

黄山臭鳃鱼热风干燥动力学及其品质特性

吴永祥¹, 俞昌浩^{1,2}, 刘刚¹, 代琪琪¹, 杨柳³, 胡晓倩^{1*}

¹ 黄山学院生命与环境科学学院 安徽黄山 245041

² 南京师范大学食品与制药工程学院 南京 210023

³ 合肥工业大学食品与生物工程学院 合肥 230009

摘要 为提高黄山臭鳃鱼干燥效率及成品品质,研究不同干燥温度(55,65,75,85,95℃)条件下臭鳃鱼鱼肉的干燥特性和品质变化。结果表明,热风干燥温度在 55~95℃范围,臭鳃鱼鱼肉的有效水分扩散系数 D_{eff} 在 2.8848×10^{-10} ~ 8.8663×10^{-10} m²/s 范围,温度越高,有效水分扩散系数越大,其扩散活化能 E_a 为 27.9370 kJ/mol。通过模型拟合发现,Page 模型能准确描述臭鳃鱼热风干燥过程中水分迁移情况。不同干燥温度对臭鳃鱼品质影响显著,当温度为 75℃时,鱼肉复水比最大,为 3.03 ± 0.13 ,多肽含量最高,为 (3.79 ± 0.25) g/100 g,抗氧化作用最显著,以 75℃热风干燥对鱼肉的质构特性与综合品质较好。研究结果阐明了臭鳃鱼干燥特性与品质的相关性,为黄山臭鳃鱼干燥加工过程中品质调控优化提供理论参考。

关键词 臭鳃鱼; 热风干燥动力学; 扩散活化能; 质构特性; 抗氧化

文章编号 1009-7848(2023)08-0286-10 **DOI:** 10.16429/j.1009-7848.2023.08.029

“初闻有异味,深嗅奇香,肉质白嫩如蒜瓣,入口润滑,生津吐香”描述的是我国黄山地区特色发酵食品——黄山臭鳃鱼。臭鳃鱼是以新鲜鳃鱼为原料,配以食盐、香辛料等辅料,经低温、短期腌制发酵而成^[1-3]。因其营养丰富、风味独具而深受人们喜爱,2019 年单品销售额高达 30 亿,其市场需求量逐年递增^[4]。目前,臭鳃鱼的传统加工工艺是发酵完成后直接冷藏,致其储存与运输成本高、品质不稳定、保质期短,已不能满足市场供应需求^[5-6]。然而,有关臭鳃鱼的研究主要集中于臭鳃鱼的发酵工艺、菌群结构、理化性质及风味成分变化等方面^[7-10],对于臭鳃鱼发酵后的加工工艺研究较少。

脱水干燥是食品加工过程的常用方法之一,在一定程度上能保持水产品原有的色、香、味及营养成分,且干制品易贮运,是解决长期贮藏与保持品质稳定的有效方法之一^[11-12]。热风干燥效率高、

产能大、操作方便且成本低^[13],被食品工业广泛应用于加工生产中。然而,热风干燥参数设置不当会对产品色泽、感官品质与风味物质等产生不良影响,也降低其营养及食用价值^[14-16]。探究臭鳃鱼干燥过程中水分迁移规律,建立合适的数学模型以预测臭鳃鱼干燥的动力学过程^[17-18],选择合适的干燥工艺参数,对提升产品的生产效率及品质尤为关键。本试验探究干燥温度对臭鳃鱼鱼肉热风干燥特性的影响,并对干燥过程进行 Page、Newton、Henderson and Pabis、Wang and Singh 4 种经验方程的拟合,对比分析不同温度下臭鳃鱼干燥产品的复水比、色泽、质构特性、多肽含量以及抗氧化活性等品质特性,以期为臭鳃鱼工业化生产中干燥参数优化及品质调控提供理论依据。

1 材料与方 法

1.1 材料与试剂

臭鳃鱼,由黄山市胡兴堂桃花流水食品有限公司提供,为低温湿法发酵而成,冰藏于-20℃待试验分析。

抗坏血酸、牛血清白蛋白、DPPH、ABTS 等,美国 sigma 公司;双缩脲试剂,上海麦克林生化科技有限公司;铁氰化钾、三氯乙酸、三氯化铁、磷酸氢二钠、磷酸二氢钠等,国药集团化学试剂公司。

收稿日期: 2022-08-24

基金项目: 安徽省重点研究与开发项目(202104a06020013);黄山市科技计划项目(2020KN-04);安徽省高校自然科学基金项目(KJ2021A1047;KJ2021ZD0123);安徽省高校优秀人才支持计划项目(gxyqZD2022079);国家级大学生创新创业训练计划项目(202210375048)

第一作者: 吴永祥,男,博士,副教授

通信作者: 胡晓倩 E-mail: 107014@hsu.edu.cn

1.2 仪器与设备

DKL410C 型热风干燥箱,上海重逢科学仪器有限公司;ENS-PRO 型质构仪,北京怡诺威腾科技发展有限公司;CR-10plus 色差仪,日本柯尼卡美能达公司;LabStart-Aw 便携式水活度测定仪,瑞士 Novasina 公司;S-3400N 扫描电镜,日本日立公司;SpectraMax-190 全波长酶标仪,美国 Molecular Devices 公司;AR124CN 型电子天平,奥豪斯仪器(常州)有限公司。

1.3 方法

1.3.1 臭鳃鱼样品预处理及热风干燥 在超净工作台中,将臭鳃鱼鱼肉切片为厚度 6 mm,取厚度均匀的肉切片用于试验。将臭鳃鱼鱼肉切片称取相同质量,调节热风干燥箱温度至 55 ℃,每 2 h 测定一次鱼片质量,直至鱼片干燥至恒重(最后 2 次干燥后称量的质量差不超过 2 mg 视作恒重)。依照上述方法,于 65,75,85,95 ℃ 条件进行相同操作,记录相应数据。

1.3.2 水分指标的计算

1.3.2.1 干基含水率(M_t) 干基含水率参考式(1)计算。

$$M_t = \frac{G_t - G}{G} \quad (1)$$

式中, G_t —— t 时刻样品干燥后的质量,g;
 G ——恒重后样品的质量,g。

1.3.2.2 水分比(MR) 水分比参考式(2)计算。

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e} \quad (2)$$

式中, M_e ——物料平衡干基含水率, M_0 ——初始干基含水率, M_t ——干燥 t 时刻的干基含水率。

1.3.2.3 有效水分扩散系数(D_{eff}) 臭鳃鱼鱼片呈平铺的板状结构,可视作薄层干燥物料,其有效水分扩散系数可用线性变化后的菲克第二定律来计算^[19]:

$$\ln MR = \ln \left(\frac{8}{\pi^2} \right) - \frac{\pi^2 D_{\text{eff}}}{4H^2} t_0 \quad (3)$$

式中, D_{eff} ——有效水分扩散系数, m^2/s ; H ——物料厚度的一半,m; t_0 ——干燥至恒重所需要的时间,h。

1.3.2.4 活化能(E_a) Arrhenius 方程通常可用作表达温度与水分扩散有效扩散的关系,将此方程进行线性化处理,利用此方程可求得物料的活化

能 E_a 。

$$\ln D_{\text{eff}} = \ln D_0 - \frac{E_a}{R} \times \frac{1}{T} \quad (4)$$

式中, D_0 ——扩散常数, m^2/s ; E_a ——样品的活化能,kJ/mol; T ——干燥的温度,K; R ——理想气体常数,其数值为 8.314472 J/(mol·K)。

在一定的温度范围内,物料的干燥活化能(E_a)可视作不变的常数,故将 D_{eff} 取对数进行线性变化后,可构造一条具有良好线性关系的回归方程,再根据方程斜率为 $-E_a/R$,计算求出物料的活化能 E_a ^[20]。

1.3.3 建立数学模型 本试验通过与 Newton、Page、Henderson and Pabis、Wang and Singh 4 种鱼肉制品中常见的经验模型进行拟合,利用 Origin 8.0 软件对干燥时间和水分比的干燥曲线进行回归模拟,以回归方程的决定系数(R^2)和残差平方和(RSS)作为评判模型拟合优度的 2 个指标,以此判断试验数据与 4 种模型预测值的拟合程度,以确定最能够描述臭鳃鱼热风干燥规律的方程。

表 1 4 种经验方程及其表达式

Table 1 Four kinds of empirical equations and their expressions

模型名称	模型方程
Newton	$MR = \exp(-kt)$
Page	$MR = \exp(-kt^n)$
Henderson and Pabis	$MR = a \exp(-kt)$
Wang and Singh	$MR = 1 + at + bt^2$

注:MR 表示水分比; t 表示干燥时间; k 、 n 、 a 、 b 表示待定系数。

1.3.4 理化性质的测定

1.3.4.1 水分活度的测定 水分活度采用 LabStart-Aw 便携式水活度测定仪测定,具体操作步骤见说明书。

1.3.4.2 复水比的测定 准确称取干燥后的臭鳃鱼鱼肉质量 m_1 ,然后将其置于 35 ℃ 的恒温水浴锅中进行复水,复水后取出,用吸水纸吸干鱼肉表面水分后称取复水后的臭鳃鱼鱼肉质量 m_2 ;每隔 10 min 测量一次,直至样品质量达到恒量^[21]。复水比(R_f)计算公式如下:

$$R_f = \frac{m_2 - m_1}{m_1} \quad (5)$$

1.3.4.3 可溶性多肽含量的测定 称取 0.5 g 不

同干燥温度的臭鳊鱼鱼肉,加入 10 mL 灭菌蒸馏水,50 ℃水浴 1 h 后,在 3 500 r/min 条件下离心 5 min,取上清液即为多肽提取液。采用双缩脲法^[22],以牛血清白蛋白(BSA)为标准品绘制标准曲线,得到回归方程为: $Y=0.1032X-0.0081$, $R^2=0.9865$ (其中 X 为 BSA 的含量, Y 为 A_{540nm}),表明 BSA 在 0~3 mg 时与 A_{540nm} 呈良好的线性关系。将待测样品测得的吸光值代入 BSA 标准曲线中进行可溶性多肽含量的计算,结果以每 100 g 鱼肉中含有相当 BSA 克数表示,即 g/100 g。

1.3.5 色泽的测定 色泽测定利用 CR-10plus 型色差仪,在干燥后臭鳊鱼鱼肉表面随机选取 10 个点测量,并记录 L^* (亮度)、 a^* (红度)、 b^* (黄度)值。

1.3.6 质构特性的测定 硬度和咀嚼性的测定利用 ENS-PRO 型质构仪,采用探头型号为 36 mm 平底圆柱探头进行测定。测定条件:测前速率为 60 mm/min,测试速率为 60 mm/min,测后速率为 60 mm/min,压缩程度为 30%,距离为 1.00 mm,触发力 0.03 N,触发类型为自动。

1.3.7 微观组织结构的测定 微观组织结构测定利用 S-3400N 型扫描电镜,将干燥后臭鳊鱼鱼肉固定在样品托上,采用离子溅射仪在样品的横断面上喷金,扫描电子显微镜(500 倍)观察并拍照。

1.3.8 抗氧化活性的测定 按照 1.3.4.3 节方法获得不同干燥温度臭鳊鱼鱼肉的多肽提取液,DPPH 和 ABTS 自由基清除能力以及还原力采用比色法^[23-25]测定。

1.4 数据的统计与分析

结果以平均值±标准差表示。采用 Origin 8.5 软件作图及模型拟合。利用 SPSS 18.0 软件进行方差分析,采用 Duncan's 多重比较法进行差异显著性检验, $P<0.05$ 表示存在显著性差异。

2 结果分析与讨论

2.1 臭鳊鱼的热风干燥特性

不同温度下臭鳊鱼的热风干燥特性曲线见图 1。由图 1 可知,黄山臭鳊鱼在 55,65,75,85,95 ℃条件下进行热风干燥,达到干燥终点的时间分别为 26,22,18,14,10 h,说明温度越高,其干燥速率越快,达到恒重的时间越短。在干燥起始阶段,臭鳊鱼鱼肉的干燥速率较快,而后续的干燥速率并

未增高或保持恒定,干燥过程直接经历降速阶段,这与鲑鱼、鲍鱼、海马等的热风干燥过程相似^[1626-27]。物料的干燥过程由内部扩散和表面汽化 2 个传质阶段构成,而干燥过程的速度取决于进行较慢的传质阶段。降速干燥过程中,物料内部水分扩散至物料表面的速度慢于热空气带走物料表面汽化水分的速度,致使物料表面局部干区变大,干燥速率逐渐下降,这种干燥过程属于内部扩散传质阶段控制整体干燥速度的过程。据此推测,黄山臭鳊鱼的这种干燥模式可能与臭鳊鱼鱼片表面水分迁移情况有关,干燥起初由于鱼肉表面曝于高温之下,加以干燥箱产生具有一定流速的热风快速带走了臭鳊鱼表面的水分,随着时间的推移,表面水分大部分得到汽化,鱼片整体的自由水含量显著减少,鱼肉结构失水紧缩,传热阻力增大,阻止了臭鳊鱼鱼肉内部水分扩散至表面,水分汽化变得更加困难,从而导致干燥速率不断下降。

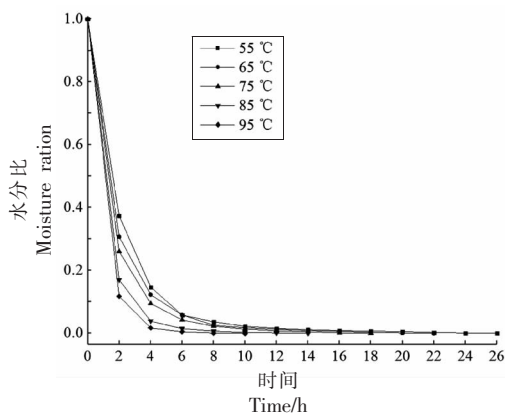


图 1 不同干燥温度臭鳊鱼鱼的热风干燥特性曲线
Fig.1 Hot air drying characteristic curves of stinky mandarin fish fillets dried at different temperatures

2.2 臭鳊鱼干燥过程的有效水分扩散系数和活化能

有效水分扩散系数(D_{eff})和活化能(E_a)是衡量干燥过程物料脱水能力的重要参数, D_{eff} 越高,其脱水能力越强,水分扩散所需要的 E_a 越低^[28]。不同温度下臭鳊鱼有效水分扩散系数见表 2。由表 2 可知,臭鳊鱼热风干燥的 D_{eff} 在 $2.8848 \times 10^{-10} \sim 8.8663 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ 范围,温度越高,有效水分扩散系数越大,两者呈正相关的关系。各温度下的决定系数 R^2 均大于 0.98,拟合度较好。

表 2 不同干燥温度臭鳃鱼鱼肉的有效水分扩散系数 (D_{eff})

Table 2 Effective moisture diffusion coefficient (D_{eff}) of stinky mandarin fish fillets dried at different temperatures

温度/°C	$D_{\text{eff}}/10^{-10} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	R^2
55	2.8848	0.9841
65	3.4080	0.9900
75	4.1287	0.9930
85	5.9342	0.9917
95	8.8663	0.9980

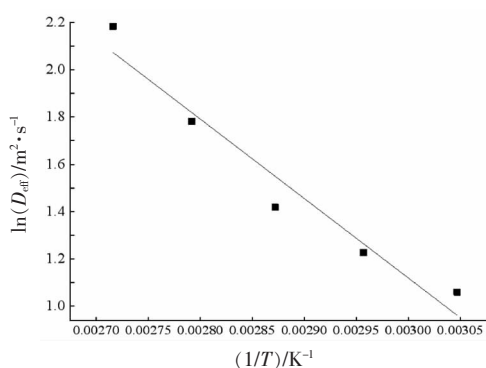


图 2 臭鳃鱼鱼肉有效水分扩散系数与温度之间的关系

Fig.2 Relationship between effective moisture diffusion coefficient and temperature of stinky mandarin fish fillets

由图 2 可知,对臭鳃鱼鱼肉的有效扩散系数取对数后, $\ln(D_{\text{eff}})$ 与温度的倒数($1/T$)之间具有一定的线性关系,其线性拟合方程为 $Y = -3360.0406X + 11.1995$,决定系数(R^2)为 0.9490。基于 Arrhenius 方程,根据线性回归方程的斜率与截距,计算求得臭鳃鱼的扩散活化能 E_a 为 27.9370 kJ/mol。

2.3 臭鳃鱼热风干燥数学模型的建立

表 3 为不同热风干燥温度下臭鳃鱼水分变化数据与 4 种经验模型的拟合情况。决定系数(R^2)又称拟合优度,它表征数学模型预测值与试验实际数值的拟合程度,其数值越接近 1,说明该方程与试验数据的拟合程度越好,能够较好地描述臭鳃鱼热风干燥水分变化的过程。残差平方和 RSS 也是判定模型拟合精确度的一个指标,其在统计学上服从 χ^2 分布,能够用以描述试验实际数值与线性回归方程的离散程度,其数值越小,则表明数

据点与模型的回归曲线越接近,拟合出的方程精确程度越高。通过比较分析,Page 模型与试验实际数据的拟合程度最优,各温度下方程的 R^2 均大于 0.975, RSS 均在 0.081 以下。Newton、Henderson and Pabis 模型拟合度次之,虽然这 2 种经验模型与试验实际数值拟合出的方程 R^2 与 1 也很接近,但其 RSS 数值较大,说明实际值与预测值的残差较大,离散程度较高,故它们并不是反映臭鳃鱼热风干燥水分变化的最佳方程。Wang and Singh 模型的拟合程度较差, R^2 的数值与 1 相差较大,不适合用来描述臭鳃鱼干燥过程。

由表 3 可见,Page 方程的参数 k 与 n 根据热风干燥温度呈现明显的规律性变化,随着温度的升高, k 、 n 的值随之增大。相比于 n 值, k 值的增幅明显较大,说明温度对于 k 值的影响更加显著。然而,臭鳃鱼的热风干燥过程并非仅受到温度一个因素的影响,其水分变化的过程是一个较为复杂的过程,物料扩散阻力的变化、物料自身结构的变化以及干燥介质的湿度差都可能是影响干燥规律的因素。

2.4 臭鳃鱼热风干燥动力学模型的验证

为检验所建立的 Page 模型的准确性,采用选定的 Page 模型对臭鳃鱼鱼肉热风干燥进行验证,干燥条件为热风干燥 75 °C,拟合结果见图 3。由图 3 可知,试验组 MR 值与模型预测值相近,无明显差异,说明 Page 模型能够较好地反映臭鳃鱼鱼片热风干燥中水分比的变化规律,为后期优化干燥参数、提高臭鳃鱼鱼肉品质提供了科学依据。

2.5 热风干燥温度对臭鳃鱼鱼肉水分活度、复水比和色泽的影响

由表 4 可知,干燥后臭鳃鱼鱼肉的水分活度下降,不同干燥温度对水分活度影响显著 ($P < 0.05$)。复水比反映了物料干制后细胞和结构的破坏程度,是衡量干制品品质的重要参数。不同温度干燥下臭鳃鱼鱼肉的复水比发生了显著变化 ($P < 0.05$),其中,经 75 °C 干燥的鱼肉复水比最大,为 3.03 ± 0.13 。当干燥温度较低时,其干燥时间延长,也会致使鱼肉内部发生了不可逆性的细胞破坏和错位,导致细胞结构坍塌,复水比降低^[11]。

色泽是臭鳃鱼鱼肉的重要感官指标。由表 4 可知,不同干燥温度处理的臭鳃鱼鱼肉,其 L^* 、 a^* 、

表3 不同干燥温度臭鳊鱼鱼肉4种经验模型拟合结果

Table 3 Fitting results of four empirical models of stinky mandarin fish fillets dried at different temperatures

模型名称	模型方程	温度/°C	模型系数	R^2	RSS
Newton	$MR = \exp(-kt)$	55	$k=0.2973$	0.9791	4.89619
		65	$k=0.3514$	0.9858	2.73262
		75	$k=0.4260$	0.9896	1.55773
		85	$k=0.6099$	0.9882	1.62122
		95	$k=0.9101$	0.9964	0.35890
Page	$MR = \exp(-kt^n)$	55	$k=0.6968, n=0.7072$	0.9750	0.08058
		65	$k=0.7596, n=0.7149$	0.9903	0.02417
		75	$k=0.8279, n=0.7306$	0.9921	0.01482
		85	$k=1.1098, n=0.7318$	0.9942	0.00690
		95	$k=1.2059, n=0.8489$	0.9964	0.00280
Henderson and Pabis	$MR = a \exp(-kt)$	55	$k=0.2286, a=0.3181$	0.9543	1.43244
		65	$k=0.2802, a=0.3692$	0.9772	0.60564
		75	$k=0.3521, a=0.4327$	0.9811	0.40179
		85	$k=0.4820, a=0.3302$	0.9876	0.20422
		95	$k=0.8008, a=0.5191$	0.9944	0.07229
Wang and Singh	$MR = 1 + at + bt^2$	55	$a=-0.1384, b=0.0041$	0.5834	0.48630
		65	$a=-0.1617, b=0.0057$	0.6408	0.40031
		75	$a=-0.1948, b=0.0083$	0.7150	0.30765
		85	$a=-0.2515, b=0.0136$	0.7596	0.24779
		95	$a=-0.3414, b=0.0253$	0.8647	0.13721

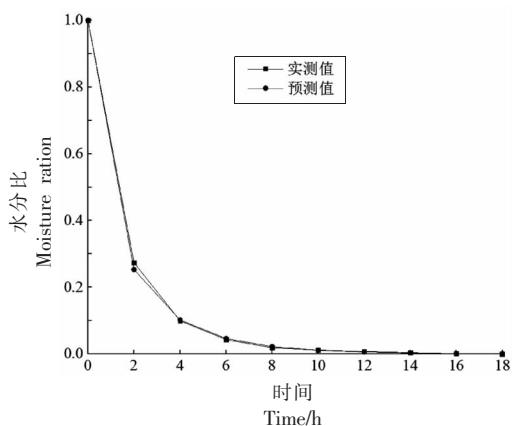


图3 Page模型预测值与实测值的水分比

Fig.3 Moisture ration between the predicted value and measured value of Page model

b^* 值均差异显著 ($P < 0.05$)。随着干燥温度升高, L^* 值有增加的趋势, 这可能是温度越高, 鱼肉表面失水速率越快, 鱼肉结构更加紧密结实, 增加了光的散射, 同时温度升高致使鱼肉蛋白质变性程度增加, 故 L^* 值增大^[29]。随着温度的升高, b^* 值增大, 这

主要与脂肪的氧化有关, 温度升高致使脂肪氧化速率加快^[16]。

2.6 热风干燥温度对臭鳊鱼肉质构特性的影响

硬度和咀嚼性是臭鳊鱼品质的重要指标, 直接决定了成品的口感。由图4可知, 干燥温度对臭鳊鱼鱼肉硬度和咀嚼性均有显著影响 ($P < 0.05$)。当干燥温度为 55 °C 时, 其硬度和咀嚼性最高, 分别为 (76.37 ± 5.45) N 和 (34.16 ± 4.55) N, 这可能由于干燥温度较低, 其干燥时间延长, 使得鱼肉结构更加结实紧密^[30]。随着温度的升高, 硬度和咀嚼性下降, 这是干燥温度升高与干燥时间缩短共同作用的结果。

2.7 热风干燥温度对臭鳊鱼鱼肉微观组织结构的影响

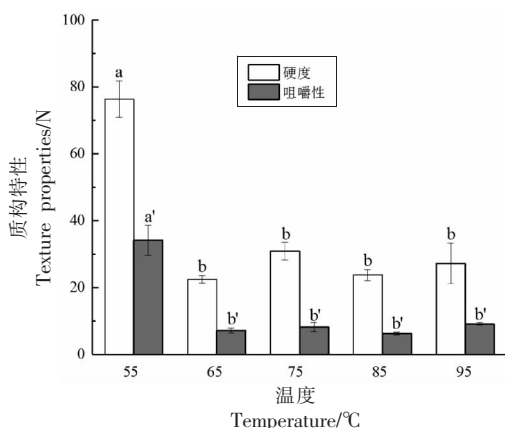
对不同干燥温度处理的臭鳊鱼鱼肉的微观组织结构进行扫描电镜观察, 结果如图5所示。不同干燥温度对臭鳊鱼鱼肉的微观组织结构的影响较

表 4 不同干燥温度臭鳃鱼鱼肉水分活度、复水比和色泽的比较

Table 4 Comparison of water activity, rehydration rate and color parameters of stinky mandarin fish fillets dried at different temperatures

温度/°C	水分活度	复水比	L^*	a^*	b^*
55	0.59 ± 0.01^a	2.07 ± 0.20^b	11.70 ± 1.06^b	1.97 ± 0.06^c	8.23 ± 0.38^b
65	0.58 ± 0.00^a	2.78 ± 0.60^{ab}	12.03 ± 0.25^{ab}	2.57 ± 0.23^b	9.17 ± 0.45^b
75	0.56 ± 0.01^b	3.03 ± 0.13^a	13.97 ± 1.50^a	2.40 ± 0.20^b	9.00 ± 1.23^b
85	0.59 ± 0.01^a	2.58 ± 0.22^{ab}	13.37 ± 1.11^{ab}	1.93 ± 0.15^c	12.23 ± 0.45^a
95	0.54 ± 0.01^b	0.94 ± 0.28^c	11.87 ± 0.76^b	4.40 ± 0.10^a	11.43 ± 0.23^a

注: 同列字母不同表示差异显著 ($P < 0.05$), 下同。



注: 不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。

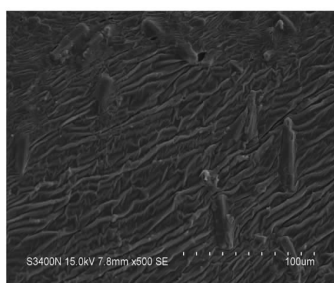
图 4 不同干燥温度臭鳃鱼鱼肉质构特性的比较
Fig.4 Comparison of texture properties of stinky mandarin fish fillets dried at different temperatures

为显著。在相对较低温度干燥条件下 (55, 65, 75 °C), 臭鳃鱼鱼肉肌纤维排列较为整齐、轮廓清晰, 呈有序排列。随着温度的继续升高, 热风干燥对鱼肉质度结构破坏较为严重, 肌纤维纹理变得模糊, 甚至鱼肉肌纤维出现了断裂, 冯天依等^[31]利用热

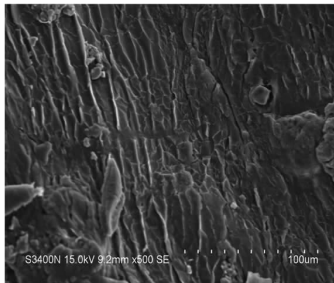
风干燥处理鲢鱼肉后肌纤维变化结果与本试验结果一致。不同干燥温度处理后臭鳃鱼鱼肉微观组织结构发生的显著改变, 从而影响了鱼肉的复水性、色泽、硬度和咀嚼性等质构特性参数。

2.8 热风干燥温度对臭鳃鱼多肽含量和抗氧化活性的影响

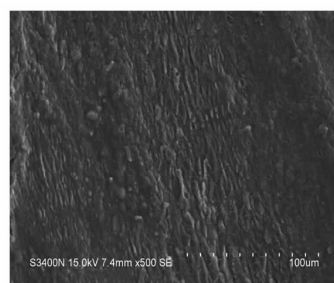
由表 5 可知, 不同干燥温度对臭鳃鱼鱼肉的 多肽含量和抗氧化活性有显著的影响 ($P < 0.05$)。随着干燥温度的增加, 臭鳃鱼鱼肉可溶性多肽含量呈现先增加后降低的趋势, 当温度为 75 °C 时, 其多肽含量最高, 为 $(3.79 \pm 0.25) \text{g}/100 \text{g}$, 这可能是因为较高温度干燥时, 鱼肉蛋白的变性程度增加, 导致可溶性多肽含量降低^[32]。不同干燥温度处理后臭鳃鱼鱼肉多肽提取液均具有一定的 ABTS、DPPH 自由基清除能力以及还原能力。当干燥温度为 75 °C 时, 臭鳃鱼鱼肉的抗氧化活性最显著 ($P < 0.05$), 这可能与其提取液中较高的可溶性多肽含量有关。有大量研究显示, 多肽类物质具有较好的抗氧化作用, 能显著的清除 ABTS、DPPH 自由基^[33-34]。



(a) 55 °C



(b) 65 °C



(c) 75 °C

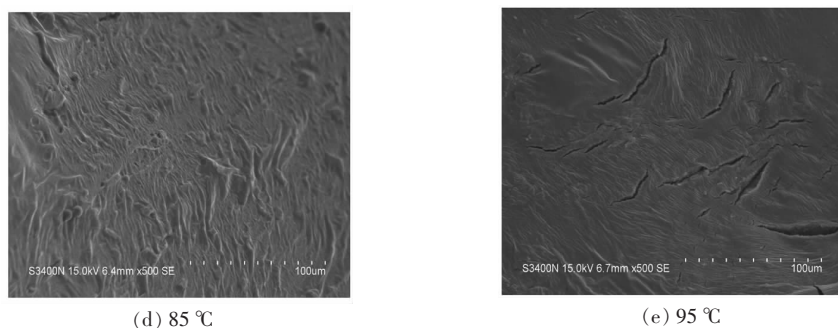


图5 不同干燥温度臭鳊鱼鱼肉微观结构的比较(500×)

Fig.5 Comparison of microscopic structure of stinky mandarin fish fillets dried at different temperatures (500×)

表5 不同干燥温度臭鳊鱼鱼肉多肽含量和抗氧化能力的比较

Table 5 Comparison of polypeptide contents and antioxidant capacity of stinky mandarin fish fillets dried at different temperatures

温度/°C	可溶性多肽/g·(100 g) ⁻¹	ABTS 自由基清除率/%	DPPH 自由基清除率/%	还原力
55	3.06 ± 0.28 ^b	99.56 ± 0.30 ^a	16.89 ± 0.48 ^{ab}	0.24 ± 0.03 ^b
65	3.20 ± 0.32 ^{ab}	99.54 ± 0.26 ^a	16.92 ± 3.98 ^{ab}	0.26 ± 0.03 ^b
75	3.79 ± 0.25 ^a	99.67 ± 0.49 ^a	19.63 ± 1.21 ^a	0.43 ± 0.11 ^a
85	3.18 ± 0.43 ^{ab}	99.92 ± 0.04 ^a	17.81 ± 0.08 ^{ab}	0.35 ± 0.09 ^{ab}
95	2.98 ± 0.35 ^b	99.67 ± 0.24 ^a	15.25 ± 0.96 ^b	0.33 ± 0.09 ^{ab}

3 结论

本试验探究了臭鳊鱼在不同温度下的热风干燥规律,在 55~95 °C 温度范围,干燥速率与温度呈正相关,干燥过程始终为降速干燥阶段。臭鳊鱼鱼肉有效水分扩散系数(D_{eff})随干燥温度的升高而升高,在 $2.8848 \times 10^{-10} \sim 8.8663 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ 范围。根据 D_{eff} 与温度之间的关系,利用 Arrhenius 方程求得臭鳊鱼的活化能 E_a 为 27.9370 kJ/mol。将臭鳊鱼的热风干燥数据与 Page、Newton、Henderson and Pabis、Wang and Singh 4 种经验模型进行拟合,发现 Page 模型最适合用以预测臭鳊鱼热风干燥过程的水分变化。不同干燥温度对臭鳊鱼鱼肉的复水比、色泽、质构特性、多肽含量及抗氧化活性等影响显著,温度过低和过高都不利于臭鳊鱼鱼肉干燥加工后较好品质的形成,以 75 °C 热风干燥对样品的质构特性与综合品质较好。本研究结果为今后臭鳊鱼的工业化干燥加工及品质保持关键技术提供了理论依据。

参 考 文 献

[1] 吴永祥,俞昌浩,王婷婷,等. 传统发酵臭鳊鱼的

研究概述[J]. 食品与发酵工业, 2019, 45(19): 299–306.

WU Y X, YU C H, WANG T T, et al. Research progress on traditional fermentation of stinky mandarin fish[J]. Food and Fermentation Industries, 2019, 45(19): 299–306.

[2] BAO R Q, LIU S S, JI C F, et al. Shortening fermentation period and quality improvement of fermented fish, *Chouguiyu*, by co-inoculation of *Lactococcus lactis* M10 and *Weissella cibaria* M3 [J]. Frontiers in Microbiology, 2018, 9: 3003.

[3] YANG S, HE Y L, YAN Y, et al. Textural properties of stinky mandarin fish (*Siniperca chuatsi*) during fermentation: Effects of the state of moisture [J]. International Journal of Food Properties, 2017, 20(2): 1530–1538.

[4] 周迎芹, 鄢嫣, 林心萍, 等. 安徽省臭鳊鱼加工产业调研及分析[J]. 农产品加工, 2020(5): 67–71, 75. ZHOU Y Q, YAN Y, LIN X P, et al. Research and analysis on the processing industry of *Siniperca chuatsi* in Anhui Province [J]. Farm Products Processing, 2020(5): 67–71, 75.

[5] 赵柄舒, 王梦竹, 陈丹丹, 等. 臭鳊鱼中氨基酸产生菌的分离鉴定及其加工特性评价[J]. 食品与发酵

- 工业, 2020, 46(9): 195–200.
- ZHAO B S, WANG M Z, CHEN D D, et al. Isolation and identification of amino acid-producing bacteria from stinky mandarin fish and evaluation of its processing characteristics[J]. Food and Fermentation Industries, 2020, 46(9): 195–200.
- [6] 周迎芹, 杨明柳, 殷俊峰, 等. 清酒乳杆菌对臭鳃鱼食用品质及挥发性风味物质的影响[J]. 中国食品学报, 2021, 21(9): 160–168.
- ZHOU Y Q, YANG M L, YIN J F, et al. Effect of *Lactobacillus sakei* on edible quality and volatile flavor of stinky mandarin fish[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2021, 21(9): 160–168.
- [7] JI C F, ZHANG J B, LIN X P, et al. Metaproteomic analysis of microbiota in the fermented fish, *Siniperca chuatsi*[J]. LWT–Food Science and Technology, 2017, 80: 479–484.
- [8] DAI Z Y, LI Y, WU J J, et al. Diversity of lactic acid bacteria during fermentation of a traditional Chinese fish product, Chouguiyu (stinky mandarin fish)[J]. Journal of Food Science, 2013, 78(11): 1778–1783.
- [9] LI C P, WU J J, LI Y, et al. Identification of the aroma compounds in stinky mandarin fish (*Siniperca chuatsi*) and comparison of volatiles during fermentation and storage[J]. International Journal of Food Science and Technology, 2013, 48(11): 2429–2437.
- [10] 周迎芹, 鄢嫣, 殷俊峰, 等. 发酵方式对黄山臭鳃鱼菌群组成及挥发性物质的影响[J]. 肉类研究, 2019, 33(10): 36–43.
- ZHOU Y Q, YAN Y, YIN J F, et al. Effect of fermentation methods on microflora and volatile compounds in Huangshan smelly mandarin fish[J]. Meat Research, 2019, 33(10): 36–43.
- [11] 周明珠, 熊光权, 乔宇, 等. 不同干燥方式下鲶鱼片的干燥特性及风味变化[J]. 现代食品科技, 2021, 37(4): 242–251.
- ZHOU M Z, XIONG G Q, QIAO Y, et al. Drying characteristics and flavor changes of catfish fillets under different drying methods[J]. Modern Food Science and Technology, 2021, 37(4): 242–251.
- [12] ORTIZ J, LEMUS-MONDACA R, VEGA-GALVEZ A, et al. Influence of air-drying temperature on drying kinetics, colour, firmness and biochemical characteristics of Atlantic salmon (*Salmo salar* L.) fillets [J]. Food Chemistry, 2013, 139 (1/2/3/4): 162–169.
- [13] KORESE J K, ACHAGLINKAME M A, CHIKPAH S K. Effect of hot air temperature on drying kinetics of palmyra (*Borassus aethiopum* Mart.) seed-sprout-fleshy scale slices and quality attributes of its flour [J]. Journal of Agriculture and Food Research, 2021, 6: 100249.
- [14] LIU Y F, ZHANG Y L, WEI X Y, et al. Effect of radio frequency-assisted hot-air drying on drying kinetics and quality of Sichuan pepper (*Zanthoxylum bungeanum maxim.*) [J]. LWT–Food Science and Technology, 2021, 147(3): 111572.
- [15] KAYRAN S, DOYMAZ I. Determination of drying kinetics and physicochemical characterization of apricot pomace in hot-air dryer[J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2017, 130: 1163–1170.
- [16] 吴佰林, 薛勇, 王玉, 等. 鲛鱼热风干燥动力学及品质变化研究[J]. 食品科技, 2018, 43(10): 174–180.
- WU B L, XUE Y, WANG Y, et al. Study on the kinetics and quality changes of hot air drying of *Scomberomorus niphonius*[J]. Food Science and Technology, 2018, 43(10): 174–180.
- [17] ADEYEYE S A O. An overview of fish drying kinetics[J]. Nutrition & Food Science, 2019, 49(5): 886–902.
- [18] DING Y T, HU Y M, ZHANG J Y, et al. Mathematical models' establishment of hot-air drying for *Spratelloides gracilis* [J]. Journal of Aquatic Food Product Technology, 2012, 21(4): 380–392.
- [19] CHEN Q Q, BI J F, WU X Y, et al. Drying kinetics and quality attributes of jujube (*Zizyphus jujuba* Miller) slices dried by hot-air and short- and medium-wave infrared radiation[J]. LWT–Food Science and Technology, 2015, 64(2): 759–766.
- [20] 王近近, 袁海波, 滑金杰, 等. 足火工艺参数对工夫红茶热风干燥特性和品质的影响[J]. 农业工程学报, 2020, 36(10): 287–296.
- WANG J J, YUAN H B, HUA J J, et al. Effects of second-drying process parameters on the hot-air drying characteristics and quality of congou black tea[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2020, 36(10): 287–296.

- [21] GIRI S K, PRASAD S. Drying kinetics and rehydration characteristics of microwave-vacuum and convective hot-air dried mushrooms [J]. *Journal of Food Engineering*, 2007, 78(2): 512-521.
- [22] 吴永祥, 王婷婷, 张梦婷, 等. 徽州臭鳊鱼微生物多样性、品质特性及其酶解产物抗氧化能力分析[J]. *食品科学*, 2021, 42(2): 128-134.
- WU Y X, WANG T T, ZHANG M T, et al. Microbial diversity and quality characteristics of Huizhou stinky mandarin fish and the antioxidant activity of its enzymatic hydrolysates [J]. *Food Science*, 2021, 42(2): 128-134.
- [23] CHUA L Y W, CHUA B L, FIGIEL A, et al. Characterisation of the convective hot-air drying and vacuum microwave drying of *Cassia alata*: Antioxidant activity, essential oil volatile composition and quality studies [J]. *Molecules*, 2019, 24(8): 1625.
- [24] WU Y X, LU W W, GENG Y C, et al. Antioxidant, antimicrobial and anti-inflammatory activities of essential oil derived from the wild rhizome of *Atractylodes macrocephala* [J]. *Chemistry & Biodiversity*, 2020, 17(8): e2000268.
- [25] AIT BABAHMAD R, AGHRAZ A, BOUTAFDA A, et al. Chemical composition of essential oil of *Jatropha curcas* L. leaves and its antioxidant and antimicrobial activities [J]. *Industrial Crops and Products*, 2018, 121: 405-410.
- [26] 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拟[J]. *食品工业科技*, 2012, 33(3): 72-76, 80.
- JIA M, CONG H H, XUE C H, et al. Drying kinetics and mathematical modeling of abalone during the hot-air drying process [J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2012, 33(3): 72-76, 80.
- [27] 吴靖娜, 陈晓婷, 潘南, 等. 不同干燥方式下海马干燥特性及其数学模型[J]. *现代食品科技*, 2020, 36(12): 133-142.
- WU J N, CHEN X T, PAN N, et al. The drying characteristic and mathematical modeling of various drying method of seahorse [J]. *Modern Food Science and Technology*, 2020, 36(12): 133-142.
- [28] 周明, 徐明生, 陈金印, 等. ‘修水化红’甜橙皮热风干燥动力学及其品质特性分析[J]. *食品科学*, 2020, 41(11): 141-149.
- ZHOU M, XU M S, CHEN J Y, et al. Drying kinetics and quality characteristics of ‘Xiushui Huahong’ sweet orange peel dried by hot air [J]. *Food Science*, 2020, 41(11): 141-149.
- [29] 吴佰林, 薛勇, 李兆杰, 等. 温度模式对鲮鱼热泵干燥品质及动力学特性的影响[J]. *食品工业科技*, 2019, 40(4): 86-92, 99.
- WU B L, XUE Y, LI Z J, et al. Effect of temperature mode on quality and kinetic characteristics of *Scomberomorus niphonius* of heat pump drying [J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2019, 40(4): 86-92, 99.
- [30] 陈小雷, 胡王, 鲍俊杰, 等. 不同干燥方式对封鲮鱼品质的影响[J]. *水产科学*, 2019, 38(1): 98-103.
- CHEN X L, HU W, BAO J J, et al. Effects of drying methods on qualities of sealing white bream [J]. *Fisheries Science*, 2019, 38(1): 98-103.
- [31] 冯天依, 姜启兴, 杨方, 等. 不同干燥方式对鲢鱼肉品质变化的影响[J]. *食品科技*, 2019, 44(8): 120-125.
- FENG T Y, JIANG Q X, YANG F, et al. Effect of different drying processes on quality changes of silver carp (*Hypophthalmichthys molitrix*) [J]. *Food Science and Technology*, 2019, 44(8): 120-125.
- [32] YU D W, FENG T Y, JIANG Q X, et al. The change characteristics in moisture distribution, physical properties and protein denaturation of slightly salted silver carp (*Hypophthalmichthys molitrix*) filets during cold/hot air drying processing [J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2021, 137: 110466.
- [33] ZENG W C, ZHANG W C, ZHANG W H, et al. Antioxidant activity and characterization of bioactive polypeptides from bovine hair [J]. *Reactive & Functional Polymers*, 2013, 73(3): 573-578.
- [34] SUN Y N, HU X L, LI W X. Antioxidant, antitumor and immunostimulatory activities of the polypeptide from *Pleurotus eryngii* mycelium [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2017, 97: 323-330.

Hot-air Drying Kinetics and Quality Characteristics of Huangshan Stinky Mandarin Fish

Wu Yongxiang¹, Yu Changhao^{1,2}, Liu Gang¹, Dai Qiqi¹, Yang Liu³, Hu Xiaoqian^{1*}

(¹College of Life and Environment Science, Huangshan University, Huangshan 245041, Anhui

²School of Food Science and Pharmaceutical Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210023

³School of Food Science and Biological Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009)

Abstract In order to improve the hot-air drying efficiency and product quality, the drying characteristics and quality changes of Huangshan stinky mandarin fish were investigated at different drying temperatures (55, 65, 75, 85 °C and 95 °C). The results showed that the effective moisture diffusion coefficient (D_{eff}) of stinky mandarin fish ranged from $2.8848 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ to $8.8663 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ in the range of 55–95 °C. The higher temperature led to higher effective water diffusion coefficient, and its diffusion activation energy (E_a) was 27.9370 kJ/mol. The data fitting result showed that Page model could accurately describe the water migration during hot-air drying of stinky mandarin fish. Drying temperature had significant effect on the quality of stinky mandarin fish. When the temperature was 75 °C, the fish rehydration ratio was the largest at 3.03 ± 0.13 , the peptide content was the highest at $(3.79 \pm 0.25) \text{ g}/100 \text{ g}$, and with the most significant antioxidant effect. The texture characterization and overall quality of 75 °C were relatively better. This research preliminarily revealed the correlation between drying characteristics and quality of stinky mandarin fish, which could provide theoretical reference for the optimization of quality control during the drying process of Huangshan stinky mandarin fish.

Keywords stinky mandarin fish; hot-air drying kinetics; diffusion activation energy; texture properties; antioxidant