

# 水产品干燥技术研究进展

郑烟梅<sup>1,2,3</sup>, 刘智禹<sup>1,2</sup>, 路海霞<sup>1,2</sup>, 陈晓婷<sup>1,2</sup>, 叶琳弘<sup>1,2</sup>, 蔡水淋<sup>1,2</sup>, 吴靖娜<sup>1,2\*</sup>

(1. 福建省水产研究所, 福建省海洋生物增殖与高值化利用重点实验室, 厦门 361013; 2. 福建省海洋生物资源开发利用协同创新中心, 厦门 361013; 3. 闽南师范大学生物科学与技术学院, 漳州 363000)

**摘要:** 干燥是水产品加工工艺中不可或缺的环节之一, 但采用不同的干燥技术会导致最终产品风味和质地的差异。因此, 本文从传统干燥技术和新型干燥技术的角度出发对水产品干燥技术的研究进展进行总结, 综述了自然晾晒、热风干燥、真空冷冻干燥、真空干燥、冷风干燥、热泵干燥、微波干燥和红外干燥技术的研究情况, 概述了各种干燥技术的研究应用现状, 指出水产品干燥技术今后的研究方向和发展趋势, 旨在有效提高水产品干燥效率, 并促进水产品的加工利用和经济效益, 从而为干燥技术的进一步研究利用提供参考。

**关键词:** 水产品; 干燥技术; 研究现状

## Research progress on drying technology of aquatic product

ZHENG Yan-Mei<sup>1,2,3</sup>, LIU Zhi-Yu<sup>1,2</sup>, LU Hai-Xia<sup>1,2</sup>, CHEN Xiao-Ting<sup>1,2</sup>, YE Lin-Hong<sup>1,2</sup>,  
CAI Shui-Lin<sup>1,2</sup>, WU Jing-Na<sup>1,2\*</sup>

(1. Fisheries Research Institute of Fujian, Key Laboratory of Cultivation and High-value Utilization of Marine Organisms in Fujian Province, Xiamen 361013; 2. Collaborative Innovation Center for Exploitation and Utilization of Marine Biological Resources, Xiamen 361013; 3. College of Biological Science and Technology, Minnan Normal University, Zhangzhou 363000, China)

**ABSTRACT:** Drying is an essential part of aquatic product processing, however, different drying technology will lead to different flavor and quality of dried products. Therefore, the article summarized the current status of the research of drying technology of aquatic products in the traditional and the novel drying technology, including the studies and applications of natural drying, hot-air drying, vacuum freeze drying, vacuum drying, cold-air drying, heat pump drying, microwave drying and infrared drying. Meanwhile, in order to improve the drying efficiency, facilitate the utilization of aquatic product and enhance the economic performance, the paper pointed out the future research directions and development trends of drying technology of aquatic products, which can provide references for the further researches.

**KEY WORDS:** aquatic products; drying technology; current status of the research

基金项目: 福建省海洋高新技术产业发展专项 ( [2016]23 号、[2016]07 号 ), 福建省海洋经济创新发展区域示范项目 ( 2014FJPT01、2014FJPT05 ), 厦门南方海洋研究中心项目 ( 14PZY017NF17 ), 厦门市海洋经济发展专项 ( 14CZP041HJ15 )

Fund: Supported by Special Marine High-Tech Industry Development of Fujian province ([2016]23,[2014]07), Marine Economy Innovation and Development Project of Fujian (2014FJPT01, 2014FJPT05), the Marine Economy Development Project of Xiamen (14PZY017NF17), the Special Marine Economy Development Projects of Xiamen (14CZP041HJ15)

\*通讯作者: 吴靖娜, 硕士, 助理研究员, 主要研究方向为水产品加工与综合利用研究。E-mail: 31301863@qq.com。

\* Corresponding author: WU Jing-Na, Master, Research Assistant, Fisheries Research Institute of Fujian, No.7, Dongdu Haishan road, Xiamen 361013, China. E-mail: 31301863@qq.com

## 1 引言

大多数水产品富含蛋白质,氨基酸种类多且比例适宜,易消化吸收,一直被视为优质蛋白的主要来源而深受大众青睐。目前全球水产品的生产与消费量每年都在持续增长,我国作为全球最大的水产出口国,一方面为了契合国内外水产品的需求进行大力养殖和加工水产品,另一方面还要克服水产品水分含量高、组织酶活跃,极易引起原料腐败、难以长途运输和贮存等问题。因此,在鲜销的基础上必须对原料采取及时有效的保鲜措施或进行加工处理。

干燥技术用于水产品加工可降低水分活度脱除物料内部的部分水分,达到抑制微生物生长繁殖的目的,是有益于生产并能长期保藏产品的方法之一<sup>[1]</sup>。除了普通日晒和热风干燥这些传统的干燥技术外,近年来不断地涌现出各种新型的干燥方式,如真空冷冻干燥、真空干燥、冷风干燥、微波干燥和红外干燥等技术,通过以上新型干燥技术脱水处理后,不仅能节省包装和运输费用,还可有效防止或延缓产品品质劣变,最大限度地保留水产品特有风味质地。因此,国内外企业利用各种干燥方式生产出种类丰富的干制水产品如干咸沙丁鱼、干咸鳕鱼、干海蜇头、干鲍鱼、即食干海参、鱿鱼干和虾干等,深受广大消费者的喜爱。

## 2 传统的水产品干燥技术概况

### 2.1 自然晾晒

自然日晒具有悠久的历史,不需要特殊设备,操作简单方便、成本低廉,因此亚洲、非洲以及太平洋沿岸地区仍采用该法来干制水产品<sup>[2]</sup>。然而自然日晒完全依赖于自然条件,可控性差,生产效率低,且需要大面积的晒场和大量的劳动力支撑。常用的自然晾晒的方式包括晒干、风干和阴干3种<sup>[3]</sup>,干燥速率受日光温度、风力和空气湿度等因素的影响。同时日晒过程中水产品易受到风尘污染、虫鸟侵袭等发生损耗,卫生安全性不高,干制品的品质和风味也很难满足当代消费者要求。

自然晾晒多受客观条件所限,往往干燥用时较长,干燥速率很低。刘倩等<sup>[4]</sup>研究发现鲍鱼自然晾晒的干燥效率明显不如冷风干燥,干基含水率下降速率较慢,干燥时间约为冷风干燥的1.7倍。高智春<sup>[5]</sup>关于鲍鱼干制工艺及产品特性的研究结果与之相似。尽管在干燥速率上,与其他干燥技术相比,自然晾晒表现出了明显的弱势,但在品质方面经自然晾晒得到的水产类干制品则表现出了明显的优越性。Selmi等<sup>[6]</sup>比较了海产鱼 *Silverside* 经日光干燥和热风干燥处理后产品品质的差异,前者的游离脂肪酸和硫代巴比妥酸值等生化指标显著高于后者。

### 2.2 热风干燥

热风干燥技术,也称热空气干燥,具有高效率、投资

少、易操作等优点,自20世纪以来已广泛应用于加工行业,至今已相当成熟。热风干燥在干燥过程中同时发生了传热和传质,只是推动力不同,一个是温度差,由湿物料通过热空气获得热量由外向内传递引起;另一个是由于浓度差的作用,内部水分由表面迁移至干燥介质主体<sup>[7]</sup>,显然二者方向相反但密切相关<sup>[8]</sup>。

国外使用热风干燥的时间早于我国,作为水产品加工的必要处理环节,为干燥过程中保证水分的扩散,其干燥关键的控制点是必须建立并保持一定的温度梯度<sup>[9]</sup>。张燕平等<sup>[10]</sup>以梅鱼为实验对象,证实了温度是影响热风干燥的主要因素。曾令彬等<sup>[11]</sup>研究证明了白鲢在温度45~65℃,风速1.5~2.5 m/s的热风干燥条件下,提高热风温度和风速能显著提高干燥速率。对于热风干燥而言,采取高温虽然能够促使干燥进程加快,但产品表面可能产生硬壳等干燥效应,使得内部水分难以扩散出来,造成干燥不均匀<sup>[12]</sup>,干燥时间延长,耗能增加且食品品质下降如褐变现象。张亚琦等<sup>[13]</sup>以鲍鱼为原料进行热风干燥,发现由于干燥环境温度较高,相对湿度较小,产品会生成棕色产物,其亮度 $L^*$ 、红色度 $a^*$ 、黄色度 $b^*$ 值均显著高于自然晾晒,引起干品颜色变深且发生褐变的原因可能是肌肉蛋白的氨基与还原糖发生美拉德反应。

目前,为了克服热风干燥存在的不足,国内外针对优化热风干燥的工艺条件的研究报道有很多,特别是从热风干燥的机理性研究的角度出发,如干燥物料的特性参数<sup>[14]</sup>、干燥动力学和数学模拟等。孙研<sup>[15]</sup>为优化海参热风干燥的操作参数,研究其干燥动力学特点并建立数学模型,得到水分的有效扩散系数分布在 $3.553 \times 10^{-10} \sim 8.056 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ ,发现海参的干燥行为最适合用Two-term模型。贾敏等<sup>[16]</sup>以皱纹盘鲍为原料,选取了60、65、70、75和80℃的热风温度拟合理论模型-扩散模型、经验模型-Newton模型和Henderson and Pabis模型等多种数学模型,证实鲍鱼在热风干燥过程中仅有降速阶段,且水分扩散起主导作用。因此,可以将动力学机理结合数学模型对热风干燥的关键点进行控制和优化,使热风干燥技术更加完善,进而促进该技术的发展和运用。

## 3 新型的水产品干燥技术研究进展

### 3.1 真空冷冻干燥

近年来,国内的真空冷冻干燥技术推广得十分迅速,真空冷冻干燥机构成系统主要是干燥箱、真空系统、制冷系统及加热系统等,以调节冻干机的板层控制温度,将湿物料冻结到共晶点温度以下,将液态水完全冻结成小冰晶,再利用真空泵使箱体内维持较低的真空气度,使固态冰直接升华成气态水蒸气,最后利用冷阱将水蒸气冷凝,达到脱水的目的<sup>[17]</sup>。但是,在水产品加工行业中应用较少,因为冻干过程需持续20 h以上,能耗损失多,产品生产成本高。

因此, 真空冷冻干燥技术较适合于贵重的海洋原料的脱水加工, 如扇贝<sup>[18]</sup>、海参<sup>[19,20]</sup>和鱼翅等。作为一种自动化低温脱水的高新技术, 真空冷冻干燥与其他干燥方法相比, 具有以下优势<sup>[21,22]</sup>: 适用于热敏性高、极易氧化的样品; 脱水彻底, 能排除 95%~99% 的水分<sup>[23]</sup>; 物料先冻结, 再进行升华脱水, 可以形成稳定“骨架”, 内部呈疏松多孔的海绵结构, 充分保留食品的色、香、味, 提高产品的质量; 复水性能极好, 能够迅速恢复与鲜样基本相同的色泽和品质。云霞等<sup>[24]</sup>以海参为实验材料, 发现真空冷冻干燥后的干制品保持了原料的营养、色泽和形状, 经复水后口感不差于水发的海参。而采用传统干燥方法对海产品进行加工时, 热敏性成分损失大, 体积缩小严重, 导致复水较难。刘书成等<sup>[25]</sup>以罗非鱼片为研究对象, 发现真空冷冻干燥的鱼片表面和内部都有大量孔隙, 为之后复水提供了水分渗入的良好途径, 复水性能高于经超临界 CO<sub>2</sub> 和热风干燥的鱼片。但目前真空冷冻干燥技术在基础参数的研究方面较为薄弱, 其干燥的关键控制点在于如何保质、节能降耗和低成本生产, 这也成为当前该技术领域亟待解决的问题。李敏等<sup>[26]</sup>以罗非鱼为实验材料, 证明了在保持 10 mm 物料和 160 pa 压力的基础上, 采用 -62 °C 的预冻温度和 40 °C 的加热板温度, 可以得到使单位能耗降低至 0.43 kw · h/mm 的最佳冻干工艺参数组合。

### 3.2 真空干燥

近年来, 真空干燥在国内外食品深加工中早有应用, 通过利用真空系统使干燥室保持真空状态, 再对物料进行加热, 使内部水分在内外压强差的推动下扩散至表面, 进而被真空泵抽走水分使物料干燥<sup>[27]</sup>。该技术的优势在于传热均匀、低温快速; 能够较好地保留产品的风味和营养成分; 节能并提高产品品质。陈青云等<sup>[28]</sup>以海鳗鱼片为实验材料, 研究真空冷冻干燥、热风干燥、真空干燥 3 种方式对鱼片品质的影响, 发现冰温真空干燥样品中鲜味物质肌苷酸含量是真空冷冻干燥的 2 倍, 且复水率高于热风干燥, 该结果与庞文燕等<sup>[29]</sup>以青鱼片为研究对象的实验结果相似。此外, 热敏性的物料干燥可采用真空干燥法实现无氧干燥的目的, 防止样品被氧化变质。

目前国内外关于水产品的真空干燥的研究大部分是与微波干燥相结合, 通过联合干燥技术实现干燥优化。张国琛等<sup>[30]</sup>采用微波真空干燥方法干制仿刺参, 研究表明, 当功率密度平均每增加 0.5 W/g, 缩短 22.5 min 的干燥时间; 得到的干海参色泽和形状保持完好, 收缩率较低(32.20%), 复水率较高(266.32%), 且干燥时间仅为 110 min。张倩等<sup>[31]</sup>以虾夷扇贝闭壳肌为实验材料, 在微波功率密度为 2 W/g、脉冲间歇比 10 s-on/20 s-off、真空度为 -90 kPa 的最佳干燥条件下, 扇贝闭壳肌干基含水率为 15%, 得到干贝柱的品质好且其蛋白质、DHA 和 EPA 等的保留率较高。由此可见, 联合干燥能够使干品质量得到明显的提高。

### 3.3 冷风干燥

冷风干燥是在低温、低湿、高风速的环境中, 对样品进行干燥<sup>[32]</sup>, 较适用于干燥高蛋白质的水产品, 因其能够减少蛋白质的热变性和脂肪氧化、防止色变; 能较好地保持物料的微观结构、外观和品质等优点<sup>[33]</sup>。Kilic 等<sup>[34]</sup>研究证实了水产干制品采用冷风干燥获得的品质更优。孙丽雯等<sup>[35]</sup>以扇贝为研究材料, 发现在低温短时条件下, 冷风干燥得到的干扇贝的总糖含量高于自然晾晒, 其内部排列有序的肌纤维结构正好说明了冷风干燥中贝柱未发生断裂和卷曲现象且色泽较好。马先英等<sup>[36]</sup>以海参为实验对象, 采用冷风干燥及冷风联合干燥技术发现冷风温度越低, 海参的感官品质越好, 尤其是 8 °C 时感官品质最好。且在此条件下, 冷风干燥后的干品复水干重率是联合干燥的 1.15 倍, 样品品质可达特级和行标一级品质, 而联合干燥样品最多只能达到三级品质。此外, 吴靖娜等<sup>[37]</sup>研究液熏鲍纹盘鲍冷风干燥工艺, 最终获得液熏鲍鱼冷风干燥工艺的最优参数组合为温度 26 °C, 风速 4 m/s, 时间 23 h, 得到干制品的硬度为 (22845.05 ± 1098.71) N, 弹性为 (-0.13 ± 0.03) mm 时风味和品质均佳。可见, 目前许多关于冷风干燥的研究报道为国内外冷风干燥技术可以提高水产干品风味和质量提供了有利依据。

### 3.4 热泵干燥

热泵干燥是指热泵从 18~35 °C 的低温热源吸收热量, 高温下将热源进行利用, 设备主要由干燥仓、热泵机组、主风机、辅助风机机组和调节冷凝器等部分组成。相比于其他干燥方式, 热泵干燥技术更加节能、干燥温度低、干燥条件范围可调节, 能准确适时地控制干燥介质, 避免水产品中不饱和脂肪酸的氧化, 减少蛋白质受热变性、防止物料变形、变色和呈味类物质的损失<sup>[38]</sup>。Shi 等<sup>[39]</sup>以竹荚鱼为实验对象, 结果发现利用响应面法优化热泵干燥工艺的干品品质优于热风干燥, 同时能耗大幅度下降。沈启扬等<sup>[40]</sup>利用低温热泵干燥技术干制鳗鱼, 含水率曲线均匀下降, 有效地控制了物料除湿速率, 且干制品具有不弯曲变形、厚度一致、表面无焦糊等特点, 尽可能地保留了自身营养与口感。张国琛等<sup>[41]</sup>研究采用热泵干燥方法干燥北极虾, 发现当温度由 -2~0 °C 增加到 20 °C 时, 北极虾的复水性和持水性均有升高趋势; 比热风干燥获得的干品质量更优。母刚等<sup>[42]</sup>以海参为研究对象, 发现采用热泵干燥海参, 干燥速率快, 操作简单、用时少, 产品的品质得到很大改善; 同时在 28% 湿度和 1.80 m/s 风速条件下, 不影响小个体海参的收缩率; 此外, 国内外在海珍品类的加工技术已有所突破, 尤其是采用热泵干燥技术加工干贝柱和鲜蚝干等, 产值很高。

但热泵干燥技术存在干燥时间长, 能源消耗大, 制冷剂泄漏影响环境, 维护要求高等问题, 需要逐步解决。今后研究开发相匹配的热泵干燥的制冷工艺、开发新型热泵干

干燥系统、广泛应用自动控制技术等研究方向,将是热泵干燥技术今后的主要发展目标<sup>[43]</sup>。

### 3.5 微波干燥

微波干燥由于其独特的介电加热特性,促使干燥速率大大加快,改变了传统的由表及里的加热方式,同时,其具有选择性和穿透性好、无余热等优点,被广泛应用于食品工业和农产品加工等方面<sup>[44]</sup>。一般微波发生器可产生频率 300~300000 MHz,波长 0.001~1 m 的高频电磁波<sup>[45]</sup>。

国内外关于微波干燥技术的研究方向主要有:一是关于微波干燥特性的研究,探究干制品的各干燥因素(干燥温度和时间等)对品质的影响及其动力学模型分析<sup>[46,47]</sup>。齐力娜等<sup>[48]</sup>以草鱼片为原料,研究了样品经过不同微波干燥及热风干燥过程的动力学变化。干燥过程中有效水分扩散系数会随着微波干燥中微波功率的增大从  $9.9540 \times 10^{-10}$  m/s 升高到  $2.3443 \times 10^{-9}$  m/s;而随着热风干燥温度的升高,系数则从  $4.0014 \times 10^{-10}$  m/s 增加到  $7.2912 \times 10^{-10}$  m/s。水分有效扩散系数越高,水分蒸发速率越快。二是关于微波与其他干燥技术相结合的联合干燥技术,包括微波与真空干燥技术、微波与热风干燥技术以及微波与热泵干燥技术等。段振华等<sup>[49]</sup>以罗非鱼为实验材料,结果发现先进行 40 °C 与 50 °C 的热风干燥 3 mm 厚的鱼片后,再采用微波功率 200、400 和 600 W,鱼片的含水率以先快后慢的速度下降,收缩率和复水率增加;当微波功率一定时,随着热风初干温度的升高,收缩率和复水率增加,但复原率降低。因此,对于采用热风干燥处理的罗非鱼而言,低温和低微波功率均能有效地使产品取得良好的保质效果。

### 3.6 红外干燥

红外干燥与微波干燥都是物料内部发生摩擦产生热量促使水分汽化来进行干燥。但是,引起摩擦产热的原理却不尽相同,微波干燥是通过高频电磁波射入物料并与内部极性分子(如水等)同频率高速旋转引起摩擦且因高温而瞬间产热;红外干燥则是在辐射源发射频率和湿物料中分子运动的固有频率相匹配时,才会引起物料内分子强烈振动(共振)进行激烈摩擦产热。

红外干燥具有干燥速度快、加热相对均匀、干燥质量好以及能量利用率高等优势,从而引起国内外许多研究者的广泛关注。红外干燥与热风干燥不同,产生的热能造成物料内部温度高于表面,热量的扩散方向由内及外,水分的扩散方向与之保持一致,从而加快了干燥的进程<sup>[50]</sup>。徐保国等<sup>[51]</sup>研究了不同干燥方法对鱿鱼片理化特性及感官品质的影响,得到红外干燥技术在保持鱿鱼片结构、色泽和感官上要比采用热风干燥、热泵干燥和射频干燥技术优越得多;中短波红外干燥仅 70 min 就达到要求的含水率,效率高,复水性能最好。此外, Pan 等<sup>[52]</sup>研究中也发现含 50% 水分的湿物料经红外干燥较热风干燥处理相比减少 43.9% 的用时。此外,红外干燥可以与任何一种干燥技术相

结合,充分发挥了各干燥方法的优势,使得干燥速率达到最大化。结合微波干燥可以将湿物料内部水分迅速外排,但水分会聚积在表面不易干燥的特点,而红外干燥恰好具有迅速排出物料表面水分的优势<sup>[53,54]</sup>,二者取长补短,提高了干燥效率。

影响红外干燥速率的因素主要是物料的性质(厚度、体积大小)和功率。有研究表明,单位面积的能量随功率升高而升高,由此被作用的水分子就越多,就会显著地加快了干燥进程<sup>[55]</sup>。虽然红外干燥具有加热效率快的优势,但是其只适合于薄层干燥,导致生产效率低、生产成本低,使其应用范围受到限制。

## 4 展望

基于水产品干燥技术研究现状,国内外干燥领域仍有很多问题需要解决:(1)传统干燥工艺存在许多不足之处,如自然晾晒难以控制,卫生安全存在隐患;热风干燥受温度影响较大,干燥时会发生硬化现象等。(2)新型工艺的研究不够全面和深入,如真空冷冻干燥技术的基础干燥参数的研究较少。

综上所述,我们需要关注以下几个方面:(1)加强水产品传统干燥基础理论方面的研究,进行多种模拟分析,不断优化工艺,达到提高干燥效率的目的,实现“精确干燥”;(2)系统研究水产品的干燥特性参数,确定出最佳干燥工艺,进而得到高品质的干制品;(3)根据实际生产情况,综合考虑各种水产品的物料性质,选择最佳的工艺设备和干燥条件;(4)结合各干燥技术的优势,进一步研究联合干燥的新方法或新型干燥设备,使其向功能全、能耗低、成本低和品质高的方向发展。

此外,国内外针对水产品干燥技术的研究与开发已经不断引起食品科学与工程领域的专家学者的关注,研究报道日益增多,相信今后渔业经济的发展与高效、创新、实用的水产品干燥技术密切相关。

### 参考文献

- [1] Duan Z H, Zhang M, Tang J. Thin layer hot-air drying of bighead carp [J]. *Fish Sci*, 2004, 23(3): 29-32.
- [2] Wulandari J, Dyah A. Design and experimental testing of a solar dryer combined with kerosene stoves to dry fish [Z]. ASAE 028024.
- [3] 桑迎迎, 周国燕, 王爱民, 等. 中药材干燥技术研究进展[J]. *中成药*, 2010, 32(12): 2140-2144.  
Sang YY, Zhou GY, Wang AM, et al. Research progress of dried technology and product features on traditional Chinese medicinal materials [J]. *Chin Tradit Patent Med*, 2010, 32(12): 2140-2144.
- [4] 刘倩, 高澄宇, 黄金发, 等. 鲍鱼冷风干燥和自然晾晒试验的比较分析[J]. *渔业现代化*, 2012, 39(4): 42-47.  
Liu Q, Gao CY, Huang JF, et al. Comparison and analysis of cold-blast air drying and natural drying of abalone [J]. *Fish Mod*, 2012, 39(4): 42-47.
- [5] 高智春. 鲍鱼干制工艺及产品特性的研究[D]. 福州: 福建农林大学,

2011.  
Gao ZC. Research of dried technology and product features on abalone [D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2011.
- [6] Selmi S, Bouriga N, Cherif M. Effects of drying process oil biochemical and microbiological quality of silverside (fish) *Athefina lagunae* [J]. *Int J Feed Sci Technol*, 2010, 45(6): 1161–1168.
- [7] 于蒙杰, 张学军, 牟国良, 等. 我国热风干燥技术的应用研究进展[J]. *农业科技与设备*, 2013, 230: 14–16.  
Yu MJ, Zhang XJ, Mou GL, *et al.* Research progress on the application of hot air drying technology in China [J]. *Agric Sci Technol Equip*, 2013, 230: 14–16.
- [8] 张慧. 海芦笋干燥工艺研究[D]. 无锡: 江南大学, 2008.  
Zhang H. Research of dried technology to sea asparagus [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2008.
- [9] 段振华. 水产品干燥技术研究[J]. *食品研究与开发*, 2012, 33(5): 213–215.  
Duan ZH. Research and development of drying technology to aquatic products [J]. *Food Res Dev*, 2012, 33(5): 213–215.
- [10] 张燕平, 岑琦琼, 戴志远, 等. 梅鱼热风干燥工艺模型及脂肪氧化规律初探[J]. *中国食品学报*, 2013, 13(9): 39–46.  
Zhang YP, Cen QQ, Dai ZY, *et al.* Preliminary study on process model of hot-air drying and lipid oxidation rule during drying of *Collichthys niveatus* [J]. *J Chin Inst Food Sci Technol*, 2013, 13(9): 39–46.
- [11] 曾令彬, 赵思明, 熊善柏, 等. 风干白鲢的热风干燥模型及内部水分扩散特性[J]. *农业工程学报*, 2008, 24(7): 280–282.  
Zeng LB, Zhao SM, Xiong SB, *et al.* Modeling and moisture diffusion properties of salted silver carp during hot-air drying [J]. *Trans Chin Soc Agric Eng*, 2008, 24(7): 280–282.
- [12] 潘德聪, 于龙, 谭玉喜. 水产品的干燥技术的发展探析[J]. *应用技术*, 2012, (24): 290.  
Pan DC, Yu L, Tan YX. Progress of discussing drying technology to aquatic products [J]. *China Sci Technol Rev*, 2012, (24): 290.
- [13] 张亚琦, 高昕袋, 许加超, 等. 鲍鱼热风、晾晒干燥的比较试验[J]. *农业工程学报*, 2008, 24(1): 296–299.  
Zhang YQ, Gao XD, Xu JC, *et al.* Comparative study on natural drying and hot-air drying of abalone [J]. *Trans Chin Soc Agric Eng*, 2008, 24(1): 296–299.
- [14] 张国琛, 牟晨晓, 潘瀛瀛, 等. 热风干燥参数对扇贝柱干燥速度及品质的影响[J]. *大连水产学院学报*, 2004, 19(1): 35–39.  
Zhang GC, Mou CX, Pan LL, *et al.* The impact of hot-air drying parameters on drying rate and quality of scallops [J]. *J Dalian Fish Univ*, 2004, 19(1): 35–39.
- [15] 孙研. 海参干燥动力学的研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2007.  
Sun Y. The kinetics of dry sea cucumber [D]. Qingdao: Ocean university of China, 2007.
- [16] 贾敏, 丛海花, 薛长湖, 等. 鲍鱼热风干燥动力学及干燥过程数学模型[J]. *食品工业科技*, 2012, (3): 72–76.  
Jia M, Cong HH, Xue CH, *et al.* Drying kinetics and mathematical modeling of abalone during the hot-air drying process [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2012, (3): 72–76.
- [17] 王鹏. 真空冷冻干燥技术在水产品加工中应用的探讨[J]. *农产品加工*, 2009, 8: 69–73.  
Wang P. Application of vacuum freeze-drying technology to aquatic product [J]. *Farm Prod Process*, 2009, 8: 69–73.
- [18] 王征. 扇贝干燥关键技术研究[D]. 保定: 河北农业大学, 2012.  
Wang Z. Pivotal Process of drying technology to scallop [D]. Baoding: Agricultural University of Hebei Province, 2012.
- [19] 李银塔. 冻干速溶即食海参汤的加工工艺研究[J]. *食品研究与开发*, 2013, 34(24): 127–129.  
Li YT. Process of freeze-dried ready to eat sea cucumber health soup [J]. *Food Res Dev*, 2013, 34(24): 127–129.
- [20] 刘建涛, 赵永军, 辛静. 海参真空冷冻干燥工艺[C]. 第十一届全国冷冻干燥学术交流会, 2012.  
Liu JT, Zhao YJ, Xin J. Technological condition of vacuum freeze-drying in *Stichopus japonicus* [C]. The 11th national freeze-drying academic communication, 2012.
- [21] 肖宏伟, 黄传伟, 冯雁峰, 等. 真空冷冻干燥技术的研究现状和发展[J]. *医疗卫生装备*, 2010, 31(7): 30–32.  
Xiao HW, Huang CW, Feng YF, *et al.* Research status and development of vacuum freeze-drying technology [J]. *Med Health Care Equip*, 2010, 31(7): 30–32.
- [22] 姚静, 张自强. 药物冻干制剂技术的设计及应用[M]. 北京: 中国医药科技出版社, 2007.  
Yao J, Zhang ZQ. The design and application of drug of freeze-dried preparation technology [M]. Beijing: Chinese Medical Science and Technology Press, 2007.
- [23] 邹同华, 陈见兴, 易小红, 等. 真空冷冻干燥技术及其在火龙果冻干中的应用[J]. *食品研究与开发*, 2009, 30(5): 159–163.  
Zhou TH, Chen JX, Yi XH, *et al.* Vacuum freeze-drying technology and its applications in *hylocereus undatus* freeze-drying [J]. *Food Res Dev*, 2009, 30(5): 159–163.
- [24] 云霞, 韩学宏, 农绍庄, 等. 海参真空冷冻干燥工艺[J]. *中国水产科学*, 2006, 13(4): 662–666.  
Yun X, Han XH, Nong SZ, *et al.* Technological condition of vacuum freeze-drying in *Stichopus japonicus* [J]. *J Fish Sci China*, 2006, 13(4): 662–666.
- [25] 刘书成, 张常松, 吉宏武, 等. 不同干燥方法对罗非鱼片品质和微观结构的影响[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(15): 221–227.  
Liu SC, Zhang CS, Ji HW, *et al.* Effects of different drying methods on *Tilapia* fillets quality and microstructure [J]. *Trans Chin Soc Agric Eng*, 2012, 28(15): 221–227.
- [26] 李敏, 蒋小强, 叶彪. 罗非鱼真空冷冻干燥过程及其能耗实验[J]. *农业机械学报*, 2008, 39(8): 202–204.  
Liu M, Jiang XQ, Ye B. *Tilapia* vacuum freeze-drying process and energy consumption of the experiment [J]. *J Agric Mach*, 2008, 39(8): 202–204.
- [27] 徐成海, 张志军, 张世伟, 等. 真空干燥现状与发展趋势分析[J]. *干燥技术与设备*, 2009, 7(5): 207–213.  
Xu CH, Zhang ZJ, Zhang SW, *et al.* Vacuum drying status quo and development trend analysis [J]. *Drying Technol Equip*, 2009, 7(5): 207–213.
- [28] 陈青云, 万金庆, 齐自元, 等. 冰温真空干燥海鳗鱼片的限度和挥发性成分的对比研究[J]. *现代食品科技*, 2014, 30(3): 210–215.  
Chen QY, Wan JQ, Qi ZY, *et al.* Points the limits of vacuum drying sea eel slices and of the comparison of the volatile components [J]. *Mod Food Sci Technol*, 2014, 30(3): 210–215.
- [29] 庞文燕, 万金庆, 姚志勇, 等. 不同干燥方式对青草鱼片鲜度的影响[J]. *广东农业科学*, 2013, 40(15): 124–126.  
Pang WY, Wan JQ, Yao ZY, *et al.* Effects of different drying methods on grass fish freshness [J]. *Guangdong Agric Sci*, 2013, 40(15): 124–126.
- [30] 张国琛, 母刚, 王隽冬, 等. 仿刺参微波真空干燥工艺的研究[J]. *大连海洋大学学报*, 2012, 27(2): 186–189.  
Zhang GC, Mu G, Wag JD, *et al.* Microwave vacuum drying process of

- sea cucumber* [J]. *J Dalian Fish Univ*, 2012, 27(2): 186–189.
- [31] 张倩, 张国琛, 母刚, 等. 微波真空干燥对虾夷扇贝闭壳肌营养成分的影响[J]. *大连海洋大学学报*, 2013, 28(6): 604–609.  
Zhang Q, Zhang GC, Mu G, *et al*. Effects of microwave vacuum drying on nutritional quality of *Yesso Scallop* adductors [J]. *J Dalian Fish Univ*, 2013, 28(6): 604–609.
- [32] 施延军. 对冷风干燥机的现状问题与发展趋势分析[J]. *城市建设理论研究*, 2011, (22): 1.  
Shi YJ. Cold air dryer analysis of the status of the problems and development trend [J]. *Urban Construct Theory Res*, 2011, (22): 1.
- [33] 郑跃. 冷风烘道的工作原理及应用[J]. *渔业现代化*, 2007, 34(3): 47.  
Zheng Y. The cold wind bake, work principle and application [J]. *Fish Mod*, 2007, 34(3): 47.
- [34] Kilic A. Low temperature and high velocity(LTHV) application in drying: Characteristics and effects on the fish quality [J]. *J Food Eng*, 2009, 91(1): 173–182.
- [35] 孙丽雯, 刘倩, 侯丽丽, 等. 冷风干燥对扇贝柱品质及结构的影响[J]. *农产品加工*, 2013, (12): 1–7.  
Sun LW, Liu Q, Hou LL, *et al*. The impact of cold air drying on the quality and the scallop column structure [J]. *Acad Period Farm Prod Process*, 2013, (12): 1–7.
- [36] 马先英, 赵世明, 洪滨, 等. 冷风及冷风与热风联合干燥海参效果的比较研究[J]. *大连海洋大学学报*, 2015, 30(5): 536–539.  
Ma XY, Zhao SM, Hong B, *et al*. Comparison of sea cucumber dried by cold air and combination of cold and hot air [J]. *J Dalian Fish Univ*, 2015, 30(5): 536–539.
- [37] 吴靖娜, 陈晓婷, 位绍红, 等. 液熏鲍冷风干燥工艺优化及贮藏期的研究[J]. *渔业现代化*, 2016, 43(4): 51–58.  
Wu JN, Chen XT, Wei SH, *et al*. Study on the optimization of cold wind drying processing and storage period of liquid-smoked abalone [J]. *Fish Mod*, 2016, 43(4): 51–58.
- [38] 钱炳俊, 苏树强, 连之伟, 等. 热泵干燥技术在水产品加工应用中的研究概况[J]. *浙江农业科学*, 2010, (4): 830–834.  
Qian BJ, Su SQ, Lian ZW, *et al*. In the heat pump drying technology application in aquatic products processing [J]. *Zhejiang Agric Sci*, 2010, (4): 830–834.
- [39] Shi QL, Xue CH. Optimization of processing parameters of horse mackerel (*Trachurus japonicus*) dried in a heat pump dehumidifier using response surface methodology [J]. *J Food Eng*, 2008, 87: 74–81.
- [40] 沈启扬, 张晓辛, 陈新华, 等. 热泵低温干燥水产品试验的研究[J]. *江苏农业科学*, 2011, 39(4): 504–505.  
Shen QY, Zhang XX, Chen XH, *et al*. Heat pump drying experiment research of aquatic products at low temperature [J]. *Jiangsu Agric Sci*, 2011, 39(4): 504–505.
- [41] 张国琛, Arason S, Vikingur OS. 热泵干燥北极虾的物理和感官特性研究[J]. *农业工程学报*, 2008, 24(5): 235–239 .  
Zhang GC, Arason S, Vikingur OS. Research of physical and sensory characteristics of heat pump drying the arctic shrimp [J]. *Trans Chin Soc Agric Eng*, 2008, 24(5): 235–239 .
- [42] 母刚, 张国琛, 邵亮. 热泵干燥海参的初步研究[J]. *渔业现代化*, 2007, 34(5): 47–50.  
Mu G, Zhang GC, Shao L. Preliminary study on drying characteristics of heat pump dried sea cucumber [J]. *Fish Mod*, 2007, 34(5): 47–50.
- [43] 刘贵珊, 何建国, 韩小珍, 等. 热泵干燥技术的应用现状与发展展望[J]. *农业科学研究*, 2006, 27(1): 46–49.  
Liu GS, He JG, Han XZ, *et al*. Application situation and development prospect of drying by heat pump [J]. *J Agric Sci*, 2006, 27(1): 46–49.
- [44] Chong CH, Figiel A, Law CL, *et al*. Combined drying of apple cubes by using of heat pump, vacuum-microwave and intermittent techniques [J]. *Food Bioprocess Technol*, 2014, 7(4): 975–989.
- [45] 徐振方, 潘澜澜, 张国琛. 微波真空干燥技术在食品工业中的应用与展望[J]. *大连水产学院学报*, 2004, 19(4): 292–296.  
Xu ZF, Pan LL, Zhang GC, *et al*. The development and application of microwave vacuum drying technology in food industry [J]. *J Dalian Fish Univ*, 2004, 19(4): 292–296.
- [46] Roknul ASM, Zhang M, Wang ASMY. A Comparative study of four drying methods on drying time and quality characteristics of stem lettuce slices (*Lactuca sativa* L.) [J]. *Dry Technol*, 2015, 32(6): 657–666.
- [47] Chandrasekaran S, Ramanathan S, Basak T. Microwave food processing: a review [J]. *Food Res Int*, 2013, 52(1): 243–261.
- [48] 齐力娜, 彭荣艳, 程裕东, 等. 草鱼鱼片的微波干燥特性[J]. *食品与发酵工业*, 2016, 42(1): 119–123.  
Qi LN, Peng RY, Cheng YD, *et al*. Characteristics of microwave drying of grass carp fillets [J]. *Food Ferment Ind*, 2016, 42(1): 119–123.
- [49] 段振华, 蒋李娜, 郑元平, 等. 罗非鱼片的热风微波复合干燥特性[J]. *食品科学*, 2008, 29(9): 203–206.  
Duan ZH, Jiang LN, Zheng YP, *et al*. Study on Characteristics of hot air-microwave drying of tilapia fillets [J]. *Food Sci*, 2008, 29(9): 203–206.
- [50] Khir R, Pan ZL, Salim A, *et al*. Moisture diffusivity of rough rice under infrared radiation drying [J]. *LWT-Food Sci Technol*, 2011, 44(4): 1126–1132.
- [51] 徐保国, 张慧, 王兆进. 不同干燥方法对鱿鱼片理化特性及感官品质的影响[C]. 第十四届全国干燥技术交流会, 2013: 305–310.  
Xu BG, Zhang H, Wang ZJ, *et al*. Different drying methods on the influence of squid slice of physical and chemical properties and sensory quality [A]. The 14th national drying technology exchange meeting, 2013: 305–310.
- [52] PAN ZL. Feasibility of using infrared heating for blanching and dehydration of fruits and vegetables [C]. ASAE Annual International Meeting, 2005: 1–10.
- [53] Tireki S, Sumnu G, Esin A. Production of bread crumbs by infrared-assisted microwave drying [J]. *Europ Food Res Technol*, 2005, 222(1/2): 8–14.
- [54] Kowalski SJ, Mierzwa D. Convective drying in combination with microwave and IR drying for biological materials [J]. *Drying Technol*, 2009, 27(12): 1292–1301.
- [55] Kocabiyik H, Tezer D. Drying of carrot slices using infrared radiation [J]. *Int J Food Sci Technol*, 2009, 44(5): 953–959.

(责任编辑: 姚 菲)

## 作者简介



郑烟梅, 本科, 主要研究方向为水产品加工与综合利用。

E-mail: 946048437@qq.com



吴靖娜, 助理研究员, 主要研究方向为水产品加工与综合利用。

E-mail: 31301863@qq.com