

DOI: 10.19663/j.issn2095-9869.20200229001

http://www.yykxjz.cn/

赵玲, 曹荣, 王联珠, 刘淇, 刘胜男. 条斑紫菜烤制前后特征风味变化研究. 渔业科学进展, 2021, 42(4): 199–207
ZHAO L, CAO R, WANG L Z, LIU Q, LIU S N. Study on the characteristic flavor change of *Porphyra yezoensis* before and after roasting. Progress in Fishery Sciences, 2021, 42(4): 199–207

条斑紫菜烤制前后特征风味变化研究*

赵玲 曹荣 王联珠 刘淇^① 刘胜男

(中国水产科学研究院黄海水产研究所 山东 青岛 266071)

摘要 为探讨烤制对条斑紫菜(*Porphyra yezoensis*)主要风味物质的影响, 研究烤制前后条斑紫菜挥发性成分的变化。采用电子鼻、FlavourSpec[®]风味分析仪和固相微萃取-气相色谱-质谱联用(SPME-GC-MS)对比分析条斑紫菜在烤制前后挥发性风味物质的组成变化。电子鼻分析结果显示, 条斑紫菜烤制前后的挥发性成分存在一定差异, 二者的第一、二主成分相同, 均为烃类、含氮类物质, 但其对主成分的贡献率不同。风味分析表明, 条斑紫菜烤制前后挥发性成分差异显著, 烤制后出现吡嗪类特征风味物质。SPME-GC-MS分析表明, 醛类、醇类、酮类和烷烃类构成了条斑紫菜的主体风味, 烤制后吡嗪、甲基吡嗪、2,5-二甲基-吡嗪、2-乙基-5-甲基-吡嗪、3-乙基-2,5-二甲基-吡嗪和2-乙基-6-甲基-吡嗪等物质含量显著增加。综上所述, 经过烤制, 构成条斑紫菜的主要风味物质发生了明显变化, 其中吡嗪类物质的相对含量显著增加。

关键词 条斑紫菜; 烤制; 风味变化

中图分类号 S985.4 文献标识码 A 文章编号 2095-9869(2021)04-0199-09

条斑紫菜(*Porphyra yezoensis*)隶属于红藻门(Rhodophyta)、原红藻纲(Protofloridaeophyceae)、红毛菜目(Bangiales)、红毛菜科(Bangiaceae)、紫菜属(*Pyropia*), 富含蛋白质、多糖、微量元素等, 极富营养价值及药用价值(王亚等, 2012; 赵玲等, 2018)。紫菜因其独特的风味和丰富的营养而深受广大消费者喜爱。随着经济发展和消费水平的提高, 消费者对风味的要求也随之提高, 尤其对以烤、调为主的紫菜加工品, 不仅以色泽、味感等评价产品质量, 并且将香型等嗅觉感受作为品质的重要评价指标(胡传明等, 2011)。焙烤是一种重要的食品加工方法, 可以改进食品的风味、色泽和质地, 促进食欲(吴巧, 2012)。条斑紫菜经过烤制后, 一般用于寿司料理、食品加工等, 也可直接食用。

近年来, 气相离子迁移谱仪(曹荣等, 2019)、人

工嗅辨器(Misry *et al*, 1996)以及电子鼻(卞瑞姣等, 2017)等检测技术的进步, 使得特征风味物质的研究成为可能。科研工作者对多种水产品的挥发性物质进行了研究, 且取得了理想的研究进展(高瑞昌等, 2013; 杨欣怡等, 2015; 王当丰等, 2016; 曹荣等, 2019), 绿藻、褐藻及红藻等多种海藻的挥发性物质已被分析鉴定(Akakabe *et al*, 2003; Boonprab *et al*, 2006), 但对紫菜挥发性物质的研究较少(胡传明等, 2011; 曹荣等, 2019; 姚兴存等, 2015), 且缺少对烤制前后条斑紫菜主要风味物质变化的研究。

本研究以条斑紫菜为研究对象, 分别采用电子鼻、FlavourSpec[®]风味分析仪和固相微萃取-气相色谱-质谱联用(SPME-GC-MS)对主要挥发性风味物质进行检测, 对比分析条斑紫菜在烤制前后挥发性成分的变化, 以为条斑紫菜加工品的品质评定提供参考。

* 财政部和农业农村部: 国家现代农业产业技术体系资助 [This work was supported by China Agriculture Research System of MOF and MARA]. 赵玲, E-mail: zhaoling@ysfri.ac.cn

① 通讯作者: 刘淇, 研究员, E-mail: liuqi@ysfri.ac.cn

收稿日期: 2020-02-29, 收修改稿日期: 2020-04-06

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

条斑紫菜鲜菜于2019年1月8日采自江苏省如东内沙海域,由江苏省南通海旅水产品有限公司加工成干条斑紫菜,再通过远红外线烤箱三段式焙烤获得烤制条斑紫菜,烤制过程中未加任何食品添加剂。

PEN3 便携式电子鼻,德国Airsense公司; FlavourSpec[®]风味分析仪,德国G.A.S公司;气相色谱-质谱联用仪(7980A/5975C),美国Agilent公司;固相微萃取装置(DVB/CAR/PDMS 50/30 μm),美国Supelco公司。

1.2 方法

1.2.1 电子鼻检测 分别称取1.0 g剪碎的烤制前条斑紫菜和烤制后的条斑紫菜,置于20 mL顶空瓶中,加盖密封,依次用电子鼻进行检测,电子鼻的10个传感器所对应的代表性化合物类型见表1。测定参数:清洗时间100 s,气体流速200 mL/min,数据采集时间80 s。采用WinMaster软件进行数据的采集与处理,分析方法包括主成分分析(PCA)、线性判别分析(LDA)和负荷加载分析(Loadings)。

表1 电子鼻传感器构成及其性能
Tab.1 Composition of sensors in electronic nose and performance

序号 Number	传感器 Sensor	性能描述 Performance
1	W1C	芳香成分
2	W5S	灵敏度大,对氮氧化物很灵敏
3	W3C	氨水,对芳香成分灵敏
4	W6S	主要对氢气有选择性
5	W5C	烷烃芳香成分
6	W1S	对甲烷灵敏
7	W1W	对硫化物灵敏
8	W2S	对乙醇灵敏
9	W2W	芳香成分,对有机硫化物灵敏
10	W3S	对烷烃灵敏

1.2.2 挥发性成分检测 分别称取1.0 g剪碎的样品置于20 mL顶空瓶中,60 $^{\circ}\text{C}$ 孵育10 min后进样。采用仪器配套的分析软件(LAV和Reporter、Gallery Plot、Dynamic PCA三款插件以及GC \times IMS library search)分析数据。

1.2.3 SPME-GC-MS 检测 参照王玉等(2018)的方法进行测定,固相微萃取方法:取1.0 g样品放入

20 mL顶空瓶中,将SPME萃取头插入到顶空瓶中顶空60 $^{\circ}\text{C}$ 吸附30 min,迅速插入GC进样口中。色谱条件:色谱柱为HP-5MS(30 m \times 0.25 mm,0.25 μm);进样口温度为250 $^{\circ}\text{C}$;采用分流模式进样(分流比10:1);载气为氦气;柱流速为1 mL/min;解吸时间为5 min;解吸温度为250 $^{\circ}\text{C}$;采用阶段式程序升温模式(初始温度40 $^{\circ}\text{C}$,5 min;10 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 升至250 $^{\circ}\text{C}$;250 $^{\circ}\text{C}$,保持4 min)。质谱条件为电离方式EI;电子能量为70 eV;离子源温度为250 $^{\circ}\text{C}$;传输线温度为250 $^{\circ}\text{C}$ 。扫描质量范围为 m/z 45~300。

2 结果与分析

2.1 烤制前后条斑紫菜的气味差异分析

2.1.1 主成分分析法(PCA)分析条斑紫菜烤制前后的电子鼻响应值 如图1所示,第一主成分和第二主成分的贡献率分别为95.24%和4.37%,总贡献率为99.61%,表明其基本涵盖了样品的整体信息,可以用来表征烤制前后条斑紫菜的气味组成。烤制前后条斑紫菜对应的电子鼻检测信号的特征区域没有重叠,样品距离较远,说明其有各自的气味特征,香气物质的种类或含量不同,主成分分析能较好地区分样品,表明烤制前后条斑紫菜的气味有显著差异。

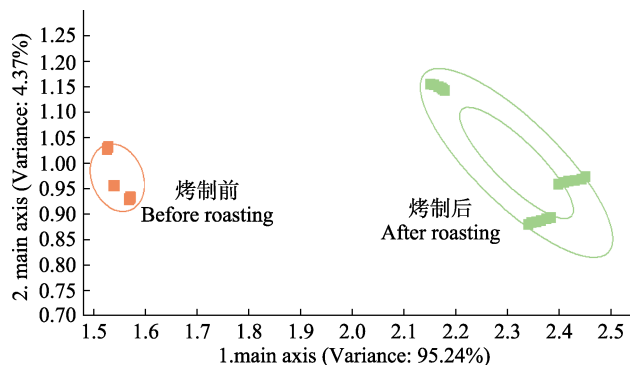


图1 条斑紫菜烤制前后气味的PCA分析

Fig.1 PCA analysis of odors derived from *P. yezoensis* before and after roasting

2.1.2 线性判别法(LDA)分析条斑紫菜烤制前后的电子鼻响应值 如图2所示,判别式LD1和判别式LD2的贡献率分别为99.14%和0.11%,两判别式的总贡献率为99.25%,基本涵盖样品的整体信息,采用LDA分析能够明显区分烤制前后条斑紫菜的气味组成,且LDA分析比PCA分析样品间的距离远,说明线性判别分析能提高样品的分类精度。

2.1.3 Loadings负荷加载分析 图3为烤制前后条斑紫菜Loadings负荷加载分析,总贡献率为99.61%。

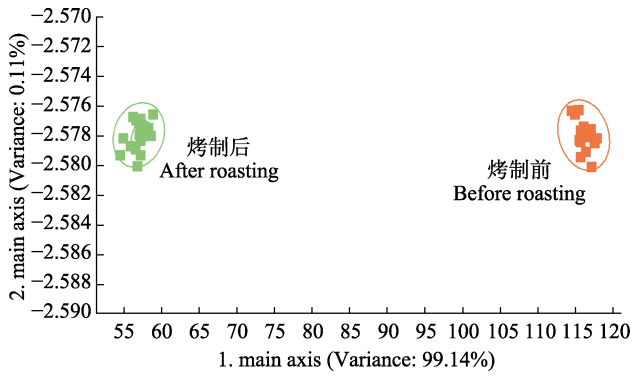


图 2 条斑紫菜烤制前后气味的 LDA 分析

Fig.2 LDA analysis of odors derived from *P. yezoensis* before and after roasting

不同传感器在负荷加载分析图中的位置可以反映传感器对于样品挥发性气味贡献率的大小;若某一传感器的响应值接近于零,说明该传感器的识别作用可以忽略;反之则说明该传感器的识别能力越强。

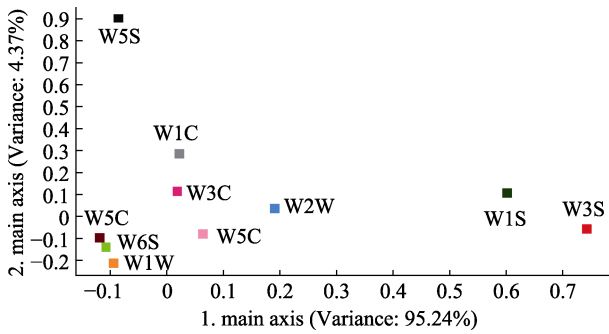


图 3 条斑紫菜烤制前后气味的 Loadings 分析

Fig.3 Loadings analysis of odors derived from *P. yezoensis* before and after roasting

从图 3 可以看出, W3S(烃类)、W5S(氮氧化合物)传感器对主成分贡献率最大,这说明烤制前后条斑紫菜的第一、二主成分相同,均为烃类、含氮类物质,其贡献率不同。

2.2 烤制前后条斑紫菜的特征性挥发性物质

气相离子迁移谱图中每一个点代表一种挥发性化合物,颜色越深、面积越大表示含量越高。如图 4 所示,烤制后,条斑紫菜中分离鉴定出 35 种挥发性组分,其中包含醛类、酮类、醇类、酯类以及芳香族化合物等。

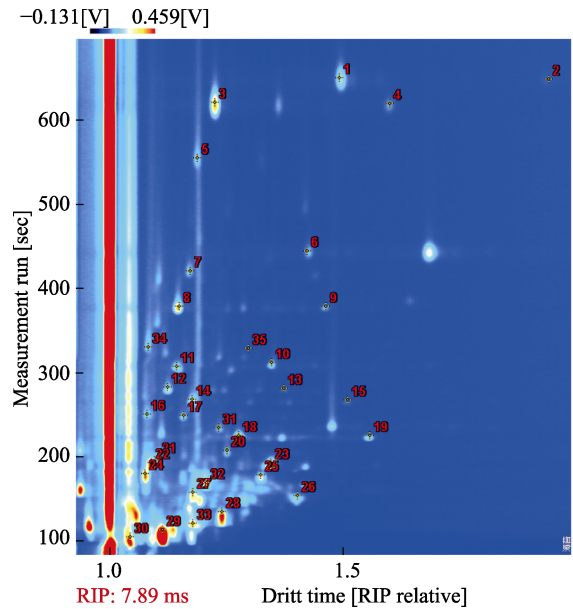


图 4 烤制后条斑紫菜的气相离子迁移谱

Fig.4 Gas phase ion mobility of *P. yezoensis* after roasting

图 5 中每一行代表 1 个样品中选取的全部信号峰,每一列代表同一挥发性有机物在烤制前后条斑紫菜中的信号峰。从图 5 中可以直观地看出,每种样品的完整挥发性有机物信息以及样品之间挥发性有机物的差异。由图 5 可知,条斑紫菜烤制前后挥发性风味物质含量差异显著,烤制前,条斑紫菜中壬醛、辛醛、己醛、戊醛、苯甲醛、2-乙基呋喃等物质的含量较

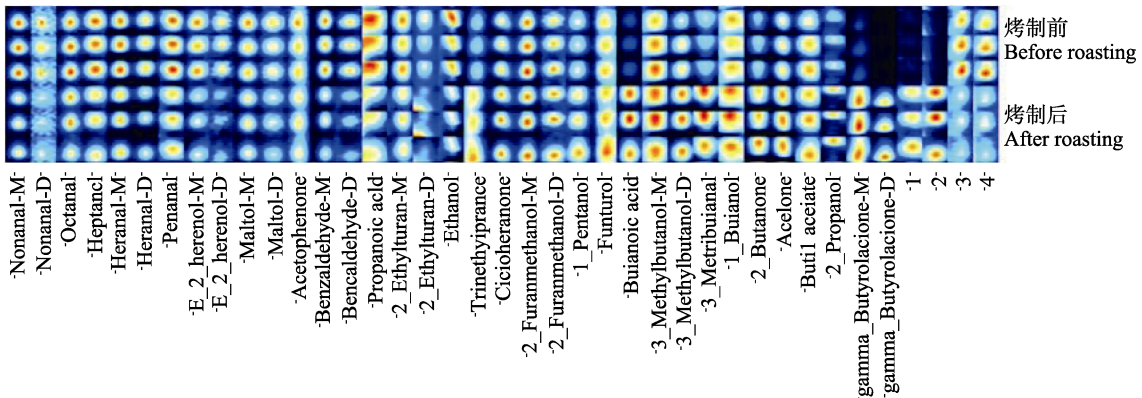


图 5 烤制前后条斑紫菜 Gallery Plot 图谱

Fig.5 Gallery plot of *P. yezoensis* before and after roasting

高; 烤制后, 甲基吡嗪、1-戊醇、呋喃甲醛、3-甲基丁醇、3-甲基丁醛、1-丁醇、丙酮等物质的含量较高。

2.3 SPME-GC-MS 分析

焙烤过程中会发生一系列化学反应, 由不同的前体物质合成或分解产生不同种类的香气物质, 包括酮类、醇类、醛类、酯类以及杂环类物质(如呋喃类、吡嗪类和吡咯类等)(静玮等, 2016)。

通过 SPME-GC-MS 分析, 烤制前后的紫菜样品分别鉴定出 83 种和 86 种挥发性物质, 按结构分类的结果见表 2。由表 2 可知, 醛类、酮类、醇类和烷烃

类是条斑紫菜挥发性成分的主要组成成分, 其含量组成一定程度上代表了条斑紫菜的特征风味组成。

2.3.1 醛类化合物 醛类化合物的阈值较低, 对气味的贡献大(高瑞昌等, 2013)。己醛通常产生一种原生味、鲜香的特征香味(赵庆喜等, 2007), 壬醛具有青草气味(阚建全, 2002; Phat *et al*, 2016), (E,E)-2,4-庚二烯醛具有鱼腥味和金属味, 苯甲醛具有苦杏仁味(曹荣等, 2019), 因此, 它们可能对条斑紫菜的特征风味有重要贡献, 共同构成了其鲜腥的气味。烤制前后的条斑紫菜中均检测出 2-甲基-丁醛、3-甲基-丁醛、戊醛、己醛、(E)-2-戊烯醛、2-甲基-2-戊烯醛、2-己

表 2 烤制前后条斑紫菜的挥发性成分及相对含量

Tab.2 Changes in volatile compounds and relative contents of *P. yezoensis* before and after roasting

化合物名称 Compound	保留时间 Retention time/min	相对峰面积百分含量 Relative content/%	
		烤制前 Before roasting	烤制后 After roasting
醛类 Aldehydes			
乙醛 Acetaldehyde	1.74	4.52	—
丙醛 Propanal	2.10	1.96	—
2-甲基-丁醛 2-Methyl-butanal	3.25	0.54	1.68
3-甲基-丁醛 3-Methyl-butanal	3.33	1.26	2.94
戊醛 Pentanal	4.55	0.33	0.21
己醛 Hexanal	7.36	1.32	0.83
(E)-2-甲基-丁烯醛(E)-2-Methyl-2-butenal	7.64	1.61	—
(E)-2-戊烯醛(E)-2-Pentenal	8.58	0.42	0.27
2-甲基-2-戊烯醛 2-Methyl-2-pentenal	9.29	0.55	0.78
2-己烯醛 2-Hexenal	10.71	0.37	0.31
(Z)-4-庚烯醛(E,E)-4-Heptadienal	11.27	—	—
辛醛 Octanal	12.23	0.29	0.25
壬醛 Nonanal	14.24	1.20	1.40
(E,E)-2,4-庚二烯醛(E,E)-2,4-Heptadienal	15.99	—	0.49
苯甲醛 Benzaldehyde	16.49	1.94	2.05
BETA-环柠檬醛 2,6,6-Trimethyl-1-cyclohexene-1-carboxaldehyde	18.01	0.11	—
酮类 Ketones			
丙酮 Acetone	2.25	2.24	3.44
2-丁酮 2-Butanone	3.08	0.89	—
2-戊酮 2-Pentanone	4.50	—	0.25
2,3-丁二酮 2,3-Butanedione	4.60	0.44	—
3-己酮 3-Hexanone	6.88	—	0.22
1-甲氧基-2-丙酮 1-Methoxy-2-propanone	7.89	—	0.64
3-羟基-2-丁酮 3-Hydroxy-2-butanone	12.14	0.39	0.54
4,4-二甲基-2-环戊烯-1-酮 4,4-Dimethyl-2-cyclopenten-1-one	16.16	—	0.37
3,5-辛二烯-2-酮 3,5-Octadien-2-one	16.40	1.36	—
1-甲基-2-吡咯烷酮 1-Methyl-2-pyrrolidinone	18.78	0.22	1.49
4-[2,2,6-三甲基-7-氧杂二环[4.1.0]庚-1-基]-3-丁烯-2-酮 4-(2,2,6-Trimethyl-7-oxabicyclo[4.1.0]hept-1-yl)-3-buten-2-one	23.15	—	0.20

续表 2

化合物 Compound	保留时间 Retention time/min	相对峰面积百分含量 Relative content/%	
		烤制前 Before roasting	烤制后 After roasting
(E)-4-(2,6,6-三甲基-1-环己烯-1-基)-3-丁烯-2-酮 (E)4-(2,6,6-Trimethylcyclohexa-1,3-dienyl)but-3-en-2-one	23.26	0.41	0.70
2-吡咯烷酮 2-Pyrrolidinone	23.63	—	0.37
甲基环戊烯醇酮 2-Ethylidenecyclohexanone	26.39	0.17	—
醇类 Alcohols			
1-甲氧基-2-丙醇 1-Methoxy-2-propanol	8.52	0.31	0.41
正丁醇 1-Butanol	9.00	0.22	0.30
1-戊烯-3-醇 1-Penten-3-ol	9.40	1.91	1.31
3-甲基-1-丁醇 3-Methyl-1-Butanol	11.42	—	0.31
(Z)-2-戊烯醇(Z)-2-Penten-1-ol	12.83	0.67	—
2-甲基-3-戊醇 2-Methyl-3-pentanol	13.27	—	0.89
2-十九烷醇 2-Nonadecanol	13.58	—	0.37
2-丁氧基乙醇 2-Butoxy-ethanol	14.35	2.26	1.97
2,6-二甲基-环己醇 2,6-Dimethyl-cyclohexanol	17.70	1.56	—
松油醇 a,a,4-Trimethyl-3-cyclohexene-1-methanol	19.10	0.42	—
苯氧基乙醇 2-Phenoxy-ethanol	24.96	0.21	0.25
(S)-2-甲基-1-十二烷醇(S)-2-Methyl-1-dodecanol	16.68	—	0.10
2-(十二烷氧基)乙醇 2-(Dodecyloxy)-ethanol	17.95	—	0.07
烷烃类 Alkanes			
己烷 Hexane	1.55	5.51	—
十甲基环戊硅氧烷 Decamethyl-cyclopentasiloxane	9.964	0.39	0.36
十二烷 Dodecane	10.25	2.04	1.28
十三烷 Tridecane	12.42	5.00	3.77
2,6,11-三甲基-十二烷 2,6,11-Trimethyl-dodecane	13.50	0.46	—
9-辛基-十七烷 9-Octyl-heptadecane	13.70	0.15	—
3-甲基-十三烷 3-Methyl-tridecane	13.72	0.28	—
环庚烷 Cyclotridecane	14.14	0.11	—
二十烷 Eicosane	14.49	0.49	—
十四烷 Cyclotetradecane	15.09	0.11	—
10-甲基-二十烷 10-Methyl-eicosane	13.69	—	0.15
十四烷基环氧乙烷 Tetradecyl oxirane	16.06	—	0.82
环十二烷 Cyclododecane	16.95	—	0.15
2,2-二甲基丙亚基环己烷 Neopentylidene cyclohexane	18.01	—	0.25
十七烷 Heptadecane	19.12	—	0.56
4-(乙酰苯基)苯甲烷(4-Acetylphenyl)phenylmethane	26.18	—	0.24
1-戊烯 1-Pentene	11.41	0.38	—
1-二十六烯 1-Hexacosene	16.68	0.12	—
1-十八烯 1-Octadecene	16.96	0.22	—
8-十七烷烯 8-Heptadecene	19.60	2.31	5.90
长叶烯[1S-(1.alpha.,3a.beta.,4.alpha.,8a.beta.)]- decahydro-4,8,8-trimethyl-9-methylene-1,4-methanoazulene	17.21	3.16	—
反式 3 癸烯 Trans-3-decene	12.73	—	0.23
1,4-辛二烯 1,4-Octadiene	21.04	—	0.12
1-十四烯 1-Tetradecene	22.77	—	0.06
(Z)-4-甲基-2-己烯(Z)-4-Methyl-2-hexene	19.47	—	0.34

续表 2

化合物 Compound	保留时间 Retention time/min	相对峰面积百分含量 Relative content/%	
		烤制前 Before roasting	烤制后 After roasting
苯并环丁烯 Bicyclo[4.2.0]octa-1,3,5-triene	11.57	—	0.14
4-苯基-1-环己烯 3-Cyclohexen-1-yl-benzene	19.95	0.32	0.39
酯类 Esters			
草酸环丁基十三酯 Oxalic acid, cyclobutyl tridecyl ester	13.49	—	0.26
亚硫酸十五烷基戊酯 Sulfurous acid, pentadecyl pentyl ester	13.54	—	0.15
草酸异丁基十五烷基酯 Oxalic acid, isobutyl pentadecyl ester	15.18	0.31	—
丙酸戊酯 Propanoic acid, pentyl ester	15.79	0.27	0.48
丁内酯 Butyrolactone	18.15	0.47	—
磷酸三乙酯 Triethyl phosphate	18.48	1.28	1.77
3-环己烯羧酸乙酯 Ethyl 3-cyclohexenecarboxylate	18.97	0.63	—
2,4,4-三甲基戊烷-1,3-二基双(2-甲基丙酸酯) Propanoic acid, 2-methyl-1-(1,1-dimethylethyl)-2-methyl-1,3-propanediyl ester	21.62	3.79	1.18
庚烷-2-基丁酸酯 Butanoic acid, 1-methylhexyl ester	21.73	0.16	—
(1-羟基-2,4,4-三甲基戊-3-基) 2-甲基丙酸酯 Propanoic acid, 2-methyl-2,2-dimethyl-1-(2-hydroxy-1-methylethyl)propyl ester	21.74	—	0.05
2-氟苯甲酸, 2,5-二氯苯酯 2-Fluorobenzoic acid, 2,5-Dichlorophenyl ester	23.15	0.15	—
顺丁烯二酸二丁酯 2-Butenedioic acid (Z)-, dibutyl ester	24.37	0.28	0.24
二氢猕猴桃内酯 5,6,7,7a-Tetrahydro-4,4,7a-trimethyl-2(4H)-benzofuranone	27.38	0.42	0.63
邻苯二甲酸异壬酯 1,2-Benzenedicarboxylic acid, bis(2-methylpropyl) ester	29.33	0.29	—
吡嗪类 Pyrazines			
吡嗪 Pyrazine	10.54	—	0.32
甲基吡嗪 Methyl-pyrazine	11.70	0.25	0.55
2,5-二甲基-吡嗪 2,5-Dimethyl-pyrazine	12.83	—	1.10
2-乙基-5-甲基-吡嗪 2-Ethyl-5-methyl-pyrazine	14.14	—	0.37
3-乙基-2, 5-二甲基-吡嗪 3-Ethyl-2,5-dimethyl-pyrazine	15.09	—	0.69
2-乙基-6-甲基-吡嗪 2-Ethyl-6-methyl-pyrazine	14.03	—	0.21
呋喃类 Furans			
2-乙基-呋喃 2-Ethyl-furan	3.99	0.13	0.21
2,3-二氢呋喃 2,3-Dihydrofuran	6.23	0.48	0.33
5-甲基-2(5H)呋喃酮 5-Methyl-2(5H)-furanone	18.89	0.73	—
4H-吡喃-4-酮 4H-Pyran-4-one	17.49	0.35	—
3-甲基-2(5H)-呋喃酮 3-Methyl-2(5H)-furanone	19.47	0.58	—
呋喃甲醛 Furfural	15.49	—	0.49

烯醛、辛醛、壬醛、苯甲醛等, 醛类化合物总含量分别占 16.42% 和 11.70%。

2.3.2 酮、醇类化合物 3,5-辛二烯-2-酮对腥味有一定的增强作用, 它可能对条斑紫菜的特征风味有一定的贡献; 而分子量较大的不饱和酮类化合物具有花香味(陈婉珠等, 2006), 碳链越长, 其散发的特征花

香味越强, 这可能与烤制品散发的清醇香味有关。

饱和醇的阈值较高, 对气味贡献较小(刘红等, 2010); 只有含量高的醇类才会对气味产生较大的影响, 而条斑紫菜样品中饱和醇类含量不高, 因此, 对气味的贡献值不大。醇类化合物中的 1-戊烯-3-醇具有独特的鱼腥味, 为不饱和醇, 阈值比饱和醇的低,

对整体风味有一定的贡献。

2.3.3 烷烃类化合物 烤制前后的条斑紫菜中共检测出 27 种烷烃类化合物,其中 8-十七烷烯的相对含量较高,已知其是淡水褐藻和一些海藻的特征风味物质(胡传明等,2011),因此,也可能是条斑紫菜的重要风味物质之一。

2.3.4 酯类化合物 烤制前后的条斑紫菜中均检测出二氢猕猴桃内酯,其属于类胡萝卜素降解物质,具有花香味,所以,酯类对条斑紫菜整体风味也有一定的贡献。

2.3.5 吡嗪和呋喃类化合物 吡嗪是含氮的杂环化合物,具有典型焙烤香气,在烤制食品中经常出现(Marsili *et al*, 1996; Mottram *et al*, 1998),它们可能是条斑紫菜烤制后香味的重要来源。条斑紫菜烤制后,吡嗪类物质包括甲基吡嗪、2,5-二甲基吡嗪、2-乙基-5-甲基吡嗪、3-乙基-2,5-二甲基吡嗪和 2-乙基-6-甲基吡嗪等的种类和相对含量显著增加;其中,2 种吡嗪类物质,2,5-二甲基吡嗪和 3-乙基-2,5-二甲基吡嗪,因仅在条斑紫菜中被检出而作为其特有的化合物(李微等,2016)。

2-乙基呋喃有较强的焦香香气(Mottram *et al*, 1998),呋喃类化合物一般是通过葡萄糖或者果糖等糖的热降解反应产生的(静玮等,2016),呋喃甲醛的生成说明条斑紫菜经过烤制后其糖类物质发生了热降解反应。

3 讨论

挥发性风味是水产品最典型的特征之一,是评价产品品质的一个重要指标,气味是由于其产品的挥发性成分的种类以及组成比例不同而造成的。胡传明等(2011)研究表明,浙江省象山栽培海区的坛紫菜和江苏省南通栽培海区的条斑紫菜含量最高的挥发性组分是 8-十七烯,其次是十五烷,醛类化合物种类最多。曹荣等(2019)研究发现,福建省漳州海域不同采收期的坛紫菜挥发性成分差别明显,一水坛紫菜的挥发性成分以 2-乙基呋喃以及一些阈值较高的酮、醇类为主;二水和三水坛紫菜中丁内酯、2-己烯-1-醇、1-辛烯-3-醇含量相对较高;四水和五水坛紫菜中具有青草味的壬醛和具有苦杏仁味的苯甲醛含量较高。由此可见,不同养殖地区的紫菜挥发性风味成分也有明显差异。

本研究采用电子鼻、FlavourSpec[®]风味分析仪和固相微萃取气相色谱质谱联用(SPME-GC-MS),对比分析了江苏省如东内沙海域的条斑紫菜在烤制前后

挥发性成分的变化,研究表明,条斑紫菜烤制前后挥发性成分差异显著,二者的第一、第二主成分相同,均为烃类、含氮化合物类物质,但其对主成分的贡献率不同;烤制后出现吡嗪类特征风味物质.SPME-GC-MS 分析表明,醛类、醇类、酮类和烷烃类构成了条斑紫菜的主体风味,烤制后,吡嗪、甲基吡嗪、2,5-二甲基-吡嗪、2-乙基-5-甲基-吡嗪、3-乙基-2,5-二甲基-吡嗪和 2-乙基-6-甲基-吡嗪等含量显著增加。综上所述,经过烤制,构成条斑紫菜的挥发性风味物质发生了明显变化,其中吡嗪类物质的相对含量显著增加。这有助于明确焙烤风味产生的途径,进一步优化加工工艺,但风味的形成机理尚需深入研究。

参 考 文 献

- AKAKABE Y, MATSUI K, KAJIWARA T. 2,4-Decadienals are produced via (*R*)-11-HPITE from arachidonic acid in marine green alga *Ulva conglobata*. *Bioorganic and Medicinal Chemistry*, 2003, 11(17): 3607–3609
- BIAN R J, CAO R, ZHAO L, *et al*. Application of the electronic nose for assessing the freshness of *Cololabis saira*. *Modern Food Science and Technology*, 2017, 33(1): 243–247 [卞瑞姣, 曹荣, 赵玲, 等. 电子鼻在秋刀鱼鲜度评定中的应用. *现代食品科技*, 2017, 33(1): 243–247]
- BOONPRAB K, MATSUI K, AKAKABE Y, *et al*. Formation of aldehyde flavor (*n*-hexanal, 3Z-nonenal and 2E-nonenal) in the brown alga, *Laminaria angustata*. *Journal of Applied Phycology*, 2006, 18(3/4/5): 409–412
- CAO R, LIU N, WANG L Z, *et al*. Flavor analysis of *Porphyra haitanensis* harvested during different periods. *Journal of Shanghai Ocean University*, 2019, 28(5): 686–692 [曹荣, 刘楠, 王联珠, 等. 不同采收期坛紫菜的风味比较. *上海海洋大学学报*, 2019, 28(5): 686–692]
- CHEN W Z, RUI H M, ZHANG L. Analysis of kelp astringent substances by HS-SPME-GC-MS. *Science and Technology of Food Industry*, 2006, 27(12): 71–73 [陈婉珠, 芮汉明, 张玲. 海带腥味物质的 HS-SPME-GC-MS 分析. *食品工业科技*, 2006, 27(12): 71–73]
- GAO R C, SU L, HUANG X Y, *et al*. Research progress of flavor components in fishery products. *Fisheries Science*, 2013, 32(1): 59–62 [高瑞昌, 苏丽, 黄星奕, 等. 水产品风味物质的研究进展. *水产科学*, 2013, 32(1): 59–62]
- HU C M, XU J L, ZHU J Y, *et al*. Characteristic volatile matters in *Porphyra* (Bangiales). *Marine Sciences*, 2011, 35(5): 106–111 [胡传明, 徐继林, 朱建一, 等. 紫菜特征挥发性物质分析. *海洋科学*, 2011, 35(5): 106–111]
- JING W, SU Z P, LIN L J. Volatile profiling of macadamia nuts during roasting. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 2016, 37(6): 1224–1231 [静玮, 苏子鹏, 林丽静. 澳洲坚果焙烤过程中挥发性成分的特征分析. *热带作物学报*, 2016,

- 37(6): 1224–1231]
- KAN J Q. Food chemistry. Beijing: China Agricultural University Press, 2002, 309–360 [阚建全. 食品化学. 北京: 中国农业大学出版社, 2002, 309–360]
- LI W, OMANNISA M, XU J L, *et al.* Comparative study of volatile components from two strains of *Pyropia haitanensis* in different culture areas. *Progress in Fishery Sciences*, 2016, 37(5): 147–156 [李微, 阿曼尼萨·买买提, 徐继林, 等. 不同海域不同品种坛紫菜(*Pyropia haitanensis*)挥发性成分的比较分析. 渔业科学进展, 2016, 37(5): 147–156]
- LIU H, YANG R H, DAI Z Y, *et al.* The preparation of meat flavor essence from silver carp and the analysis of flavor components. *Journal of Chinese Institute of Food Science of Technology*, 2010, 10(2): 149–153 [刘红, 杨荣华, 戴志远, 等. 利用鲢鱼制备肉味香精及其香气成分的分析. 中国食品学报, 2010, 10(2): 149–153]
- MARSILI R. Techniques for analyzing food aroma. New York: Food Science and Technology, 1996, 81–112
- MISRY B S, REINECCIUS T, OLSON L K. Gas chromatography-olfactometry for the determination of key odorants in foods. New York: Marcel Dekker, 1996, 265–292
- MOTTRAMDS D S. Flavor formation in meat and meat products: A review. *Food Chemistry*, 1998, 62(4): 415–424
- PHAT C, MOON B K, LEE C. Evaluation of umami taste in mushroom extracts by chemical analysis, sensory evaluation, and an electronic tongue system. *Food Chemistry*, 2016, 192: 1068–1077
- WANG D F, LI T T, LIU N, *et al.* Analysis of effects of protamine on volatile compounds for grass carp slices by HS-SPME-GC-MS technology combined with electronic nose. *Food and Fermentation Industries*, 2016, 42(10): 163–170 [王当丰, 李婷婷, 刘楠, 等. 顶空固相微萃取-气质联用法结合电子鼻分析鱼精蛋白对草鱼片挥发性气味的影响. 食品与发酵工业, 2016, 42(10): 163–170]
- WANG Y, WANG R D, XUE Y, *et al.* Analysis of volatile flavor compounds changes during traditional processing of salted Spanish mackerel. *Modern Food Science and Technology*, 2018, 34(9): 268–275 [王玉, 王睿迪, 薛勇, 等. 传统加工咸鲛鱼的挥发性风味成分. 现代食品科技, 2018, 34(9): 268–275]
- WANG Y, ZHANG C H, GE Y. Comparison of 12 elemental concentrations in different *Porphyra* products. *Guangdong Trace Elements Science*, 2012, 19(9): 14–19 [王亚, 张春华, 葛滢. 不同紫菜产品中 12 种元素含量的比较研究. 广东微量元素科学, 2012, 19(9): 14–19]
- WU Q. Analysis and regulation on the aroma in baked quail eggs. Master's Thesis of Hefei University of Technology, 2012 [吴巧. 烤制鹌鹑蛋香气分析与调控研究. 合肥工业大学硕士研究生学位论文, 2012]
- YANG X Y, LIU Y, XU C H, *et al.* Extraction and analysis of volatile flavor compounds in aquatic products: A review. *Food Science*, 2015, 36(5): 289–295 [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. 食品科学, 2015, 36(5): 289–295]
- YAO X C, QIU C J, LAI X Y. Preparation and flavor component analysis of *Porphyra yezoensis* flavor essence. *Journal of Food Science and Technology*, 2015, 33(3): 28–34 [姚兴存, 邱春江, 赖小燕. 紫菜风味香精的制备及其风味成分分析. 食品科学技术学报, 2015, 33(3): 28–34]
- ZHAO L, CAO R, WANG L Z, *et al.* Nutritional analysis and umami assessment of *Pyropia yezoensis* from Jing Bay. *Progress in Fishery Sciences*, 2018, 39(6): 134–140 [赵玲, 曹荣, 王联珠, 等. 靖海湾条斑紫菜的营养及鲜味评价. 渔业科学进展, 2018, 39(6): 134–140]
- ZHAO Q X, XUE C H, XU J, *et al.* Analysis of volatile compounds in bighead carp by microwave distillation and solid phase microextraction coupled with gas chromatography-mass spectrometry and olfactometry. *Chinese Journal of Chromatography*, 2007, 25(2): 267–271 [赵庆喜, 薛长湖, 徐杰, 等. 微波蒸馏-固相微萃取-气相色谱-质谱-嗅觉检测器联用分析鳙鱼鱼肉中的挥发性成分. 色谱, 2007, 25(2): 267–271]

(编辑 马瑾艳)

Study on the Characteristic Flavor Change of *Porphyra yezoensis* before and after Roasting

ZHAO Ling, CAO Rong, WANG Lianzhu, LIU Qi^①, LIU Shengnan

(Yellow Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Qingdao, Shandong 266071, China)

Abstract With recent advances in detection technology the volatile substances in green algae, brown algae, red algae, and other algae have been identified. However, few studies have investigated the volatile substances of laver (genus *Porphyra*), especially, the analysis of the flavor change in *Porphyra yezoensis* after roasting. To address this issue, the electronic nose, FlavourSpec[®] flavor analyzer and SPME-GC-MS were used to compare the volatile components of *P. yezoensis* before and after roasting. The results of the electronic nose analysis showed that there were some differences in the volatile components derived from *P. yezoensis* before and after roasting. The two main components were the same, but the contribution of hydrocarbon compounds to the main components were different. Thus, the electronic nose was capable of discriminating the flavor differences in *P. yezoensis* before and after roasting. Flavor analysis showed that the volatile components of *P. yezoensis* before and after roasting were significantly different. The contents of nonanal, octanal, hexanal, valeraldehyde, benzaldehyde, and 2-ethyl-furan, were relatively higher in *P. yezoensis*. After roasting, the contents of methyl-pyrazine, 1-pentanol, furfural, 3-methyl-butanol, and 3-methyl-butanal were higher. The characteristic flavor and relative content of pyrazines also increased after roasting. The SPME-GC-MS analysis showed that the total volatile flavor compounds of laver samples before and after roasting were 83 and 86, respectively. The major volatile compounds of *P. yezoensis* were aldehydes, alcohols, ketones, and alkanes. The pyrazines consisted of methyl pyrazine, 2,5-dimethyl-pyrazine, 2-ethyl-5-methyl-pyrazine, 3-ethyl-2,5-dimethyl-pyrazine and 2-ethyl-6-methyl-pyrazine. These compounds increased significantly after roasting. In summary, the main flavor substances of *P. yezoensis* varied significantly after roasting, especially the content of pyrazines (increased significantly). This research clarifies how the roast flavor is generated, allowing us to optimize our processing technology. Future research is required to understand the mechanisms underlying the formation of flavor.

Key words *Porphyra yezoensis*; Roast; Flavor change

① Corresponding author: LIU Qi, E-mail: liuqi@ysfri.ac.cn