

文章编号: 1000-0615(2019)01-0197-09

DOI: 10.11964/jfc.20180911453

· 综述 ·

## 水产品真空冷冻干燥技术的研究现状与展望

吴燕燕<sup>1\*</sup>, 石慧<sup>1,2</sup>, 李来好<sup>1</sup>, 杨贤庆<sup>1</sup>, 林婉玲<sup>1</sup>, 陈胜军<sup>1</sup>

(1. 中国水产科学研究院南海水产研究所, 农业农村部水产品加工重点实验室, 广东广州 510300;

2. 上海海洋大学食品学院, 上海 201306)

**摘要:** 随着生活水平的提高, 人们对水产品品质提出了更高的要求, 因此开发新的加工技术势在必行。冻干食品以其优良的营养品质, 易流通、贮藏和方便食用, 迎合了这一发展趋势。本文综述了水产品真空冷冻干燥过程中前处理工艺(切片处理、超声波处理、浸渍处理、涂膜处理等)、冻干工艺参数(预冻工艺参数、干燥条件等)、品质变化(感官、质构、营养、风味、滋味、复水性)和品质预测模型的研究现状, 并重点探讨水产品真空冷冻干燥技术今后的研发趋势, 为水产真空冷冻干燥制品的研究与应用提供参考。

**关键词:** 水产品; 真空冷冻干燥; 前处理; 冻干工艺参数; 品质

**中图分类号:** S 983

**文献标志码:** A

第二次世界大战时期, 由于需要保存大量的易变性的医疗用品, 真空冷冻干燥技术应运而生。之后随着科技的不断进步和食品工业的不断发展, 真空冷冻干燥技术于20世纪60年代开始应用到食品工业中, 如今, 真空冷冻干燥作为一种重要食品加工技术被广泛应用到各种食品加工中, 如干燥香料、咖啡、速溶茶、果蔬、休闲食品等<sup>[1-5]</sup>。然而真空冷冻干燥技术在水产品加工中的应用仍处于初级阶段, 这就预示着水产品真空冷冻干燥技术存在着巨大的发展潜力。

近年来, 虽然我国在水产品加工发展中取得了一定的进展, 但相较于发达国家来说不论是发展程度还是发展速度都存在很大的差距, 然而由于我国水产品产量高、种类多、品质优良、价格便宜, 原料上的优势足以弥补加工技术上的劣势, 因此在国际食品市场上我国冻干水产品的竞争力仍不可小觑。目前的研究主要集中在海参<sup>[6]</sup>、扇贝<sup>[7]</sup>等海珍品上, 在其他水产品中研究较少。然而不仅海珍干制品可通过真空冷冻干燥技术提高其品质和档次, 中低档水

产品也可由此技术加工以增加附加值和销售渠道。本文对水产品真空冷冻干燥技术的研究现状进行综述, 为以后冻干水产品的发展指明方向, 也为日后的研究及应用奠定基础。

### 1 真空冷冻干燥技术的原理及其优势

当系统压力低于610.5 Pa时, 固态冰可通过加热升温转化为气态, 真空冷冻干燥食品就是利用此原理, 将原料预处理后快速冻结, 使食品中的水分在真空状态下从固态升华为气态, 再由解吸干燥除去剩余水分, 从而达到低温脱水干燥的目的。

作为一种半自动化低压低温脱水的高新技术, 真空冷冻干燥具有以下优势: 热敏性物质、易氧化物质在低温低压低氧环境不易变性失活, 因此风味成分及营养物质保留率较高; 干制品复水后与原料相比, 其基础成分及感官特性基本无差异; 干燥后不会发生收缩现象, 体积几乎不变, 呈疏松多孔海绵状, 复水快且复水后其品质与新鲜品基本相同或完全相同;

收稿日期: 2018-09-13 修回日期: 2018-12-20

资助项目: 现代农业产业技术体系专项(CARS-47); 国家重点研发计划资助(2016YFD0400201-6); 农业部财政重大专项(NFZX2013); 中国水产科学研究院中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(2018ZD01)

通信作者: 吴燕燕, E-mail: wuyyg@163.com

制品水分活度低,重量轻,易于保藏及运输<sup>[8]</sup>。

## 2 水产品真空冷冻干燥技术研究现状

### 2.1 前处理工艺对冻干水产品的影响

前处理是为了使原料达到更适合加工的状态,以获得品质更好的产品。前处理不仅可以提高冻干效率,在一定程度上改善产品品质,并且对延长产品的储藏期也有一定的作用。

**切片处理** 物料的厚度对干燥过程起到较大的影响,虽然物料的厚度越薄,干燥层热、质传递的阻力越小,从而缩短干燥时间,但批量生产能力也会随之降低,选择合适的物料厚度可在生产能力和生产效率之间找到最佳平衡点。有研究表明江珧(*Pinna rudis*)在冻干过程中影响升华冻干能耗的主次顺序为肉片厚度>加热板温度>预冻温度,当物料厚度为10 mm时,冻干能耗最优<sup>[7]</sup>。不仅物料的厚度对冻干过程有影响,同时有研究表明冻干时肉的纹理方向与热流方向平行,有利于传热和传质;而肉的纹理方向与热量传递方向垂直时,水蒸气难以扩散,阻碍了传质传热,使得干燥效率降低。郑建珊<sup>[9]</sup>实验发现顺纹理切割的青鱼(*Mylopharyngodon piceus*)片较逆纹理的冻干速率快。

**超声波处理** 经超声波处理的物料,其组织会产生“空穴效应”,即物料组织产生一些微小的孔道,会在一定程度上加快传质速率,然而若超声波功率过大,使得组织结构被破坏、组织纤维结构断裂,会导致淤塞,使得空穴效应产生的效果弱化。李敏等<sup>[10]</sup>研究发现超声波预处理对冻干罗非鱼片的品质有一定的增益效果,经预处理的鱼片前期升温慢有利于升华干燥,后期升温快有利于解析干燥。且以干制品的白度值和复水率为标准,发现350W功率超声波处理的效果较好。超声辅助技术通过“海绵效应”达到挤压和膨胀的作用,从而提高渗透脱水过程中的物质交换率。段续<sup>[11]</sup>将海参进行渗透处理后再冻干,以失水率和固形物增加率指标进行响应面优化,得到最佳工艺条件。同时发现利用超声辅助渗透处理的海参相较于未处理的海参,不仅含盐量没有明显增加,且其他质量指标如复水性、色泽、营养活性成分等都与未经处理的海参几乎没有差异,却降低了20%的能耗,因此该处理方法可节约能耗、提高效率。

**浸渍处理** 为了提高冻干产品品质和复水率,学者们研究了不同食品添加剂或加工助剂对原料的浸渍处理方法。浸渍处理根据溶质的不同分为普通的食盐浸渍、磷酸盐浸渍、海藻糖浸渍、复合浸渍等。

食盐浸渍是通过盐溶液对原料进行渗透脱水。易翠平等<sup>[12]</sup>研究发现6%的盐溶液处理后的鳃(*Elopichthys bambusa*)鱼片经冻干后复水率最高,为 $2.34\% \pm 0.01\%$ ,而未处理对照组仅为 $1.40\% \pm 0.01\%$ 。海藻糖等藻类多糖食品添加剂具有较好的保水作用,常作为冷冻水产品的保水剂,其对冻干水产品也能起到改善品质的作用,赵祥忠等<sup>[13]</sup>研究了海藻糖浸泡处理对牡蛎、扇贝、花蛤3种贝类复水性的影响,结果发现在 $(10 \pm 1)^\circ\text{C}$ 的条件下,用5%的海藻糖溶液浸泡贝肉30 min,冻干后3种贝类的复水率都达到了94%以上。杨晓宙等<sup>[14]</sup>发现添加5.00%的海藻糖可将固态的贝类海鲜蛋花汤的复水率提高到90%以上。真空冷冻干燥过程中,预冻易使原料失水从而使可溶性蛋白质等营养物质也有一定的损失,而加入适量多聚磷酸盐可以提高原料的持水性,并以此来降低营养物质的损失<sup>[15]</sup>,刘娟娟等<sup>[16]</sup>采用响应面分析法,以蒸煮损失率为指标,预测出了当三聚磷酸钠、焦磷酸钠及六偏磷酸钠最佳配比分别为1.5%、1.25%、0.75%时,蒸煮损失率最小为14.35%,并通过实验验证了这一预测值,结果接近。不同的溶液浸泡得到的产品品质也有不同,为了更好地改善产品的持水性和复水性,使产品复水后保持良好的质构,筛选出良好的添加剂,崔宏博<sup>[17]</sup>对比研究了环糊精、复合磷酸盐、NaCl以及海藻胶低聚糖对冻干成品品质的影响,发现复合磷酸盐和海藻酸钠裂解物能够增大其复水比,提高持水力,复水后的虾仁弹性和咀嚼性好。减少磷酸盐的使用一直是当前研究的热点,因此海藻酸钠裂解物等天然化学添加剂的使用也会成为必然趋势。

**涂膜处理** 水产品的贮藏特性是评价产品品质的重要标准。为了控制水产品贮藏过程中免受微生物的污染,有学者开始研究在水产品表面涂膜抑菌剂。纳米银作为一种安全、环保的天然杀菌剂,可使细菌DNA分子结构变形,造成细菌失活。李新林<sup>[18]</sup>研究发现使用纳米银淀粉抗菌膜溶液涂膜后,海参失水率、复水比、干燥收缩率和感官方面都没有明显变化,但

细菌总数变化显著,细菌死亡率为92.1%,因此纳米银淀粉抗菌膜溶液涂膜可以改善冻干产品的储藏特性。添加乳酸链球菌素可干扰细胞膜的正常功能,造成膜电位下降,养分易流失,从而导致致病菌和腐败菌死亡。

## 2.2 预冻工艺参数对冻干水产品的影响

预冻温度的确定是进行真空冷冻干燥的首要工作,也对冻干产品的品质产生重要影响。物料预冻温度设置过低会使冻结所需时间相应延长,不仅增加能耗,还降低了冻干效率;而设置过高,物料并没有完全冻结,干燥时这部分未冻结的水分发生气化而不是升华,在抽真空时,水分气化会使物料发生沸腾和起泡,造成产品形态收缩、变形等<sup>[19]</sup>。物料的预冻温度一般确定为共晶点以下5~10℃,共晶点温度是指物料完全冻结不存在液体水分时的温度,对共晶点的测定方法较多,如电阻检测法、差示扫描量热法(DSC法),并且电阻检测法更为方便可行,应用此法的较多。苏秀榕等<sup>[20]</sup>采用电阻法测得水发刺参的共晶点为-15℃。

预冻的速率对于干制品的品质起着举足轻重的作用,速率过快,虽然原料体内形成的冰晶小,细胞结构不会被破坏,但由于形成的空隙小,不利于水蒸气的排除,而且复水时水分也难以渗入,造成速率降低。然而慢速冻结形成冰晶大,使得升华后组织孔隙较大,虽然会加速水蒸气排除并且干制品复水加快,但大冰晶会挤压破坏鱼肉的细胞,造成复水后的水产品汁液流失严重,品质下降。邹兴华等<sup>[21]</sup>综合多种因素发现,银鱼的预冻方式最好采用中速冻结,即超低温冰箱冻结。

随着快速冻结技术的发展,液体浸渍速冻、液氮速冻等开始在水产品中应用,如何利用新的速冻技术进行预冻处理,减少对冻干产品品质的影响还需要进一步研究。

## 2.3 干燥条件对冻干水产品的影响

升华温度由物料的共熔点温度及崩解温度共同决定,既不能超过崩解温度,又不高于共熔点温度。共熔点温度是指冻结的物料开始融化的温度,若升华温度高于共熔点温度,物料融化会使干制品发生收缩,产生气泡,色泽变深,复水困难;若升华温度过低,升华速率也

会因此降低,时间延长。因此升华阶段要求物料的温度接近共熔点温度,但又不能超过共熔点温度<sup>[22]</sup>。共熔点与共晶点的测定方法相似,常采用电阻法、DSC法等。虽然共熔点温度可以大致确定升华温度,但仍需进一步优化。

干燥过程同时涉及传质和传热两个过程,干燥室的真空度与升华、解吸过程的传热、传质速率关系密切。徐瑛等<sup>[23]</sup>比较了不同真空室压力对河蚬(*Corbicula fluminea*)干品水分含量及复水性等方面的影响,发现真空室压力为35~40 Pa所得到的干品河蚬水分含量为2.1%,复水率高达93.56%。然而干燥仓内稳定的压强在一定程度上影响着食品的升华温度,因此真空脱水干燥阶段干燥室压强和加热板温度交互影响干制品的品质。郑晓杰等<sup>[24]</sup>采用单因素与正交实验,研究厚度、绝对压力、升华加热温度对蓝点马鲛(*Scorpaenopsis niphonius*)鱼糜冻干制品品质的影响,得到物料厚度为7 mm,绝对压力为85 Pa,升华温度为20℃时,鱼糜制品冻干的干燥速率和复水能力都较好。郑斌<sup>[25]</sup>以巴非蛤的冻干速率和氨基酸态氮含量为指标,通过模型分析和优化确定出最优工艺参数:真空度为24 Pa,升华温度为45℃,解析温度为63℃。

然而对于复杂的冻干过程,一成不变的加热板温度和真空度并不完全适用于不断变化的物料,因此对于变温变压的研究是非常有必要的。孙小红等<sup>[26]</sup>利用调压法来缩短海湾扇贝南部亚种(*Argopecten irradians contentricus*)的冻干时间,并发现调压法相较恒压优化后的冻干时间减少了10%左右,而对调压法的参数进一步优化得到前期高压60 Pa、物料中心温度为0℃时调为低压10 Pa时冻干时间最短,较恒压优化后缩短了20%。李敏等<sup>[27]</sup>采用两次变温与一次变压的组合调节,发现随冻干过程的进行适时变温变压,不仅可以减少时间和能耗,而且干制品的质量也有相应的提高。

对于不同的物料其最优的工艺参数不同,因此不同原料最佳工艺参数的研究是水产品真空冷冻干燥应用到食品工业中的基础,而目前也有部分研究涉及到这方面。陈飞东等<sup>[28]</sup>通过实验优化,确定鱿鱼的最佳干燥工艺参数为加热板温度40℃,真空度40 Pa,烫漂时间2 min。刘达等<sup>[29]</sup>利用Box-Behnken中心组合设计原理和响应面分析法,确定虾仁的最佳干燥工艺条件为

加热板温度31.25 °C, 真空度22.81 Pa, 烫漂时间1.43 min。

## 2.4 冻干水产品的品质研究现状

水产品原料经真空冷冻干燥发生了一系列的品质变化, 其中主要是感官特性、理化性质、微生物指标等。对于产品品质的变化, 其模型的监控和预测可以较好的保证产品稳定性, 并进一步优化产品品质及工艺。

**冻干水产品的感官与质构分析** 以干燥脱水处理水产品, 最直观的是形态大小的变化。Wang等<sup>[30]</sup>比较风干、真空干燥、真空冷冻干燥、微波真空干燥方法对重组鲢(*Hypophthalmichthys molitrix*)鱼肉品质的影响, 发现前三种方法干燥后的鱼肉形态均有所收缩, 而微波真空干燥后的重组鱼肉却有所膨胀。感官指标是评价食品品质的重要标准, 通过感官评价可良好地反映食品的可食用性、安全性。林丰等<sup>[31]</sup>经感官评定真空冷冻干燥的南极磷虾(*Euphausia superba*)制品, 发现色泽较好, 无虾头黑变; 干燥制品有独特的风味, 且所含风味物质更接近原虾。

感官评定的适口性与食品的质构有密不可分的关系, 食品的质构也是评价食品品质的重要因素。李书红等<sup>[32]</sup>对冻干前后扇贝柱的质构特性变化进行研究, 发现扇贝柱干燥后的硬度、弹性、黏聚性和咀嚼性较干燥前显著增加; 与其他干燥方法相比, 冻干扇贝柱的硬度、弹性、黏聚性和咀嚼性等质构特性和感官综合评分较低, 但其色泽较好, 更接近新鲜的扇贝, 说明真空冷冻干燥的扇贝在口感上存在劣势, 而在保持外观色泽方面具有优势。因此多种干燥方法联合干燥, 扬长避短, 将会成为未来的发展方向。

**冻干水产品营养品质分析** 人们对于食品品质的要求越来越不仅仅局限于外观、风味等方面, 还对食品中的营养物质提出了更高的要求。经冷冻干燥的食品其营养成分流失较少, 具有较高的营养价值。高加龙等<sup>[33]</sup>对比市售蚝干与牡蛎冻干制品, 发现后者的蛋白含量较高, 脂肪含量较低, 且均具有显著性差异。真空冷冻干燥不仅对牡蛎的ATP关联化合物总量、乳酸、糖原等无影响, 并且甜菜碱和琥珀酸损失较少, 与市售蚝干对比明显。Hu等<sup>[34]</sup>以加热过的未干燥的带鱼(*Trichiurus japonicus*)鱼糜为对

照, 采用SDS-聚丙烯酰胺凝胶电泳分析干燥前后带鱼鱼糜蛋白的降解情况, 发现占肌纤维蛋白15%~30%的肌动蛋白没有发生降解, 并且肌球蛋白重链带密度也没有发生变化。

**冻干水产品风味与滋味分析** 味道包含风味和滋味, 是水产品主要的品质评价指标, 也是消费者对产品喜爱与否的关键因素。水产品的风味和滋味与产品的鲜度K值和ATP相关物质、挥发性物质、氨基酸组成有密切的关系, 研究者分别以青鱼、罗非鱼、大黄鱼(*Larimichthys crocea*)为对象, K值作为评价鲜度的指标, 比较冰温真空干燥与真空冷冻干燥产品的K值, 均处于一级鲜度(10%以下)且无显著性差异<sup>[35-37]</sup>; 而热风干燥的K值均较高; 干制品中挥发性成分总量较新鲜鱼片均有所降低, 其中采用热风干燥的产品降幅较小, 主要原因是由于热风干燥温度高, 易使鱼肉脂肪氧化产生挥发性羰基化合物; 肌苷酸(IMP)是一种鲜味极强的风味增强剂<sup>[38]</sup>, 经热风干燥和真空冷冻干燥的鱼片干品中IMP含量均有损失, 而经冰温真空干燥后的鱼片中IMP含量却升高, 是新鲜鱼片2倍。但Li等<sup>[39]</sup>研究发现热风干燥海鳗(*Muraenesox cinereus*)制品较真空冷冻干燥的IMP含量高, 可见干燥条件、原料特点均对产品的鲜度和风味品质有显著影响; 李佳等<sup>[40]</sup>研究了海鳗鱼片中与风味物质有关的内源酶活性的变化, 发现AMP脱氨酶、亮氨酸氨肽酶、组织蛋白酶B和酸性磷酸酶潜在活性均有所降低, 真空冷冻干燥鱼片的4种酶活性保存率最高, 冰温真空干燥次之, 热风干燥最低。Cao等<sup>[37]</sup>发现冰温真空干燥鱼片的微生物和TVB-N的含量最低, 鱼片能保持良好的风味和滋味, 且不容易出现氧化或微生物引起的腐败变质而导致的不良风味。

**冻干水产品复水性分析** 冻干食品通常情况下需要复水后烹调食用, 因此其复水性及复水后的食品品质是评价干制品品质等级的重要指标。阙婷婷等<sup>[41]</sup>研究了真空冷冻干燥、热风干燥、真空微波干燥方法对鱼糜干制品的水分含量、复水性能、吸水指数(WAI)、水溶解指数(WSI)的影响, 发现真空冷冻干燥鱼糜的品质最好, 所得产品中水分含量、WAI、WSI分别可达4.03%、5.60、18.66%, 而热风干燥产品为11.84%、2.35、27.65%; 真空微波干燥产品为6.16%、5.52、15.01%。干制品的复水性与干制

品中盐溶性蛋白含量、水分状态、肌原纤维等有一定的关系。崔宏博等<sup>[42]</sup>观察了冻干虾仁随贮藏时间的延长后,以上几个方面状态变化,发现复水后的冷冻干燥虾仁中,水分由中间水向自由水迁移;肌纤维致密均匀的排列,肌原纤维本身的结构被破坏,虾肉蛋白的进一步变性使得蛋白质的盐溶性下降、三维结构和表面基团改变,这几个方面的变化使得虾仁的复水性能和复水后的持水性均下降。张凡伟等<sup>[43]</sup>发现不同方法(热风干燥、微波干燥、真空冷冻干燥、微波真空冷冻干燥)干燥刺参制品复水性最高的是冻干刺参,其主要原因是冻干刺参微观结构呈现均匀疏松的海绵状,疏松多孔,易于复水。有研究发现层状冰结构可以在干燥后留下高连通性的大孔,更有利于传质传热<sup>[44]</sup>;而冰核蛋白具有改变冰晶宏观形态的作用<sup>[45]</sup>。以此为基础, Jue等<sup>[46]</sup>通过实验发现冰核蛋白不仅可以促进冰成核过程,还能改变宏观冰结构,适当添加冰核蛋白可以提高冻干效率,缩短冻干时间,降低生产成本。由于冰核蛋白具有这种特殊的作用,未来可考虑研究筛选更有利于复水的冰晶结构。

**冻干水产品的品质预测模型** 现如今模型主要作用是预测食品品质变化以及控制过程中的参数变化。由于在冻干过程中,原料的温度是在不断变化的,而对于温度的控制影响着产品的品质。李晓斌等<sup>[47]</sup>通过仿真和实验比较,表明APSO-PFC控制方法优于PID控制方法,可动态跟踪控制罗非鱼冻干过程中的温度,从而控制冻干罗非鱼片产品的品质。Ma等<sup>[48]</sup>利用高光谱预测模型研究真空冷冻干燥草鱼(*Ctenopharyngodon idella*)片脱水和复水过程中的质量变化,基于SG平滑预处理的简化平均光谱(脱水: $R_p^2=0.9325$ , 预测标准差(RMSEP)=5.34%;复水: $R_p^2=0.8278$ , RMSEP=9.79%)的偏最小二乘回归(PLSR)模型被确定为最佳预测模型,从而实现产品质量损失值和增益百分比可视化。而以上两种方法的结合即智能跟踪控制与可视化无损检测必将成为今后食品研究应用方面的热点。

水产品原料不同,其冻干过程会有所差异,其适用的动力学模型也会有所不同。刘娟娟<sup>[49]</sup>为了找出更适用于北太平洋柔鱼(*Ommastrephes bartrami*)真空冷冻干燥的动力学模型,比较了Page方程、经典扩散模型和指数模型,发现用

Page模型来描述厚度、加热板温度及真空度与冻干产品水分比之间的关系最为合适。孙小红等<sup>[50]</sup>通过质量和能量衡算,建立了描述冷冻干燥过程的一维非稳态耦合热质传递动力学模型。同时以扇贝柱为研究对象证明模型的可行性,发现模拟制品中心温度曲线与实验测得的制品中心温度曲线吻合良好,说明所选的一维传热模型可以用来预测升华干燥时间。

### 3 展望

冻干水产品具有重量轻、体积小、易贮藏流通的特点,且能较好地保持产品的品质,目前在海参、对虾和贝类中已有应用,随着人们生活水平的提高和对高品质水产品的需求,其开发应用将是今后的重要研究方向,特别是当前海水、淡水鱼类养殖产量急增,除了冷冻加工之外,需要开发更多高品质易贮藏流通的水产加工品,但水产品通常是采用热风或自然晒干,所以品质难以保证,干制加工新技术的发展势在必行。随着冻干技术的发展,虽然有不少学者研究了水产品冻干后的风味,但冻干制品味道单调、加工成本高、生产不连续等问题并没有得到解决。今后需要着重研究水产品冻干技术的以下几个方面:

通过改变原料的各方面特性使其达到更适应真空冷冻干燥的状态,可利用新型的生物技术方法改变水产品中水分的分布情况、冰晶结构状态或蛋白质的存在状态等来促进冻干过程的进行,加快冻干速率,降低能耗。对原料进行一定的预调理,赋予食品原料独特的风味,或将水产品切碎后重新调制成型以丰富制品形态多样性,增加产品的附加值。

根据不同水产品原料的特点,通过研究真空冷冻干燥工艺参数,经优化获得不同大小或种类的水产品共性冻干工艺条件,并且对于变温变压工艺进行优化,为水产冻干制品的实际生产提供切实可行的工艺技术。

通过对水产干制品各方面质量指标的测定,并结合感官评定,确定评价产品质量的标准。通过对原料、工艺参数及成品的质量进行分析,针对不同水产品建立适宜的产品品质监控预测的模型,从而进一步确保产品品质的稳定。

针对当前冻干设备成本高且能耗大的问题,根据水产品冻干工艺,研发可连续化生产

的冻干设备,通过热能的循环利用,提高能源的利用率。应用无损检测,将加工与智能控制相结合,根据物料状态变化,利用计算机程序相应地改变加热板温度及真空度。

将真空冷冻干燥与其他干燥方式结合是未来水产品干燥的主要研究方向。真空冷冻干燥后的水产品更易于保存,也能更好地与其他食品一起制成休闲食品,丰富水产品的食用形式,所以也要重视多样化的冻干水产食品研发。

### 参考文献:

- [1] 刘华, 钟业俊, 李资玲, 等. 冻干圣女果粉的水分吸附性质及玻璃化转变温度[J]. *食品科学*, 2015, 36(23): 95-99.  
Liu H, Zhong Y J, Li Z L, *et al.* Water sorption characteristics and glass transition temperature of freeze-dried cherry tomatoes[J]. *Food Science*, 2015, 36(23): 95-99(in Chinese).
- [2] 刘业凤, 周国梁, 李续. 真空冷冻干燥蒜丁实际生产的能耗研究[J]. *农业工程学报*, 2014, 30(10): 242-247.  
Liu Y F, Zhou G L, Li X. Research on energy consumption in actual production of vacuum freeze-dried garlic slice[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, 30(10): 242-247(in Chinese).
- [3] Djekic I, Tomic N, Bourdoux S, *et al.* Comparison of three types of drying (supercritical CO<sub>2</sub>, air and freeze) on the quality of dried apple - quality index approach[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2018, 94: 64-72.
- [4] Dong W J, Hu R S, Chu Z, *et al.* Effect of different drying techniques on bioactive components, fatty acid composition, and volatile profile of robusta coffee beans[J]. *Food Chemistry*, 2017, 234: 121-130.
- [5] Ma Y, Liu W W, Huang G H. Manufacturing research with feasibility of vacuum freeze drying technology for leisure meat products processing[J]. *Advanced Materials Research*, 2014, 1056: 84-87.
- [6] 员冬玲, 邵敏, 蔡中盼, 等. 海参的干制技术研究进展[J]. *干燥技术与设备*, 2015, 13(6): 1-9.  
Yuan D L, Shao M, Cai Z P, *et al.* Advances in research on dry technology of sea cucumber[J]. *Drying Technology and Equipment*, 2015, 13(6): 1-9(in Chinese).
- [7] 刘征. 扇贝干燥关键技术研究[D]. 保定: 河北农业大学, 2012: 26-56.  
Liu Z. Research on the key drying technologies of scallops[D]. Baoding: Agricultural University of Hebei Province, 2012: 26-56(in Chinese).
- [8] 郑烟梅, 刘智禹, 路海霞, 等. 水产品干燥技术研究进展[J]. *食品安全质量检测学报*, 2017, 8(1): 27-32.  
Zheng Y M, Liu Z Y, Lu H X, *et al.* Research progress on drying technology of aquatic product[J]. *Journal of Food Safety and Quality*, 2017, 8(1): 27-32(in Chinese).
- [9] 郑建珊. 提高青鱼片冻干工艺效率的实验研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2011: 20-24.  
Zheng J S. Experimental study of herring slice freeze drying efficiency improvement[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2011: 20-24(in Chinese).
- [10] 李敏, 关志强, 吴阳阳, 等. 不同功率的超声波预处理对罗非鱼片冻干性能的影响[J]. *真空科学与技术学报*, 2016, 36(6): 618-623.  
Li M, Guan Z Q, Wu Y Y, *et al.* Vacuum freeze-drying of ultrasonic dehydrated tilapia fillets[J]. *Chinese Journal of Vacuum Science and Technology*, 2016, 36(6): 618-623(in Chinese).
- [11] 段续. 海参微波-冻干联合干燥工艺与机理研究[D]. 无锡: 江南大学, 2009: 83-93.  
Duan X. Studies on processing and mechanism of microwave-freeze hybrid drying sea cucumbers[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2009: 83-93(in Chinese).
- [12] 易翠平, 钟春梅, 何英和, 等. 预处理对冻干鳕鱼片弹性和复水率的影响[J]. *食品工业科技*, 2013, 34(6): 181-184, 201.  
Yi C P, Zhong C M, He Y H, *et al.* Effects of preprocessing on the springness and rehydration of freeze-dried *Elopichthys bambusa* fillets[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2013, 34(6): 181-184, 201(in Chinese).
- [13] 赵祥忠, 张合亮, 王振华, 等. 提高贝类蛋花汤中贝肉复水性的工艺研究[J]. *齐鲁工业大学学报*, 2014, 28(2): 51-54.  
Zhao X Z, Zhang H L, Wang Z H, *et al.* Research on improving rehydration of shellfish meat in egg drop soup[J]. *Journal of Qilu University of Technology*, 2014, 28(2): 51-54(in Chinese).
- [14] 杨晓宙, 赵祥忠, 张合亮, 等. 速食贝类蛋花汤生产技术研究[J]. *食品研究与开发*, 2014, 35(14): 54-57.  
Yang X Z, Zhao X Z, Zhang H L, *et al.* Research on fast

- food-egg drop soup of shellfish production technology[J]. *Food Research and Development*, 2014, 35(14): 54-57(in Chinese).
- [15] 郝娟, 丁武. 复合磷酸盐对鸡肉制品质构特性的影响研究[J]. *肉类工业*, 2010(2): 21-24.  
Hao J, Ding W. Study on Effect of compound phosphate on the texture properties of chicken meat products[J]. *Meat Industry*, 2010(2): 21-24(in Chinese).
- [16] 刘娟娟, 丁颀, 方旭波, 等. 提高冻干鱿鱼熟片复水性的初步研究[J]. *食品科技*, 2012, 37(12): 121-125.  
Liu J J, Ding Y, Fang X B, *et al.* The preliminary research on improving rehydration of freeze-dried cooked squid[J]. *Food Science and Technology*, 2012, 37(12): 121-125(in Chinese).
- [17] 崔宏博. 两种南美白对虾产品工艺和贮藏稳定性的研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2012: 15-20.  
Cui H B. Study of freeze-dried and ready-to-eat shrimp (*Penaeus vannamei*)[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2012: 15-20(in Chinese).
- [18] 李新林. 纳米银涂膜液制备及其在海参低温干制品中的应用[D]. 无锡: 江南大学, 2008: 31-39.  
Li X L. Preparation of nano silver coating solution and application in low temperature dried products of sea cucumber[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2008: 31-39(in Chinese).
- [19] 麦润萍, 冯银杏, 李汴生. 基于分形理论的预冻温度对冻干猕猴桃片干燥特性及品质的影响[J]. *食品与发酵工业*, 2018.  
Mai R P, Feng Y X, Li B S. The influence of pre-freezing temperature on the characteristics of kiwifruit slices based on fractal[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2018(in Chinese).
- [20] 苏秀榕, 徐静, 向怡卉, 等. 水发刺参的冷冻干燥技术研究[J]. *食品科学*, 2008, 29(10): 277-280.  
Su X R, Xu J, Xiang Y H, *et al.* Study on freeze-drying technology of *Stichopus japonicus* processing[J]. *Food Science*, 2008, 29(10): 277-280(in Chinese).
- [21] 邹兴华. 太湖银鱼的真空冷冻和真空微波联合干燥[D]. 无锡: 江南大学, 2005: 11-21.  
Zou X H. Experimental studies on treatment of Taihu whitebait by a combination of freeze drying and vacuum microwave[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2005: 11-21(in Chinese).
- [22] 郭树国. 人参真空冷冻干燥工艺参数试验研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2012: 15-30.  
Guo S G. Experiment study on technology parameters for freeze-drying of ginseng slice[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2012: 15-30(in Chinese).
- [23] 徐瑛, 陈天及, 谢堃. 真空冷冻干燥水产品的技术分析[J]. *渔业现代化*, 2007, 34(3): 44-46.  
Xu Y, Chen T J, Xie K. Technical analysis of vacuum freeze-dried aquatic products[J]. *Fishery Modernization*, 2007, 34(3): 44-46(in Chinese).
- [24] 郑晓杰, 李燕, 卢杰, 等. 鱼糜制品真空冷冻干燥工艺优化[J]. *食品与机械*, 2013, 29(1): 216-218.  
Zheng X J, Li Y, Lu J, *et al.* Optimization of freeze-drying of surimi product[J]. *Food & Machinery*, 2013, 29(1): 216-218(in Chinese).
- [25] 郑斌. 巴非蛤预煮液浓缩及冻干制粉工艺研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2012: 23-47.  
Zheng B. The Study on concentration and vacuum freeze drying and powdering technology of pre-cooked paphia liquid[D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2012: 23-47(in Chinese).
- [26] 孙小红, 关志强, 蒋小强, 等. 墨西哥湾扇贝的变压真空冷冻干燥的实验研究[J]. *南方水产*, 2006, 2(6): 45-48.  
Sun X H, Guan Z Q, Jiang X Q, *et al.* Experimental study about changeable pressure on vacuum freeze-drying of *Argopecten irradians concentricus*[J]. *South China Fisheries Science*, 2006, 2(6): 45-48(in Chinese).
- [27] 李敏, 关志强, 蒋小强, 等. 变温变压的优化组合对扇贝真空冷冻干燥过程影响的实验研究[J]. *真空科学与技术学报*, 2012, 32(4): 357-361.  
Li M, Guan Z Q, Jiang X Q, *et al.* Optimization of vacuum freeze-drying conditions of scallop[J]. *Chinese Journal of Vacuum Science and Technology*, 2012, 32(4): 357-361(in Chinese).
- [28] 陈飞东, 刘军波, 王宏海, 等. 鱿鱼真空冷冻干燥工艺的优化[J]. *农产品加工*, 2015(21): 23-27.  
Chen F D, Liu J B, Wang H H, *et al.* Optimization of vacuum freeze-drying process of squid foot slices by orthogonal[J]. *Farm Products Processing*, 2015(21): 23-27(in Chinese).
- [29] 刘达. 中华管鞭虾虾仁不同干燥工艺的研究[D]. 杭州: 浙江工商大学, 2016: 29-42.  
Liu D. Study on different drying process and storage of

- Solenocera melantho*[D]. Hangzhou: Zhejiang Gongshang University, 2016: 29-42(in Chinese).
- [30] Wang Y Q, Zhang M, Mujumdar A S, *et al.* Quality changes of dehydrated restructured fish product from silver carp (*Hypophthalmichthys molitrix*) as affected by drying methods[J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2013, 6(7): 1664-1680.
- [31] 林丰, 汪之和, 施文正, 等. 干燥方式对南极磷虾干制品风味成分的影响[J]. 上海农业学报, 2016, 32(5): 133-138.  
Lin F, Wang Z H, Shi W Z, *et al.* Effects of drying methods on flavor and ingredients of Antarctic krill dried products[J]. *Acta Agriculturae Shanghai*, 2016, 32(5): 133-138(in Chinese).
- [32] 李书红, 王颀, 宋春风, 等. 不同干燥方法对即食扇贝柱理化及感官品质的影响[J]. 农业工程学报, 2011, 27(5): 373-377.  
Li S H, Wang J, Song C F, *et al.* Effects of different drying methods on physicochemical and sensory characteristics of instant scallop[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2011, 27(5): 373-377(in Chinese).
- [33] 高加龙, 沈建, 章超桦, 等. 真空冷冻干燥对牡蛎品质的影响[J]. 现代食品科技, 2015, 31(4): 253-257.  
Gao J L, Shen J, Zhang C H, *et al.* Effects of vacuum freeze-drying on the quality of the oyster *ostrea rivularis*[J]. *Modern Food Science and Technology*, 2015, 31(4): 253-257(in Chinese).
- [34] Hu Y Q, Que T T, Fang Z X, *et al.* Effect of different drying methods on the protein and product quality of hairtail fish meat gel[J]. *Drying Technology*, 2013, 31: 1707-1714.
- [35] 庞文燕, 万金庆, 姚志勇, 等. 不同干燥方式对青鱼片鲜度的影响[J]. 广东农业科学, 2013, 40(15): 124-126.  
Pang W Y, Wan J Q, Yao Z Y, *et al.* Effects of different drying methods on freshness of black carp fillet[J]. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2013, 40(15): 124-126(in Chinese).
- [36] 陈青云, 施文正, 万金庆, 等. 三种干燥方式对罗非鱼片风味物质的影响[J]. 食品工业科技, 2014, 35(16): 323-327, 333.  
Chen Q Y, Shi W Z, Wang J Q, *et al.* Effect of three kinds of drying methods on the flavor substances of tilapia fillet[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2014, 35(16): 323-327, 333(in Chinese).
- [37] Cao X C, Wan J Q, Li J. Effects of different drying methods on freshness of *Pseudosciaena crocea* fillet[C]//Proceedings of the 2015 6th International Conference on Manufacturing Science and Engineering. Guangzhou, China: Atlantis Press, 2016: 836-841.
- [38] 邹明辉, 李来好, 郝淑贤, 等. 凡纳滨对虾虾仁在冻藏过程中品质变化研究[J]. 南方水产, 2010, 6(4): 37-41.  
Zou M H, Li L H, Hao S X, *et al.* Study on *Penaeus vannamei* quality changes during frozen storage[J]. *South China Fisheries Science*, 2010, 6(4): 37-41(in Chinese).
- [39] Li J, Wan J Q, Bian H, *et al.* Effect of controlled freezing-point vacuum drying on color and flavor of *Muraenesox cinereus* fillets[J]. *Journal of Food Process Engineering*, 2017, 40(1): e12273.
- [40] 李佳, 万金庆, 邹磊, 等. 不同干燥方法对海鲢鱼片几种内源酶活力的影响[J]. 现代食品科技, 2015, 31(8): 254-260.  
Li J, Wang J Q, Zou L, *et al.* Effect of different drying methods on several endogenous enzyme activities of *Muraenesox cinereus* fillets[J]. *Modern Food Science and Technology*, 2015, 31(8): 254-260(in Chinese).
- [41] 阙婷婷, 张佳琪, 张慧, 等. 真空微波干燥与真空冷冻干燥对鱼糜干制品质量的影响[J]. 食品工业科技, 2012, 33(23): 253-257, 262.  
Que T T, Zhang J Q, Zhang H, *et al.* Study on the application of the vacuum microwave drying and vacuum freeze-drying technology in surimi products[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2012, 33(23): 253-257, 262(in Chinese).
- [42] 崔宏博, 薛勇, 宿玮, 等. 即食南美白对虾贮藏过程中水分状态的变化研究[J]. 中国食品学报, 2012, 12(6): 198-203.  
Cui H B, Xue Y, Su W, *et al.* Study on moisture status change of ready-to-eat shrimp during storage[J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2012, 12(6): 198-203(in Chinese).
- [43] 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 japonicas*[J]. *Food & Machinery*, 2018, 34(1): 209-212(in Chinese).
- [44] Patapoff T W, Overcashier D E. The importance of



- freezing on lyophilization cycle development[J]. *Biopharm*, 2002, 15(3): 16-21.
- [45] Rezanezhad F, Quinton W L, *et al.* Examining the effect of pore size distribution and shape on flow through unsaturated peat using computer tomography[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2009, 13: 1993-2002.
- [46] Jue J, Edward J Y, Derek A, *et al.* Improved freeze drying efficiency by ice nucleation proteins with ice morphology modification[J]. *Food Research International*, 2018, 106: 90-97.
- [47] 李晓斌, 王海波, 许哲, 等. 罗非鱼真空冷冻干燥温度的智能预测控制[J]. *控制工程*, 2011, 18(5): 719-722, 770.
- Li X B, Wang H B, Xu Z, *et al.* Intelligent predicting control of vacuum freeze-drying temperature of tilapia[J]. *Control Engineering of China*, 2011, 18(5): 719-722, 770(in Chinese).
- [48] Ma J, Qu J H, Sun D W. Developing hyperspectral prediction model for investigating dehydrating and rehydrating mass changes of vacuum freeze dried grass carp fillets[J]. *food and bioproducts processing*, 2017, 104: 66-76.
- [49] 刘娟娟. 鱿鱼真空冷冻干燥加工工艺研究[D]. 舟山: 浙江海洋学院, 2013: 41-48.
- Liu J J. Investigation of vacuum freeze-drying process of squid[D]. Zhoushan: Zhejiang Ocean University, 2013: 41-48(in Chinese).
- [50] 孙小红, 关志强, 覃惠芳, 等. 贝肉真空冷冻干燥过程的数值计算[J]. *制冷*, 2008, 27(1): 21-26.
- Sun X H, Guan Z Q, Qin H F, *et al.* Numerical calculation during vacuum freeze-drying of shellfish meat[J]. *Refrigeration*, 2008, 27(1): 21-26(in Chinese).

## Research status and prospects of vacuum freeze-drying technology for aquatic products

WU Yanyan<sup>1\*</sup>, SHI Hui<sup>1,2</sup>, LI Laihao<sup>1</sup>, YANG Xianqing<sup>1</sup>, LIN Wanling<sup>1</sup>, CHEN Shengjun<sup>1</sup>

(1. Key Lab of Aquatic Product Processing, Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People's Republic of China, South China Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Guangzhou 510300, China;

2. College of Food Sciences and Technology, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China)

**Abstract:** With the improvement of living standards, people have put forward higher requirements for the quality of aquatic products, so it is imperative to develop new processing technologies. Freeze-dried foods cater to this development trend because of their excellent nutritional quality, easy logistics, transportation, and storage and convenient consumption. In this paper, the pretreatment process in the vacuum freeze-drying process of aquatic products (slicing treatment, ultrasonic treatment, immersion treatment, coating treatment, etc.), freeze-drying process parameters (pre-freezing process parameters, drying conditions, etc.), quality changes (sensory, texture, nutrition, flavor, taste, rehydration) and quality prediction model research status were reviewed. The future research and development trend of aquatic product vacuum freeze-drying technology was also focused on. It will provide reference for the research and application of vacuum freeze-drying products.

**Key words:** aquatic products; vacuum freeze-drying; pretreatment; freeze-drying process parameters; quality

**Corresponding author:** WU Yanyan. E-mail: wuyygd@163.com

**Funding projects:** China Agriculture Research System (CARS-47); National Key R & D Program of China (2016YFD0400201-6); Major Special Funds for Agriculture and Rural Finance (NFZX2013); Central Public-interest Scientific Institution Basal Research Fund, South China Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences (2018ZD01)