

干燥过程对水产干制品品质的影响

沈嘉森^{1,2,3}, 陈晓婷², 苏永昌², 刘淑集², 许 旻², 林河通^{1,3}, 刘智禹^{2*}

(1. 福建农林大学食品科学学院, 福州 350002;

2. 福建水产研究所, 国家海水鱼类加工技术研发中心, 福建省海洋生物增殖与高值化利用重点实验室, 厦门 361013;

3. 闽台特色海洋食品加工及营养健康教育部工程研究中心, 福州 350002)

摘 要: 干燥方式是目前应用广泛、传统的水产品加工技术。通过不同加工原理, 可以有效降低水产品的水分含量, 抑制微生物的生长, 提高水产干制品的色泽和风味, 增加高值化加工价值。本文通过调查研究, 分析不同水产品干燥方式, 阐述不同干燥方式的原理及优缺点。并从营养品质角度, 分析干燥过程对水产品的水分、蛋白质、脂质品质的影响。从感官品质方面, 分析其对水产品的风味、滋味、质构和色泽方面的影响, 旨在从营养和感官品质 2 个方面分析干燥工艺对水产品品质的影响, 为水产干制品的发展提供技术支撑。

关键词: 干燥方式; 水分分布; 蛋白质; 风味

Effects of drying process on the quality of dried aquatic products

SHEN Jia-Sen^{1,2,3}, CHEN Xiao-Ting², SU Yong-Chang², LIU Shu-Ji², XU Min²,
LIN He-Tong^{1,3}, LIU Zhi-Yu^{2*}

(1. College of Food Science, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China; 2. Fisheries Research Institute of Fujian, National Research and Development Center for Marine Fish Processing, Key Laboratory of Cultivation and High-value Utilization of Marine Organisms in Fujian Province, Xiamen 361013, China; 3. Engineering Research Centre of Fujian-Taiwan Special Marine Food Processing and Nutrition, Ministry of Education, Fuzhou 350002, China)

ABSTRACT: Drying method is a widely used traditional processing technology of aquatic products. Different processing principles can effectively reduce the moisture content of aquatic products, inhibit the growth of microorganisms, improve the color and flavor of aquatic dry products, and increase the value of high-value processing. Through investigation and research, this paper analyzed different drying methods of aquatic products, and expounded the principles, advantages and disadvantages of different drying methods, analyzed the effects of drying process on water, protein and lipid quality of aquatic products from the perspective of nutritional quality, analyzed the effects of sensory quality on the flavor, taste, texture and color of aquatic products. The aim is to analyze the influence of drying technology on the quality of aquatic products from 2 aspects of nutrition and sensory quality, and to provide technical support for the development of aquatic dry products.

KEY WORDS: drying method; water distribution; protein; flavor

基金项目: 福建省海洋与渔业结构调整专项(2016、2020)、福建省种业创新与产业化工程(2017FJSCZY03)

Fund: Supported by the Fujian Province Marine and Fishery Structure Adjustment Special Project (2016, 2020), Fujian Province Seed Industry Innovation And Industrialization Project (2017FJSCZY03)

*通讯作者: 刘智禹, 教授级高级工程师, 博士, 主要研究方向为水产品加工与综合利用。E-mail: 13906008638@163.com

*Corresponding author: LIU Zhi-Yu, Professor, Ph.D, Fisheries Research Institute of Fujian, Dongdu Haishan Road, Xiamen 361013, China. E-mail: 13906008638@163.com

1 引 言

我国水产品产量高, 种类丰富, 富含蛋白质、脂质等多种营养元素^[1]。随着加工设备的智能化发展, 水产品加工能力和加工总量稳步提升, 但水产品中内源性蛋白酶的水解^[2]和多不饱和脂肪酸的水解氧化^[3]等使得水产品容易腐败变质, 对水产品的品质产生极大的影响。目前, 干燥技术主要应用于虾、蟹、鱼、贝、藻类等^[4-6]贮藏及加工, 研究表明, 利用不同技术和方法对水产品进行加工, 能够有效抑制水产品死后肌肉自溶、解僵等品质变化^[7], 抑制微生物生长。其中, 对水分活度(water activity, Aw)的控制是影响微生物缓慢繁殖的一个关键点。干燥加工^[8,9]是降低Aw有效的加工方式, 随着干燥过程中水分的流失, 水产品中蛋白质、脂质等营养物质也在一定程度上流失。不同干燥方式的损耗率不同, 如真空微波干燥^[5]使扇贝的蛋白质、脂质得以保留, 保留率分别为 96.84%、87.52%, 同时二十碳五稀酸(eicosapentaenoic acid, EPA)和二十二碳六烯酸(docosahexaenoic acid, DHA)等不饱和脂肪酸也有效保留。

目前, 对水产品干燥的研究主要在干燥技术原理^[10,11]和干燥技术应用^[12,13]等方面。对干燥过程中水分、蛋白质、脂质等品质影响的相关综述较少。因此, 本文通过对不同干燥方式的原理进行分析, 对比不同干燥方式的优缺点, 阐述干燥过程对水产品水分、蛋白质、脂质及感官品质等影响, 以期水产品干燥工艺提供依据, 为水产干制品的高值化加工研究提供参考。

2 水产品干燥方式

水产品利用不同的干燥方式制成水产干制品, 进而延长水产品的贮藏期。干燥是将液体或湿产品转变为干燥状态的常用技术, 降低水产品体内的水分活度, 抑制微生物繁殖以及减少代谢反应, 延长水产品货架期^[11]。不同的干燥方式通过不同的干燥原理来控制水分含量, 常见的干燥方式为自然晾晒技术、热风干燥技术、冷风干燥技术、冷冻干燥技术、真空干燥技术、真空冷冻干燥技术、微波真空干燥技术、冰温真空干燥技术及新型联用技术等^[14,15], 不同干燥方式原理及其优缺点见表 1。

表 1 干燥方式的比较
Table 1 Comparison of drying method

干燥方式	原理	优势	缺点	应用实例
自然晾晒	通过自然环境控制	易操作、成本低廉	可控性差、生产效率低	刘倩等 ^[16] 得出自然晾晒鲍鱼干肌纤维收缩饱满, 但易受环境影响导致品质降低
冷风干燥	低温低湿的循环密闭空间使物料水分减少	节能环保、能降低物料营养成分的损失	干燥时间长	刘倩等 ^[16] 对比了自然晾晒和冷风干燥鲍鱼干, 干基含水率降至 16%耗时 122 h, 干燥时间长
热风干燥	热空气为干燥介质, 自然或强制地对流循环的方式与食品进行湿热交换	易操作、传热速率快	内部水分散失不均匀、能耗和温度过高容易造成产品热损伤和热氧化	Li 等 ^[6] 研究热风干燥下南美对虾容易导致 EPA 和 DHA 营养损失; 磷脂酰胆碱、磷脂酰乙醇胺等脂质指标降低
冷冻干燥	含水物料冷冻到冰点以下, 使水转变为冰, 在较高真空下将冰转变为蒸汽而除去	保持原来的化学组成和物理性质、蛋白质不会失去活性	设备投资和动力消耗高	Li 等 ^[6] 对比热风与冷冻干燥, 冷冻干燥更好去除对虾含水量、维持原料的营养品质和色泽外观
真空干燥	食品物料在密闭的干燥室内通过真空系统抽真空的同时, 并对干燥物料不断加热	适用热敏性物料、干燥的温度低、无过热现象、水分易于蒸发、干燥时间短	设备投资和动力消耗高	蔡文强等 ^[17] 对鲟鱼肉进行真空 60 °C 干燥 7 h 条件处理, 干燥效率高, 产生良好感官品质
真空冷冻干燥	物料冷冻至共晶点温度以下, 并在真空条件下获得疏松多孔、复水快的干燥产品	热敏性高、极易氧化、复水性能好、保持原有营养特性	能耗损失高、生产成本低	高加龙等 ^[18] 发现在-40 °C、20 Pa 真空度条件下冻干牡蛎, 复水性能优于市售牡蛎高达 3.68
微波干燥	干燥物料从内到外, 由辐射产生的高频磁场摩擦生热	能源利用率高、干燥匀速、高效节能	能耗大、生产成本低	孙月娥等 ^[19] 利用微波干燥对白鲢鱼片进行研究, 功率越高, 干燥速率越快, 脂肪氧化程度最低, 品质最好
微波真空干燥	利用介电加热原理, 使温度迅速升高, 达到物料水分气化	加热均匀、易控制、便于操作	物料干燥终点难以掌控, 技术设备成本较大	张孙现 ^[20] 通过 Page 拟合模型表明微波真空干燥包含加速、恒速、降速 3 阶段的水分速率曲线变化
冰温真空干燥	在真空干燥过程中, 物料温度保持在±0.5 °C 的冰温范围	调节稳定物料干燥速度、节省设备运行时间	设备推广度受到物料温度控制的阻碍	庞文燕等 ^[21] 研究冰温真空干燥比热风、真空冷冻干燥更能保持青鱼片的鲜度

3 干燥工艺对水产品营养品质的影响

3.1 水分

水分是机体进行代谢变化的重要营养因素,水分与物料的结合程度不同,主要有 3 种存在状态^[22],第 1 种为结合水(T_{21}),是肌肉蛋白质中与极性基团能结合紧密的水,不易被微生物利用;第 2 种为不易流动水(T_{22}),是肌原纤维及在肌原纤维细胞内的水,其在加工与复水过程密切相关;第 3 种为自由水(T_{23}),是肌原纤维束以外的以游离状态存在的水。目前,干燥容易导致非结合水分散流失,一部分不易流动水和自由水往结合水方向迁移;另一方面,受不同干燥方式的影响,热风干燥与冷风干燥等水分迁移规律为从外部向内部失水,而微波干燥与红外干燥等变化趋势是由内往外的电磁波传热^[23]。水产品的品质特性由水分含量、活度、分布状态共同影响,干燥能有效减少水分含量,进而控制水分活度,实时监测水分分布,延长干制品贮藏期,提高质构特性。

3.1.1 水分含量

水分含量,指含水物质中所含水分占该物质总重量百分比的总称。干燥时间与温度都会影响水分含量,温度越高时间越长,水分含量变化越明显^[24],为准确预测干燥过程,常用干燥速率曲线模型来拟合干燥水分变化趋势^[25,26],吴靖娜等^[26]研究真空冷冻干燥海马的 8 种数学拟合模型,得出 $R^2=0.9994$ 的 Page 模型与干燥速率结果相似,拟合程度高,说明真空冷冻干燥海马水分干燥趋势。

3.1.2 水分活度

水分活度是表征水产品产生微生物的指标,平衡状态下的水分状态。在干燥过程中,需控制水分含量,降低到细菌等腐败致病菌无法生长的程度,食品贮藏性很大程度上由水分活度决定,而不易流动水和自由水与微生物的繁殖和酶的代谢密切相关^[27]。有研究表明绝大多数细菌($0.90 < Aw < 0.99$)、酵母菌($0.88 < Aw < 0.94$)、霉菌($0.73 < Aw < 0.94$)、嗜盐性细菌($Aw > 0.75$)、干性霉菌($Aw > 0.65$)等在此范围内均能繁殖,而 $Aw < 0.5$ 则微生物不进行生命活动^[28]。余丹丹^[29]利用复配海藻糖的保水性,降低安康鱼肉的水分活度,维持不易流动水的迁移,能延长调味鱼片的贮藏期到 180 d。

3.1.3 水分分布

水分受外界加工、环境的双重作用,在肌原纤维细胞内外不断迁移,导致各水分分布存在差异。低场核磁(low field nuclear magnetic technology, LF-NMR)^[30]是研究水产品中水分分布的一种快速、无损的检测技术,可以直接得出各组分水的实时信号强度、分布趋势与反演谱图。Cheng 等^[31]对干制虾进行研究,结果表明,在干燥 8 h 后,随着水分散失, T_{21} 水消失, T_{22} 、 T_{23} 水往弛豫减少的方向迁移,不易流动水和自由水在干燥中流动性较差,利用 T_1 和 T_2 加

权成像,图像清晰的呈现:水分中自由水往结合水转移变化。臧秀等^[30]研究刺参干燥过程中的水分分布,得出 45 °C 干燥中自由水存在肩峰,对比各组分峰面积,表明内部有水分残留有关系。干制水产品干燥的逆反应称为复水,表征重新吸收水分的能力,一般复水性越好,品质越优。李帆^[32]对热风干燥下的扇贝进行复水研究,结果说明 T_{22} 和 T_{23} 总的弛豫图谱随复水时间增加而往右移,体外水向肌原纤维内部迁移,在 100 °C 复水 9 min 下得到复水扇贝品质较优。

3.2 蛋白质

水产品是优质蛋白质的来源,其必需氨基酸种类众多^[33]。根据蛋白质溶解性不同,可以分为盐溶性肌原纤维蛋白、水溶性肌浆蛋白和不溶性肌基质蛋白。肌原纤维蛋白是水产品加工中起重要的结构和功能的蛋白质,包括了肌球蛋白、肌动蛋白、原肌球蛋白和肌钙蛋白等^[34]。肌浆蛋白则包含多种水与代谢相关的酶。肌基质蛋白是胶原和弹性蛋白的结合体。但在加工过程中,蛋白质易发生变性、氧化及分解等现象。

3.2.1 蛋白质变性

在加工过程中,因物理或化学因子的作用,蛋白质分子内的空间结构遭到破坏,丧失原有的理化性质,导致蛋白质发生变性。蛋白质的变性主要是由于肌原纤维蛋白的变性,使盐溶性、ATP 酶活性、活性巯基、表面疏水性、稳定性等理化性质发生改变^[34]。干燥终点的含水率会影响蛋白质的稳定性,陆妙灵等^[35]比较了不同含水率的鱼皮胶原蛋白含量,在热变性作用下发生蛋白聚集效应,随着干燥过程中含水率的降低,极性分子通过氢键连接的氨基酸稳定性降低,胶原蛋白含量降低。干燥温度会影响变性的程度,容易导致干制品硬度、弹性变化。吕飞等^[36]利用差示扫描量热法(differential scanning calorimetry, DSC)得出蛋白质容易在 55~60 °C 发生热变性,发现肌纤维蛋白紧缩,与巯基相连的氢键交联更加紧密,硬度、弹性增加。这也是水产品干制品容易变硬的原因之一。

3.2.2 蛋白质氧化

蛋白质氧化是指蛋白质分子在自由氧的作用下产生的共价键修饰变化。蛋白质交联和蛋白质构象、溶解性的变化会引起蛋白质结构功能的改变。巯基氧化成二硫键、酪氨酸氧化成聚酪氨酸、氨基酸脱氨产生羰基衍生物都表征蛋白质发生交联现象^[37]。干燥方式易改变肌原纤维的构象,冷风干燥对肌纤维变化影响较小。蔡路鸣等^[38]用扫描电镜分析鱼肉肌纤维束得到,发生不同程度的形变,破坏其完整性,肌纤维收缩,肌纤维细胞间隙有不同程度的分裂,结合拉曼光谱图,发现蛋白质二级结构构象会发生 α -螺旋向 β -折叠、 β -转角、无规则卷曲的重排现象转变。Zhang 等^[39]通过探究冷风干燥鲍鱼肉的肌纤维和流变学特征,发现冷风干燥 36 h 的鲍鱼肉的弹性模量、粘滞模量和

断裂强度均小于原始样品, 停止干燥时肌纤维和胶原无断裂, 形成均匀的网状结构, 适合于水分的恢复, 表明冷风干燥更具有实用性价值。

3.2.3 蛋白质分解

氨与二甲胺、三甲胺组成的含氮有机物称为挥发性盐基氮(total volatile base nitrogen, TVB-N)^[40], TVB-N 与三甲胺(trimethylamine, TMA)都是判断蛋白质是否发生腐败变质现象的指标, 加工过程中 TVB-N 值不得超过 0.3 mg/g, 若 TVB-N 含量越小, 说明产品货架期越长。史梦佳等^[41]研究不同温度和不同湿度条件对牡蛎特性的影响, 结果发现 20 °C、55% 湿温相对度(relative humidity, RH)的条件下牡蛎的 TVB-N 值最小, 温度过高易加快蛋白质水解速率。Nagwekar 等^[42]研究了热风、冷风、太阳能干燥过程, 肌肉产生不同的 TVB-N 与 TMA 的值, 结果显示太阳能的干燥抑制效果最好。

3.3 脂 质

脂质是水产品机体代谢的重要营养素之一, 机体含有脂肪酸和甘油分为甘油酯和非甘油酯 2 大类。甘油酯根据脂肪酸的含量又分为甘油单酯、甘油二酯、甘油三酯。脂肪酸是甘油酯最主要的成分^[43]。石慧等^[44]研究鲳鱼片在热风干燥下的脂肪酸含量, 多不饱和脂肪酸比饱和脂肪酸多, EPA、DHA 不饱和脂肪酸是水产品重要的营养来源。在水产品干燥过程中, 在微生物和酶的作用下容易发生脂质氧化、脂质水解等反应。

3.3.1 脂质氧化

水产品的脂肪中富含的不饱和脂肪酸, 在一定的酶、温度、环境作用下容易氧化酸败, 脂质氧化主要是脂肪在活性氧作用下的自由基链式反应, 产生脂质氢过氧化物等初级产物, 这些产物不稳定又容易氧化成酸、醛、酮类及丙二醛(malonic dialdehyde, MDA)等次级氧化物。硫代巴比妥酸(thiobarbituric acid, TBA 值)、羰基值(carbonyl value, COV 值)、过氧化值(peroxide value, POV 值)、油脂总氧化值(total oxidation value of oil, TOTOX)是常用来衡量脂肪氧化的指标^[45]。陆妙灵等^[35]研究发现鱼皮在 55 °C 的热泵干燥温度和 10% 的干燥终点含水率, 所测得 MDA 含量最低, 其脂肪氧化程度也最低。史梦佳等^[41]研究了冷风干燥下牡蛎脂质氧化产生的 TBA 值, 得出任何温度与湿度条件均不会使牡蛎变质。高温易发生脂质氧化, 从而贮藏期缩短。Liu 等^[45]研究了热风干燥下蛤仔脂质氧化过程, 随着干燥温度的增大, TOTOX 值和 POV 值增大, 肌肉组织的诱导期明显缩短, 其氧化水平较高, 氧化稳定性差, 货架期缩短。

3.3.2 脂质水解

脂质水解是水产品的甘油三酯在酶的作用下水解产生游离脂肪酸和甘油的过程。Azad 等^[46]通过研究鲱鱼的脂质组成, 发现在干燥过程中, 鲱鱼的总脂质、甘油三酯和磷

脂含量降低, 游离脂肪酸、胆固醇、甘油二酯含量增加。游离脂肪酸含量、酸价(acid value, AV)常作为脂质水解的指标, 干燥导致脂质氧化, 促进磷脂的水解, 产生更丰富的 DHA 含量。林芳等^[47]通过测定草鱼片的总脂质、甘油三酯、磷脂、游离脂肪酸含量, 研究发现脂质在干燥过程中受磷脂酶和酯酶的作用水解, 游离脂肪酸含量增加, AV 值也随干燥时间延长而增加。

4 干燥对水产品感官品质的影响

水产品的风味是指食物进入口腔后, 产生的一种综合味道, 包括挥发性呈味物质和非挥发性呈味物质。挥发性风味即嗅觉所闻到, 对总体风味贡献度较突出的几种组合性物质。在不同预处理及加工工艺下对风味产生的影响存在差异, 常用气相色谱-质谱联用法(gas chromatography-mass spectrometry, GC-MS)、气相色谱质谱联用-嗅辨法(gas chromatography-mass spectrometry-olfactometry, GC-O)等^[48]分析产品的风味变化。非挥发性滋味则通过味觉所感知, 由鲜味、酸味、甜味、苦味、咸味等^[49]味道构成的综合物质。

4.1 挥发性气味

脂质的水解氧化、美拉德反应、Strecker 降解对气味有重要影响^[40]。气味由醛、酮合称的羰基化合物及醇、烷烃类、含氮类、吡嗪类等化合物组成, 在不同加工环境下组成不同比例和种类的小分子物质, 羰基化合物包括己醛、辛醛、壬醛、2,3-辛二酮等, 是罗非鱼的主要挥发性气味物质^[15]。GC-MS 是利用色谱柱对样品进行微萃取, 结合气相色谱和质谱的特性进行定性定量的分析方法。王珏等^[50]对烘干鲈鱼进行定性定量分析, 图谱库共检测 42 种挥发性成分, 19 种不同烃类、8 种醛类, 3 种酮类, 7 种醇类和 5 种含硫含氮含氧及杂环化合物。表 2 列出了水产品中主要的挥发性成分及其相应的气味类型。

4.2 非挥发性滋味

蛋白质水解和多肽蛋白质降解均会影响滋味的组成, 滋味主要由游离氨基酸、核苷酸、有机酸等含氮化合物和糖、无机离子等非含氮化合物组成的浸出物决定的。游离氨基酸、核苷酸、有机酸是主要的呈味物质^[52]。低温和短时间能有效保留游离氨基酸, 且游离氨基酸越多, 呈味效果越好。Oeztuerk 等^[53]研究不同干燥海参的氨基酸组成及含量, 微波干燥时间短, 能有效保留干燥过程的氨基酸损失, 丝氨酸、天冬氨酸和脯氨酸是作为海参风味的重要氨基酸。邹磊等^[54]对比冰温、3、8、14 °C 的游离氨基酸总量, 冰温干燥后游离氨基酸增加约 22%, 甘氨酸、谷氨酸是海鳗的呈味物质, 与肌苷酸有协同作用。核苷酸主要是腺苷酸(adenylate, AMP)、肌苷酸(inosincacid, IMP)、鸟苷

酸(guanylic acid, GMP)为代表的 5'-核苷酸, 内源酶对滋味的产生是基于 ATP 在水产品死后发生降解, AMP 在 AMP 脱氨酶作用下产生 IMP、IMP 在磷酸酶产生次黄苷(hypoxanthine riboside, HxR)和次黄嘌呤(hypoxanthine, Hx)。李佳等^[55]研究了 AMP 脱氨酶和酸性磷酸酶活性对滋味的影响, 冰温真空冷冻干燥抑制了磷酸酶的活性, IMP

大量保留, 呈浓厚的鲜味。有机酸中的乳酸、柠檬酸、苹果酸等具有酸味呈味作用, 调节机体平衡促进新陈代谢。陈青云等^[15]研究了真空冷冻干燥、热风干燥和冰温真空冷冻干燥 3 种干燥条件下罗非鱼的滋味成分, 在三羧酸循环条件下, 冰温真空冷冻干燥产生的有机酸含量最少, 柠檬酸作为主要的呈味物质, 能增强代谢功能, 促进食欲。

表 2 挥发性成分表
Table 2 Volatile component odor table

种类	香味	代表化合物	参考文献
醛类	甜香、坚果香	十一醛(脂肪香味)、己醛(青草香味或酸败香味)	[49]
酮类	花果香	苯丙酮(水果香味)	[50]
醇类	蘑菇香、鱼腥味	1-戊烯-3-醇(鱼腥味)	[50]
烷烃类	刺激、寡淡风味	2,6,10,14-四甲基十五烷(胡萝卜香甜味)	[50,51]
含氮类	鱼腥味	三甲胺、异丙胺、异丁胺(鱼腥味)	[51]
吡嗪类	烤肉香味	2-乙基-3、5-二甲基吡嗪(烤肉香味)	[49, 51]
吡啶类	海鲜味	六氢吡啶类(淡水鱼腥味)	[49]

4.3 质 构

质构是对食品施加一个可控的外力, 对产品固态或半固态进行 2 次重复压缩, 肌肉所感觉到的食品的性质, 主要包括硬度(hardness)、咀嚼性(chewiness)、弹性(springiness)等指标^[29]。硬度主要由于肌肉失水、肌纤维收缩而变大。咀嚼性是硬度和弹性的综合体现, 表征咀嚼食品至吞咽状态所需的能量。温度过高会导致蛋白质变性, 使得干制品表面硬化、咀嚼性增大, 对质构品质有较大的影响。郭雪霞等^[56]研究发现在 45~55 °C 的太阳能干燥温度下, 虾的硬度、弹性、咀嚼性品质保持最好。产品的收缩率与水分含量紧密关联, 微波干燥(microwave drying, MD)能使组织内外部产生压缩应力, 导致肌肉收缩, 收缩率越小, 产生的完整度越好。孟维博等^[57]研究不同的干燥方式下对牡蛎收缩率的影响, 微波和热风微波干燥均使收缩率降低。Wang 等^[58]研究发出现微波干燥鱿鱼丝, 水分从内部向外部散失, 在鱼体内部形成多孔间隔, 减小鱿鱼收缩率。

4.4 色 泽

色泽被当成评判感官品质的指标之一, L^* (黑白色度)、 a^* (红绿色度)、 b^* (黄蓝色度)由色差仪测得^[29]。干燥温度和干燥方式会引起色泽的改变, 干制品加热状态下容易变性导致变色, 在温和条件下更适合保持原样。Hamzeh 等^[59]研究表明, 虾的 a^* 增加, L^* 减少的原因是 70 °C 下热风干燥降低了虾青素的热降解和氧化反应。Li 等^[6]对比热风与冷风干燥下虾的色泽, 表明热风干燥使得虾体的 L^* 、 a^* 、 b^* 增加, 冷风干燥只增加 L^* 值, 虾体亮度增加, 更能保持色泽。薛超轶等^[24]研究冷风干燥温度对鲢鱼片色泽的变化, 得出蛋白质变性和脂质氧化会产生不透明层, 是导致 L^* 减小、 b^* 值增大的原因之一。

5 总结与展望

干燥能有效降低产品的水分, 产生较好的风味和质构, 延长食品货架期。根据原料特性和干燥原理选择合适的干燥工艺生产干制品能提高加工效率。目前对于联合干燥技术的研究已有大量报道, 但大部分的联合干燥技术在水产品加工中的研究仍处于起步阶段。由于机器设备成本昂贵和推广度不足, 许多研究都停留在理论基础。水产干制品加工中, 蛋白质和脂质等物质易受加工环境的变化导致氧化变性, 失去原有的品质。为了发挥联合技术的优势, 应该从设备结构与能耗损失进一步优化。对保证最佳的咀嚼口感, 同时最大限度地保留风味, 改善干燥环境来保持独特的品质具有重要科学意义。随着科技水平的进步, 相信会有更多的干燥工艺能改善蛋白质变性和脂质氧化等不足, 推动水产干制品的深入研究。

参考文献

[1] 黄利华, 贾强, 郑玉玺, 等. 水产品加工现状及发展对策[J]. 现代食品, 2019, (24): 5-7.
Huang LH, Jia Q, Zheng YX, *et al.* Current situation and development strategy of aquatic products processing [J]. Mod Food, 2019, (24): 5-7.
[2] 杨帆, 万金庆, 张楠, 等. 水产品腐败机理及控制方法研究进展[J]. 食品工业科技, 2019, 40(5): 282-285.
Yang F, Wang JQ, Zhang N, *et al.* Research progress on corruption mechanism and control methods of aquatic products [J]. Sci Technol Food Ind, 2019, 40(5): 282-285.
[3] Qiu XJ, Chen SJ, Lin H. Oxidative stability of dried seafood products during processing and storage: A review [J]. J Aquat Food Prod Technol, 2019, 28(3): 329-340.
[4] Etemadian Y, Shabanpour B, Ramzanpour Z, *et al.* Nutritional and

- functional properties of two dried brown seaweeds *Sirophysis trinitatis* and *Polysiphonia myrica* [J]. *J. Aquat. Food Prod. Technol.*, 2018, 27(2): 219–235.
- [5] 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.
- [6] Li DY, Zhou DY, Yin FW, *et al.* Impact of different drying processes on the lipid deterioration and color characteristics of *Penaeus vannamei* [J]. *J. Sci. Food Agric.*, 2020, 100(6): 2544–2553.
- [7] 王春华. 水产品的加工和储藏[J]. 科学种养, 2016, (7): 59.
- Wang CH. Processing and storage of aquatic products [J]. *Sci. Farm.*, 2016, (7): 59.
- [8] Pal M, Shimelis A, Mamo W, *et al.* Hurdle Technology: A novel approach for food preservation [J]. *Bever Food World*, 2017, 44(1): 20–22.
- [9] Mukhopadhyay S, Gorris LGM. Hurdle technology [J]. *Encycl. Food Microbiol.*, 2014, (6): 221–227.
- [10] 林家辉, 章学来, 张振涛. 水产品热泵干燥技术综述[J]. 制冷与空调, 2019, 19(9): 1–4, 11.
- Lin JH, Zhang XL, Zhang ZT. Summary of heat pump drying technology for aquatic products [J]. *Ref. Air-conditioning*, 2019, 19(9): 1–4, 11.
- [11] Wang YQ, Zhang M, Mujumdar AS. Trends in processing technologies for dried aquatic products [J]. *Dry Technol.*, 2011, 29(4): 382–394.
- [12] 郑烟梅, 刘智禹, 路海霞, 等. 水产品干燥技术研究进展[J]. 食品质量检测学报, 2017, 8(1): 27–32.
- Zheng YM, Liu ZY, Lu HX, *et al.* Research progress on drying technology of aquatic product [J]. *J. Food Saf. Qual.*, 2017, 8(1): 27–32.
- [13] 吴燕燕, 石慧, 李来好, 等. 水产品真空冷冻干燥技术的研究现状与展望[J]. 水产学报, 2019, 43(1): 197–205.
- Wu YY, Shi H, Li LH, *et al.* Research status and prospects of vacuum freeze-drying technology for aquatic products [J]. *J. Fisher. China*, 2019, 43(1): 197–205.
- [14] 厉建国, 王金庆, 赵彦峰. 冰温真空干燥系统的设计与实现[J]. 食品与机械, 2017, 33(11): 89–91, 156.
- Li JG, Wang JQ, Zhao YF. Design and application of an ice-temperature vacuum drying system [J]. *Food Sci. Technol.*, 2017, 33(11): 89–91, 156.
- [15] 陈青云, 施文正, 王金庆, 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, (16): 323–327, 333.
- Chen QY, Shi WZ, Wang JQ, *et al.* Effect of three kinds of drying methods on the flavor substances of tilapia fillet [J]. *Sci. Technol. Food Ind.*, 2014, (16): 323–327, 333.
- [16] 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]. *Fisher. Mod.*, 2012, 39(4): 42–47.
- [17] 蔡文强, 陈跃文, 董秀萍, 等. 真空干燥对鲟鱼肉理化品质及微观结构的影响[J]. 食品研究与开发, 2020, 41(13): 24–30.
- Cai WQ, Chen YW, Dong XP, *et al.* Effect of vacuum drying on the physicochemical quality and microstructure of sturgeon meat [J]. *Food Res. Dev.*, 2020, 41(13): 24–30.
- [18] 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 JL, Shen J, Zhang CH, *et al.* Effects of vacuum freeze-drying on the quality of the oyster *Ostrea rivularis* [J]. *Mod. Food Sci. Technol.*, 2015, 31(4): 253–257.
- [19] 孙月娥, 王卫东, 付湘晋. 干燥方法对干白鲢鱼片质量的影响[J]. 食品科学, 2012, 33(10): 16–19.
- Sun YE, Wang WD, Fu XJ. Effect of drying method on the quality of silver carp slices [J]. *Food Sci.*, 2012, 33(10): 16–19.
- [20] 张孙现. 鲍鱼微波真空干燥的品质特性及机理研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2013.
- Zhang SX. Study on the microwave vacuum drying quality characteristics and mechanism of abalone [D]. Fuzhou: Fujian Agric. Forest University, 2013.
- [21] 庞文燕, 王金庆, 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, 141.
- Pang WY, Wang JQ, Yao ZY, *et al.* Effects of different drying methods on freshness of black carp fillet [J]. *Guangdong Agric. Sci.*, 2013, 40(15): 124–126, 141.
- [22] Sanchez-Alonso I, Moreno P, Careche M. Low field nuclear magnetic resonance (LF-NMR) relaxometry in hake (*Merluccius merluccius* L.) muscle after different freezing and storage conditions [J]. *Food Chem.*, 2014, 153: 250–257.
- [23] 张文杰, 薛长湖, 丛海花, 等. 低场核磁共振及成像技术对海参复水过程水分状态变化的研究[J]. 食品工业科技, 2012, 33(23): 90–93.
- Zhang WJ, Xue ZH, Cong HH, *et al.* Study on the change of moisture state in sea cucumber during rehydration processing by LF-NMR and LF-MRI [J]. *Sci. Technol. Food Ind.*, 2012, 33(23): 90–93.
- [24] 薛超轶, 张卿, 梁鹏. 冷风干燥过程中温度对鲮鱼片品质的影响[J]. 食品研究与开发, 2016, 37(23): 29–33.
- Xue CY, Zhang Q, Liang P. Effects of cold air-drying temperature on properties of anchovy fillets [J]. *Food Res. Dev.*, 2016, 37(23): 29–33.
- [25] Deng Y, Wu J, Su SQ, *et al.* Effect of far-infrared assisted heat pump drying on water status and moisture sorption isotherm of squid (*Illex illecebrosus*) fillets [J]. *Dry Technol.*, 2011, 29(13): 1580–1586.
- [26] 吴靖娜, 陈晓婷, 刘智禹, 等. 海马真空冷冻干燥特性及其动力学模型[J]. 渔业研究, 2019, (5): 404–408.
- Wu JN, Chen XT, Liu ZY, *et al.* The drying characteristic and dynamical modeling of seahorse under vacuum freeze drying [J]. *J. Fisher. Res.*, 2019, (5): 404–408.
- [27] 连凤, 赵伟, 杨瑞金. 低水分活度食品的微生物安全研究进展[J]. 食品科学, 2014, 35(19): 333–337.
- Lian F, Zhao W, Yang RJ. Microbiological safety of low-water activity foods [J]. *Food Sci.*, 2014, 35(19): 333–337.
- [28] 赵君哲. 食品的水分活度与微生物菌群[J]. 肉类工业, 2014, 7: 51–54.
- Zhao JZ. Water activity and microbial groups in foods [J]. *Meat Ind.*, 2014, 7: 51–54.
- [29] 余丹丹. 安康鱼调味烤鱼片加工工艺研究与货架期预测[D]. 杭州: 浙江海洋大学, 2016.
- Yu DD. Study on processing technology and product shelf life prediction of *Lophius litulon* flavored grilled fish [D]. Hangzhou: Zhejiang Ocean

- University, 2016.
- [30] 臧秀, 王偲琦, 章坦, 等. 低场核磁及成像技术原位监测温度对刺参干燥过程中水分流动性的影响[J]. 大连工业大学学报, 2019, 38(1): 5–9.
- Zang X, Wang SQ, Zhang T, *et al.* Effect of temperature on moisture changes in *Stichopus japonicus* during drying process detected by LF-NMR and MRI *in situ* monitoring technology [J]. J Dalian Poly Univ, 2019, 38(1): 5–9.
- [31] Cheng SS, Tang YQ, Zhang T, *et al.* Approach for monitoring the dynamic states of water in shrimp during drying process with LF-NMR and MRI [J]. Dry Technol, 2017, 36(7): 841–848.
- [32] 李帆. 不同干燥及复水工艺对栉孔扇贝 (*Chlamysfarreri*) 品质影响的研究[D]. 大连: 大连工业大学, 2017.
- Li F. Effects of different drying and rehydration processes on the quality of *Chlamysfarreri* [D]. Dalian: Dalian Polytechnic University, 2017.
- [33] 张清科, 郑学斌, 唐道军, 等. 养殖大口肌肉营养成分分析及评价[J]. 宁波大学学报(理工版), 2019, 32(4): 15–19.
- Zhang QK, Zheng XB, Tang DJ, *et al.* Analysis and evaluation of nutritional components in muscle of cultured *Opsariichthysbidens* [J]. J Ningbo Univ (Nat Sci Eng), 2019, 32(4): 15–19.
- [34] Niu J, Zhao B, Guo X, *et al.* Effects of vacuum freeze-drying and vacuum spray-drying on biochemical properties and functionalities of myofibrillar proteins from silver carp [J]. J Food Qual, 2019, 2019: 1–8.
- [35] 陆妙灵, 吕飞, 丁玉庭. 黄鳍金枪鱼鱼皮热泵干燥特性研究[J]. 食品工业科技, 2013, 34(24): 110–113, 119.
- Lu ML, Lv F, Ding YT. Study on heat pump drying characteristics of yellowfin tuna (*Thunnus albacores*) skin [J]. Sci Technol Food Ind, 2013, 34(24): 110–113, 119.
- [36] 吕飞, 沈军樑, 丁玉庭. 贻贝热泵干燥过程中的品质变化研究[J]. 现代食品科技, 2015, 31(6): 142–149.
- Lv F, Shen JL, Ding YT. Changes in mussel quality during heat-pump drying [J]. Mod Food Sci Technol, 2015, 31(6): 142–149.
- [37] 邹朝阳, 赵峰, 欧帅, 等. 冷藏和冰藏条件下大菱鲆品质变化与蛋白质氧化相关性[J]. 食品与发酵工业, 2019, 45(22): 213–219.
- Zou CY, Zhao F, Ou S, *et al.* Correlation between quality change and protein oxidation of turbot (*Scophthalmus maximus*) during refrigerated and ice storage [J]. Food Ferm Ind, 2019, 45(22): 213–219.
- [38] 蔡路昀, 台瑞瑞, 周小敏, 等. 不同干燥方式下沙丁鱼干燥特性的比较[J]. 食品工业科技, 2019, 40(6): 19–25.
- Cai LY, Tai RR, Zhou XM, *et al.* Comparison of drying characteristics of sardines under different drying methods [J]. Sci Technol Food Ind, 2019, 40(6): 19–25.
- [39] Zhang ZH, Liu Q, Wang P, *et al.* The rheological properties and structural changes of abalone meat with different drying methods [J]. J Aquat Food Prod T, 2016, 26(2): 205–214.
- [40] 郭雅. 不同腌制工艺对风干鳊鱼品质影响研究[D]. 南京: 南京师范大学, 2016.
- Guo Y. Effects of different curing technology on quality of air-drying *Parabramispekinensis* [J]. Nanjing: Nanjing Normal University, 2016.
- [41] 史梦佳, 陈丽娇, 张卿, 等. 冷风干燥温度和环境相对湿度对牡蛎品质的影响[J]. 农产品加工, 2019, (3): 1–5, 9.
- Shi MJ, Chen LJ, Zhang Q, *et al.* Effects of cold air drying temperature and relative humidity on the quality of oyster [J]. Agric Prod Process, 2019, (3): 1–5, 9.
- [42] Nagwekar N, Tidke V, Thorat BN. Microbial and biochemical analysis of dried fish and comparative study using different drying methods [J]. Dry Technol, 2017, 35(12): 1481–1491.
- [43] Sun DW, Cao C, Li B, *et al.* study on combined heat pump drying with freeze-drying of antarctic krill and its effects on the lipids [J]. J Food Proc Eng, 2017, 40(6): 10.
- [44] 石慧, 杨少玲, 吴燕燕, 等. 卵形鲳鲹鱼片热风干燥条件优化及其品质特性研究[J]. 食品与发酵工业, 2019, (17): 129–135.
- Shi H, Yang SL, Wu YY, *et al.* Optimized hot air drying conditions and quality characteristics of *Trachinotusovatus* fillet [J]. Food Ferm Ind, 2019, (17): 129–135.
- [45] Liu ZY, Zhou DY, Zhou X, *et al.* Effect of various hot-air drying processes on clam *Ruditapes philippinarum* lipids: Composition Changes and oxidation development [J]. J Food Sci, 2018, 83(12): 2976–2982.
- [46] Azad SAKM, Tokunaga C, Kurihara H, *et al.* Changes in lipids and their contribution to the taste of migaki-nishin (dried herring fillet) during drying [J]. Food Chem, 2009, 115(3): 1011–1018.
- [47] 林芳, 孙骏威, 葛建. 草鱼片热风干制过程中脂质氧化特性研究[J]. 中国食品学报, 2012, 12(3): 192–200.
- Lin F, Sun JW, Ge J. Research on lipid oxidation during heat-drying of grass carp (*Ctenopharyngodonidellus*) Fillets [J]. J Chin Inst Food Sci Technol, 2012, 12(3): 192–200.
- [48] 杨欣怡, 刘源, 许长华, 等. 水产品中挥发性风味物质提取和分析研究进展[J]. 食品科学, 2015, 36(5): 289–295.
- Yang XY, Liu Y, Xu CH, *et al.* Extraction and analysis of volatile flavor compounds in aquatic products: A review [J]. Food Sci, 2015, 36(5): 289–295.
- [49] 蔡路昀, 年琳玉, 曹爱玲, 等. 不同干燥方式对中国对虾风味组分的影响[J]. 农业工程学报, 2017, 33(11): 291–298.
- Cai LY, Nina LY, Cao AL, *et al.* Effect of different drying methods on flavor components of Chinese shrimp (*FenneropnaeusChinensis*) [J]. Transact Chin Soc Agric Eng, 2017, 33(11): 291–298.
- [50] 王珏, 林亚楠, 马旭婷, 等. 鲈鱼干制过程中风味物质及风味活性物质分析[J]. 中国食品学报, 2019, 19(9): 269–278.
- Wang J, Lin YN, Ma XT, *et al.* Analysis of volatile compounds and odor-active compounds in dried mackerel [J]. J Chin Inst Food Sci Technol, 2019, 19(9): 269–278.
- [51] Zhang J, Cao J, Pei Z, *et al.* Volatile flavour components and the mechanisms underlying their production in golden pompano (*Trachinotusblochii*) fillets subjected to different drying methods: A comparative study using an electronic nose, an electronic tongue and SDE-GC-MS [J]. Food Res Int, 2019, 123: 217–225.
- [52] Gong J, Shen H, Zheng JY, *et al.* Identification of key umami-related compounds in yangtze *Coiliaetenes* by combining electronic tongue analysis with sensory evaluation [J]. RSC Adv, 2016, 6(51): 45689–45695.
- [53] Oeztuerk F, Guenduez H. The effect of different drying methods on chemical composition, fatty acid, and amino acid profiles of sea cucumber (*Holothuriatubulosa* Gmelin, 1791) [J]. J Food Proc Preserv, 2018, 42(9): 13710.
- [54] 邹磊, 万金庆, 钟耀广, 等. 温度对真空干燥海鳗的鲜度和滋味影

- 响[J]. 现代食品科技, 2014, 30(8): 206–211.
- Zou L, Wang JQ, Zhong YG, *et al.* Effect of Temperature on the Freshness and Taste of *Muraenesox cinereus* during vacuum drying [J]. Mod Food Sci Technol, 2014, 30(8): 206–211.
- [55] 李佳, 万金庆, 邹磊, 等. 不同干燥方法对海鳗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, Wan JQ, Zou L, *et al.* Effect of different drying methods on several endogenous enzyme activities of *Muraenesox cinereus* fillets [J]. Mod Food Sci Technol, 2015, 31(8): 254–260.
- [56] 郭雪霞, 王伟华, 刘瑜, 等. 不同太阳能干燥温度对南美白对虾理化特性和干燥能耗的影响[J]. 中国调味品, 2017, 42(12): 79–83.
- Guo XX, Wang WH, Liu Y, *et al.* Effects different solar drying temperatures on physical and chemical properties and energy consumption of *Penaeus vannamei* [J]. China Cond, 2017, 42(12): 79–83.
- [57] 孟维博, 刘燕, 伍国杰, 等. 不同干燥方法对牡蛎干品质及气味的影响[J]. 食品科技, 2015, (6): 174–179.
- Meng WB, Liu Y, Wu GJ, *et al.* Effect of different drying methods on quality and odour of dried oysters [J]. Food Sci Technol, 2015, (6): 174–179.
- [58] Wang YQ, Zhang M, Mujumdar AS, *et al.* Drying and quality characteristics of shredded squid in an infrared-assisted convective dryer [J]. Dry Technol, 2014, 32(15): 1828–1839.
- [59] Hamzeh S, Motamedzadegan A, Shahidi SA, *et al.* Effects of drying condition on physico-chemical properties of foam-mat dried shrimp powder [J]. J Aquat Food Prod T, 2019, 28(7): 794–805.

(责任编辑: 王 欣)

作者简介



沈嘉森, 硕士研究生, 主要研究方向为水产品加工及贮藏工程。
E-mail: 905505974@qq.com



刘智禹, 教授级高级工程师, 主要研究方向为水产品加工与综合利用。
E-mail: 13906008638@163.com