咸干鲅鱼自然风干过程中脂质变化

简　冲[1,2]，曹　荣[2]，王善宇[2]，王灵昭[1,*]
（1.江苏海洋大学食品科学与工程学院，江苏 连云港　222005；
2.中国水产科学研究院黄海水产研究所，山东 青岛　266071）

摘　要：为探究咸干鲅鱼风干加工过程中脂质变化情况，以青岛传统咸干鲅鱼为研究对象，分别对鲜鱼和不同风干时间样品总脂含量、脂质组成、脂肪酸组成、酸价（acid value，AV）、过氧化值（peroxide value，POV）、硫代巴比妥酸反应物（thiobarbituric acid reactive substances，TBARs）值进行检测。结果表明：鲜鲅鱼总脂含量为34.96 g/100 g（干基计），在风干过程中变化不显著（$P>0.05$）；与鲜鲅鱼相比，风干鲅鱼脂质组成发生明显变化，其中甘油三酯和磷脂的含量显著降低（$P<0.05$），而游离脂肪酸含量显著升高（$P<0.05$），胆固醇含量相对稳定。脂肪酸组成在加工过程总体变化较小，其中多不饱和脂肪酸相对含量在干制阶段有所减少。咸干鲅鱼风干加工过程中，POV、AV、TBARs值均呈上升趋势。咸干鲅鱼的风干加工过程会影响其脂质组分的相对含量，同时引起脂质的氧化分解。

关键词：咸干鲅鱼；风干；脂质组成；脂质氧化；脂肪酸

Changes in Lipid Profile of Dried Salted Spanish Mackerel during Natural Air Drying

JIAN Chong[1,2], CAO Rong[2], WANG Shanyu[2], WANG Lingzhao[1,*]
(1. School of Food Science and Engineering, Jiangsu Ocean University, Lianyungang　222005, China;
2. Yellow Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Qingdao　266071, China)

Abstract: This study was undertaken in order to explore the changes in the lipid profile of traditional Qingdao dried salted Spanish mackerel during natural air-drying. The total lipid content, lipid composition, fatty acid composition, acid value (AV), peroxide value (POV) and thiobarbituric acid reactive substances (TBARs) value of fresh fish and salted fish with different air-drying durations were measured. The results showed that the total lipid content of fresh Spanish mackerel was 34.96 g/100 g (on a dry basis), and did not significantly change during air drying ($P > 0.05$). There was a remarkable difference in lipid composition between dried and fresh Spanish mackerel; the contents of triglycerides and phospholipids significantly decreased compared with those in the fresh fish ($P < 0.05$); while the content of fatty acids significantly increased. However, the content of cholesterol did not vary between the two groups. Overall, fatty acid composition changed little during the air drying process except for a decrease in the proportion of polyunsaturated fatty acids. Moreover, POV, AV and TBARs values all showed an increasing trend. The air drying process affected the proportions of various lipid components and caused the oxidative breakdown of lipids.

Keywords: dried salted Spanish mackerel; air drying; lipid composition; lipid oxidation; fatty acid
DOI:10.7506/rlyj1001-8123-20210518-142
中图分类号：TS254.4　　文献标志码：A　　文章编号：1001-8123（2021）12-0001-06
引文格式：
简冲, 曹荣, 王善宇, 等. 咸干鲅鱼自然风干过程中脂质变化[J]. 肉类研究, 2021, 35(12): 1-6. DOI:10.7506/rlyj1001-8123-20210518-142.　http://www.rlyj.net.cn
JIAN Chong, CAO Rong, WANG Shanyu, et al. Changes in lipid profile of dried Salted spanish mackerel during natural air drying[J]. Meat Research, 2021, 35(12): 1-6. DOI:10.7506/rlyj1001-8123-20210518-142.　http://www.rlyj.net.cn

收稿日期：2021-05-18
基金项目：“十三五”国家重点研发计划重点专项（2018YFD0901004）
第一作者简介：简冲（1996—）（ORCID: 0000-0003-2981-131X），男，硕士研究生，研究方向为水产品加工。
E-mail: 909391902@qq.com
*通信作者简介：王灵昭（1976—）（ORCID: 0000-0003-4377-5941），男，副教授，博士，研究方向为食品加工与功能食品。
E-mail: wanglz@jou.edu.cn

鲅鱼，学名蓝点马鲛（*Scomberomorus niphonius*），体态呈纺锤形，背部为蓝黑色，布满蓝色斑点。鲅鱼广泛分布于我国渤海、黄海以及东海海域，其营养丰富、味道鲜美，深受消费者喜爱。

干鲅鱼是北方沿海地区的传统特色美食，青岛地区又称之为“甜晒鲅鱼”。“甜晒”并非指加糖，而是特指经自然风干、不加其他调味品的加工方式，产品口感劲道、咸鲜味美、风味独特。近年来，科研人员对咸干鲅鱼食用安全性[1]、菌群结构[2]、香气成分[3-4]、加工工艺[5]等进行了研究，而对加工过程中脂质变化的研究较少。由于水产品普遍富含多不饱和脂肪酸（polyunsaturated fatty acid，PUFA），因此其营养价值被认为优于畜禽类产品。受到加工过程中添加的原辅料、其本身脂质组成、加工条件等内外因素的影响[6]，水产品中的PUFA在加工贮运过程中易发生氧化水解。脂质氧化过程能够赋予产品特殊的风味[7]，但是当脂质氧化程度超过一定临界值时，水产品则会产生令人不愉悦的异味，同时营养价值降低，最终影响其感官品质。

脂质变化过程复杂，对水产品的感官品质具有重要的意义，因此在水产品加工及贮运过程中的脂质变化备受科研工作者的关注。例如，王建辉等[8]对草鱼冷藏期间脂质的氧化水解进行研究，发现脂肪酶及脂肪氧化酶在脂质氧化水解中发挥主要作用；Chung等[9]研究烤制前后鲭鱼的脂质组成，发现烤制后鲭鱼的脂质发生了热降解，同时还伴随着PUFA的降解，使得鲭鱼营养价值降低；蔡秋杏等[10]研究黄花鱼的脂肪氧化酶，发现盐腌制后，脂肪氧化酶的活性被抑制，但脂质氧化并没有被抑制，表明脂质氧化的主要原因并不是酶促反应。

本研究以传统自然风干的咸干鲅鱼为研究对象，对其风干过程中总脂含量、主要脂质组成、脂肪酸组成、脂质氧化情况进行分析，以期为鲅鱼生产加工过程品质控制提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

鲜鲅鱼购于青岛市市南区埠东海鲜市场，选取形态完整、体长（35±5）cm的个体进行后续实验。

总胆固醇试剂盒、甘油三酯试剂盒　中生北控生物科技股份有限公司；氯仿、甲醇、硝酸、高氯酸、钼酸钠、无水硫酸钠、正庚烷、硫氰酸钾、硫酸联氨、浓硫酸、1,1,3,4-四乙氧基丙烷、TritonX100等均为分析纯　青岛青科赛尔生物技术有限公司。

1.2 仪器与设备

UV-2802型紫外-可见分光光度计　尤尼柯仪器（上海）有限公司；TA-XT Plus质构仪　英国Stable Micro System公司；5975C/6890型气相色谱-质谱联用仪　美国安捷伦公司。

1.3 方法

1.3.1 干鲅鱼样品制备与采集

将新鲜鲅鱼用蒸馏水清洗，用刀具沿背鳍切入顺延至尾部切开，去除鳃和内脏，冲洗干净，在鱼体表面均匀涂抹一层食盐，头部朝下悬挂于无阳光直射的通风处自然风干。风干过程环境温度1～7 ℃，环境湿度约40%。每2 d取鲅鱼样品3 条，去除头、尾和骨，取鱼肉检测各项指标。

1.3.2 水分含量测定

参照GB/T 5009—2003《食品中水分的测定》，采用常压干燥法测定。

1.3.3 质构特性测定

将鲅鱼样品切成3 cm×3 cm×2 cm小块，使用质构仪测定。测定参数：探头P/50，压缩比60%，循环间隔5 s，测试速率2 mm/s，触发力20 g。

1.3.4 总脂含量测定

参照Vasta等[11]的方法，称取制备好的鲅鱼样品约100 g，绞碎，加入氯仿-甲醇（2∶1，*V*/*V*）混合液1 500 mL，磁力搅拌6～8 h，加入适当比例的生理盐水，搅拌混合后静置过夜。将混合液通过纱网过滤，收集滤液，得到粗滤液，再将粗滤液装入分液漏斗，取下层氯仿层过无水硫酸钠去除甲醇及水分，旋转蒸发至干，即得样品脂质，经计算后得到总脂含量。

1.3.5 脂质组成测定

磷脂含量：参照GB/T 5537—2008《粮油检验 磷脂含量的测定》，采用钼蓝比色法测定。取适量总脂样品加入消化管内，同时加入20 mL消化液（硝酸与高氯酸按体积比4∶1混合）进行湿法消化[12]，以消化液无黄烟且液体基本呈无色或微黄状态为消化终点。

甘油三酯含量和总胆固含量：取适量总脂样品，使用TritonX100-异丙醇（1∶9，*m*/*V*）溶液稀释至适当倍数[13]，根据试剂盒说明书步骤测定总脂中甘油三酯含量和总胆固含量。

游离脂肪酸含量：采用铜皂比色法[14]，取0.1 g总脂样品用氯仿定容至50 mL，取1 mL定容后的溶液于10 mL离心管内氮气吹干，然后加入3 mL正庚烷溶解萃取，密封后振荡1 min，加入1 mL铜试剂，再次振荡2 min后室温静置10 min，取样品溶液上层正庚烷层，用紫外-可见分光光度计于715 nm波长处测定吸光度。按上述方法，以油酸为参照样品，以吸光度为纵坐标，油酸溶液浓度为横坐标，绘制标准曲线。根据标准曲线方程计算游离脂肪酸含量。

1.3.6 脂肪酸组成分析

参照GB 5009.168—2016《食品安全国家标准 食品中脂肪酸的测定》测定脂肪酸组成，并作适当修改。鲅鱼样品经盐酸水解和乙醇、乙醚石油醚混合液提取后，加入2 mL 2 g/100 mL氢氧化钠溶液（甲醇配制），85 ℃水浴30 min，然后加入3 mL 14 g/100 mL三氟化硼溶液（甲醇配制），继续水浴30 min。水浴完成后降至室温，在离心管中加入1 mL正己烷，振荡萃取2 min，静置1 h。取上层清液100 μL，用正己烷定容到1 mL，过0.45 μm滤膜，上机待测。

气相色谱条件：TG-5MS毛细管柱（30 m×0.25 mm，0.25 μm），载气（He）流速1.2 mL/min，进样温度290 ℃，检测器温度250 ℃；升温程序：先以80 ℃保持1 min，然后以10 ℃/min匀速升温至200 ℃，再以5 ℃/min匀速升温至250 ℃，最后以2 ℃/min匀速升温至270 ℃，保持3 min。

质谱条件：电子电离源，离子源温度280 ℃，电离能量70 eV，质量扫描范围*m/z* 30～400。

1.3.7 脂质氧化程度分析

参照GB 5009.229—2016《食品安全国家标准 食品中酸价的测定》中热乙醇指示剂滴定法[16]测定鲅鱼总脂样品酸价（acid value，AV）。参照GB/T 5009.37—2003《食用植物油卫生标准的分析方法》中比色法[17]测定鲅鱼总脂样品过氧化值（peroxide value，POV）。参照GB 5009.181—2016《食品安全国家标准 食品中丙二醛的测定》中分光光度法[18]测定鲅鱼总脂样品硫代巴比妥酸反应物（thiobarbituric acid reactive substances，TBARs）值。

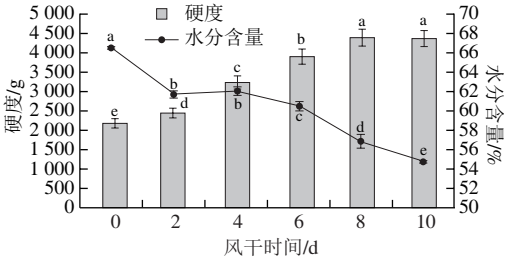
1.4 数据处理

实验测定均取3 条鲅鱼，平行测定2 次，结果以平均值±标准差表示。组间差异性分析采用*t*-检验，利用Excel软件作图。

2 结果与分析

2.1 咸干鲅鱼风干过程中水分含量和质构特性的变化

水分含量的变化对于咸干鲅鱼风干加工具有重要意义，是咸干鲅鱼加工过程的一个重要指标，与咸干鲅鱼的感官及质构品质密切相关[19]。硬度是指样品达到一定形变所必需的力[20]，反映了食品口感的优劣，过高的硬度表明食品口感偏硬，当硬度过低时，则表明食品口感偏软，因此，食品适中的硬度能带来良好的口感体验。当食品中水分含量偏高时，食品质地偏软，口感无嚼劲，并且不利于贮藏；当食品中的水分含量偏低时，食品质地过硬，口感偏硬、难嚼，从而影响其品质[21]。



小写字母不同，表示同一指标不同风干时间差异显著（$P<0.05$）。下同。

图1 咸干鲅鱼风干过程水分含量和硬度变化

Fig. 1 Changes in water content and hardness of dried salted Spanish mackerel during air drying

由图1可知，鲜鲅鱼硬度为2 192 g，水分含量为66.57%。风干过程中，水分含量在风干0～2 d显著降低（$P<0.05$），在2～4 d变化不大，这可能与此阶段内部水分向表面迁移有关，从风干第4天开始，水分含量持续降低，风干第10天时降至54.75%。水分含量降低伴随着硬度逐渐增大（$P<0.05$），这与鲅鱼风干过程中肌原纤维收缩、蛋白质变性等有关，风干第10天时，鲅鱼硬度为4 206 g，此时咸干鲅鱼肉质柔韧，富有嚼劲，食用口感较佳。

2.2 咸干鲅鱼风干过程中总脂含量和主要脂质组分变化

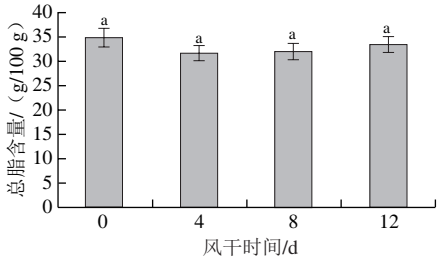


图2 咸干鲅鱼风干过程中总脂含量变化（干基）

Fig. 2 Changes in total lipid content in dried salted Spanish mackerel during air drying (on a dry mass basis)

鲅鱼体内含有大量暗色肉，是一种脂肪含量较高的鱼类。由图2可知，鲜鲅鱼的总脂含量高达34.95 g/100 g（以干基计），与汪秋宽等[22]的分析结果类似。在风干过程中，总脂含量略有降低，但与鲜鲅鱼相比无显著差异。

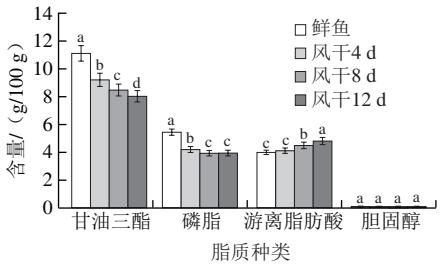


图3 咸干鲅鱼风干过程脂质组成含量变化（干基）

Fig. 3 Changes in lipid composition during air drying of dried salty Spanish fish (on a dry mass basis)

鲅鱼脂质主要由甘油三酯、磷脂和游离脂肪酸组成，其中甘油三酯是主要成分。由图3可知，鲜鲅鱼中甘油三酯含量为11.11 g/100 g。在风干过程中，甘油三酯含量显著降低（$P<0.05$），至风干12 d，甘油三酯含量降低至8.03 g/100 g，这可能与风干过程“出油”（油脂溢出至鱼体表面）以及甘油三酯部分发生水解有关。磷脂是鲅鱼脂质中的另一主要组分。水产品磷脂含量较高，是其区别于禽畜肉的主要特点之一。磷脂具有重要的生理功能，但同时也易发生氧化分解，适度氧化有利于风味形成，而过度氧化则会引起酸败[23-25]。鲜鲅鱼中磷脂含量为5.41 g/100 g，风干过程中磷脂含量降低不明显，至风干12 d时，磷脂含量降低至3.95 g/100 g。游离脂肪酸含量在风干过程中呈上升趋势，风干12 d，游离脂肪酸含量为4.81 g/100 g，显著高于鲜鲅鱼（$P<0.05$），这与甘油三酯和磷脂的分解有关[26]。胆固醇普遍存在于动物体内，是动物组织细胞不可缺少的物质[27]。鲅鱼脂质组成中，胆固醇含量相对较低，鲜鲅鱼中为0.17 g/100 g，且风干过程中比较稳定，含量变化不大。

2.3 咸干鲅鱼风干过程中脂肪酸组成变化

表1 咸干鲅鱼风干过程中脂肪酸组成及相对含量变化

Table 1 Changes in fatty acid composition in dried salted Spanish mackerel during air drying

%

脂肪酸	风干时间/d			
	0	4	8	12
$C_{12:0}$	0.050±0.003^a	0.053±0.003^a	0.038±0.002^b	0.039±0.002^b
$C_{13:0}$	0.057±0.003^a	0.041±0.002^b	0.025±0.001^c	0.026±0.001^c
$C_{14:0}$	4.219±0.211^a	3.098±0.155^b	3.255±0.168^b	2.911±0.146^b
$C_{14:1}$	0.048±0.002^b	0.042±0.002^b	0.064±0.003^a	0.044±0.002^b
$C_{15:0}$	0.803±0.040^a	0.541±0.027^b	0.574±0.029^b	0.573±0.029^b
$C_{16:0}$	24.758±1.238^c	24.196±1.210^c	25.573±1.279^b	26.446±1.322^a
$C_{16:1}$	5.388±0.269^b	5.172±0.259^b	6.222±0.311^a	5.288±0.264^b
$C_{17:0}$	0.729±0.036^a	0.597±0.030^b	0.517±0.026^b	0.588±0.029^b
$C_{18:0}$	6.194±0.310^a	6.152±0.313^a	5.962±0.298^c	6.785±0.339^b
$C_{18:1\ n\text{-}9c}$	24.595±1.23^b	30.841±1.542^a	30.753±1.538^a	30.346±1.517^a
$C_{18:2\ n\text{-}6c}$	1.145±0.062^a	0.908±0.040^a	1.043±0.052^a	0.991±0.045^a
$C_{18:3\ n\text{-}6}$	0.095±0.005^a	0.071±0.004^b	0.067±0.003^b	0.068±0.003^b
$C_{18:3\ n\text{-}3}$	0.890±0.045^a	0.576±0.029^b	0.923±0.046^a	0.809±0.040^a
$C_{20:0}$	0.631±0.032^b	0.867±0.043^a	0.390±0.020^c	0.418±0.021^c
$C_{20:1}$	2.412±0.121^a	1.993±0.100^b	1.758±0.088^c	1.709±0.085^c
$C_{20:2}$	0.265±0.013^a	0.196±0.010^b	0.155±0.008^c	0.182±0.009^b
$C_{20:3\ n\text{-}6}$	0.078±0.004^a	0.069±0.003^b	0.061±0.003^b	0.068±0.003^b
$C_{20:3\ n\text{-}3}$	0.188±0.009^a	0.161±0.008^b	0.145±0.007^c	0.166±0.008^b
$C_{20:4\ n\text{-}6}$	0.526±0.026^a	0.419±0.021^b	0.367±0.018^c	0.385±0.019^c
$C_{20:5\ n\text{-}3}$	4.961±0.248^a	4.448±0.222^b	4.275±0.214^b	4.312±0.216^b
$C_{21:0}$	0.093±0.005^b	0.072±0.004^a	0.054±0.003^b	0.061±0.003^b
$C_{22:0}$	0.269±0.013^a	0.268±0.013^a	0.224±0.011^b	0.286±0.014^a
$C_{22:1\ n\text{-}9}$	2.864±0.143^a	1.826±0.091^b	1.348±0.067^c	1.251±0.063^c
$C_{22:2}$	0.038±0.002^a	0.024±0.001^b	0.028±0.001^b	0.025±0.001^b
$C_{22:6\ n\text{-}3}$	17.240±0.862^a	16.118±0.806^b	14.763±0.738^c	14.997±0.750^c
$C_{23:0}$	0.107±0.005^a	0.095±0.005^a	0.095±0.005^a	0.102±0.005^a
$C_{24:0}$	0.265±0.013^b	0.288±0.014^b	0.277±0.014^b	0.315±0.016^a
$C_{24:1}$	0.993±0.050^a	0.895±0.043^a	0.944±0.047^a	0.904±0.045^a
SFA	38.175±1.909^a	37.368±1.818^a	37.084±1.854^a	38.558±1.928^a
MUFA	36.301±1.815^b	40.741±2.037^a	41.090±2.055^a	39.542±1.977^a
PUFA	25.524±1.276^a	22.892±1.145^b	21.827±1.091^b	21.899±1.095^b

注：以湿基计；同行小写字母不同，表示差异显著（$P<0.05$）。

脂肪酸含量和组成是影响鲅鱼营养价值、风味以及品质稳定性的重要因素。如表1所示，鲅鱼风干过程中共检出28 种脂肪酸。其中，PUFA共检出10 种，以二十二碳六烯酸（docosahexaenoic acid，DHA）和二十碳五烯酸（eicosapentaenoic acid，EPA）相对含量较高；饱和脂肪酸（saturated fatty acid，SFA）检出12 种，以棕榈酸（$C_{16:0}$）和硬脂酸（$C_{18:0}$）相对含量较高；单不饱和脂肪酸（monounsaturated fatty acid，MUFA）检出6 种，以油酸（$C_{18:1\ n\text{-}9c}$）和棕榈油酸（$C_{16:1}$）相对含量较高。在3 类脂肪酸中PUFA比例相对较低，SFA及MUFA相对含量较高。其中PUFA中的EPA和DHA是人体生长发育必不可少的脂肪酸，同时也具有一定的保健功能，如降血脂、降血压等功效[28]。

随风干时间的延长，SFA中$C_{14:0}$相对含量下降，$C_{16:0}$相对含量有所增加，使得SFA在总脂肪酸中占比变化不大；PUFA相对含量有所下降，以油酸（$C_{18:1\ n\text{-}9c}$）变化最为明显，这主要因为其含有较多的不饱和双键，在风干加工过程中双键断裂生成次级产物。不饱和脂肪酸容易受到自由基攻击发生氧化，分解生成次级产物，一部分在特定条件下还会生成饱和脂肪酸[29,30-32]，从而导致其含量下降。MUFA相对含量总体上有所上升，以$C_{18:1\ n\text{-}9c}$最为明显。

2.4 咸干鲅鱼风干过程中脂质氧化水解情况

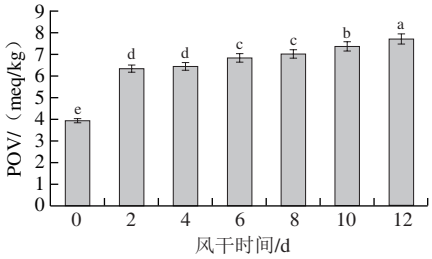


图4 咸干鲅鱼风干过程中POV变化

Fig. 4 Changes in POV in dried salted Spanish mackerel during air drying

在咸干鲅鱼风干过程中，POV呈上升趋势。POV是反映脂质初级氧化产物的指标。由图4可知，鲜鲅鱼风干加工2 d时其POV显著升高（$P<0.05$），这与王琦等[33]的研究结果一致。风干2～12 d期间POV继续升高，但上升幅度有所减缓。在风干初期，脂质氧化分解导致POV迅速上升，随着风干继续进行，脂肪氧合酶活性降低[34]，氢过氧化物进一步氧化生产醛、醇等二级氧化产物，减缓了POV的上升速率[35]。

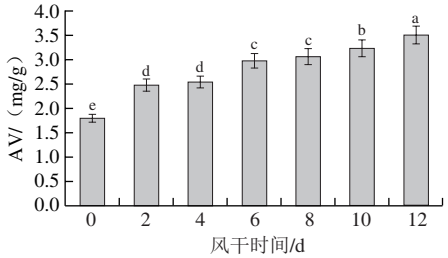


图 5 咸干鲅鱼风干过程中AV变化

Fig. 5 Changes in AV of dried salted Spanish mackerel during air drying

AV反映了样品中游离脂肪酸的含量，是衡量脂质水解程度的指标[36]。由图5可知，咸干鲅鱼风干过程中AV呈上升趋势。加工过程中AV由风干0 d的1.79 mg/g升高至风干12 d的3.50 mg/g，差异显著（$P<0.05$），这主要与脂质中的磷脂及甘油三酯水解生成游离脂肪酸有关。此外，脂质的水解受多种因素影响，如水分的含量及分布、内源酶活性及环境温度、湿度等，使得其水解速率并不稳定[37-38]。

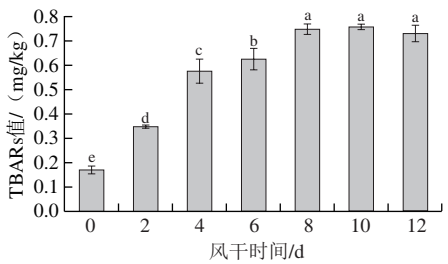


图 6 咸干鲅鱼风干过程中TBARs值变化

Fig. 6 Changes in TBARs value in dried salted Spanish mackerel during air drying

TBARs值是评价脂质次级氧化程度的指标，以产生的丙二醛含量表示[39-40]。由图6可知，随着风干过程的进行，咸干鲅鱼样品中TBARs值呈上升趋势，由鲜鲅鱼的0.167 mg/kg经风干12 d后上升至0.725 mg/kg。咸干鲅鱼加工过程中，脂质氧化产生过氧化物，随着加工的继续，过氧化物进一步分解[41]。Ersoy等[42]认为鲜、冻水产品的TBARs值不大于8.0 mg/kg时适宜食用，风干加工后的咸干鲅鱼的TBARs值为0.725 mg/kg，符合推荐范围。

3 结 论

咸干鲅鱼风干加工过程中，总脂含量变化不大，但总脂样品中脂质组分的相对含量变化显著。脂质组成中甘油三酯和磷脂含量显著降低，而游离脂肪酸含量显著上升，胆固醇因其较为稳定在加工过程中含量相对稳定。咸干鲅鱼脂肪酸组成中以不饱和脂肪酸相对含量较高，风干过程PUFA发生氧化分解，造成其相对含量下降。鲜鲅鱼经风干加工后POV、AV、TBARs值均显著升高，说明风干过程脂质发生氧化分解，这对于咸干鲅鱼的营养价值和风味形成有重要意义，后续研究应重点关注。

参考文献：

[1] 赵延宁, 王玉, 王睿迪, 等. 市售咸干鲅鱼的安全性分析[J]. 食品与发酵工业, 2019, 45(14): 215-220. DOI:10.13995/j.cnki.11-1802/ts.019258

[2] 王睿迪, 刘胜男, 王玉, 等. 咸干蓝点马鲛品质特征与优势菌群分析[J]. 渔业科学进展, 2019, 40(2): 141-147. DOI:10.19663/j.issn2095-9869.20180814002.

[3] 王玉, 赵延宁, 薛勇, 等. 基于电子鼻与SPME-GC-MS法分析咸鲅鱼加工过程挥发性风味成分变化[J]. 食品工业科技, 2018, 39(24): 266-272. DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2018.24.045.

[4] WU S, YANG J, DONG H, et al. Key aroma compounds of Chinese dry-cured Spanish mackerel (*Scomberomorus niphonius*) and their potential metabolic mechanisms[J]. Food Chemistry, 2020, 342(3): 128381. DOI:10.1016/j.foodchem.2020.128381.

[5] 胡梦月, 赵延宁, 薛勇, 等. 土豆烧咸干鲅鱼软罐头加工工艺[J]. 食品工业, 2020, 41(2): 5-7.

[6] GLADYSHEV M I, ANISHCHENKO O V, MAKHUTOVA O N, et al. The benefit-risk analysis of omega-3 polyunsaturated fatty acids and heavy metals in seven smoked fish species from Siberia[J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2020, 90: 103489. DOI:10.1016/j.jfca.2020.103489.

[7] 王兆明, 贺稚非, 李洪军. 脂质和蛋白质氧化对肉品品质影响及交互氧化机制研究进展[J]. 食品科学, 2018, 39(11): 295-301. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201811045.

[8] 王建辉, 刘冬敏, 刘永乐, 等. 冷藏期间草鱼肌肉脂质降解的影响因素分析[J]. 食品科学, 2013, 34(18): 276-279. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201318057.

[9] CHUNG H, CHOI A, CHO I H, et al. Changes in fatty acids and volatile components in mackerel by broiling[J]. European Journal of Lipid Science & Technology, 2015, 113(12): 1481-1490. DOI:10.1002/ejlt.201000510.

[10] 蔡秋杏, 吴燕燕, 李来好, 等. 黄花鱼腌制加工过程的脂肪氧化分析[J]. 食品安全质量检测学报, 2014(12): 4079-4084.

[11] VASTA V, PAGANO R, LUCIANO G, et al. Effect of morning vs. afternoon grazing on intramuscular fatty acid composition in lamb[J]. Meat Science, 2011, 90: 93-98. DOI:10.1016/j.meatsci.2011.06.009.

[12] 万楚筠, 黄凤洪, 李文林. 抗坏血酸-钼蓝光度法测定油脂中磷脂含量的研究[J]. 中国油脂, 2006, 31(4): 46-49. DOI:10.3321/j.issn:1003-7969.2006.04.013.

[13] 王善宇, 刘鑫, 曹荣, 等. 即食虾干加工过程脂质变化研究[J]. 上海海洋大学学报, 2021, 30(5): 932-939. DOI:10.12024/JSOU.20200703113.

[14] 孙甜甜, 薛长湖, 薛勇, 等. 南极磷虾脂质提取方法的比较[J]. 食品工业科技, 2012, 33(16): 115-117; 121.

[15] 国家卫生和计划生育委员会, 国家食品药品监督管理总局. 食品安全国家标准 食品中脂肪酸的测定: GB 5009.168—2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.

[16] 国家卫生和计划生育委员会. 食品安全国家标准 食品中酸价的测定: GB 5009.229—2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.

[17] 卫生部, 中国国家标准化管理委员会. 食品安全国家标准 食品中过氧化值的测定: GB/T 5009.37—2003[S]. 北京: 中国标准出版社, 2003.

[18] 国家卫生和计划生育委员会. 食品安全国家标准 食品中丙二醛的测定: GB 5009.181—2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.

[19] 刘霞, 江宁, 刘春泉, 等. 预处理对微波联合气流膨化干燥黑毛豆仁品质的影响[J]. 核农学报, 2011, 25(6): 1216-1220.

[20] 曹荣, 刘淇, 殷邦忠, 等. 虾仁TPA质构分析及不同熟制加工方式对其品质的影响[J]. 食品研究与开发, 2010, 31(6): 1-5. DOI:10.3969/j.issn.1005-6521.2010.06.001.

[21] 胡梦月, 王善宇, 薛勇, 等. 即食虾干加工过程风味变化[J]. 中国渔业质量与标准, 2020, 10(6): 10-16. DOI:10.3969/j.issn.2095-1833.2020.06.002.

[22] 汪秋宽, 陈炜, 马悦欣, 等. 液熏蓝点马鲛鱼片的抗氧化研究[J]. 大连水产学院学报, 2002, 17(3): 262-266.

[23] PRIOLO A, MICOL D, AGABRIEL J. Effects of grass feeding systems on ruminant meat colour and flavour. A review[J]. Animal Research, 2001, 50(3): 185-200. DOI:10.1051/animres:2001125.

[24] 罗嘉, 蒲强, 余霞, 等. 猪肌内脂肪沉积机理研究进展[J]. 猪业科学, 2014(10): 114-116. DOI:10.3969/j.issn.1673-5358.2014.10.032.

[25] 闫海鹏, 朱虹, 吴菊清, 等. 脂肪酸与肉的品质[J]. 肉类研究, 2009, 23(7): 21-25.

[26] 王艳. 强化高温风干成熟工艺对中式培根脂质分解氧化及品质风味影响的研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2012.

[27] 何小雷. 皖南黑猪血液胆固醇含量相关候选基因研究[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2013.

[28] 邢旭文, 张宪中. 斑驳尖塘鳢肌肉营养成分与品质的评价[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2006, 36(1): 107-111. DOI:10.3969/j.issn.1672-5174.2006.01.021.

[29] 郭丽莉, 李昌模, 若文靓, 等. 高温条件下食用油脂脂肪酸的变化[J]. 中国油脂, 2011, 36(10): 16-19.

[30] 王庆玲. 禽蛋脂质分析及鸡蛋贮藏过程中脂质变化规律的研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2015.

[31] 曹松敏, 吴燕燕, 李来好, 等. 蓝圆鲹传统腌干过程中内源脂肪酶和脂质降解氧化的变化分析[J]. 食品科学, 2017, 38(7): 36-42. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201707007.

[32] 顾赛麒, 唐锦晶, 周绪霞, 等. 腌腊鱼传统日晒干制过程中品质变化与香气形成[J]. 食品科学, 2019, 40(17): 36-44. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20180716-201.

[33] 王琦, 岳大鹏, 王然然, 等. 风干金鲳鱼制品加工过程中脂质氧化和挥发性成分的变化[J]. 食品工业科技, 2021, 42(1): 54-60. DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2019100005.

[34] 吴燕燕, 曹松敏, 李来好, 等. 比较2 种蓝圆鲹腌干工艺中脂质氧化与挥发性风味物质形成的关系[J]. 食品科学, 2017, 38(6): 165-172. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201706026.

[35] 瞿丞, 贺稚非, 王兆明, 等. 不同食盐添加量腌制对鸡肉脂质氧化、蛋白质氧化及食用品质的影响[J]. 食品科学, 2020, 41(16): 77-85. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20190504-012.

[36] 顾赛麒, 周洪鑫, 郑皓铭, 等. 干制方式对腌腊草鱼脂肪氧化和挥发性风味成分的影响[J]. 食品科学, 2018, 39(21): 1-10. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201821001.

[37] WARDHANI D, FUCIÑOS P, VÁZQUEZ J, et al. Inhibition kinetics of lipid oxidation of model foods by using antioxidant extract of fermented soybeans[J]. Food Chemistry, 2013, 139: 837-844. DOI:10.1016/j.foodchem.2013.01.049.

[38] 王悦齐, 吴燕燕, 李来好, 等. 抗氧化乳酸菌对发酵腌干带鱼脂肪氧化的影响及其主成分分析[J]. 食品科学, 2017, 38(8): 231-238. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201708036.

[39] RUSSO A, CAPUTO S, PANTUSA M, et al. Amino acids as modulators of lipoxygenase oxidation mechanism. The identification and structural characterization of spin adducts intermediates by electron spin resonance and tandem mass spectrometry[J]. Food Chemistry, 2010, 119(2): 533-538. DOI:10.1016/j.foodchem.2009.06.065.

[40] 曹文明, 王鑫, 包杰, 等. 油脂氧化评价研究进展[J]. 粮食与油脂, 2013, 26(4): 1-5.

[41] 程珂萌, 周昌瑜, 潘道东, 等. 低温风干型酱鸭加工过程中脂质氧化特性[J]. 食品科学, 2018, 39(12): 219-225. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201812034.

[42] ERSOY B, AKSAN E, ÖZEREN A. The effect of thawing methods on the quality of eels (*Anguilla anguilla*)[J]. Food Chemistry, 2008, 111: 377-380. DOI:10.1016/j.foodchem.2008.03.081.