.16 ± 0.01 ^a	2.18 ± 0.03 ^a
	亮氨酸	3.02 ± 0.01 ^a	3.02 ± 0.02 ^a	3.06 ± 0.04 ^a
	酪氨酸	1.63 ± 0.01 ^a	1.64 ± 0.02 ^a	1.62 ± 0.04 ^a
	苯丙氨酸	2.02 ± 0.01 ^a	2.02 ± 0.01 ^a	2.06 ± 0.04 ^a
	组氨酸	0.78 ± 0.02 ^a	0.78 ± 0.01 ^a	0.80 ± 0.02 ^a
	精氨酸	5.88 ± 0.00 ^a	5.74 ± 0.03 ^a	5.51 ± 0.10 ^b
	胱氨酸	ND	ND	ND
	鲜味氨基酸总含量	17.33 ± 0.00 ^a	16.91 ± 0.03 ^b	16.64 ± 0.23 ^b
甜味氨基酸总含量	31.62 ± 0.17 ^a	30.68 ± 0.25 ^b	29.44 ± 0.35 ^c	
苦味氨基酸总含量	19.61 ± 0.09 ^a	19.48 ± 0.10 ^a	19.34 ± 0.31 ^a	
氨基酸总含量	68.56 ± 0.08 ^a	67.07 ± 0.18 ^{ab}	65.42 ± 0.88 ^b	

注:不同小写字母表示显著性差异, $P < 0.05$,ND. 未检出。

白发生降解生成氨基酸。同时,其多孔结构更有利于物料中化学成分的提取,从而提高了氨基酸的含量。3种干燥条件对海参复水后苦味氨基酸含量影响不显著($P > 0.05$)。与HAD海参[鲜味:(16.64±0.23)g/100 g,甜味:(29.44±0.35)g/100 g]相比,PVD-10:5和PVD-20:5条件下得到的干海参复水后具有更高的鲜味 [(17.33±0.00) g/100 g和(16.91±0.03)g/100 g]和甜味氨基酸[(31.62±0.17)g/100 g和(30.68±0.25)g/100 g]含量,表明PVD处理有利于使海参复水后产生更理想的风味。

3 结论

干燥条件对干海参的复水动力学和复水海参的品质影响显著($P < 0.05$)。与HAD处理后的复水海参相比,PVD真空保持时间为10 min和20 min的海参最终复水比分别增加了16.08%和3.24%。LF-NMR和MRI表明,相同温度下,PVD的海参复水后比HAD的海参 T_{22} 稍短,水与海参组织结

合更紧密,持水力也更高。复水海参的质子信号强度随复水时间的延长而增强,PVD海参复水后质子信号强度比HAD的海参更高。PVD的海参复水后硬度低于HAD的海参,干燥条件对弹性、胶着性和咀嚼性的影响不显著。SEM结果也表明,PVD的海参复水后具有更大的组织多孔结构。PVD真空保持时间为10 min干燥的海参复水后多糖和皂苷含量(1.17 μg/g和0.23 μg/g)与HAD的海参(1.18 μg/g和0.26 μg/g)差异不显著。与HAD处理的海参复水后的总氨基酸含量(65.42 g/100 g)相比,PVD真空保持时间为10 min处理的海参复水后氨基酸含量显著(68.56 g/100 g)升高。综上所述,PVD通过改变干海参的水分状态、水分分布和微观结构提高复水能力,同时也保留了更多的多糖和皂苷含量。研究结果有助于揭示PVD提高干海参复水能力和有效营养成分保留率的机理,从而为获得高品质可食用海参提供了理论依据和技术支持。

参 考 文 献

- [1] 葛小通, 王红丽, 尹明雨, 等. 冷冻即食海参质构特性指标的相关性研究[J]. 中国食品学报, 2023, 23(1): 326-334.
- GE X T, WANG H L, YIN M Y, et al. Studies on correlation of texture properties of frozen instant sea cucumber[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2023, 23(1): 326-334.
- [2] 白颖, 冯丁丁, 浦源, 等. 海参低温贮藏过程中品质与理化性质的变化[J]. 中国食品学报, 2021, 21(1): 208-214.
- BAI Y, FENG D D, PU Y, et al. Quality and physicochemical properties of sea cucumber during low temperature storage[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2021, 21(1): 208-214.
- [3] YANG D D, LIN F D, HUANG Y Y, et al. Separation, purification, structural analysis and immune-enhancing activity of sulfated polysaccharide isolated from sea cucumber viscera[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 155: 1003-1018.
- [4] ZHU Q Y, LIN L Z, ZHAO M M. Sulfated fucan/fucosylated chondroitin sulfate-dominated polysaccharide fraction from low-edible-value sea cucumber ameliorates type 2 diabetes in rats: New prospects for sea cucumber polysaccharide based-hypoglycemic functional food[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 159: 34-45.
- [5] MOHAMED A S, MAHMOUD S A, SOLIMAN A M, et al. Antitumor activity of saponin isolated from the sea cucumber, *Holothuria arenicola* against ehrlich ascites carcinoma cells in swiss albino mice [J]. Natural Product Research, 2019, 35(11): 1-5.
- [6] SU L, YANG J F, FU X, et al. Ultraviolet rays induced sea cucumber (*Stichopus japonicus*) melting is mediated by the caspase-dependent mitochondrial apoptotic pathway [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2018, 66(1): 45-52.
- [7] MOON J H, YOON W B. Size dependence of the salting process for dry salted sea cucumber (*Stichopus japonicus*) [J]. Journal of Food Engineering, 2016, 170: 170-178.
- [8] 赵玲, 刘淇, 曹荣, 等. 免煮速发型干海参与盐干海参的品质对比分析[J]. 中国渔业质量与标准, 2015, 5(6): 59-63.
- ZHAO L, LIU Q, CAO R, et al. Quality analysis of decocting-free dried sea cucumber and salt dried sea cucumber[J]. Chinese Fishery Quality and Standards, 2015, 5(6): 59-63.
- [9] WANG B X, JIA Y L, LI Y, et al. Dehydration-rehydration vegetables: Evaluation and future challenges[J]. Food Chemistry: X, 2023, 20: 100935.
- [10] 向怡卉, 苏秀榕, 董明敏, 等. 盐渍海参水发技术的研究[J]. 食品科学, 2007, 28(12): 153-156.
- XIANG Y H, SU X R, DONG M M, et al. Study on water immersion technology of salted sea cucumber[J]. Food Science, 2007, 28(12): 153-156.
- [11] 员璐, 李洪军, 倪冬冬, 等. 不同复水条件对淡干海参品质特性的影响[J]. 西南大学学报, 2016, 38(2): 25-31.
- YUAN L, LI H J, NI D D, et al. Effects of different rehydration conditions on short dry sea cucumber quality[J]. Journal of Southwest University, 2016, 38(2): 25-31.
- [12] 杜婕妤, 管娟, 汤海青, 等. 微波加热结合真空冷水浸泡对海参水发效果的影响[J]. 农业工程学报, 2020, 36(17): 272-280.
- DU J Y, GUAN J, TANG H Q, et al. Influence of microwave heating combined with vacuum cold water immersion on sea cucumber (*Stichopus japonicus*) soaking effects[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(17): 272-280.
- [13] ZHANG L T, HUANG X H, MIAO S, et al. Influence of ultrasound on the rehydration of dried sea cucumber (*Stichopus japonicus*) [J]. Journal of Food Engineering, 2016, 178: 203-211.
- [14] 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 F W, ZHANG X Y, LI S P, et al. Effect of different drying methods on quality of *Stichopus japonicus* [J]. Food & Machinery, 2018, 34(1): 209-212.
- [15] 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): e13723.
- [16] 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.
- [17] 刁华玉, 林松毅, 陈冬, 等. 解冻方式对南极磷虾肉理化特性和滋味的影响[J]. 中国食品学报, 2023, 23(4): 228–238.
- DIAO H Y, LIN S Y, CHEN D, et al. Effect of thawing methods on the physico-chemical and taste characteristics of antarctic krill meat[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2023, 23(4): 228–238.
- [18] ZHANG Y, HOU H, FAN Y, et al. Effect of moisture status on the stability of thermal gels from the body wall of sea cucumbers (*Apostichopus japonicus*) [J]. LWT–Food Science and Technology, 2016, 74: 294–302.
- [19] GENG S T, WANG H H, WANG X L, et al. A non-invasive NMR and MRI method to analyze the rehydration of dried sea cucumber [J]. Analytical Methods, 2015, 7(6): 2413–2419.
- [20] 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, 34(4): 135–141.
- WANG Z H, AN J W, ZHENG J, et al. Effects of different soaking methods on the quality characteristics of dried sea cucumber[J]. China Food Additives, 2023, 34(4): 135–141.
- [21] LAKSHMANANA R, PARKINSON B J A, PIGGOTT J R. High-pressure processing and water-holding capacity of fresh and cold-smoked salmon (*Salmo salar*) [J]. LWT–Food Science and Technology, 2007, 40(3): 544–551.
- [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: 102801.
- [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.
- [25] 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.
- [26] 郝梦甄, 胡志和. 超高压和盐渍泡发处理海参的质构和功能成分比较研究[J]. 食品科学, 2013, 34(5): 115–119.
- HAO M Z, HU Z H. Comparative effects of UHP and salt soaking on the texture and functional composition of sea cucumber (*Stichopus japonicus*) [J]. Food Science, 2013, 34(5): 115–119.
- [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 J, CHEN S Q, GUO R H, 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] AL-KHUSEIBI M K, SABLANI S S, PERERA C O. Comparison of water blanching and high hydrostatic pressure effects on drying kinetics and quality of potato [J]. Drying Technology, 2005, 23(12): 2449–2461.
- [29] LIU Z L, XIE L, ZIELINSKA M, et al. Improvement of drying efficiency and quality attributes of blueberries using innovative far-infrared radiation heating assisted pulsed vacuum drying (FIR-PVD) [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2022, 77: 102948.
- [30] 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: 114836.
- [31] TORNBERG E. Effects of heat on meat proteins – Implications on structure and quality of meat products [J]. Meat Science, 2005, 70(3): 493–508.
- [32] 刘文涛. 海参加热及水发过程中体壁胶原组织变化和机制研究[D]. 大连: 大连工业大学, 2019.
- LIU W T. Changes of collagen structure in sea cucumber (*Stichopus japonicus*) body wall during heating and rehydration [D]. Dalian: Dalian Polytechnic University, 2019.
- [33] CHENG S S, LI R R, YANG H M, et al. Water status and distribution in shiitake mushroom and the effects of drying on water dynamics assessed by LF-

- NMR and MRI[J]. *Drying Technology*, 2019, 38(8): 1001–1010.
- [34] XIE L, ZHENG Z A, MUJUMDAR A S, et al. Pulsed vacuum drying (PVD) of wolfberry: Drying kinetics and quality attributes[J]. *Drying Technology*, 2018, 36(12): 1501–1514.
- [35] 何秀. 基于微波真空干燥过程的海参水分迁移及品质变化规律研究[D]. 大连: 大连工业大学, 2021.
- HE X. Moisture migration and quality change of sea cucumber based on microwave vacuum drying process[D]. Dalian: Dalian Polytechnic University, 2021.
- [36] DONG X P, LIU W T, SONG X, et al. Characterization of heat-induced water adsorption of sea cucumber body wall [J]. *Journal of Food Science*, 2019, 84(1): 92–100.
- [37] BHAT T H, CHOUKSEY M K, BALANGE A K, et al. Effect of heat treatment at different stages of rigor on the quality of Pacific white shrimp (*Litopenaeus vannamei*)[J]. *Journal of Aquatic Food Product Technology*, 2017, 26(7): 770–780.
- [38] LI M, QI Y X, MU L, et al. Effects of processing method on chemical compositions and nutritional quality of ready-to-eat sea cucumber (*Apostichopus japonicus*)[J]. *Food Science and Nutrition*, 2019, 7(2): 755–763.
- [39] 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: 103154.
- [40] MENG S J, ZHANG H Y, SUN J F, et al. Study on nutritional value of instant sea cucumber processed by the new processing approach[J]. *American Journal of Biochemistry and Biotechnology*, 2017, 13(1): 51–57.

Effects of Drying Conditions on Rehydration Kinetics and Quality of Dried Sea Cucumber

LIN Yawen¹, LI Aiqing¹, TAN Zhuohong¹, KE Changhao¹, LI Yingmei², MA Rongrong³,
LI Jianrong¹, LI Xuepeng^{1*}

¹College of Food Science and Engineering, Bohai University, Jinzhou 121013, Liaoning

²Linghai Dalian Seafoods Breeding Co., Ltd., Jinzhou 121209, Liaoning

³Rongcheng Technology Transfer Service Center, Weihai 264300, Shandong)

Abstract In order to investigate the effects of pulsed vacuum drying (PVD) on the rehydration kinetics and quality of dried sea cucumber after rehydration, the effects of different vacuum holding time (10 min and 20 min) on the rehydration kinetics, water retention, water state and distribution, microstructure, texture, polysaccharide and saponin of dried sea cucumber after rehydration were studied when PVD was held at atmospheric pressure for 5 min. Sea cucumbers dried by hot air (HAD) were used as control. The results showed that compared with the dried sea cucumber treated with HAD, the dried sea cucumber with PVD had higher rehydration ratio (improved by 3.24%–16.08%) and water holding capacity (improved by 5.06%–5.20%), and the dried sea cucumber with PVD vacuum holding time of 10 min had the highest rehydration ratio and water retention capacity, which were 8.95 and 63.00%, respectively. The sea cucumber dried by PVD had larger porous structure after rehydration, and the relaxation time of immobilized water was shorter. MRI images showed that the proton signal intensity of sea cucumber dried by PVD was higher after rehydration. The sea cucumber with PVD vacuum holding time of 10 min after rehydration had the lowest hardness (377.44 N), the highest polysaccharide and saponin contents (1.17 $\mu\text{g/g}$ and 0.23 $\mu\text{g/g}$) and the highest amino acid contents (68.56 g/100 g). Compared with sea cucumbers dried by HAD, sea cucumbers dried by PVD had higher water rehydration ability by changing the tissue porous structure, and the dry sea cucumbers with PVD maintained higher nutrient content after rehydration. This study could help to elucidate the mechanisms by which PVD improved the rehydration characteristics and nutrient retention rates of sea cucumber, and provided a theoretical basis for finding suitable PVD conditions and obtaining high-quality rehydrated sea cucumber.

Keywords dried sea cucumber; rehydration kinetics; moisture diffusion; microstructure; polysaccharides; saponin