

条斑紫菜与坛紫菜挥发性风味的电子鼻分析* Odors Analysis of *Pyropia yezoensis* and *Pyropia haitanensis* by Electronic Nose

胡传明^{1,2,3}, 王丹青¹, 王锡昌^{1**}, 周伟², 吴娜¹, 陆勤勤², 姜波⁴, 邓银银²

HU Chuanming^{1,2,3}, WANG Danqing¹, WANG Xichang¹, ZHOU Wei², WU Na¹, LU Qinqin², JIANG Bo⁴, Deng Yinyin²

(1. 上海海洋大学食品学院, 上海 201306; 2. 江苏省海洋水产研究所, 江苏南通 226007; 3. 江苏省农业种质资源保护与利用平台, 江苏南京 210014; 4. 常熟理工学院, 江苏常熟 215500)

(1. College of Food Science and Technology, Shanghai Ocean University, Shanghai, 201306, China; 2. Jiangsu Marine Fisheries Research Institute, Nantong, Jiangsu, 226007, China; 3. Jiangsu Provincial Platform for Conservation and Utilization of Agricultural Germplasm, Nanjing, Jiangsu, 210014, China; 4. Changshu Institute of Technology, Changshu, Jiangsu, 215500, China)

摘要:【目的】利用电子鼻技术区分条斑紫菜 (*Pyropia yezoensis*) 与坛紫菜 (*Pyropia haitanensis*) 的原藻及其制品。【方法】应用 18 个金属氧化型气体传感器并通过风味雷达图和主成分分析法对 2 种紫菜的挥发性风味进行轮廓性分析。【结果】两种方法分析原藻及其制品均显示条斑紫菜和坛紫菜的气味轮廓与敏感物质类型存在差异; 相比紫菜原藻, 各制品间的气味轮廓较为一致。【结论】电子鼻技术可以区分条斑紫菜与坛紫菜挥发性风味, 原藻及其制品均有明显差异。加工过程使得产品挥发性风味趋于统一。

关键词: 电子鼻 紫菜 挥发性风味

中图分类号: TS254.1 文献标识码: A 文章编号: 1005-9164(2016)02-0138-06

Abstract:【Objective】The odors differences of *Pyropia yezoensis* and *Pyropia haitanensis* on stock and products were analyzed using electronic nose. 【Methods】The odors outlines of 2 lavers were evaluated by 18 metal-oxide sensors using the volatile radar chart and principal component analysis. 【Results】The odors outlines and the types of sensitive compounds of *Pyropia yezoensis* and *Pyropia haitanensis* were different between stock and products, which were identified by 2 analytical methods, and the odors outline of products was more uniform than that of stock. 【Conclusion】The difference of volatile flavor derived from the stock and products of

Pyropia yezoensis and *Pyropia haitanensis* could be obviously distinguished by electronic nose technology. The processing resulted in the unification of the volatile flavor of laver products.

Key words: electronic nose, *Pyropia*, odors

DOI: 10.13656/j.cnki.gxkx.20160511.004

0 引言

【研究意义】条斑紫菜 (*Pyropia yezoensis*) 与坛紫菜 (*Pyropia haitanensis*) 是我国重要的经济海

收稿日期: 2016-04-05

作者简介: 胡传明(1980—), 男, 助理研究员, 主要从事海藻育种与理化分析工作。

* 南通市科技计划项目(MS12015068), 国家自然科学基金面上项目(31272664), 江苏省自然科学基金项目(BK20140439), 江苏省农业科技自主创新资金项目(CX(14)2081)和江苏省水产三新工程重大项目(D2015-18)资助。

** 通讯作者: 王锡昌(1964—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事食品风味方面研究, E-mail: xewang@shou.edu.cn。

藻,其中条斑紫菜主产区位于长江以北,坛紫菜主产区位于长江以南。2014年我国紫菜栽培总面积为 $6.41 \times 10^4 \text{ hm}^2$,其中条斑紫菜栽培面积为 $3.93 \times 10^4 \text{ hm}^2$,坛紫菜为 $2.49 \times 10^4 \text{ hm}^2$;2014年紫菜总产量达 $11.41 \times 10^4 \text{ t}$,其中条斑紫菜年产量达 $2.77 \times 10^4 \text{ t}$,坛紫菜年产量约 $8.65 \times 10^4 \text{ t}$ (文献[1])。紫菜是风味独特的海洋食品,两种紫菜产品分类有较大差异,条斑紫菜产品以烤紫菜和调味紫菜为主,坛紫菜主要的商品形式是用作汤料的圆饼紫菜。近年来,紫菜产品品类日趋丰富,有加料脆片、酱料、面食等,产品同质化现象日趋严重。所以从风味角度研究区分两种紫菜对紫菜食品加工业有着重要的意义。【前人研究进展】食品挥发性风味具有组成复杂、不稳定、物质含量极少但品质贡献极大及分子结构缺乏普遍规律性等特点。挥发性风味的经典研究方法是通过嗅觉感官评定^[2],单纯感官分析具有快速灵活、简便易行、成本低等特点,但难于精确定量及排除外界干扰。随着风味提取技术的进步,溶剂、水蒸气、超临界等抽提技术^[3]与热解析技术^[4]、顶空进样技术^[5]已被广泛应用于食品风味分析。顶空技术分为静态顶空与动态顶空,控温范围广,补集的挥发性气味能够较大还原食品风味。结合上述提取技术,气相色谱-质谱联用(GC/MS)技术可以对挥发性物质进行定性定量,但短于复杂的整体性气味轮廓分析。电子鼻技术结合顶空进样技术,可快速描绘挥发性风味的整体轮廓,推动食品香味的整体特征、食品真伪鉴定、产地判别、品质评定、工艺优化等多方面研究进展^[6-8]。紫菜的挥发性风味研究主要集中在中、日、韩3个藻类主产国^[9-23]。挥发性物质中包含烃、醇、醛、酮、酯,以及卤化物与硫化物等多种物质^[12-13,18-21,23]。二甲基硫作为挥发性风味的主要贡献者用于研究紫菜采收期^[21-23]和货架期^[13,17,21]等的风味变化,固相微萃取(SPME)技术的应用表明两种紫菜原藻中8-十七烯含量最大^[20-21],醛、酮类含量也较为显著,且条斑紫菜

表1 取样日期与紫菜原藻产地

Table 1 Sampling date and cultivated areas of the laver stock

样品 Sample	日期 Date	产地 Locations
条斑紫菜原藻 <i>Pyropia yezoensis</i> stock	2016-01-13	江苏东沙 Dongsha sandbanks, Jiangsu
条斑紫菜制品-I <i>Pyropia yezoensis</i> - I	2016-03-14	江苏东沙 Dongsha sandbanks, Jiangsu
条斑紫菜制品-II <i>Pyropia yezoensis</i> - II	2016-03-14	江苏东沙 Dongsha sandbanks, Jiangsu
坛紫菜原藻 <i>Pyropia haitanensis</i> stock	2015-12-30	江苏东沙 Dongsha sandbanks, Jiangsu
坛紫菜制品-I <i>Pyropia haitanensis</i> - I	2016-02-22	江苏东沙 Dongsha sandbanks, Jiangsu
坛紫菜制品-II <i>Pyropia haitanensis</i> - II	2016-03-17	福建漳州 Zhangzhou, Fujian

大于坛紫菜^[20]。但缺乏对两种紫菜产品的挥发性风味比较分析。【本研究切入点】本研究利用多传感器的电子鼻技术对紫菜挥发性风味轮廓进行分析,研究两种紫菜原藻及其制品的风味整体差异与加工对风味的影响。【拟解决的关键问题】以原藻及其制品为原料,应用配置金属氧化气体传感器的电子鼻技术结合主成分分析方法,研究比较条斑紫菜与坛紫菜的挥发性风味差别,以及原藻及其制品之间的气味变化。

1 材料与方法

1.1 样品采集与处理

样品共分为6组,其中条斑紫菜与坛紫菜原藻样均取自江苏东沙海区,坛紫菜制品-I取自江苏海安县兰波实业有限公司,条斑紫菜制品与坛紫菜制品-II均取自江苏南通瑞雪海洋食品有限公司,取样日期与紫菜原藻产地见表1。条斑紫菜制品为烤制品,未加调料与添加剂,长方形,规格为 $19.5 \text{ cm} \times 21.5 \text{ cm}$,厚 0.5 mm ,坛紫菜制品-I为烘干制品,圆形,直径为 20.5 cm ,厚 5 mm ,坛紫菜制品-II为烘干制品,长方形,规格为 $19.5 \text{ cm} \times 21.5 \text{ cm}$,厚 1.5 mm 。

采收的原藻经海水清洗后阴干。称取粉碎到5目尺寸以下的6种试样 0.20 g ,装入 10 mL 顶空进样瓶内。每种样品各有6个平行试样。

1.2 仪器

Fox 4000型电子鼻,法国Alpha MOS公司,配置18个金属氧化型气味传感器(表2); 10 mL 顶空进样瓶,上海安谱科学仪器有限公司;SW-CJ-1CU双人单面超净工作台,上海松泰净化科技有限公司。

1.3 电子鼻实验参数

将进样瓶于 37°C 平衡 2 min 后,以洁净干燥空气为载气,流速 $150 \text{ mL}/\text{min}$,进样体积 $2500 \mu\text{L}$, 1 s 进样完毕,注射针温度 65°C ,数据采集时间 120 s ,传感器清洗时间 10 min 。每组样品6个平行试样。

表 2 传感器类型、阵列及其对应的敏感化合物类型

Table 2 Type, matrix set and sensitive compounds of sensors

类型 Type	阵列与序号 Set & No.	名称 Name	敏感化合物类型 Type of sensitive compounds
LY	CL2-1	LY2/LG	氯、氟、一氧化氮、臭氧 Chlorine, fluorine, nitrogen oxide, ozone
	CL2-2	LY2/G	氨、胺类化合物、一氧化碳 Ammonia, amines, carbon monoxide
	CL2-3	LY2/AA	乙醇 Alcohol
	CL2-4	LY2/GH	氨、胺类化合物 Ammonia, amines
	CL2-5	LY2/gCTL	硫化氢 Hydrogen sulfide
	CL2-6	LY2/gCT	丙烷、丁烷 Propane, butane
P	A-2	P10/1	烃类、甲烷 Hydrocarbons, methane
	A-3	P10/2	甲烷 Methane
	A-4	P40/1	氟 Fluorine
	A-6	PA/2	乙醇、氨、胺类化合物 Alcohol, ammonia, amines
	B-1	P30/1	烃类、有机化合物 Hydrocarbons, organic compounds
	B-2	P40/2	氯 Chlorine
T	B-3	P30/2	乙醇 Alcohol
	A-1	T30/1	有机化合物 Organic compounds
	A-5	T70/2	芳香族化合物(甲苯、二甲苯等) Aromatic compounds (toluene, xylene, etc.)
	B-4	T40/2	氯 Chlorine
	B-5	T40/1	氟 Fluorine
	B-6	TA/2	乙醇 Alcohol

1.4 数据处理

取 18 个金属氧化物气体传感器的原始响应信号峰值(波峰或波谷值)为 R_t , 以空载电阻值为 R_0 , $|R_0 - R_t|$ 为 ΔR , 对电子鼻原始响应信号进行 $\Delta R/R_0$ 的数据标准化处理, 消除不同传感器电阻值的量纲差异。构建标准化数据矩阵后应用 Excel 2016 版做雷达图, 并应用 SPSS 22 版对已经进行标准化处理的 18 个电子鼻传感器响应值进行主成分分析, 通过数据降维, 提取到反映整体原始信息的 18 个主成分。

2 结果与分析

2.1 响应值雷达图

为了消除干扰因素, 本研究的样品均为片状, 质量相等, 分析条件相同。在电子鼻定性分析过程中, 为了突出样品间的差异, 传感器信号的标准化值设在 $\pm(0.3 \sim 0.8)$ 较为合适。由图 1 可知, 6 种样品中除了 LY2/gCT 的标准化值均位于 0 附近以外, 其他传感器的标准化值主要落在 $\pm(0.3 \sim 0.8)$, 说明电子鼻检测条件合适。坛紫菜的 3 组样品与条斑紫菜的 3 组样品的雷达图有明显区别。LY2/LG、P30/2、P40/2、P30/1、PA/2、T70/2、T30/1 共 7 个传感器对 3 组条斑紫菜样品的标准化响应值明显大于坛紫菜样品, 这 7 个传感器包括 1 个 LY 型、4 个 P 型和 2 个 T 型, 敏感物质类型包括卤化物、氨、胺类化合物、芳香族化合物和有机挥发物等。LY2/G、LY2/AA、LY2/GH、LY2/gCTL 共 4 个 LY 型传感器对条斑紫菜样

品的标准化响应值小于坛紫菜样品。这 4 个传感器的敏感物质类型包括硫化物、氨、胺类化合物和弱极性有机挥发物。另外, TA/2、T40/1、T40/2、P10/1、P10/2、P40/1 共 6 个 P 型和 T 型传感器对 2 种紫菜试样的响应差异较小, 这 6 个传感器的敏感物质类型主要为烃类与卤化物。

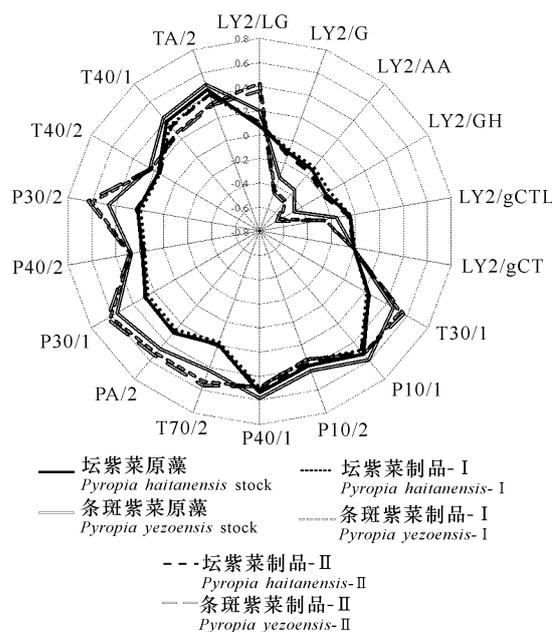


图 1 条斑紫菜与坛紫菜气味的电子鼻标准化响应值雷达图

Fig. 1 The Radar chart of standardized data from odors of *Pyropia yezoensis* and *Pyropia haitanensis* using electronic nose

比较条斑紫菜样品的雷达图, T40/2、P40/2 对 3

组条斑紫菜样品的响应值差异不明显,其敏感物质类型均为氯化物。LY2/LG、T30/1、T70/2、PA/2、P30/1、P30/2 共 6 个传感器对条斑紫菜制品的标准化响应值大于原藻。这与上述条斑紫菜标准化响应值明显大于坛紫菜的 6 个传感器重合。TA/2、T40/1、P10/1、P10/2、P40/1 共 5 个敏感物质类型主要为烃类和卤化物的传感器,其对条斑紫菜原藻的响应值大于其他 5 组试样。坛紫菜 3 组样品的雷达图几乎重叠,仅 TA/2、T40/1、P40/1、P10/2 共 4 个传感器对坛紫菜原藻的标准化响应值大于制品。

2.2 主成分分析

由表 3 可知,第一主成分(PC-1)的方差贡献率达到 73.99%,第二主成分(PC-2)的方差贡献率达到 24.83%,两者的总方差贡献率达 98.82%,即表示前 2 个主成分的信息反映了原始信息的 98.82%。

表 3 指标特征值与贡献率

Table 3 The index characteristic values and the variances contribution rate

主成分 Principle component	特征值 Eigen value	方差贡献率 Percentage of variance (%)	累计贡献率 Percentage of cumulative (%)
1	13.32	73.99	73.99
2	4.47	24.83	98.82
3	0.08	0.44	99.26
4	0.06	0.32	99.58
...
18	1.19e ⁻⁵	6.60e ⁻⁵	100.00

根据累计贡献率大于 85% 的原则提取 PC-1 与 PC-2,由表 4 可以看出,PC-1 对 PA/2、T30/1、LY2/gCT、P30/1、LY2/GH、T70/2、LY2/AA、LY2/G、P30/2、LY2/gCTL、P40/2、T40/2、LY2/LG 共 13 个传感器有较大的绝对值载荷,其中 LY2/gCT、LY2/

表 4 提取的主成分对于各传感器的载荷情况

Table 4 The loading of principle components on sensors

序号 No.	传感器 Sensor	因子载荷 Factor loading	
		PC-1	PC-2
1	PA/2	0.999*	-0.007
2	T30/1	0.997*	-0.043
3	LY2/gCT	-0.996*	0.017
4	P30/1	0.996*	-0.010
5	LY2/GH	-0.995*	0.089
6	T70/2	0.994*	-0.102
7	LY2/AA	-0.993*	0.109
8	LY2/G	-0.992*	0.112
9	P30/2	0.990*	-0.132

注: * 表示在 PC-1 上载荷较大; ** 表示在 PC-2 上载荷较大

Note: * more loading on PC-1; ** more loading on PC-2

GH、LY2/AA、LY2/G、LY2/gCTL 共 5 个传感器响应值对 PC-1 呈负相关。PC-2 对 P10/2、P40/1、TA/2、T40/1 共 4 个传感器有较大的绝对值载荷。

将 PC-1 与 PC-2 在各样品上的因子得分做聚类图(图 2),条斑紫菜与坛紫菜原藻明显分为 2 类。两者在 PC-1 与 PC-2 上均有较大差别,前者只有一个试样在 PC-2 与后者平行。条斑紫菜原藻位于右上部,坛紫菜原藻位于左上部。且条斑紫菜原藻各样品间差异较大,坛紫菜原藻差异较小,这可能与藻体细胞学特征有关。

条斑紫菜两种制品间有部分重叠,条斑紫菜制品-I 位于制品-II 左上部,且两者与原藻在 PC-1 上平行,差异主要在 PC-2,制品位于下方。坛紫菜两种制品也出现部分重叠,坛紫菜制品-I 位于制品-II 左下,两种坛紫菜制品与原藻差异也主要在 PC-2,且位于原藻下方。条斑紫菜制品各样品存在较大差异,但小于原藻,坛紫菜制品-II 各样品间差异比原藻小,坛紫菜制品-I 各样品间差异较制品-II 稍大。说明加工过程使得紫菜原藻的挥发性风味发生了较大变化,造成 PC-2 的因子得分降低,加工制品比原藻风味趋于统一。

如图 2 所示,条斑紫菜制品与坛紫菜制品在 PC-2 上基本处于平行位置。在方差贡献率为 73.99% 的 PC-1 上差异较大,说明两种制品风味差异明显。由于坛紫菜制品位于负轴,根据表 4,LY2/gCT、LY2/GH、LY2/AA、LY2/G、LY2/gCTL 共 5 个 LY 型传感器与 PC-1 呈负相关,并结合图 1,说明坛紫菜制品对 LY2/GH、LY2/AA、LY2/G、LY2/gCTL 共 4 个传感器较为敏感。表明坛紫菜制品的气味特征可能在硫化物、氨、胺类化合物和弱极性有机挥发物上有别于条斑紫菜制品。

序号 No.	传感器 Sensor	因子载荷 Factor loading	
		PC-1	PC-2
10	LY2/gCTL	-0.979*	0.188
11	P40/2	0.978*	0.109
12	T40/2	0.946*	0.277
13	LY2/LG	0.929*	-0.298
14	P10/2	-0.008	0.990**
15	P40/1	0.120	0.988**
16	TA/2	-0.359	0.931**
17	T40/1	-0.373	0.918**
18	P10/1	0.626	0.774

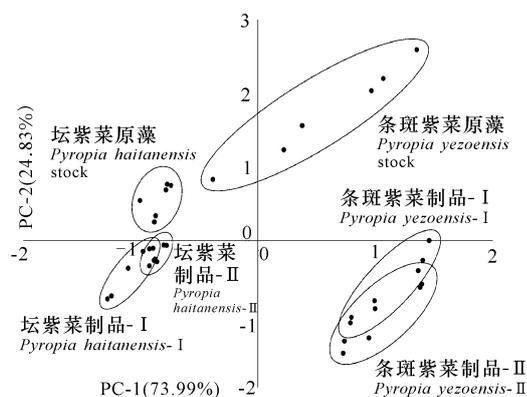


图2 条斑紫菜与坛紫菜气味主成分分析

Fig. 2 PCA chart of odors derived from *Pyropia yezoensis* and *Pyropia haitanensis*

3 讨论

应用电子鼻技术,从原藻与工业制品两个角度均可以有效区分条斑紫菜与坛紫菜的挥发性风味。为了消除产地因素的干扰,条斑紫菜与坛紫菜原藻样均取自同一海区,采用相同前处理方式。从敏感物质类型角度分析,条斑紫菜原藻对有机卤化物和芳香族类物质更为敏感。有机卤化物经常与污染物联系起来,同时在自然界广泛存在^[24],一般具有较低的气味活化值,如2,4,6-三氯苯甲醚的阈值达到0.002 μg/L(文献^[25])。二卤代苯酚在海藻中广泛存在,也具有较低的阈值,且刺激性强^[26],如2,6-二溴苯酚是澳大利亚对虾中类碘酞气味的主要贡献物质,其阈值比前者更低^[27]。坛紫菜原藻则对硫化物较为敏感。海洋生物硫化物中多甲基硫占有较大比重,二甲基硫最早是1935年在红藻门多管藻 *Polysiphonia fastigiata* 和 *Polysiphonia nigrescens* 中被发现^[28],后被日本学者作为紫菜中的特征挥发物^[10,17],研究表明,多种海藻含有二甲基硫、三甲基硫等气味阈值较低的硫化物^[29]。应用PDMS/DVB萃取头的SPME-GC/MS技术对两种紫菜原藻的挥发物分析发现,条斑紫菜中醛与酮的相对量值高于坛紫菜,挥发物组分上同样差异明显^[20]。较大差异的挥发性风味也是两种紫菜食品类不同的原因之一。

对条斑紫菜与坛紫菜不同采收期的挥发性风味分析表明,条斑紫菜中醛和酮对前期的风味贡献较大,中期为醇和酯,后期为烃类^[23]。坛紫菜的一水和二水挥发性成分变化较小,质量较稳定,三水和四水的坛紫菜其挥发性变化较大,应用电子鼻技术可以区分^[21]。本研究条斑紫菜制品采用相同工艺,未加入添加剂与调料,原藻取自不同的采收时期,但其制品挥发性风味轮廓较为接近,没有完全分开。说明加工

过程改变了条斑紫菜原藻的挥发性风味,使得风味趋于统一,保证了产品的稳定性。对同一生产年度的日本条斑紫菜的干制品中二甲基硫、硫化氢与甲硫醇含量的分析表明,不同海区条斑紫菜的二甲基硫含量差异较为明显^[11]。本研究两种坛紫菜同工艺生产制品的原藻同样取自不同海区,但两种制品的挥发性风味比较相似,本实验也没有完全区分,同样说明加工过程使得商品风味更为一致。

主成分分析法是通过降低多组相互交叉变量的维度而尽可能还原原始信息的一种统计方法。FOX 4000型电子鼻是采用18个传感器组成的传感器阵列,对不同气体具有广谱响应性与交叉敏感性。基于传感器的这种特性,适用主成分分析法,通过对响应值的归纳、整理,得到少量正交的综合指标,尽可能还原原始数据包含的信息,从而客观分析样品间的差异。电子鼻技术虽可在一定程度上模拟鼻子的识别气味方式,但与感官感受仍有一定距离,本研究采用的电子鼻应用范围广,响应速度快,其传感器适用于多个领域,但在气味模拟上反映的是样本的总体信息,而不是定性或定量的结果,因此该技术融合感官分析、质量分析等手段将更好地推动紫菜食品风味研究。

4 结论

本研究采用的电子鼻技术可以区分条斑紫菜与坛紫菜挥发性风味,两种紫菜在原藻及其制品上均有明显差异。加工工艺造成紫菜原藻挥发性风味发生显著变化,两种紫菜的加工制品风味趋于统一。

参考文献:

- [1] 农业部渔业局. 2015 中国渔业年鉴[M]. 北京:中国农业出版社,2015:223,248.
Fisheries Bureau. China Fisheries Yearbook(2015). Ministry of Agriculture, the People's Republic of China [M]. Beijing:China Agriculture Press,2015:223,248.
- [2] GROSCH W. Evaluation of the key odorants of foods by dilution experiments, aroma models and omission[J]. Chemical Senses,2001,26(5):533-545.
- [3] REVERCHON E,DE MARCO I. Supercritical fluid extraction and fractionation of natural matter[J]. Journal of Supercritical Fluids,2006,38(2):146-166.
- [4] ESTEBAN J L,MARTINEZ-CASTRO I,MORALES R, et al. Rapid identification of volatile compounds in aromatic plants by automatic thermal desorption-GC-MS [J]. Chromatographia,1996,42(1/2):63-72.
- [5] HUIE C W. A review of modern sample-preparation techniques for the extraction and analysis of medicinal plants[J]. Analytical and Bioanalytical Chemistry,2002,373:23-30.

- [6] YAN J, GUO X Z, DUAN S K, et al. Electronic nose feature extraction methods; A Review [J]. *Sensors*, 2015, 15: 27805-27831.
- [7] COSIO M S, BALLABIO D, BENEDETTI S, et al. Geographical origin and authentication of extra virgin olive oils by an electronic nose in combination with artificial neural networks [J]. *Analytica Chimica Acta*, 2006, 567: 202-210.
- [8] WILSON A D, BAIETTO M. Applications and advances in electronic-nose technologies [J]. *Sensors*, 2009, 9: 5100-5148.
- [9] KASAHARA K, NISHIBORI K. Flavouring of roasted laver- I [J]. *Bulletin of the Japanese Society of Scientific Fisheries*, 1975, 42(2): 193-199.
- [10] ARAKI S, OGAMA H, OOHUSA T, et al. Flavor of dried laver "nori" at different water activities, with special reference to dimethyl sulfide production [J]. *Bulletin of the Japanese Society of Scientific Fisheries*, 1983, 49(11): 1717-1720.
- [11] SHIN J A. Quality improvement of dried sheets of *Porphyra* using recombinant wild-type in *P. yezoensis* (Bangiales, Rhodophyta) [J]. *Algae*, 2003, 18(1): 95-100.
- [12] KASAHARA K, FUNAKOSHI J, NISHIBORI K. Identification of volatile components of roasted laver by GC-MS [J]. *Bulletin of the Japanese Society of Scientific Fisheries*, 1986, 52(4): 751-754.
- [13] OSUMI Y, HARADA K, FUKUDA N, et al. Changes of volatile sulfur compounds of 'Nori' products, *Porphyra* sp. during storage [J]. *Nippon Suisan Gakkaishi*, 1990, 56(4): 599-605.
- [14] DESHIMARU O, KATAYAMA T. Chemical studies on aromatic and odoriferous components of fisheries products- II [J]. *Memoirs of Faculty of Fisheries Kagoshima University, Special Issue*, 1970, 19: 103-112.
- [15] KATAYAMA T. Chemical studies on volatile constituents of sea-weeds- VII. Flavour and other characteristics of *Porphyra tenera* K. [J]. *Bulletin of the Japanese Society of Scientific Fisheries*, 1956, 22(4): 244-247.
- [16] SHU N, SHEN H. Identification of odour-active compounds in dried and roasted nori (*Porphyra yezoensis*) using a simplified gas chromatography-SNIF technique [J]. *Flavour and Fragrance Journal*, 2012, 27: 157-164.
- [17] IIDA H, NAKAMURA K, TOKUNAGA T. Changes of color and volatile sulfur concentration of dried laver during storage [J]. *Bulletin of the Japanese Society of Scientific Fisheries*, 1986, 52(6): 1077-1080.
- [18] KAJIWARA T, KASHIBE M, MATSUI K, et al. Volatile compounds and long-chain aldehydes formation in conchocelis-filaments of a red alga, *Porphyra tenera* [J]. *Phytochemistry*, 1990, 29: 2193-2195.
- [19] ZHANG M, LI R X, HU C M, et al. The metabolism of 8-heptadecene in *Pyropia* (Bangiaceae, Rhodophyta) [J]. *Journal of Applied Phycology*, 2014, 26: 1181-1187.
- [20] 胡传明, 徐继林, 朱建一, 等. 紫菜特征挥发性物质分析 [J]. *海洋科学*, 2011, 35(5): 106-111.
HU C M, XU J L, ZHU J Y, et al. Characteristic volatile matters in *Porphyra* (Bangiales) [J]. *Marine Sciences*, 2011, 35(5): 106-111.
- [21] 应苗苗, 施文正, 刘恩玲. 不同收割期坛紫菜挥发性成分分析 [J]. *食品科学*, 2010, 31(22): 421-426.
YING M M, SHI W Z, LIU E L. Analysis of volatile components in laver harvested in different time points [J]. *Food Sciences*, 2010, 31(22): 421-426.
- [22] 陈利梅, 李德茂, 叶乃好. 电子鼻在紫菜识别中的应用 [J]. *江苏农业科学*, 2010(3): 385-386, 437.
CHEN L M, LI D M, YE N H. The application of electronic nose on the discrimination of laver [J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2010(3): 385-386, 437.
- [23] 马飞. 两种经济藻类(条斑紫菜、地木耳)品质相关组分研究 [D]. 南京: 南京师范大学, 2013.
MA F. The Research on Quality Constituents of Two Economic Algae (*Porphyra yezoensis* and *Nostoc commune*) [D]. Nanjing: Nanjing Normal University, 2013.
- [24] KITTEL K M, DEIBLER K D. The contribution of halogenated aroma compounds to food flavor [C]// REINECCIUS G A, REINECCIUS T A (eds). *Heteroatomic Aroma Compounds*. [S. l. : s. n.], 2002: 269-280.
- [25] SPADONE J C, TAKEOKA G, LIARDON R. Analytical investigation of Rio off-flavor in green coffee [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 1990, 38: 226-233.
- [26] STRUBE A, BUETTNER A, CZERNY M. Influence of chemical structure on absolute odour thresholds and odour characteristics of ortho- and para-halogenated phenols and cresols [J]. *Flavour and Fragrance Journal*, 2012, 27(4): 304-312.
- [27] WHITFIELD F B, LAST J H, SHAW K J, et al. 2,6-Dibromophenol: The cause of an iodoform-like off-flavour in some Australian crustacea [J]. *Journal of Neurochemistry*, 1979, 32(32): 1867-1869.
- [28] HAAS P. The liberation of methyl sulphide by seaweed [J]. *The Biochemical Journal*, 1935, 29(6): 1297-1299.
- [29] MOORE R E. Volatile compounds from marine algae [J]. *Accounts of Chemical Research*, 1977, 10(1): 40-47.

(责任编辑: 陆雁)