赵文瑞, 陈志刚. 不同采收期条斑紫菜挥发性有机化合物分析 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(14): 314−325. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025060148

ZHAO Wenrui, CHEN Zhigang. Volatile Organic Compounds Analysis of *Pyropia yezoensis* at Different Harvest Periods[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(14): 314−325. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025060148

· 分析检测 ·

不同采收期条斑紫菜挥发性有机化合物分析

赵文瑞, 陈志刚*

（南京农业大学食品科技学院, 江苏南京 210095）

摘　要: 条斑紫菜具有多轮采收的特点，其品质和采收期密切相关，其中气味是衡量条斑紫菜品质的重要因素。为探究采收期对条斑紫菜气味的影响机制，本实验通过顶空固相微萃取气质联用技术（Head Space-Solid Phase Microextraction-Gas Chromatography-Mass Spectra，HS-SPME-GC-MS），以环己烷为内标，测定了构成一水至五水条斑紫菜气味的挥发性有机化合物（Volatile Organic Compounds，VOCs），同时使用电子鼻检测了一水至五水条斑紫菜的气味信息，采用主成分分析（Principal Component Analysis，PCA）和正交偏最小二乘法判别分析（Orthogonal Partial Least Squares Discrimination Analysis，OPLS-DA）对相关数据进行解析。结果表明，在一水至五水条斑紫菜中分别检测出 49、42、40、52 和 47 种 VOCs，总计 71 种 VOCs，主要由烃类（18 种）、醛类（24 种）和酮类（10 种）VOCs 组成，苯甲醛、藏红花醛、*β*-环柠檬醛、*β*-紫罗兰酮、环氧-*β*-紫罗兰酮、*α*-紫罗兰酮、3,5-辛二烯-2-酮、1-辛烯-3-醇、二氢猕猴桃内酯、8-十七烯、二十烷、1-溴-5-十七烯是各采收期条斑紫菜共有的、相对含量较高的 VOCs。各采收期条斑紫菜 VOCs 差异主要来自 8-十七烯、二十烷、二甲硫醚、1-溴-5-十七烯、*β*-紫罗兰酮、壬醛、(E)-环十二烯、*α*-紫罗兰酮、十五醛、3,5-辛二烯-2-酮、环氧-*β*-紫罗兰酮、二氢猕猴桃内酯、己醛和辛醛。条斑紫菜的气味特征有花香、果香、木质香、青草味和鱼腥味，一水条斑紫菜气味更加浓郁，三水条斑紫菜的鱼腥味较淡，四水和五水条斑紫菜有油脂氧化的辛辣和二甲硫醚的特征性硫磺味、鱼腥味等不良气味。电子鼻基本上可以辨别不同采收期条斑紫菜间的气味差异。综上，条斑紫菜 VOCs 成分和含量随着采收期的推移而变化，一水至三水条斑紫菜气味较好，四水、五水条斑紫菜有不良气味，品质较差。

关键词: 条斑紫菜, 顶空固相微萃取（HS-SPME）, 气相色谱-质谱法（GC-MS）, 香气活性值（OAV）, 电子鼻, 主成分分析（PCA）, 正交偏最小二乘法判别分析（OPLS-DA）

中图分类号: TS201.2　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)14−0314−12

本文网刊:

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025060148

Volatile Organic Compounds Analysis of *Pyropia yezoensis* at Different Harvest Periods

ZHAO Wenrui, CHEN Zhigang*

（College of Food Science and Technology, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China）

Abstract: *Pyropia yezoensis* exhibited the characteristic of multiple harvests, and its quality was closely associated with the harvest period. Odor served as a crucial criterion for evaluating the quality of *Pyropia yezoensis*. To investigate the mechanism by which harvest period affected the odor of *Pyropia yezoensis*, headspace-solid phase microextraction-gas chromatography-mass spectrometry (HS-SPME-GC-MS) was utilized, with cyclohexane used as the internal standard, to determine the volatile organic compounds (VOCs) that contributed to the odor of *Pyropia yezoensis* from the first to the fifth harvest period. Simultaneously, an electronic nose was employed to detect the odor profiles of *Pyropia yezoensis* at different harvest periods. The obtained data were then subjected to principal component analysis (PCA) and orthogonal partial least squares discrimination analysis (OPLS-DA) for in-depth exploration. The results indicated that 49, 42, 40, 52 and 47 kinds of VOCs were respectively detected in the first to the fifth harvest *Pyropia yezoensis*. In total, 71 kinds of VOCs were iden-

收稿日期: 2025−06−12

作者简介: 赵文瑞（1998−）, 男, 硕士研究生, 研究方向: 食品风味, E-mail: 2020108007@stu.njau.edu.cn。

*** 通信作者:** 陈志刚（1971−）, 男, 博士, 教授, 研究方向: 农产品精深加工, E-mail: zgchen@njau.edu.cn。

tified. These VOCs mainly consisted of hydrocarbons (18 kinds), aldehydes (24 kinds), and ketones (10 kinds). Benzaldehyde, safranal, *β*-cyclocitral, *β*-ionone, epoxy-*β*-ionone, *α*-ionone, 3,5-octadien-2-one, 1-octen-3-ol, dihydroactinidiolide, 8-heptadecene, eicosane, and 1-bromo-5-heptadecene were the common and relatively high-proportion VOCs in *Pyropia yezoensis* at various harvest periods. The variations in the relative contents of VOCs among different harvest periods of *Pyropia yezoensis* mainly stemmed from 8-heptadecene, eicosane, dimethyl sulfide, 1-bromo-5-heptadecene, *β*-ionone, nonanal, (E)-cyclododecene, *α*-ionone, pentadecanal, 3,5-octadien-2-one, epoxy-*β*-ionone, dihydroactinidiolide, hexanal, and octanal. The odor characteristics of *Pyropia yezoensis* encompassed floral, fruity, woody, grassy, and fishy notes. Specifically, the odor of first-harvest *Pyropia yezoensis* was more intense, the fishy odor of third-harvest *Pyropia yezoensis* was milder, while fourth-harvest and fifth-harvest *Pyropia yezoensis* exhibited more unpleasant odors, such as the pungent odor associated with lipid oxidation, as well as the characteristic sulfurous and fishy odors imparted by dimethyl sulfide. The electronic nose was basically capable of discerning the odor differences among first-harvest to fifth-harvest *Pyropia yezoensis*. This study indicates that the VOCs profile —including both qualitative composition and quantitative abundance—in *Pyropia yezoensis* exhibits significant temporal variation across successive harvests. Specifically, samples from the first to the third harvest period are characterized by favorable olfactory attributes, whereas those from the fourth and fifth harvest period to develop off-odors and demonstrate a marked decline in overall quality.

Key words: *Pyropia yezoensis*; head space-solid phase microextraction (HS-SPME); gas chromatography-mass spectra (GC-MS); odor activity value (OAV); electronic nose; principal component analysis (PCA); orthogonal partial least squares discrimination analysis (OPLS-DA)

紫菜（*Pyropia/Porphyra* spp.）是生长在潮间带、颜色呈紫褐、紫红或褐绿的大型海藻，隶属红藻门（Rhodophyta）、原红藻纲（Protoflorideae）、红毛菜目（Bangiales）、红毛菜科（Bangiaceae）[1]。紫菜营养价值较高，富含蛋白质、膳食纤维、不饱和脂肪酸、矿物质和维生素，具有抗肿瘤、抗氧化、降血压、降血糖、降血脂和免疫调节等多种生理活性[2−4]。条斑紫菜（*Pyropia yezoensis*）因其滋味鲜美、风味独特而深受人们喜爱、被广泛种植，具有很高的经济价值[5]。条斑紫菜的采收通常从 11 月至次年 4、5 月份，共 5 轮，根据采收先后称其为一水、二水、三水、四水和五水条斑紫菜。条斑紫菜的品质和采收期有关，前三水条斑紫菜具有良好的口感和可加工性，四水和五水条斑紫菜口感粗糙，可加工性差。

随着消费水平的提高，消费者对食品提出更多、更高的要求，风味也逐渐成为评价食品品质的重要标准。当前针对条斑紫菜挥发性成分的研究较少，大多停留在定性分析阶段，对于特征气味的描述也缺少定量数据支撑[6−8]。本研究通过顶空固相微萃取气相色谱-质谱联用（Head Space-Solid Phase Microextraction-Gas Chromatography-Mass Spectra, HS-SPME-GC-MS）和电子鼻技术，检测一个采收周期条斑紫菜的挥发性有机化合物（Volatile Organic Compounds, VOCs），并分析气味特征随采收期的变化规律，为条斑紫菜的品质鉴定、分类分级和高值化提供数据依据。

1　材料与方法

1.1　材料与仪器

一水至五水条斑紫菜　江苏省连云港润雨海藻培植厂提供；环己烷　纯度≥99%（GC），上海麦克林生化科技有限公司。

BSA224S-CW 电子天平　赛多利斯上海贸易有限公司；HH-1 恒温水浴锅　金坛区科析仪器有限公司；NUT-Ⅱ-5T 超纯水处理系统　南京优普试验仪器有限公司；TSQ 900 三重四极杆气质联用仪　赛默飞世尔科技公司；PEN3 电子鼻　德国 Airsense 公司；二乙烯基苯/碳分子筛/聚二甲基硅氧烷（DVB/CAR/PDMS）萃取头（50/30 μm）　美国 Supelco 公司；HP-5MS 弹性毛细管柱（30 m×0.25 mm×0.25 μm）　美国 Agilent 公司。

1.2　实验方法

1.2.1　HS-SPME-GC-MS 检测　参考 QI 等[9] 的方法并作修改。准确称取 1.0000 g 样品，加入 5 mL 饱和 NaCl 溶液，再加入 5 μL 环己烷内标液（1.58 g/L，乙醇稀释）于 20 mL 顶空瓶中，上机 60 ℃ 下孵化 20 min。萃取头于进样口 250 ℃ 老化 30 min 后插入顶空瓶，60 ℃ 下吸附 40 min 后取出并立即插入进样口，250 ℃ 解吸 5 min。每组样品做 3 个平行。

GC 条件：色谱柱：HP-5MS 弹性毛细管柱（30 m×0.25 mm×0.25 μm）；升温程序：起始柱温 40 ℃，保持 5 min，以 5 ℃/min 程序升温至 200 ℃，保持 5 min，再以 10 ℃/min 升到 250 ℃；载气（He）流量 1 mL/min；不分流。

MS 条件：电子轰击离子源；电子能量 70 eV；传输线温度 250 ℃；离子源温度 280 ℃。质量扫描范围 m/z 35~550。

挥发性有机化合物（Volatile Organic Compounds, VOCs）定性定量分析：质谱数据和 NIST 20 数据库进行比较，正反匹配度均大于 800 的定性。用内标法和面积归一法分别计算 VOCs 的含量和相对含量。

香气活性值（Odor Activity Value, OAV）计算公式为[10]：

$$OAV = C/OT$$

式中：C 为 VOCs 在水中的浓度（mg/kg）；OT 为 VOCs 在水中的阈值（mg/kg），阈值取自文献 [11]。

1.2.2 电子鼻检测 准确称取 1.0000 g 样品，加入 5 mL 饱和 NaCl 溶液于 20 mL 顶空瓶中混匀。测定前将顶空瓶置于 60 ℃ 水浴平衡 30 min。以干净空气作为载气，流速 400 mL/min，清洗时间 100 s，数据采集时间 120 s。每个采收期条斑紫菜样品做 6 个平行。PEN3 电子鼻传感器性能如表 1 所示。

表 1 PEN3 电子鼻各传感器性能

Table 1 Performance of various sensors of PEN3

传感器名称	主要性能	代表物质	探测阈值(mL/m³)
W1C	对芳香化合物敏感	甲苯	10
W5S	对氮氧化物敏感	NO_2	1
W3C	对芳香化合物、氨气敏感	苯	10
W6S	对氢气有选择性	H_2	100
W5C	对烷烃、芳香化合物敏感	丙烷	1
W1S	对甲烷敏感	CH_4	100
W1W	对无机硫化物、萜类物质敏感	H_2S	1
W2S	对乙醇敏感	乙醇	100
W2W	对有机硫化物敏感	H_2S	1
W3S	对烷烃敏感	CH_4	10

1.3 数据处理

使用 Microsoft Excel 2021 计算各采收期条斑紫菜 VOCs 的含量、百分含量和 OAV，以平均值±标准差形式呈现；使用 IBM SPSS Statistic 26.0 软件对上述数据进行单因素方差分析，并使用新复极差法进行多重比较（显著性水平 $P<0.05$）。使用 SIMCA-P 14.1 软件对 VOCs 的含量和相对含量分别进行主成分分析（Principal Component Analysis, PCA）和正交偏最小二乘法判别分析（Orthogonal Partial Least Squares Discrimination Analysis, OPLS-DA）。

2 结果与分析

2.1 不同采收期条斑紫菜 VOCs 检测结果

通过 HS-SPME-GC-MS 在一水至五水条斑紫菜中分别检测出 49、42、40、52、47 种，共 71 种 VOCs，包括醛类 24 种、酮类 10 种、醇类 8 种、酯类 5 种、烃类 18 种、杂环化合物 4 种、芳香化合物

表 2 不同采收期条斑紫菜挥发性成分及含量

Table 2 Contents of VOCs in *Pyropia yezoensis* at different harvest periods

序号	名称	含量(μg/g)				
		一水条斑紫菜	二水条斑紫菜	三水条斑紫菜	四水条斑紫菜	五水条斑紫菜
	醛类					
1	(E)-2-甲基-2-丁烯醛	0.41±0.01^{c}	0.68±0.04^{c}	3.27±0.27^{a}	1.24±0.06^{b}	1.19±0.03^{b}
2	2-己烯醛	1.83±0.19^{a}	–	0.78±0.04^{b}	0.85±0.14^{b}	0.95±0.09^{b}
3	(E)-2-乙基-2-丁烯醛	–	1.12±0.05^{c}	2.54±0.18^{a}	1.33±0.15^{bc}	1.51±0.26^{b}
4	己醛	7.20±0.57^{a}	–	2.29±0.10^{c}	6.68±0.51^{ab}	5.83±0.44^{b}
5	庚二烯醛	1.03±0.18^{a}	0.18±0.00^{d}	0.26±0.02^{d}	0.51±0.04^{c}	0.80±0.04^{b}
6	(Z)-4-庚烯醛	2.03±0.13^{a}	0.38±0.02^{d}	0.83±0.06^{b}	0.91±0.05^{b}	0.64±0.08^{c}
7	庚醛	–	1.52±0.03^{c}	–	2.40±0.12^{b}	3.03±0.44^{a}
8	苯甲醛	3.30±0.24^{bc}	3.24±0.18^{bc}	4.68±0.20^{a}	3.07±0.04^{c}	3.74±0.33^{b}
9	(E)-2-辛烯醛	–	–	–	–	1.03±0.07
10	辛醛	–	–	–	4.28±0.18^{a}	3.03±0.25^{b}
11	(E,Z)-2,6-壬二烯醛	7.85±0.78^{a}	1.83±0.07^{b}	–	1.76±0.12^{b}	1.64±0.15^{b}
12	(Z)-2-壬烯醛	1.81±0.15^{a}	0.14±0.01^{c}	–	0.49±0.08^{b}	0.64±0.11^{b}
13	壬醛	–	3.46±0.35^{b}	–	7.09±0.81^{a}	3.71±0.38^{b}
14	藏红花醛	10.09±0.82^{a}	0.30±0.02^{c}	2.02±0.40^{b}	0.42±0.07^{c}	0.63±0.22^{c}
15	*β*-环柠檬醛	12.56±1.35^{a}	2.65±0.10^{c}	5.45±0.39^{b}	3.24±0.18^{c}	2.57±0.40^{c}
16	*α*-环柠檬醛	0.61±0.09^{a}	–	0.25±0.03^{b}	0.14±0.01^{c}	–
17	(Z)-4-癸烯醛	0.78±0.11	–	–	–	–
18	(Z)-2-癸烯醛	–	–	–	0.31±0.00^{b}	0.36±0.04^{a}
19	癸醛	1.15±0.08^{a}	0.40±0.02^{c}	0.49±0.08^{c}	0.86±0.17^{b}	0.78±0.15^{b}
20	2,6,6-三甲基-1-环己烯-1-乙醛	1.60±0.21^{a}	0.34±0.01^{c}	0.89±0.17^{b}	0.49±0.12^{c}	0.29±0.02^{c}
21	十一醛	–	–	–	0.67±0.09^{a}	0.42±0.05^{b}
22	十二醛	–	0.96±0.10^{ab}	1.30±0.30^{a}	0.78±0.19^{b}	0.58±0.07^{b}
23	十三醛	–	–	–	0.79±0.06	–
24	十五醛	–	6.57±0.19^{a}	2.07±0.35^{c}	4.76±0.47^{b}	1.40±0.27^{d}
	合计	52.24±3.46^{a}	23.76±0.34^{d}	27.13±2.07^{d}	43.05±1.27^{b}	34.78±3.31^{c}
	酮类					
1	3,5-辛二烯-2-酮	20.39±1.30^{a}	1.72±0.14^{d}	5.24±0.49^{b}	2.51±0.13^{cd}	3.66±0.52^{c}
2	异戊基丙酮	–	–	–	0.57±0.08^{a}	0.36±0.03^{b}
3	2,6,6-三甲基环己烯-1,4-二酮	2.01±0.20	–	–	–	–
4	异佛尔酮	0.77±0.05	–	–	–	–

续表 2

序号	名称	含量(μg/g)				
		一水条斑紫菜	二水条斑紫菜	三水条斑紫菜	四水条斑紫菜	五水条斑紫菜
5	2,2,6-三甲基环己酮	2.30±0.16^{a}	0.32±0.02^{e}	1.11±0.10^{b}	0.80±0.05^{c}	0.54±0.04^{d}
6	3,4-脱氢-β-紫罗兰酮	1.60±0.10^{a}	0.35±0.02^{c}	1.17±0.08^{b}	0.32±0.03^{c}	0.28±0.03^{c}
7	α-紫罗兰酮	24.13±2.69^{a}	2.70±0.19^{c}	5.47±0.33^{b}	2.54±0.30^{c}	1.63±0.14^{c}
8	β-紫罗兰酮	41.17±3.20^{a}	9.00±0.65^{d}	28.92±1.36^{b}	13.50±1.34^{c}	7.68±0.78^{d}
9	环氧-β-紫罗兰酮	20.37±2.23^{a}	3.69±0.11^{c}	12.23±0.94^{b}	5.73±0.47^{c}	5.39±0.29^{c}
10	香叶基丙酮	3.34±0.08^{a}	1.04±0.06^{c}	2.05±0.15^{b}	–	–
	合计	116.07±5.02^{a}	18.81±0.53^{d}	56.19±3.16^{b}	25.96±2.08^{c}	19.54±1.02^{d}
	醇类					
1	1-戊烯-3-醇	2.14±0.24	–	–	–	–
2	(Z)-2-戊烯-1-醇	1.12±0.11	–	–	–	–
3	1-辛烯-3-醇	8.97±0.91^{a}	2.42±0.07^{cd}	1.95±0.15^{d}	3.99±0.09^{b}	3.24±0.29^{bc}
4	(E)-2-辛烯醇	1.48±0.14^{a}	0.19±0.02^{b}	–	0.20±0.03^{b}	0.19±0.13^{b}
5	2,4,4-三甲基-环己二烯-1-醇	1.39±0.14	–	–	–	–
6	(E)-2-十三烯醇	–	0.70±0.08	–	–	–
7	2-甲基-1-十六烷醇	–	–	0.56±0.02^{a}	0.28±0.01^{b}	0.30±0.07^{b}
8	(E)-2-十八碳烯-1-醇	–	2.41±0.19^{b}	4.47±0.33^{a}	1.03±0.57^{c}	1.23±0.06^{c}
	合计	15.10±1.37^{a}	5.72±0.31^{bc}	6.97±0.49^{b}	5.50±0.65^{bc}	4.96±0.45^{c}
	酯类					
1	二氢猕猴桃内酯	17.29±1.16^{a}	3.22±0.09^{c}	10.91±0.51^{b}	3.78±0.28^{c}	3.98±0.08^{c}
2	邻苯二甲酸二丁酯	–	0.81±0.05^{a}	0.58±0.05^{b}	0.39±0.08^{c}	0.25±0.02^{d}
3	邻苯二甲酸己烷-3-醇异丁醇酯	0.54±0.04^{a}	–	0.35±0.00^{b}	0.28±0.02^{c}	0.31±0.04^{bc}
4	棕榈酸乙酯	0.78±0.08^{b}	1.02±0.03^{a}	0.37±0.07^{c}	0.25±0.02^{d}	0.23±0.04^{d}
5	邻苯二甲酸二(2-丙基戊基)酯	0.35±0.04^{a}	–	–	0.20±0.06^{b}	–
	合计	18.96±1.32^{a}	5.05±0.16^{c}	12.21±0.52^{b}	4.89±0.22^{c}	4.77±0.15^{c}
	烃类					
1	十二烷	–	1.26±0.14^{a}	–	1.18±0.10^{ab}	1.00±0.16^{b}
2	2,6-二甲基-十一烷	2.03±0.15	–	–	–	–
3	4-甲基十二烷	1.83±0.12	–	–	–	–
4	十四烷	–	2.32±0.38^{b}	3.75±0.52^{a}	1.87±0.52^{b}	1.85±0.13^{b}
5	2,3,5,8-四甲基癸烷	1.75±0.03	–	–	–	–
6	十五烷	2.03±0.39^{a}	–	1.88±0.26^{a}	1.42±0.28^{ab}	0.94±0.25^{b}
7	2,6,11-三甲基十二烷	7.42±0.43	–	–	–	–
8	十六烷	5.63±0.58^{a}	1.49±0.17^{bc}	1.77±0.24^{b}	0.88±0.17^{cd}	0.53±0.16^{d}
9	3-甲基十五烷	1.36±0.11^{a}	–	0.73±0.17^{b}	–	–
10	二十烷	49.26±2.50^{b}	81.08±10.08^{a}	25.61±4.14^{c}	11.18±2.13^{d}	8.87±1.26^{d}
11	2,6,10,15-四甲基十七烷	2.46±0.21^{a}	–	–	0.82±0.09^{b}	–
12	(E)-环十二烯	–	12.67±1.09^{a}	13.83±2.44^{a}	–	–
13	(Z)-7-十六烯	–	1.14±0.22	–	–	–
14	8-十七烯	249.96±17.74^{b}	317.53±12.63^{a}	265.57±18.64^{b}	100.09±12.61^{c}	61.45±12.40^{c}
15	1-溴-5-十七烯	1.02±0.17^{b}	2.79±0.23^{b}	2.43±0.25^{b}	1.59±0.26^{b}	11.12±2.50^{a}
16	9-十九烯	0.40±0.04^{b}	0.67±0.06^{a}	0.40±0.06^{b}	0.24±0.03^{c}	–
17	新植二烯	1.55±0.02^{b}	2.02±0.12^{a}	1.11±0.12^{c}	0.58±0.04^{d}	–
18	9-二十烷炔	1.51±0.26^{ab}	1.05±0.07^{bc}	2.31±1.10^{a}	0.58±0.17^{c}	–
	合计	328.21±21.74^{b}	424.02±15.39^{a}	319.40±25.97^{b}	120.43±15.79^{c}	85.77±15.04^{c}
	芳香化合物					
1	2,4-二特丁基苯酚	–	–	–	0.22±0.04^{a}	0.19±0.00^{a}
	合计	–	–	–	0.22±0.04^{a}	0.19±0.00^{a}
	杂环化合物					
1	3-乙基-4-甲基吡咯-2,5-二酮	1.76±0.56^{a}	0.25±0.03^{b}	–	–	0.26±0.01^{b}
2	3-乙基-2,5-甲基吡嗪	5.15±0.30^{a}	–	3.72±0.34^{b}	–	–
3	(E)-2-(2-戊烯基)呋喃	1.67±0.08	–	–	–	–
4	1,2-环氧十四烷	–	0.95±0.06^{a}	–	0.94±0.47^{a}	0.48±0.02^{b}
	合计	8.57±0.71^{a}	1.20±0.09^{c}	3.72±0.34^{b}	0.94±0.47^{c}	0.74±0.02^{c}

续表 2

序号	名称	含量(μg/g)				
		一水条斑紫菜	二水条斑紫菜	三水条斑紫菜	四水条斑紫菜	五水条斑紫菜
	含硫化合物					
1	二甲硫醚	–	–	–	11.11±1.11^{b}	23.83±1.39^{a}
	合计	–	–	–	11.11±1.11^{b}	23.83±1.39^{a}
	总计	539.16±32.57^{a}	478.57±15.90^{b}	425.63±30.24^{b}	212.10±19.79^{c}	174.57±20.50^{c}

注: 同行不同字母表示不同组之间存在显著性差异(P<0.05); “–”表示未检出。

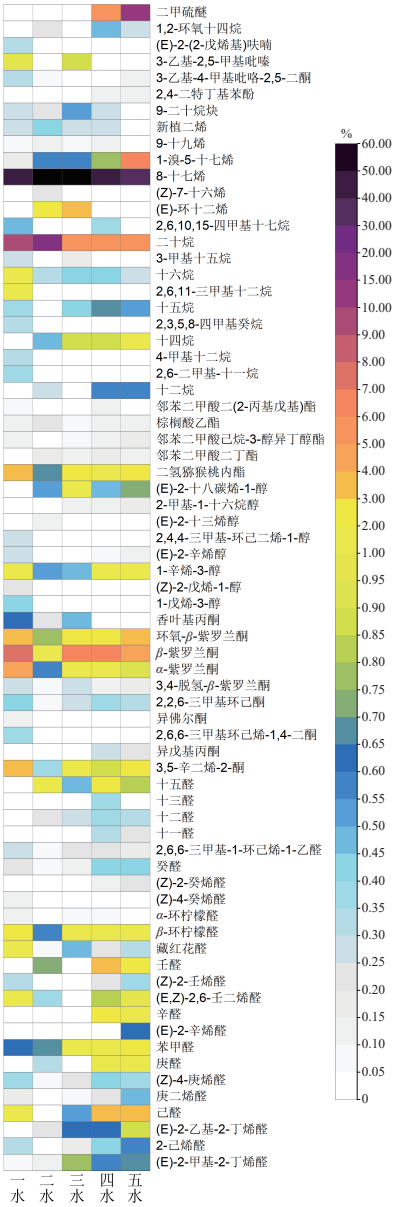


图 1 各种 VOCs 在不同采收期条斑紫菜中的相对含量

Fig.1 Relative contents of various VOCs in *Pyropia yezoensis* at different harvest periods

和含硫化合物各 1 种。不同采收期条斑紫菜各种 VOCs 含量见表 2, 相对含量见图 1, 各类 VOCs 的相对含量见图 2。

2.2 不同采收期条斑紫菜各类 VOCs

2.2.1 醛类 VOCs 醛类相对含量在前三水条斑紫菜中不足 10%, 在四水、五水条斑紫菜中为 20% 左右。(E)-2-甲基-2-丁烯醛、(Z)-4-庚烯醛、庚二烯

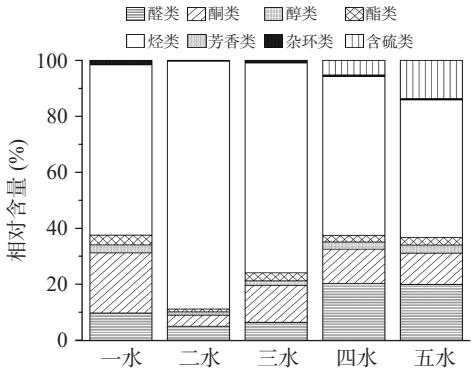


图 2 主要 VOCs 在不同采收期条斑紫菜中的相对含量

Fig.2 Relative contents of main VOCs in *Pyropia yezoensis* at different harvest periods

醛、癸醛、2,6,6-三甲基-1-环己烯-1-乙醛、苯甲醛、藏红花醛、β-环柠檬醛是五个采收期条斑紫菜共有的。己醛、2-己烯醛、(E,Z)-2,6-壬二烯醛、(Z)-2-壬烯醛、十二醛、(E)-2-乙基-2-丁烯醛、十五醛在四个采收期条斑紫菜中检测出。庚醛、壬醛存在于二、四、五水条斑紫菜中, 且在四水和五水条斑紫菜中更丰富。辛醛、(Z)-2-癸烯醛、十一醛只在四水和五水条斑紫菜中检出, 且辛醛含量较为丰富。醛类大多来自于不饱和脂肪酸的氧化降解, 一些醛类则来自氨基酸和类胡萝卜素的代谢, 如苯甲醛来自于苯丙氨酸的 Strecker 降解, 藏红花醛、β-环柠檬醛来自于 β-胡萝卜素的氧化裂解[12−14]。

2.2.2 酮类 VOCs 酮类相对含量在一水条斑紫菜中最高, 为 21.55%; 在二水条斑紫菜中最低, 为 3.93%; 在三至五水条斑紫菜中为 11%~14%。β-紫罗兰酮、环氧-β-紫罗兰酮、α-紫罗兰酮、3,4-脱氢-β-紫罗兰酮、2,2,6-三甲基环己酮、3,5-辛二烯-2-酮是所有采收期条斑紫菜共有的。2,6,6-三甲基环己烯-1,4-二酮、异佛尔酮是一水条斑紫菜特有的, 香叶基丙酮只在前三水条斑紫菜中检出, 异戊基丙酮只存在于四水和五水条斑紫菜。上述酮类主要来自类胡萝卜素的氧化降解, 如类胡萝卜素 C_9、C_{10} 间的双键裂解生成 α-紫罗兰酮与 β-紫罗兰酮, 高温诱导活性氧氧化 β-胡萝卜素生成环氧-β-紫罗兰酮、2,2,6-三甲基环己酮、香叶基丙酮[12,15]。

2.2.3 醇类 VOCs 条斑紫菜醇类相对含量不足 2%。1-辛烯-3-醇是所有采收期条斑紫菜共有的, (E)-2-辛烯醇、(E)-2-十八碳烯-1-醇在四个采收期条

斑紫菜中检测出，1-戊烯-3-醇、(Z)-2-戊烯-1-醇、2,4,4-三甲基-环己二烯-1-醇是一水条斑紫菜特有的，(E)-2-十三烯醇是二水条斑紫菜特有的。醇类主要来自不饱和脂肪酸的氧化分解。如 1-辛烯-3-醇和 1-戊烯-3-醇分别来自 ω-6 和 ω-3 多不饱和脂肪酸的降解[12−13]。

2.2.4　酯类 VOCs　条斑紫菜酯类相对含量也比较低，不足 4%。其在一水条斑紫菜中最高，为 3.51%；在二水条斑紫菜中最低，为 1.06%；在三至五水条斑紫菜中为 2%~3%。二氢猕猴桃内酯和棕榈酸乙酯是所有采收期条斑紫菜共有的。二氢猕猴桃内酯是酯类的主要组成，是 β-胡萝卜素氧化的产物[15−16]。此外，还检测到少量邻苯二甲酸二丁酯、邻苯二甲酸己烷-3-醇异丁醇酯、邻苯二甲酸二(2-丙基戊基)酯，它们可能源于海水中的塑料污染[17]。

2.2.5　烃类 VOCs　烃类相对含量在一至四水条斑紫菜 VOCs 中均在 50% 以上，在五水条斑紫菜 VOCs 中为 48.81%。8-十七烯、二十烷、1-溴-5-十七烯、十六烷是所有采收期条斑紫菜共有的，8-十七烯占烃类的 70% 以上，其次是二十烷，占 7.99%~19.11%。十四烷、十五烷、9-十九烯、新植二烯、9-二十烷炔在四个采收期条斑紫菜中检出。烃类主要来源于脂肪酸烷氧自由基的均裂[18]。

2.2.6　其他 VOCs　杂环类 VOCs 中，3-乙基-2,5-甲基吡嗪在一水和三水条斑紫菜中检出，可能是紫菜干燥时局部温度较高发生了美拉德反应[16]；(E)-2-(2-戊烯基)呋喃是一水条斑紫菜特有的，可能来自亚麻酸氧化降解[19]。在四水和五水条斑紫菜中检出较多的二甲硫醚(Dimethylsulfide, DMS)，相对含量分别为 5.26% 和 13.75%，其生成与甲硫氨酸的代谢有关[12,15]；还检出少量 2,4-二特丁基苯酚，可能是苯丙氨酸的代谢产物[15]。

以往单独研究条斑紫菜气味的文献较少，大多是在不同种类藻类气味对比的研究中有所涉及，因样品来源和采收时间不同，测得 VOCs 也不尽相同[6−8,12,16]。VOCs 的检测结果也受检测方法的影响，CAO 等[7] 使用气相色谱-离子迁移谱法(Gas Chromatography-Ion Mobility Spectrometry, GC-IMS)检测了一水、二水、四水和六水条斑紫菜的 VOCs，检测出 30 余种 VOCs，而未检出烃类 VOCs。本实验首次通过 HS-SPME-GC-MS，定量检测了连续、完整采收周期条斑紫菜的 VOCs，提供了更加全面、详实的气味数据。

2.3　不同采收期条斑紫菜 VOCs 的主要差异

PCA 和 OPLS-DA 是常见的多元变量统计方法，在最大程度保留原始数据信息的情况下，将多个变量降维成少量主成分，降低数据复杂度，使数据可视化[20]。PCA 是一种无监督的判别模式，初步评估数据是否具有分类样本的能力；OPLS-DA 是一种有监督的判别模式，能够消除与类别信息无关的数据，筛选出样本的特征变量[21]。

各采收期条斑紫菜 VOCs 含量和相对含量 PCA 结果见图 3，第一、第二主成分累计贡献率分别为 88.9% 和 81.4%，能够反映条斑紫菜 VOCs 含量和相对含量的整体信息。根据 VOCs 含量分析，不能很好区分四水和五水条斑紫菜，说明二者 VOCs 在含量上十分相似；根据 VOCs 相对含量分析，各采收期条斑紫菜在空间上组内聚类、组间分散，可以很好区分。

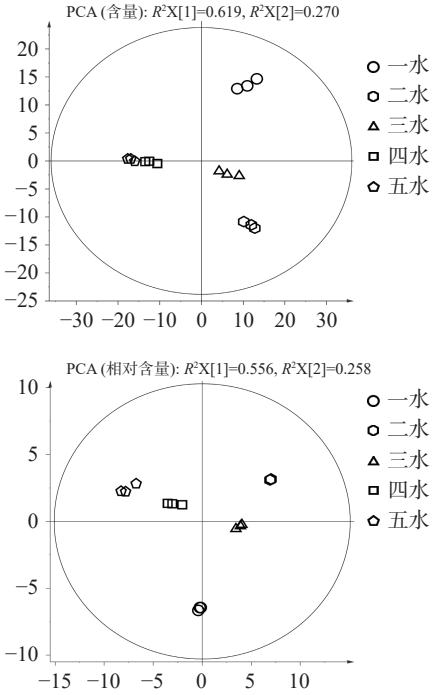


图 3　不同采收期条斑紫菜 VOCs 含量和相对含量的 PCA

Fig.3　PCA of VOCs contents and relative contents in *Pyropia yezoensis* at different harvest periods

各采收期条斑紫菜 VOCs 含量和相对含量 OPLS-DA 结果见图 4 和图 5。一水至五水条斑紫菜在空间上的分布情况和 PCA 结果类似。为验证 OPLS-DA 模型可靠性、防止模型过拟合，进行 200 次置换检验。最右侧原始的 R^2 和 Q^2 点高于左侧所有的 R^2 和 Q^2 点，且 Q^2 回归线截距小于 0，模型可靠，没有过拟合[20]。变异权重参数值(Variable Important for the Projection, VIP)能够衡量 OPLS-DA 模型各变量积累差异对各组样本分类判别的影响，VIP>1 影响显著，VIP 值越大影响越显著[9]。8-十七烯、二十烷、二甲硫醚、1-溴-5-十七烯、β-紫罗兰酮、壬醛、(E)-环十二烯、α-紫罗兰酮、十五醛、3,5-辛二烯-2-酮、环氧-β-紫罗兰酮、二氢猕猴桃内酯的含量和相对含量在不同采收期条斑紫菜间差异显著；藏红花醛的含量以及己醛、辛醛的相对含量在不同采收期条斑紫菜间差异显著。

8-十七烯是脂肪酸酶促反应的产物，作为化学信号或生物信息素可能在抵御机械损伤中起作用[22]，其含量和相对含量随采收期推移先上升后下降，在二水条斑紫菜中最高，在五水条斑紫菜中最低。二十烷的

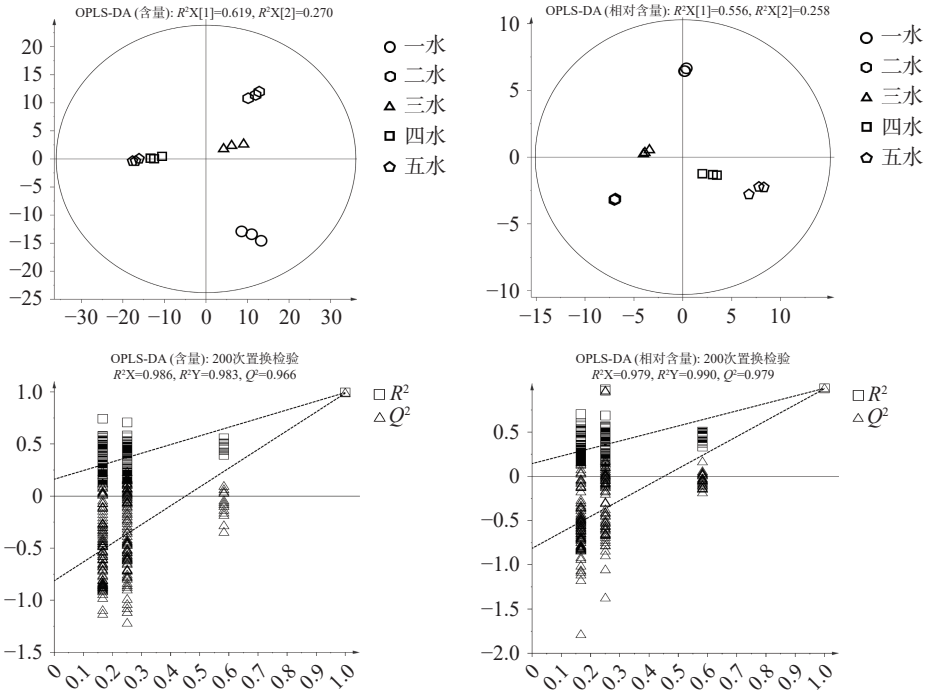


图 4 不同采收期条斑紫菜 VOCs 含量和相对含量的 OPLS-DA

Fig.4 OPLS-DA of VOCs contents and relative contents in *Pyropia yezoensis* at different harvest periods

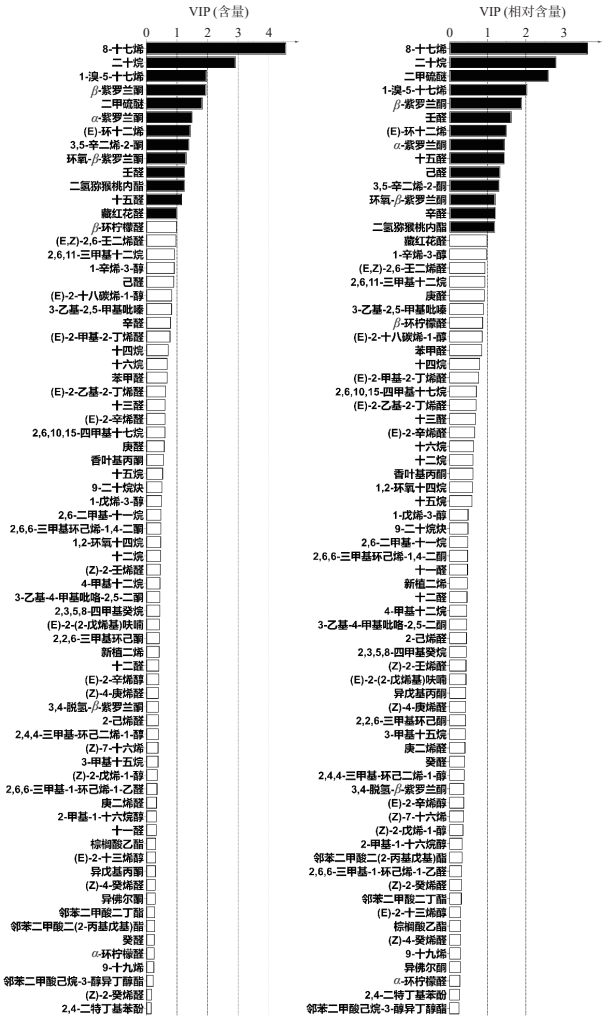


图 5 不同采收期条斑紫菜 VOCs 含量和相对含量的 OPLS-DA 模型 VIP 值

Fig.5 VIP from OPLS-DA of VOCs contents and relative contents in *Pyropia yezoensis* at different harvest periods

含量和相对含量变化规律与 8-十七烯类似。二甲硫醚的产生与藻类衰老死亡有关[23], 这解释了为什么二甲硫醚只在四水和五水条斑紫菜中检出, 且在五水条斑紫菜中的含量和相对含量是四水条斑紫菜的 2 倍。1-溴-5-十七烯可能是细胞清除活性氧等强氧化剂的产物[15,24], 在一水至四水条斑紫菜中的含量为 1~3 μg/g、相对含量不足 1%, 而在五水条斑紫菜中含量急剧上升至 11.12 μg/g, 相对含量达到 6.29%。*α*-紫罗兰酮、*β*-紫罗兰酮、环氧-*β*-紫罗兰酮、二氢猕猴桃内酯、藏红花醛等类胡萝卜素氧化降解产物在一水条斑紫菜中的含量和相对含量显著高于其他采收期, 引起了较大差异。己醛、辛醛、壬醛的相对含量在四水和五水条斑紫菜中较高; (E)-环十二烯只在二水和三水条斑紫菜中检出, 相对含量分别为 2.64%、3.24%; 十五醛的含量和相对含量无明显的变化规律。

2.4 各采收期条斑紫菜气味特征分析

VOCs 的浓度和阈值是气味特征的决定因素, 当浓度超过阈值时, 才能被人感知[25]。OAV 是 VOCs 浓度和阈值的比值, OAV>1 则对整体风味有贡献, 数值越大贡献越大。表 3 列出 42 种阈值有文献记录的 VOCs 的 OAV, 以及文献中对这些 VOCs 的气味描述[12−14,25−28]。

条斑紫菜醛类 VOCs 的来源和种类众多。来自脂肪酸代谢的脂肪醛大多具有青草味, (E,Z)-2,6-壬二烯醛给除三水外的条斑紫菜提供较浓的青草味和黄瓜味; (Z)-2-壬烯醛是鱼腥味的重要来源, 己醛也对鱼腥味有较大贡献; 链长较短的饱和脂肪醛具有脂肪氧化的不良风味, 如二水、四水和五水条斑紫菜中

表 3　不同采收期条斑紫菜 VOCs 的 OAV

Table 3　OAV of VOCs in *Pyropia yezoensis* at different harvest periods

物质名称	气味描述[12−14,25−28]	阈值(μg/kg)	OAV				
			一水条斑紫菜	二水条斑紫菜	三水条斑紫菜	四水条斑紫菜	五水条斑紫菜
(E)-2-甲基-2-丁烯醛		458.9	0.18±0.00^{c}	0.30±0.02^{c}	1.43±0.12^{a}	0.54±0.03^{b}	0.52±0.01^{b}
2-己烯醛	青草味, 杏仁味	30	12.17±1.26^{a}	–	5.18±0.27^{b}	5.67±0.90^{b}	6.32±0.59^{b}
己醛	青草味, 鱼腥, 油脂味	4.5	319.91±25.35^{a}	–	101.60±4.63^{c}	296.71±22.50^{ab}	259.29±19.57^{b}
庚二烯醛	鱼腥, 油脂味	800	0.26±0.05^{a}	0.05±0.00^{d}	0.07±0.00^{d}	0.13±0.01^{c}	0.20±0.01^{b}
(Z)-4-庚烯醛	青草味, 油脂味	15.4	26.31±1.70^{a}	4.89±0.29^{d}	10.82±0.73^{b}	11.76±0.64^{b}	8.30±1.04^{c}
庚醛	青草味, 油脂味, 辛辣	3	–	101.64±2.04^{c}	–	159.82±8.22^{b}	202.23±29.08^{a}
苯甲醛	杏仁味, 甜香	350	1.88±0.14^{bc}	1.85±0.10^{bc}	2.67±0.12^{a}	1.75±0.03^{c}	2.13±0.19^{b}
(E)-2-辛烯醛	青草味, 油脂味	3	–	–	–	–	68.95±4.34
辛醛	青草味, 油脂味, 辛辣	0.7	–	–	–	1221.56±51.35^{a}	865.20±70.84^{b}
(E,Z)-2,6-壬二烯醛	青草味, 黄瓜味	0.01	157086.88±15626.16^{a}	36600.66±1339.76^{b}	–	35111.59±2480.23^{b}	32813.08±2930.37^{b}
(Z)-2-壬烯醛	青草味, 鱼腥	0.004	90464.76±7332.25^{a}	6892.81±392.02^{c}	–	24598.98±3963.79^{b}	31824.64±5371.20^{b}
壬醛	青草味, 油脂味, 辛辣	1	–	691.10±69.49^{b}	–	1418.39±161.51^{a}	742.13±75.33^{b}
藏红花醛	花香, 木质香	0.714	2826.43±230.75^{a}	84.86±6.12^{c}	566.18±112.41^{b}	118.68±20.32^{c}	175.35±62.52^{c}
β-环柠檬醛	果香, 青草味	5	502.20±54.10^{a}	106.07±3.85^{c}	218.13±15.66^{b}	129.75±7.29^{c}	102.86±16.03^{c}
(Z)-4-癸烯醛	青果香	0.004	38972.54±5561.65	–	–	–	–
(Z)-2-癸烯醛	青草味, 油脂味	1	–	–	–	61.86±0.47^{b}	72.98±7.23^{a}
癸醛	青草味, 柑橘香	2	115.16±7.81^{a}	39.95±1.72^{c}	49.08±7.53^{c}	85.61±17.21^{b}	78.22±15.28^{b}
十一醛	果香, 甜香	10	–	–	–	13.30±1.76^{a}	8.39±0.93^{b}
十二醛	青草香, 柑橘味	2	–	95.87±10.02^{ab}	129.80±29.82^{a}	77.83±18.99^{b}	57.57±7.36^{b}
十三醛		70	–	–	–	2.24±0.18	–
十五醛		430	–	3.05±0.09^{a}	0.96±0.16^{c}	2.21±0.22^{b}	0.65±0.13^{d}

续表 3

物质名称	气味描述[12−14,25−28]	阈值(μg/kg)	OAV				
			一水条斑紫菜	二水条斑紫菜	三水条斑紫菜	四水条斑紫菜	五水条斑紫菜
3,5-辛二烯-2-酮	青草味, 木质香	100	40.78±2.61^{a}	3.44±0.27^{d}	10.49±0.99^{b}	5.01±0.26^{cd}	7.32±1.04^{c}
异戊基丙酮		24	–	–	–	4.76±0.68^{a}	3.02±0.27^{b}
2,6,6-三甲基-环己烯-1,4-二酮		25	16.08±1.62	–	–	–	–
异佛尔酮		11900	0.01±0.00	–	–	–	–
2,2,6-三甲基环己酮		100	4.60±0.32^{a}	0.64±0.05^{e}	2.22±0.21^{b}	1.60±0.10^{c}	1.08±0.08^{d}
α-紫罗兰酮	花香, 木质香	3.78	1276.50±142.14^{a}	142.67±10.21^{c}	289.35±17.57^{b}	134.17±15.64^{c}	86.18±7.49^{c}
β-紫罗兰酮	花香, 果香, 木质香	0.007	1176415.72±91422.29^{a}	257033.62±18514.74^{d}	826179.81±38876.19^{b}	385594.85±38337.55^{c}	219522.55±22209.06^{d}
环氧-*β*-紫罗兰酮	果香	100	40.74±4.45^{a}	7.38±0.21^{c}	24.46±1.89^{b}	11.46±0.95^{c}	10.77±0.58^{c}
香叶基丙酮	木兰香气	60	11.12±0.27^{a}	3.46±0.20^{c}	6.84±0.50^{b}	–	–
1-戊烯-3-醇	烧焦味、肉味	400	1.07±0.12	–	–	–	–
(Z)-2-戊烯-1-醇		720	0.31±0.03	–	–	–	–
1-辛烯-3-醇	蘑菇味, 鱼腥, 金属味	10	179.47±18.23^{a}	48.37±1.46^{c}	38.98±2.93^{d}	79.81±1.86^{b}	64.74±5.70^{bc}
(E)-2-辛烯醇	蘑菇味, 油脂味	20	14.76±1.44^{a}	1.92±0.22^{b}	–	1.95±0.32^{b}	1.92±1.29^{b}
二氢猕猴桃内酯	香豆素、麝香样香气	500	6.92±0.47^{a}	1.29±0.04^{c}	4.36±0.20^{b}	1.51±0.11^{c}	1.59±0.03^{c}
棕榈酸乙酯		2000	0.08±0.01^{b}	0.10±0.00^{a}	0.04±0.01^{c}	0.03±0.00^{d}	0.02±0.00^{d}
十二烷		10000	–	0.03±0.00^{a}	–	0.02±0.00^{ab}	0.02±0.00^{b}
十四烷		1000	–	0.46±0.08^{b}	0.75±0.10^{a}	0.37±0.10^{b}	0.37±0.03^{b}
(Z)-7-十六烯		5600	–	0.04±0.01	–	–	–
2,4-二特丁基苯酚		500	–	–	–	0.09±0.02^{a}	0.07±0.00^{a}
3-乙基-2,5-甲基吡嗪		0.4	2574.50±150.48^{a}	–	1859.23±171.66^{b}	–	–
二甲硫醚	硫磺味、鱼腥	0.3	–	–	–	7409.26±739.75^{b}	15886.63±927.71^{a}

注: 同行不同字母表示不同组之间存在显著性差异(P<0.05)。“–”表示未检出。

的庚醛、壬醛，以及四水、五水条斑紫菜中的辛醛，除青草味外有油脂味、辛辣味；链长较长的脂肪醛有令人愉悦的气味，如一水条斑紫菜特有的(Z)-4-癸烯醛有青果香，十一醛赋予四水、五水条斑紫菜果香、甜香，十二醛赋予二水至五水条斑紫菜柑橘味。来自 β-胡萝卜素降解的醛类 VOCs 提供花香或果香，藏红花醛有花香并附带木质香，β-环柠檬醛有果香并附带青草味。来自苯丙氨酸代谢的苯甲醛提供杏仁味和甜香。

条斑紫菜酮类 VOCs 主要来自类胡萝卜素降解，以 β-紫罗兰酮提供的花香、果香、木质香最为浓烈。α-紫罗兰酮、环氧-β-紫罗兰酮对花香、果香有一定贡献，3,5-辛二烯-2-酮提供青草味，香叶基丙酮为前三水条斑紫菜提供木兰香。

1-辛烯-3-醇和二氢猕猴桃内酯是各采收期条斑紫菜共有的，分别提供了蘑菇味、鱼腥味、金属味和香豆素、麝香样的香气。二甲硫醚具有硫磺味、鱼腥味，是四水、五水条斑紫菜特有的不良风味。GB/T 23597-2022《干紫菜质量通则》要求干紫菜应具有紫菜固有的鲜香气味，无异味，因此推荐采收前三水条斑紫菜以规避不良气味。烃类阈值通常极高，对紫菜气味特征没有贡献。

2.5　电子鼻分析

电子鼻通过气体传感器阵列中各传感器对被测气体灵敏度的差异识别样本气味特征，在一定程度上模拟鼻子识别气味的方式，获取样本气味的总体信息，具有应用范围广、响应速度快的特点[29−30]。

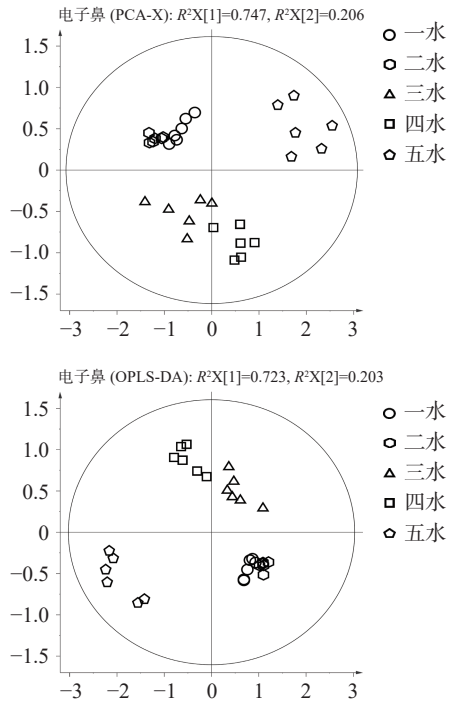


图 6　不同采收期条斑紫菜电子鼻检测数据的 PCA 和 OPLS-DA

Fig.6　PCA and OPLS-DA of electronic nose detection data of *Pyropia yezoensis* at different harvest periods

根据 HS-SPME-GC-MS 检测结果，条斑紫菜中并不含有氮氧化合物，且醇类 VOCs 含量较低，因此使用 PEN3 电子鼻检测时，传感器 W5S 和 W2S 没有收集到有效数据。故对其他 8 个传感器采集的数据进行 PCA 和 OPLS-DA，结果见图 6。第一、第二主成分累计贡献率分别为 95.3% 和 92.6%，能够代表条斑紫菜气味的整体信息。由图可以看出，电子鼻大体上能够辨别不同采收期条斑紫菜间的气味差异，但辨别一水和二水条斑紫菜间气味差异的能力不强。一方面，对醇类物质敏感的 W2S 传感器未产生有效数据，而一水条斑紫菜中醇类物质含量显著高于二水条斑紫菜，气味信息不完整导致分辨效果较差；另一方面，一水和二水条斑紫菜中烃类物质含量较高，使得传感器对其他种类 VOCs 的敏感度下降，使得分辨效果不佳。

3　结论与展望

本次在一水至五水条斑紫菜中共检测出 71 种 VOCs，其含量随采收期推移由 539.16 μg/g 降至 174.57 μg/g，烃类、醛类和酮类物质是条斑紫菜 VOCs 的主要组成。苯甲醛、藏红花醛、β-环柠檬醛、β-紫罗兰酮、环氧-β-紫罗兰酮、α-紫罗兰酮、3,5-辛二烯-2-酮、1-辛烯-3-醇、二氢猕猴桃内酯、8-十七烯、二十烷、1-溴-5-十七烯是各采收期条斑紫菜共有且相对含量较高的 VOCs。条斑紫菜 VOCs 一水条斑紫菜中酮类 VOCs、二水条斑紫菜中烃类 VOCs 以及四水和五水条斑紫菜中醛类 VOCs 相对含量显著高于其他采收期条斑紫菜。通过 PCA 和 OPLS-DA，发现从相对含量方面可以更好区分各采收期条斑紫菜 VOCs 的差异，差异主要来自 8-十七烯、二十烷、二甲硫醚、1-溴-5-十七烯、β-紫罗兰酮、壬醛、(E)-环十二烯、α-紫罗兰酮、十五醛、3,5-辛二烯-2-酮、环氧-β-紫罗兰酮、二氢猕猴桃内酯、己醛、辛醛。

条斑紫菜的气味特征为花香、果香、木质香、青草味和鱼腥味，(Z)-4-庚烯醛、苯甲醛、藏红花醛、β-环柠檬醛、癸醛、3,5-辛二烯-2-酮、α-紫罗兰酮、β-紫罗兰酮、环氧-β-紫罗兰酮、二氢猕猴桃内酯和 1-辛烯-3-醇是共有的特征风味物质。一水条斑紫菜 VOCs 的 OAV 普遍较高，气味更加浓郁；三水条斑紫菜的鱼腥味较淡；四水和五水条斑紫菜不良气味较多，如油脂氧化的辛辣和二甲硫醚带来的特征性硫磺味、鱼腥味。

在以后的研究中，可以联合使用内标法和外标法，提高 VOCs 含量测定的准确性。同时应用气相色谱-嗅闻-质谱（Gas Chromatography-Olfactory-Mass Spectrometry，GC-O-MS）技术，避免依照过往文献数据计算 OAV，更加有效地测定和描述条斑紫菜中各种 VOCs 的 OAV 和风味特征。此外，提高电子鼻传感器性能，建立条斑紫菜的电子鼻数据库，优化算法，提高电子鼻对不同采收期条斑紫菜的分辨能力，也是未来的改进方向。

© The Author(s) 2026. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

参考文献

[1] 马俊妍, 王颖, 滕雨婷, 等. 条斑紫菜贝壳丝状体人工育苗技术研究进展[J]. 水产养殖, 2023, 44(12): 31−36. [MA J Y, WANG Y, TENG Y T, et al. Research progress on artificial seedling technology of *Porphyra yezoensis* via shell conchocelis Method[J]. Aquaculture, 2023, 44(12): 31−36.]

[2] 杨贤庆, 黄海潮, 潘创, 等. 紫菜的营养成分、功能活性及综合利用研究进展[J]. 食品与发酵工业, 2020, 46(5): 306−313. [YANG X Q, HUANG H C, PAN C, et al. Advances on nutrient components, biological activities and comprehensive utilization of *Porphyra*[J]. Food and Fermentation Industries, 2020, 46(5): 306−313.]

[3] MATOS J, CARDOSO C, SERRALHEIRO M L, et al. Seaweed bioactives potential as nutraceuticals and functional ingredients: A review[J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2024, 133: 106453.

[4] CAO Jin, WANG Jianping, WANG Shicheng, et al. *Porphyra*Species: A mini-review of its pharmacological and nutritional properties[J]. Journal of Medicinal Food, 2016, 19(2): 111−119.

[5] LIANG Zhourui, JIA Rujie, SUN Tengqin, et al. Insights into the spatio-temporal composition, diversity and function of bacterial communities in seawater from a typical laver farm[J]. Frontiers in Marine Science, 2022, 9: 1056199.

[6] 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.]

[7] CAO Rong, HU Mengyue, ZHAO Ling, et al. Flavor characteristics of different crops of laver (*Porphyra yezoensis*) during one harvest cycle[J]. Journal of Ocean University of China, 2021, 20(1): 213−220.

[8] 曹荣, 胡梦月, 谭志军, 等. 基于电子舌和气相色谱-离子迁移谱分析坛紫菜与条斑紫菜的风味特征[J]. 食品科学, 2021, 42(8): 186−191. [CAO R, HU M Y, TAN Z J, et al. Flavor characteristics of *Porphyra haitanensis* and *Porphyra yezoensis*: A comparison study using electronic tongue and Gas Chromatography-Ion Mobility Spectrometry[J]. Food Science, 2021, 42(8): 186−191.]

[9] QI Heting, DING Shenghua, PAN Zhaoping, et al. Characteristic volatile fingerprints and odor activity values in different *Citrus*-tea by HS-GC-IMS and HS-SPME-GC-MS[J]. Molecules, 2020, 25(24): 6027.

[10] ZHU Jiancai, NIU Yunwei, XIAO Zuobing. Characterization of the key aroma compounds in Laoshan green teas by application of odour activity value (OAV), gas chromatography-mass spectrometry-olfactometry (GC-MS-O) and comprehensive two-dimensional gas chromatography mass spectrometry (GC×GC-qMS)[J]. Food Chemistry, 2021, 339: 128136.

[11] van GEMERT L J. Odour threshholds compilations of odour threshold values in air, water and other media (second enlarge and revised edition)[M]. Oliemans Punter & Partners BV, the Neatherlands, 2011: 207−359.

[12] 刘璐璐, 王宝贝. 藻类挥发性物质及其提取方法研究进展[J]. 食品与机械, 2021, 37(2): 220−228. [LIU L L, WANG B B. Volatile compounds in algae and their extraction methods[J]. Food and Machinery, 2021, 37(2): 220−228.]

[13] URLASS S, WU Y F, NGUYEN T T L, et al. Unravelling the aroma and flavour of algae for future food applications[J]. Trends in Food Science & Technology, 2023, 138: 370−381.

[14] 吴晓君, 沈照鹏, 张洪峰, 等. 基于顶空固相微萃取气相色谱-质谱联用技术和相对气味活度值分析不同等级条斑紫菜挥发性物质差异[J]. 食品科技, 2023, 48(7): 255−261. [WU X J, SHEN Z P, ZHANG H F, et al. Difference in volatile components of *Porphyra yezoensis* with different grades: Based on headspace solid-phase micro extraction and gas chromatography-mass spectrometry (HS-SPME-GC-MS) and ROAV analyse[J]. Food Science and Technology, 2023, 48(7): 255−261.]

[15] 左照江. 藻类挥发性有机化合物研究进展[J]. 水生生物学报, 2017, 41(6): 1369−1379. [ZUO Z J. The review of research advances in algal volatile organic compounds[J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2017, 41(6): 1369−1379.]

[16] 赵玲, 曹荣, 王联珠, 等. 条斑紫菜烤制前后特征风味变化研究[J]. 渔业科学进展, 2021, 42(4): 199−207. [ZHAO L, CAO R, WANG L Z, et al. Study on the characteristic flavor change of *Porphyra yezoensis* before and after roasting[J]. Progress in Fishery Sciences, 2021, 42(4): 199−207.]

[17] 余远江, 庞一扬, 袁桃静, 等. 基于电子鼻、HS-GC-IMS 和 HS-SPME-GC-MS 分析五种水产原料的风味特征[J]. 食品工业科技, 2021, 42(19): 106−117. [YU Y J, PANG Y Y, YUAN T J, et al. Analysis of flavor characteristics of five aquatic raw materials based on electronic nose, HS-GC-IMS and HS-SPME-GC-MS[J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(19): 106−117.]

[18] 陈姣, 徐继林, 李艳, 等. 3 种海洋硅藻不同培养阶段挥发性成分的比较分析[J]. 海洋学报, 2014, 36(8): 49−64. [CHEN J, XU J L, LI Y, et al. Analysis of volatile components from three marine diatoms at different growth stages[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2014, 36(8): 49−64.]

[19] GU Saiqi, WANG Xichang, TAO Ningping, et al. Characterization of volatile compounds in different edible parts of steamed Chinese mitten crab (*Eriocheir sinensis*)[J]. Food Research International, 2013, 54(1): 81−92.

[20] 邝格灵, 李树, 宁甜甜, 等. 基于 GC-MS 指纹图谱和多元统计学区分四川保宁醋和山西老陈醋的挥发性差异代谢产物[J]. 食品科学, 2020, 41(16): 227−232. [KUANG G L, LI S, NING T T, et al. Differential volatile metabolites between Sichuan Baoning vinegar and Shanxi aged vinegar determined by GC-MS fingerprint and multivariate statistics[J]. Food Science, 2020, 41(16): 227−232.]

[21] KANG Chaodi, ZHANG Yingying, ZHANG Mingyue, et al. Screening of specific quantitative peptides of beef by LC–MS/MS coupled with OPLS-DA[J]. Food Chemistry, 2022, 387: 132932.

[22] AKAKABE Y, IWAMOTO S, MIYAMURA S, et al. Induction of (Z)-8-heptadecene in marine green alga *Bryopsis maxima* by mechanical wounding[J]. Fisheries Science, 2007, 73(5): 1057−1060.

[23] ACHYUTHAN K, HARPER J, MANGINELL R, et al. Volatile metabolites emission by *in vivo* microalgae: An overlooked opportunity[J]. Metabolites, 2017, 7(3): 39.

［24］ KLADI M, VAGIAS C, ROUSSIS V. Volatile halogenated metabolites from marine red algae[J]. Phytochemistry Reviews, 2004, 3(3): 337−366.
［25］ XU Yuxue, JIANG Zedong, DU Xiping, et al. The identification of biotransformation pathways for removing fishy malodor from *Bangia* fusco-purpurea using fermentation with *Saccharomyces cerevisiae*[J]. Food Chemistry, 2022, 380: 132103.
［26］ RIGLING M, HEGER F, GRAULE M, et al. A robust fermentation process for natural chocolate-like flavor production with *Mycetinis scorodonius*[J]. Molecules, 2022, 27(8): 2503.
［27］ 王艳燕, 刘志薇, 严慧婷, 等. 变温发酵工艺滇红工夫挥发性成分及关键香气成分分析[J]. 食品科学, 2024, 45(23): 159−167. ［WANG Y Y, LIU Z W, YAN H T, et al. Analysis of volatile components and key aroma components of Yunnan red Eongou by variable temperature fermentation process[J]. Food Science, 2024, 45(23): 159−167.］
［28］ 王之建, 韩孟竹, 贾卫民. 顺式-4-庚烯醛的合成[J]. 上海应用技术学院学报(自然科学版), 2013, 13(1): 24−26. ［WANG Z J, HAN M Z, JIA W M. Synthesis of cis-4-hepten-1-al[J]. Journal of Technology, 2013, 13(1): 24−26.］
［29］ 胡传明, 王丹青, 王锡昌, 等. 条斑紫菜与坛紫菜挥发性风味的电子鼻分析[J]. 2016, 23(2): 138−146. ［HU C M, WANG D Q, WANG X C, et al. Odors analysis of *Pyropia yezoensis* and *Pyropia haitanensis* by electronic nose[J]. Guangxi Science, 2016, 23(2): 138−146.］
［30］ 曹荣, 刘楠, 王联珠, 等. 不同采收期坛紫菜的风味比较[J]. 上海海洋大学学报, 2019, 28(5): 811−817. ［CAO R, LIU N, WANG L Z, et al. Flavor analysis of *Porphyra haitanensis* harvested during different periods[J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2019, 28(5): 811−817.］