范霖澳, 陈婷茹, 陈继承, 等. 嫩芽海带在冻干汤块加工过程中挥发性风味物质变化 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(4): 324−336. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025020023

FAN Lin'ao, CHEN Tingru, CHEN Jicheng, et al. Changes in Volatile Flavor Compounds of Tender Kelp during the Processing of Freeze-dried Soup Cubes[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(4): 324−336. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025020023

· 分析检测 ·

嫩芽海带在冻干汤块加工过程中挥发性风味物质变化

范霖澳[1,2], 陈婷茹[3], 陈继承[1,2], 李　颖[1,2], 叶毅峰[1,2], 王　茵[3,*], 刘智禹[3,*]

（1.福建农林大学食品科学学院, 福建福州 350002;
2.闽台特色海洋食品加工及营养健康教育部工程研究中心, 福建福州 350002;
3.福建省水产研究所, 福建省海洋生物增养殖与高值化利用重点实验室, 海洋生物种业技术国家地方联合工程研究中心, 福建厦门 361013）

摘　要: 为探究冻干汤块加工过程中煮制、烘干和真空冷冻干燥等关键加工工艺对嫩芽海带挥发性风味物质的影响，本研究分析了不同煮制时间（0、1、2、3、4 和 5 min）、不同烘干温度（60、70、80、90 和 100 ℃）和冻干前后嫩芽海带挥发性风味物质的变化，并利用气味活度值（odor activity value，OAV）鉴定关键挥发性风味物质。结果表明：煮制工艺显著降低嫩芽海带的挥发性风味物质的种类和相对含量（P<0.05），而煮制时间对醛类、酸类、酯类和呋喃类物质的相对含量和所有挥发性风味物质的总相对含量无显著性影响，酮类和 1-辛烯-3-醇的相对含量则随着煮制时间的增加显著减少（P<0.05）。不同煮制时间嫩芽海带的关键风味物质数量差距较小。1-辛烯-3-酮的 OAV 值在各组样品中均为最高，且远高于其他化合物的 OAV 值，是煮制嫩芽海带最关键的挥发性风味物质，当煮制时间为 3 min 时其 OAV 值最小。随着烘干温度的上升，挥发性风味物质种类的数量呈现先上升后下降的趋势，70 ℃ 组的风味物质种类最多，各类物质的含量随着烘干温度的改变并无规律性变化。60 ℃ 组的 β-紫罗兰酮和 2-十一酮 OAV 值最高，且醛类物质和腥味物质的 OAV 值较低，因此 60 ℃ 为嫩芽海带粉调味粉的最适宜烘干温度。真空冷冻干燥工艺对嫩芽海带中挥发性风味物质的种类、相对含量和关键风味物质组成均未产生显著影响（P>0.05），表明该工艺并未显著改变嫩芽海带的整体风味，但是各物质的 OAV 值普遍下降，主要起到减淡风味的作用。综上所述，选择煮制时间 3 min 和烘干温度 60 ℃ 有助于改善冻干汤块产品的风味。

关键词: 嫩芽海带, 顶空固相微萃取-气相色谱-质谱联用技术（HS-SPME-GC-MS）, 挥发性风味物质, 气味活度值（OAV）, 加工工艺

中图分类号: TS254.4　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)04−0324−13　　本文网刊:

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025020023

Changes in Volatile Flavor Compounds of Tender Kelp during the Processing of Freeze-dried Soup Cubes

FAN Lin'ao[1,2], CHEN Tingru[3], CHEN Jicheng[1,2], LI Ying[1,2], YE Yifeng[1,2], WANG Yin[3,*], LIU Zhiyu[3,*]

（1.College of Food Science, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China;
2.Engineering Research Centre of Fujian-Taiwan Special Marine Food Processing and Nutrition, Ministry of Education, Fuzhou 350002, China;
3.Key Laboratory of Cultivation and High-value Utilization of Marine Organisms in Fujian Province, National and Local

收稿日期: 2025−02−08

基金项目: 厦门市海洋与渔业发展专项青年科技创新项目（23YYST0770CA05）; 福建省省属公益类科研院所基本科研专项（2023R1012002）; 福建省海洋服务与渔业高质量发展专项资金项目（FJHY-YYKJ-2024-1-17）; 2023 年度福建省海洋服务与渔业高质量发展专项（FJHY-YYKJ-2023-1-2）。

作者简介: 范霖澳（1999−）, 男, 硕士研究生, 研究方向: 食品风味, E-mail: 867122090@qq.com。

*** 通信作者:** 王茵（1983−）, 女, 硕士, 副研究员, 研究方向: 水产品加工与综合利用, E-mail: wangyin_83@163.com。
刘智禹（1971−）, 男, 博士, 教授级高级工程师, 研究方向: 水产品加工与综合利用, E-mail: 13906008638@163.com。

Joint Engineering Research Center of Marine Biological Seed Industry Technology, Fisheries Research Institute of Fujian, Xiamen 361013, China）

Abstract: To investigate the effects of key processing techniques—namely boiling, drying, and vacuum freeze-drying—on the volatile flavor compounds of tender kelp during the processing of freeze-dried soup cubes, this study analyzed changes in volatile flavor compounds of tender kelp under various boiling times (0, 1, 2, 3, 4, and 5 min) and drying temperatures (60, 70, 80, 90, and 100 ℃). Furthermore, the study identified key volatile flavor compounds by calculating odor activity values (OAV). The results indicated that the boiling process significantly (P<0.05) reduced both the variety and the relative content of volatile flavor compounds in tender kelp. However, boiling time had no significant effect on the relative contents of aldehydes, acids, esters, and furans. In contrast, the relative content of ketones and 1-octen-3-ol significantly (P<0.05) decreased with increasing boiling time. The variation in the number of key flavor compounds in tender kelp across different boiling times was relatively minor. The OAV value of 1-octen-3-one was the highest among all samples, significantly exceeding that of other compounds, thereby indicating its critical role as the most important volatile flavor compound in boiled tender kelp. Its OAV value was lowest at a boiling time of 3 min. As the drying temperature increased, the number of types of volatile flavor compounds initially rose and then declined, with the 70 ℃ group exhibiting the most diverse range of flavor compounds. However, the content of each compound didn't follow a consistent pattern with variations in drying temperature. The OAV values of β-ionone and 2-undecanone were highest in the 60 ℃ group, while the OAV values of aldehydes and fishy compounds were relatively low, suggesting that 60 ℃ was the optimal drying temperature for tender kelp powder seasoning. The vacuum freeze-drying process didn't significantly (P>0.05) affect the variety, relative content, and composition of key flavor compounds in tender kelp, indicating this method didn't substantially alter the overall flavor. However, the OAV values of various compounds generally decreased, primarily leading to a reduction in flavor intensity. In conclusion, selecting a boiling time of 3 minutes and a drying temperature of 60 ℃ contributed to enhancing the flavor of freeze-dried soup cube products.

Key words: tender kelp; headspace solid-phase microextraction-gas chromatography-mass spectrometry (HS-SPME-GC-MS); volatile flavour substances; odour activity value (OAV); processing technology

海带（*Laminaria japonica*）是中国海水养殖的重要经济藻类之一，又名昆布、纶布、江白菜，是褐藻门褐藻纲海带目海带科海带属的一种巨型食用藻类[1]。研究表明海带在抗氧化、抗肿瘤、抗炎、降脂、抗微生物、抗过敏和降低便秘发生率方面具有重要作用[2−3]。嫩芽海带是生长仅 15 d 的海带，相比成熟海带味道更加清淡，口感更加爽脆，并且避免了有些成熟海带熬不烂的缺点，更加容易消化，而且与成熟海带相比腥味更淡。

随着现代社会节奏的加快，人们对食品的便捷性和营养性提出了更高的要求，预制菜因其简单便捷和营养美味从而进入了快速发展的轨道。目前，以海带为主要原料开发的预制菜产品在市场上还比较少见，海带作为一种重要的水产品资源，海带预制菜产品也具有巨大的市场前景。海带汤作为一种传统的健康汤品，具有很高的营养价值和市场潜力，然而，传统海带汤的制备过程较为繁琐，难以满足现代快节奏生活的需求，真空冷冻干燥技术能最大程度保持食品原有的营养、色泽和形态，从而广泛应用于预制菜产品。通过将嫩芽海带汤开发成冻干嫩芽海带汤块产品，不仅为海带预制菜产品的研发与工艺创新提供技术支持，亦有助于提升海带的附加值。

烘干、煮制和冻干是冻干嫩芽海带汤产品开发的重要加工工艺，通过研究不同加工工艺对海带挥发性风味物质的影响，探究海带挥发性风味物质变化的规律和原因，以期有的放矢地通过工艺优化或风味调配技术等，改善冻干嫩芽海带汤产品风味，为研制出更加美味的健康海带食品提供科学依据。目前，对于海带的风味研究常用仪器分析技术为气相色谱-质谱法（gas chromatography-mass spectrometry, GC-MS），气相色谱-嗅闻-质谱法（gas chromatography-olfactometry-mass spectrometry, GC-O-MS）和电子鼻（electronic nose, E-nose）技术。GC-MS 由于具有高灵敏度、选择性强和分析速度快的优点，因而广泛应用于水产品中风味物质的研究[4−5]。焦明月[6] 利用顶空固相微萃取-气相色谱-质谱（headspace solid-phase microextraction-gas chromatography-mass spectrometry, HS-SPME-GC-MS）和电子鼻研究了不同温湿度条件下热风干燥工艺对海带品质与风味物质的影响，以药用价值较高的萜类化合物和杂环类化合物为例展开分析，最终得到了最佳工艺条件。

由于嫩芽海带近几年才被用于食用，关于嫩芽海带风味物质的研究还处于空白阶段，煮制、烘干和冻干是制作冻干嫩芽海带汤块的三个重要工艺，因此本研究采用 HS-SPME-GC-MS 对不同加工工艺处理后嫩芽海带的挥发性风味物质进行分析，探讨海带风味物质变化机制，从而为嫩芽海带产品风味研究提供理论依据。

1　材料与方法

1.1　材料与仪器

盐渍嫩芽海带　购自福建霞浦；2,4,6-三甲基吡啶（2,4,6-trimethylpyridine, TMP）　西格玛奥德里奇

(上海)贸易有限公司。

GCMS-QP2020NX GC-MS 联用仪　日本岛津仪器有限公司; SPME 萃取头 50/30 μm DVB/CAR/PDMS 复合萃取头　西格玛奥德里奇(上海)贸易有限公司; BGZ-240 电热鼓风干燥箱　上海博迅实业有限公司医疗设备厂; L22-Y82 静音真空高速破壁机　九阳股份有限公司; 60 目标准检验筛　绍兴市上虞张兴纱筛厂; SCIENTZ-30ND 冷冻干燥机　宁波新艺芝生物科技股份有限公司。

1.2　实验方法

1.2.1　冻干嫩芽海带汤块工艺流程　冻干嫩芽海带汤块的加工工艺流程如图 1 所示。

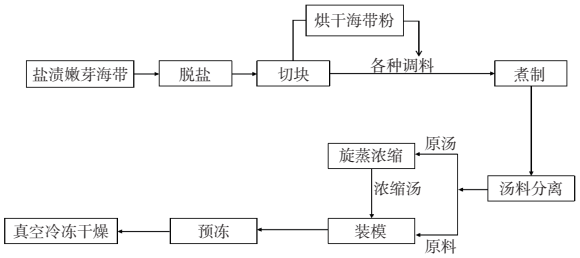


图 1　冻干嫩芽海带汤块工艺流程图

Fig.1　Process flow chart of tender kelp soup blocks

1.2.2　样品前处理　挑选品相良好, 大小接近的冷冻盐渍嫩芽海带, 用自来水冲洗表面直至无盐粒残留, 再用清水荡洗干净。参考陈丽丽[7] 的方法, 取适量清洗过后的嫩芽海带, 浸泡在自来水中, 用少量流水不断冲洗。每隔 3 h 换一次水, 换水时取适量海带浸泡液, 滴入 0.1 mol/L $AgNO_3$ 溶液观察是否有白色沉淀, 并取一小块脱盐海带品尝, 当最后一次海带浸泡液加入 0.1 mol/L $AgNO_3$ 溶液后无明显沉淀生成, 且脱盐海带入口无明显盐味即为脱盐终点。

1.2.3　嫩芽海带煮制工艺　将嫩芽海带擦干并切成 5 cm 长的均匀条状, 取 25 g 于沸水中分别煮制 0、1、2、3、4、5 min, 煮制后迅速捞出, 于冷水中冷却 2 min, 用吸水纸吸干水分, 得到煮制嫩芽海带用于挥发性风味物质测定。

1.2.4　嫩芽海带烘干工艺　参考张李等[8] 的方法并稍作修改, 取适量嫩芽海带沥干后剪去根部, 平铺在干燥铁网上, 放入电热鼓风干燥箱中分别于 60、70、80、90、100 ℃ 下烘干, 烘干直至水分含量均低于 10% 即为烘干终点。干燥后使用破壁机粉碎, 过 60 目筛子制得烘干嫩芽海带粉用于挥发性风味物质测定。

1.2.5　嫩芽海带真空冷冻干燥工艺　取 1.2.3 方法得到的煮制 3 min 的嫩芽海带于−20 ℃ 下冰冻 10 h, 放入冻干机中进行真空冷冻干燥。将冷冻干燥后的嫩芽海带加入适量水复水, 得到冻干复水嫩芽海带用于挥发性风味物质测定。

1.2.6　嫩芽海带水分测定　根据 GB 5009.3-2016《食品安全国家标准 食品中水分的测定》进行测定。

1.2.7　HS-SPME 条件　参考顾赛麒等[9] 的方法稍微修改, 选择 50/30 μm DVB/CAR/PDMS 萃取头, 将萃取头插入到 250 ℃ 进样口中老化, 当色谱图的基线趋于稳定且没有杂质时结束老化[10]。准确称取 2 g 样品于 15 mL 顶空瓶中, 于 70 ℃ 加热板中平衡 10 min, 将萃取头插入顶空瓶恒温萃取 30 min, 最后将萃取头插入进样口解析 5 min, 每个样品平行测定 5 次。

1.2.8　GC-MS 分析条件　GC-MS 条件: 采用 DB-WAX 色谱柱(30 m×0.25 mm×0.25 μm), 进样口温度 230 ℃, 载气为氦气, 流速保持 0.70 mL/min, 不分流进样, 溶剂延迟 5 min; 升温过程: 初始温度 35 ℃, 保持 2 min, 以 5 ℃/min 的速率升至 180 ℃, 保持 3 min, 最后以 10 ℃/min 的速率升至 230 ℃, 保持 2 min。

质谱条件: EI 离子源, 电子能量为 70 eV, 离子源温度为 230 ℃, 四级杆温度为 150 ℃, 采集质量范围 35~550 m/z。

1.2.9　样品挥发性成分的定性和定量　定性: 将测得物质的谱图与 NIST11 和 Wiley 中标准图进行检索对比, 选择相似度大于 80% 的挥发性物质[11]。

定量: 将 20 μL 质量浓度为 10 mg/L 的内标物 2,4,6-三甲基吡啶加入到海带样品中, 通过计算待测挥发性风味物质与内标物峰面积的比值求得各挥发性风味物质的相对含量, 计算如式(1)所示:

$$\text{挥发性风味物质相对含量}(\mu g/kg) = \frac{A_x \times C_{TMP} \times V_{TMP}}{A_{TMP} \times m} \quad \text{式 (1)}$$

式中: A_x、A_{TMP} 分别为待测挥发性风味物质与内标物 TMP 的峰面积; C_{TMP} 为加入 TMP 的质量浓度, mg/L; V_{TMP} 为加入 TMP 的体积, μL; m 为加入样品质量, g。

气味活度值(odor activity value, OAV): 通过查阅挥发性成分在水中的阈值, 根据每个挥发性风味物质的质量浓度与阈值的比值计算其 OAV[12], 计算如式(2)所示。

$$OAV = \frac{C_i}{OT_i} \quad \text{式 (2)}$$

式中: C_i 为挥发性风味物质的质量浓度, μg/kg; OT_i 为风味物质在水中的阈值, μg/kg。

1.3　数据处理

所有实验均进行 3 次重复, 采用 Excel 分析, 所有结果均以均数±标准误差表示, 使用 Graphpad Pism(Version 9)软件进行显著性分析, $P<0.05$ 表示差异显著, 使用 Origin 2022 和 TBtools(v2.152)进行作图。

2　结果与分析

2.1　煮制工艺对嫩芽海带中挥发性风味物质的影响

采用 HS-SPME-GC-MS 对不同煮制时间嫩芽海带的挥发性风味物质进行分析, 图 2 和表 1 为不

同煮制时间嫩芽海带挥发性风味物质组成及含量分析结果。由图 2 和表 1 可知，不同煮制时间嫩芽海带中共鉴定出 39 种挥发性风味物质，其中醛类 25 种，酮类 8 种，酸类 1 种，酯类 2 种，醇类 2 种，呋喃 1 种。各组嫩芽海带样品中分别检出 34 种、28 种、27 种、27 种、25 种和 27 种挥发性风味物质，其中共有物质 20 种。煮制处理过的样品中挥发性风味物质种类数量随着煮制时间的增加变化不大，但与 0 min 组海带相比有较明显的减少。

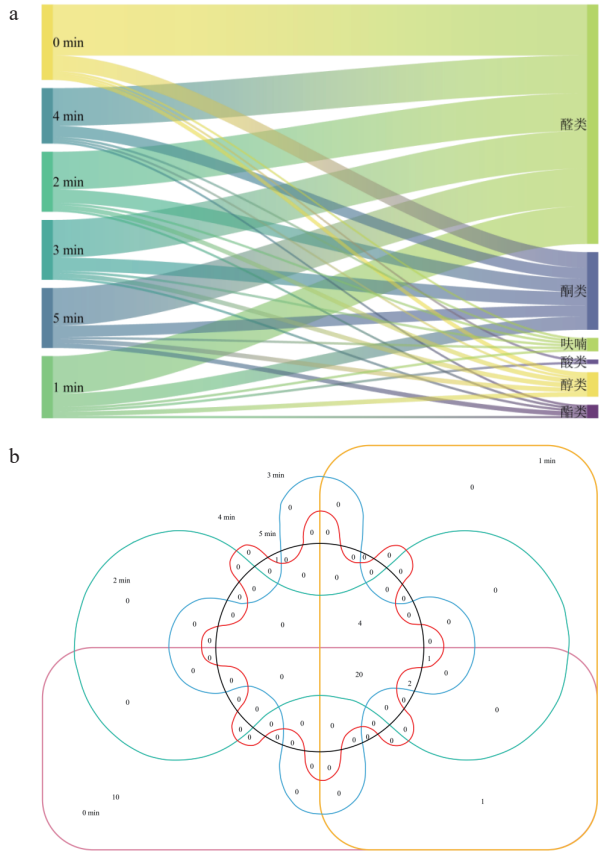


图 2　不同煮制时间嫩芽海带挥发性风味物质组成

Fig.2　Composition of volatile flavor substances in tender kelp with different cooking times

注：a 为种类桑基图；b 为韦恩图。

由图 2 可知，醛类是 6 组样品中含有的挥发性物质最多的种类，含量也最高，且阈值较低，是海带香气的主要成分。与未煮制的 0 min 组相比，煮制后的醛类相对含量明显减少，但随着煮制时间的增加其相对含量无显著性差异，说明高温煮制可能会导致嫩芽海带中的醛类物质损失，但煮制时间对其影响不大。5 组煮制样品中共同含有的醛类化合物有 17 种。0 min 组海带样品含 8 种独有醛类物质，分别为 2-已烯醛、反式-2-庚烯醛、(E)-4 壬烯醛、反式-2-壬醛、十一醛、枯茗醛、(E,E)-2,4-癸二烯醛和肉桂醛。

与未煮制的 0 min 组相比，酮类物质的含量明显减少，高温煮制也同样会导致嫩芽海带中的酮类物质损失。5 组煮制样品中分别检出酮类 7、6、6、5、5 种，共同含有的酮类化合物有 3 种，分别 1-辛烯-3-酮、香叶基丙酮和 β-紫罗兰酮。随着煮制时间的增加，酮类物质种类数量的变化很小，但相对含量呈较显著下降趋势（$P<0.05$），含量最高的酮为 β-紫罗兰酮和香叶基丙酮，β-紫罗兰酮对海带独特花香风味有着巨大贡献，香叶基丙酮具有花香，主要由类胡萝卜素与脂肪酸类香气前体于加工过程中降解产生[13]。

其余挥发性化合物（酸、醇、酯和呋喃等化合物）种类较少，其中 1-辛烯-3-醇含量较高，且是唯一共同含有的醇类化合物，是被报道过的海带主要腥味化合物之一[14]。经煮制后其相对含量明显减少，且随着煮制时间的增加，其相对含量显著减少（$P<0.05$），说明高温煮制有利于嫩芽海带腥味物质的减少。

综上所述，煮制工艺显著（$P<0.05$）降低嫩芽海带的挥发性风味物质的种类和相对含量，而煮制时间

表 1　不同煮制时间样品挥发性风味物质的含量

Table 1　Content of volatile flavouring substances in samples with different cooking times

序号	化合物	分子式	CAS号	相对含量(μg/kg)					
				0 min	1 min	2 min	3 min	4 min	5 min
	醛类			846.58±87.53^{a}	262.01±33.13^{b}	234.55±43.48^{b}	213.81±56.7^{b}	222.48±35.58^{b}	185.75±13.93^{b}
1	正己醛	$C_6H_{12}O$	66-25-1	56.23±2.63^{a}	20.60±1.79^{b}	20.60±1.06^{b}	21.79±9.85^{b}	20.86±0.70^{b}	20.14±3.18^{b}
2	庚醛	$C_7H_{14}O$	111-71-7	6.89±0.99^{a}	1.97±0.44^{b}	3.09±1.39^{b}	2.84±1.14^{b}	1.98±0.19^{b}	1.61±0.54^{b}
3	2-已烯醛	$C_6H_{10}O$	6728-26-3	15.61±1.58	–	–	–	–	–
4	辛醛	$C_8H_{16}O$	124-13-0	15.35±3.85^{a}	8.32±1.01^{ab}	13.12±1.40^{a}	11.25±0.59^{a}	10.02±1.23^{a}	7.38±0.90^{b}
5	反式-2-庚烯醛	$C_7H_{12}O$	18829-55-5	18.50±0.70	–	–	–	–	–
6	壬醛	$C_9H_{18}O$	124-19-6	162.22±18.75^{a}	45.35±10.69^{b}	66.89±6.06^{b}	50.53±12.01^{b}	66.31±7.66^{b}	56.16±3.20^{b}
7	反-2-辛烯醛	$C_8H_{14}O$	2548-87-0	134.01±9.53^{a}	49.48±1.97^{b}	22.60±6.42^{c}	24.53±5.71^{c}	27.59±5.36^{c}	27.58±0.50^{c}
8	(E)-4壬烯醛	$C_9H_{16}O$	2277-16-9	3.09±0.10	–	–	–	–	–
9	(2E, 4E)-庚二烯醛	$C_7H_{10}O$	4313-03-5	35.09±1.39^{a}	23.80±4.53^{b}	13.65±0.97^{c}	8.07±1.14^{c}	6.77±2.54^{c}	6.28±0.89^{c}
10	癸醛	$C_{10}H_{20}O$	112-31-2	53.63±3.86^{a}	18.79±2.75^{b}	19.80±8.24^{b}	21.56±6.69^{b}	18.82±2.25^{b}	14.37±1.08^{c}
11	反式-2-壬醛	$C_9H_{16}O$	18829-56-6	142.37±10.98	–	–	–	–	–
12	2-壬烯醛	$C_9H_{16}O$	2463-53-8	–	41.01±2.00^{a}	26.07±8.04^{b}	13.78±5.70^{c}	21.18±4.25^{bc}	17.23±0.38^{bc}
13	反-4-癸醛	$C_{10}H_{18}O$	65405-70-1	4.48±1.33^{a}	3.00±1.10^{a}	2.25±0.19^{a}	2.20±0.55^{a}	4.06±0.98^{a}	1.99±0.11^{a}
14	(E,Z)-2,6-壬二烯醛	$C_9H_{14}O$	557-48-2	59.96±8.73^{a}	29.88±4.56^{b}	13.41±2.09^{c}	17.64±1.41^{c}	12.64±3.01^{cd}	8.14±0.59^{d}
15	十一醛	$C_{11}H_{22}O$	112-44-7	8.88±1.38	–	–	–	–	–

续表 1

序号	化合物	分子式	CAS号	相对含量(μg/kg)					
				0 min	1 min	2 min	3 min	4 min	5 min
16	β-环柠檬醛	$C_{10}H_{16}O$	432-25-7	22.89±8.26^{a}	24.13±1.44^{a}	10.51±2.62^{b}	8.65±1.45^{b}	12.75±3.08^{b}	8.26±0.88^{b}
17	2-癸烯醛	$C_{10}H_{18}O$	3913-81-3	16.29±0.27^{a}	13.00±1.13^{a}	8.59±1.85^{ab}	16.42±1.58^{a}	7.75±2.16^{b}	6.22±0.59^{b}
18	(E,E)-2,4-壬二烯醛	$C_{9}H_{14}O$	5910-87-2	–	2.98±0.32^{a}	2.62±1.04^{a}	6.64±5.24^{a}	1.39±0.31^{a}	1.64±0.05^{a}
19	2,4-二甲基苯甲醛	$C_{9}H_{10}O$	15764-16-6	3.20±0.98^{a}	1.49±0.30^{b}	1.22±0.42^{b}	0.77±0.25^{b}	0.89±0.06^{b}	0.66±0.69^{b}
20	2-十一烯醛	$C_{11}H_{20}O$	2463-77-6	3.56±0.49^{a}	1.51±0.10^{a}	1.20±0.04^{a}	1.73±1.86^{a}	1.35±0.42^{a}	1.04±0.09^{a}
21	枯茗醛	$C_{9}H_{8}O$	122-3-2	12.63±3.81	–	–	–	–	–
22	(E,Z)-2,4-癸二烯醛	$C_{10}H_{16}O$	25152-83-4	24.59±1.85^{a}	14.78±0.87^{b}	6.96±1.48^{c}	4.37±1.31^{c}	6.46±1.06^{c}	5.00±0.54^{c}
23	(E,E)-2,4-癸二烯醛	$C_{10}H_{16}O$	25152-84-5	33.64±5.42	–	–	–	–	–
24	2-反式-6-顺式十二二烯醛	$C_{12}H_{20}O$	21662-13-5	12.19±0.51^{a}	2.93±0.36^{b}	1.97±0.17^{b}	1.04±0.22^{b}	1.66±0.32^{b}	2.05±0.26^{b}
25	肉桂醛	$C_{9}H_{8}O$	104-5-5-2	1.28±0.14	–	–	–	–	–
	酮类			256.34±18.27^{a}	74.43±8.68^{b}	53.46±6.77^{bc}	40.23±7.05^{c}	37.07±6.66^{c}	36.44±6.42^{c}
1	1-辛烯-3-酮	$C_{8}H_{14}O$	4312-99-6	36.20±5.97^{a}	9.78±1.09^{b}	10.60±1.19^{b}	6.58±2.78^{b}	11.16±1.15^{b}	9.10±3.57^{b}
2	2,2,6-三甲基环己酮	$C_{9}H_{16}O$	2408-37-9	9.50±0.78^{a}	1.69±0.09^{b}	3.78±2.27^{b}	1.95±1.14^{b}	–	2.70±0.35^{b}
3	6-甲基-5-庚烯-2-酮	$C_{8}H_{14}O$	110-93-0	13.06±1.55^{a}	3.17±0.41^{b}	6.01±1.04^{b}	3.38±0.62^{b}	5.17±0.88^{b}	–
4	2-十一酮	$C_{8}H_{14}O$	112-12-9	4.96±0.58	–	–	–	–	–
5	香叶基丙酮	$C_{11}H_{22}O$	3796-70-1	112.44±2.24^{a}	16.62±2.66^{b}	14.04±1.07^{b}	8.80±1.01^{c}	12.05±2.80^{b}	12.75±1.02^{b}
6	β-紫罗兰酮	$C_{13}H_{22}O$	14901-07-6	79.40±7.11^{a}	42.06±3.54^{b}	18.75±1.17^{c}	19.03±1.47^{c}	8.11±1.24^{d}	11.42±1.43^{cd}
7	二苯甲酮	$C_{13}H_{20}O$	119-61-9	0.78±0.04	–	–	–	–	–
8	植酮	$C_{13}H_{10}O$	502-69-2	–	1.11±0.89^{a}	0.28±0.03^{a}	0.49±0.03^{a}	0.58±0.59^{a}	0.47±0.05^{a}
	酸类			1.75±0.39^{a}	1.49±0.07^{a}	–	–	–	–
1	壬酸	$C_{9}H_{18}O_{2}$	112-5-0	1.75±0.39^{a}	1.49±0.07^{a}	–	–	–	–
	酯类			–	1.53±0.23^{a}	0.80±0.61^{a}	1.00±0.96^{a}	0.35±0.10^{a}	1.52±0.41^{a}
1	乙酸苏合香酯	$C_{10}H_{12}O_{2}$	93-92-5	–	–	–	–	–	1.05±0.35
2	二氢猕猴桃内酯	$C_{11}H_{16}O_{2}$	17092-92-1	–	1.53±0.23^{a}	0.80±0.61^{a}	1.00±0.96^{a}	0.35±0.10^{a}	0.47±0.06^{a}
	醇类			37.51±0.82^{a}	19.61±1.78^{b}	19.30±3.42^{b}	11.25±1.74^{c}	9.30±2.86^{c}	12.06±5.90^{c}
1	1-辛烯-3-醇	$C_{8}H_{16}O$	3391-86-4	35.59±0.59^{a}	17.22±1.59^{b}	17.29±2.89^{b}	8.98±1.54^{c}	9.30±2.86^{c}	9.02±4.17^{c}
2	芳樟醇	$C_{10}H_{18}O$	78-70-6	1.92±0.23^{a}	2.39±0.19^{a}	2.01±0.53^{a}	2.27±0.20^{a}	–	3.04±1.73^{a}
	呋喃			35.63±5.74^{a}	5.60±1.11^{b}	3.93±1.29^{b}	4.95±1.15^{b}	6.05±0.84^{b}	2.07±0.68^{b}
1	2-戊基呋喃	$C_{9}H_{14}O$	3777-69-3	35.63±5.74^{a}	5.60±1.11^{b}	3.93±1.29^{b}	4.95±1.15^{b}	6.05±0.84^{b}	2.07±0.68^{b}
	总相对含量			1177.81±112.75^{a}	364.67±45.00^{b}	312.04±55.57^{b}	271.24±67.60^{b}	275.25±46.04^{b}	237.84±27.34^{b}

注: 同行不同小写字母表示数据差异显著, $P<0.05$; "–"表示未检出; 表3、表5同。

对醛类、酯类和呋喃类物质的相对含量和所有挥发性风味物质的总相对含量无显著性($P>0.05$)影响, 酮类和 1-辛烯-3-醇的相对含量则随着煮制时间的增加显著($P<0.05$)减少。

2.2 不同煮制时间嫩芽海带 OAV 分析及关键风味化合物

挥发性风味物质对样品香气的贡献程度不仅取决于其在样品中的相对含量, 还与该物质在样品中的阈值有关[15]。OAV 是衡量某一组分对总体气味贡献程度的指标, 相关研究表明 0≤OAV≤1 的物质通常在食物整体香味中起修饰作用; OAV≥1 的化合物通常被认为是食物基质整体香气的有效贡献者; OAV≥10 的化合物被认为是影响食物香气的重要物质[16]。将 GC-MS 检测到的挥发性物质根据各自嗅觉阈值, 计算 OAV, 分析各物质对整体气味的贡献度, 结果如表 2 所示, 0、1、2、3、4 和 5 min 组各有 16、15、15、15、14 和 15 种 OAV>1 的关键风味物质, 各组间关键风味物质数量差距较小。1-辛烯-3-酮的 OAV 值在各组样品中均为最高, 且远高于其他化合物的 OAV 值, 这主要是由于其较低的感官阈值以及较高的物质含量所致。这表明 1-辛烯-3-酮对样品的贡献率最高, 并且影响力最大, 是煮制嫩芽海带最关键的风味物质。1-辛烯-3-酮是脂肪酸自氧化反应的降解产物[17], 具有蘑菇味和泥土味, 且对海带腥味的贡献较大[18], 是海带腥味的主要成分。在五组煮制样品中, 煮制 3 min 组的 OAV 值最小。

醛类是嫩芽海带的主要挥发性风味物质, 主要来自脂肪氧化水解、微生物作用以及糖类美拉德反应[19], 风味多样, 3~4 个碳原子的醛具有强烈的刺激性风味, 5~9 个碳原子的醛具有清香、油香、脂香风味, 分子量较高的醛具有橘子皮似的风味[20], 同时因其气味感受阈值较低, 该类化合物也是其他食物风味物质的重要组成部分[21]。6 组嫩芽海带样品中 OAV 值最大的醛类化合物分别为(E,E)-2,4-癸二烯醛、2-壬烯醛和反式-2-壬醛。其中(E,E)-2,4-癸二烯醛和反式-2-壬醛是未煮制的 0 min 组海带独有的, 2-壬烯

表 2　不同煮制时间样品 OAV 分析

Table 2　OAV analysis of samples with different cooking times

序号	化合物	CAS号	风味描述	阈值(μg/kg)	OAV					
					0 min	1 min	2 min	3 min	4 min	5 min
1	1-辛烯-3-酮	4312-99-6	泥土、蘑菇	0.003	12066.67	3260.00	3533.33	2193.33	3720.00	3033.33
2	(E,E)-2,4-癸二烯醛	25152-84-5	香菜、油炸、脂肪、油、氧化	0.027	1245.93	–	–	–	–	–
3	2-壬烯醛	2463-53-8	脂肪、紫罗兰	0.1	–	410.10	260.70	137.80	211.80	172.30
4	反式-2-壬醛	18829-56-6	脂肪、青草	0.19	749.32	–	–	–	–	–
5	(E,Z)-2,4-癸二烯醛	25152-83-4	天竺葵、绿色、蜡味	0.04	614.75	369.50	174.00	109.25	161.50	125.00
6	壬醛	124-19-6	脂肪、花香、绿色、柠檬	1.1	147.47	41.23	60.81	45.94	60.28	51.05
7	(E,Z)-2,6-壬二烯醛	557-48-2	黄瓜、绿色、蜡	0.8	74.95	37.35	16.76	22.05	15.80	10.18
8	(E,E)-2,4-壬二烯醛	5910-87-2	谷物、油炸、脂肪、西瓜	0.1	–	29.80	26.20	66.40	13.90	16.40
9	反-2-辛烯醛	2548-87-0	脂肪、水果、草、绿色、香料	3	44.67	16.49	7.53	8.18	9.20	9.19
10	1-辛烯-3-醇	3391-86-4	黄瓜、泥土、脂肪、花卉、蘑菇	1.5	23.73	11.48	11.53	5.99	6.20	6.01
11	辛醛	124-13-0	柑橘、脂肪、绿色、油、辛辣	0.587	26.15	14.17	22.35	19.17	17.07	12.57
12	芳樟醇	78-70-6	香菜、花香、柠檬、玫瑰	0.22	8.73	10.86	9.14	10.32	–	13.82
13	β-环柠檬醛	432-25-7	草本	3	7.63	8.04	3.50	2.88	4.25	2.75
14	癸醛	112-31-2	花香、油炸、橙子、脂肪	3	17.88	6.26	6.60	7.19	6.27	4.79
15	β-紫罗兰酮	14901-07-6	花香、紫罗兰香	8.4	9.45	5.01	2.23	2.27	0.97	1.36
16	(EE)-2,4-庚二烯醛	4313-03-5	脂肪、坚果	15.4	2.28	1.55	0.89	0.52	0.44	0.41
17	2-戊基呋喃	3777-69-3	黄油、花香、水果、绿豆	5.8	6.14	0.97	0.68	0.85	1.04	0.36
18	庚醛	111-71-7	柑橘、脂肪、绿色、坚果	2.8	2.46	0.70	1.10	1.01	0.71	0.58

注：风味描述依据来自网站https://www.femaflavor.org/；“–”表示未检出；表4、表6同。

醛是煮制嫩芽海带独有的。(E,E)-2,4-癸二烯醛是亚油酸的氧化产物，可以与氨基酸 Strecker 降解后得到的产物发生美拉德反应。例如，可以与半胱氨酸或谷氨酸上的氨基发生反应生成 2-戊基吡啶[22]。未煮制的 0 min 组嫩芽海带中的(E,E)-2,4-癸二烯醛可能是在煮制过程中发生了上述反应，因此未能从煮制嫩芽海带样品中检出。2-壬烯醛是脂肪氧化产生的产物，只在煮制嫩芽海带组检出可能是因为煮制促进了海带中的脂肪发生氧化。反式-2-壬醛在低浓度时具有青草气味，但在高浓度时会产生不愉快气味，仅在未煮制的 0 min 组海带检出。

对煮制嫩芽海带风味影响较大的酮类除了 1-辛烯-3-酮外还有 β-紫罗兰酮，其富有花香、紫罗兰香，对海带独特花香气息的形成起到了至关重要的作用。经煮制工艺处理后 OAV 值下降较为明显，且随着煮制时间的增加有减少的趋势。

醇类物质中 OAV>1 只有 1-辛烯-3-醇和芳樟醇，1-辛烯-3-醇是亚油酸氢过氧化物的降解产物，具有蘑菇和泥土味，是海带的主要腥味物质之一，经过煮制后可能转变为其他物质或者因煮制被大量稀释而 OAV 值下降。芳樟醇是一种常见的香味化合物，属于单萜醇类，具有花香和柠檬味，这种物质是植物中几乎不自带的化合物，主要来源于糖苷的裂解[23]。刘兴平等[24]认为高含量的芳樟醇可能具有脱腥或者腥味掩蔽效果。

综上所述，在煮制 3 min 时，嫩芽海带最关键的风味物质 1-辛烯-3-酮 OAV 值最低，腥味最淡。

2.3　烘干工艺对嫩芽海带中挥发性风味物质的影响

煮制工艺会显著(P<0.05)降低嫩芽海带的整体风味物质的 OAV，从而削弱整体风味。海带粉可作为调味料加入食品中，以提升食品的风味[25]。因此，为了弥补因煮制流失的风味，将海带烘干制成海带粉并加入汤中，以提高整体风味。

采用 HS-SPME-GC-MS 对不同烘干温度下嫩芽海带的挥发性风味物质进行分析，图 3 和表 3 为不同烘干温度下嫩芽海带挥发性风味物质组成及含量分析结果。由图 3 和表 3 可知，不同烘干温度下嫩芽海带中共鉴定出 39 种挥发性风味物质，其中醛类 18 种、酮类 8 种、酸类 6 种、酯类 2 种、醇类 4 种、呋喃 1 种。5 组烘干样品(60、70、80、90、100 ℃)中分别检出 35 种、37 种、34 种、33 种、31 种挥发性风味物质，其中共有物质 26 种。随着烘干温度的上升，挥发性风味物质种类的数量呈现先上升后下降的趋势，70 ℃ 组的风味物质种类最多。

醛类阈值一般较低，对产品风味贡献较大，尽管海带脂肪含量低，但其他一些非脂类物质(氨基酸的降解、糖类的美拉德反应等)也可能贡献一部分醛类风味物质。因此，由图 3 可知，5 组样品中醛类物质是烘干嫩芽海带中挥发性物质最多的种类，含量也最高，这与 Zhu 等[26]的研究结果一致。5 组样品中共同含有的醛类化合物有 13 种，分别为正己醛、庚醛、辛醛、壬醛、反-2-辛烯醛、(2E,4E)-庚二烯醛、癸醛、(E)-2-壬烯醛、反-4-癸醛、2-十一烯醛、2,4-癸二烯醛、2-反式-6-顺式十二二烯醛和肉豆蔻醛。随着干燥温度的变化，醛类物质的种类数量变化不大，含量最高的醛为壬醛和正己醛，这一结果与 Ferraces 等[27]相似。

酮类物质通常具有果香味，大多数酮类物质阈

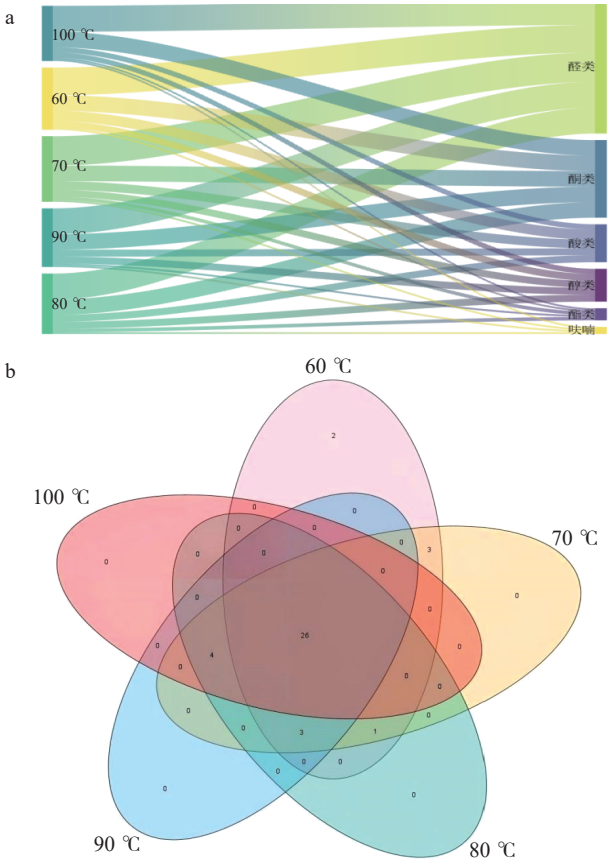


图 3 不同烘干温度嫩芽海带挥发性风味物质组成

Fig.3 Composition of volatile flavor compounds in tender kelp at different drying temperature

注: a 为种类桑基图; b 为韦恩图。

值较低, 5 组样品中酮类相对含量仅次于醛类, 也是烘干嫩芽海带香味物质的重要组成部分, 酮类物质能赋予嫩芽海带花香和果香且香味持久[28]。5 组样品中共同含有的酮类化合物有 8 种, 分别为 2,2,6-三甲基环己酮、3-辛烯-2-酮、2-十一酮、4-氧代异佛尔酮、六氢假紫罗酮、香叶基丙酮、β-紫罗兰酮和植酮。含量最高的酮均为 β-紫罗兰酮和香叶基丙酮, 紫罗兰酮是一种 13 碳化合物, 具有紫罗兰和木本香气, 其存在于许多水果和花卉中, 是类胡萝卜素氧化 9,10 键降解的产物[29]。由于海带中含有丰富的类胡萝卜素[30], 在烘干过程中高温使类胡萝卜素发生降解, 产生了大量的紫罗酮, 带给海带独特的花香。其余挥发性化合物(酸、醇、酯和呋喃等化合物)种类较少, 其中, 1-辛烯-3-醇含量较高, 1-辛烯-3-醇又被称为蘑菇醇, 主要呈蘑菇香味和脂质氧化的味道, 在水产品中常被认为是水产品腥味的来源之一[31], 主要由花生四烯酸和亚油酸氧化降解而成[32]。

综上所述, 随着烘干温度的上升, 挥发性风味物质种类的数量呈现先上升后下降的趋势, 70 ℃ 组的风味物质种类最多, 醛类、酮类等各类物质的含量随着烘干温度的改变并无规律性变化。

2.4 不同烘干温度嫩芽海带 OAV 分析及关键风味化合物

将 GC-MS 检测到的挥发性风味物质根据各自嗅觉阈值, 计算其 OAV 值, 分析各物质对整体气味的贡献度, 结果如表 4 所示, 5 组样品中 OAV 值最

表 3 不同烘干温度样品中挥发性风味物质的相对含量

Table 3 Content of volatile flavouring substances in samples with different drying temperatures

序号	化合物	结构简式	CAS号	相对含量(μg/kg)				
				60 ℃	70 ℃	80 ℃	90 ℃	100 ℃
	醛类			171.45±18.71^{ab}	183.59±19.96^{a}	139.67±8.74^{c}	208.01±16.24^{a}	101.06±11.80^{c}
1	正己醛	$C_6H_{12}O$	66-25-1	11.73±1.23^{c}	16.99±1.15^{b}	18.90±1.75^{b}	38.26±3.11^{a}	10.67±0.56^{c}
2	庚醛	$C_7H_{14}O$	111-71-7	7.73±1.28^{a}	7.70±0.75^{a}	3.67±0.25^{b}	4.79±0.46^{b}	4.23±1.75^{b}
3	(Z)-4-庚烯醛	$C_7H_{12}O$	6728-31-0	–	1.52±0.28^{a}	1.27±0.13^{a}	2.25±0.27^{a}	1.99±0.12^{a}
4	辛醛	$C_8H_{16}O$	124-13-0	5.08±0.19^{a}	5.63±0.69^{a}	4.73±0.52^{a}	6.25±0.59^{a}	2.88±0.07^{b}
5	壬醛	$C_9H_{18}O$	124-19-6	76.19±4.49^{a}	85.51±8.88^{a}	50.81±2.89^{b}	54.44±3.67^{b}	34.37±4.86^{c}
6	反-2-辛烯醛	$C_8H_{14}O$	2548-87-0	3.70±0.13^{b}	5.54±0.82^{b}	6.85±0.16^{b}	10.46±0.83^{a}	4.03±0.34^{b}
7	(2E, 4E)-庚二烯醛	$C_7H_{10}O$	4313-03-5	7.89±0.56^{d}	9.95±0.76^{cd}	19.52±0.93^{b}	35.83±2.34^{a}	11.87±1.06^{c}
8	癸醛	$C_{10}H_{20}O$	112-31-2	7.36±0.32^{b}	12.73±1.52^{a}	5.30±0.40^{b}	6.79±0.88^{b}	5.77±0.31^{b}
9	(E)-2-壬烯醛	$C_9H_{16}O$	18829-56-6	7.48±0.12^{c}	11.67±1.39^{b}	14.48±0.25^{b}	20.68±1.39^{a}	10.94±1.53^{bc}
10	反-4-癸醛	$C_{10}H_{18}O$	65405-70-1	1.57±0.19^{b}	1.62±0.26^{b}	2.80±0.22^{b}	4.55±0.68^{a}	2.04±0.25^{b}
11	月桂醛	$C_{12}H_{24}O$	112-54-9	8.89±0.76^{a}	9.27±1.16^{a}	–	–	–
12	β-环柠檬醛	$C_{10}H_{16}O$	432-25-7	19.05±8.39^{a}	–	–	–	–
13	2-癸烯醛	$C_{10}H_{18}O$	3913-81-3	–	2.13±0.31^{b}	2.08±0.14^{b}	5.70±0.11^{a}	2.10±0.17^{b}
14	2-十一烯醛	$C_{11}H_{20}O$	2463-77-6	1.35±0.11^{a}	1.45±0.12^{a}	1.28±0.12^{a}	2.63±1.32^{a}	1.50±0.25^{a}
15	2,4-癸二烯醛	$C_{10}H_{16}O$	2363-88-4	5.84±0.49^{b}	5.08±0.64^{b}	6.61±0.61^{b}	13.10±0.32^{a}	6.64±0.29^{b}
16	十三醛	$C_{13}H_{26}O$	10486-19-8	5.08±0.33^{a}	4.43±0.65^{a}	–	–	–
17	2-反式-6-顺式十二二烯醛	$C_{12}H_{20}O$	21662-13-5	1.45±0.04^{a}	1.10±0.24^{a}	0.89±0.16^{a}	1.80±0.20^{a}	1.24±0.21^{a}
18	肉豆蔻醛	$C_{14}H_{28}O$	124-25-4	1.06±0.08^{a}	1.27±0.34^{a}	0.48±0.21^{a}	0.48±0.07^{a}	0.79±0.03^{a}
	酮类			133.61±6.72^{a}	70.54±19.97^{c}	73.30±13.44^{c}	115.89±8.95^{ab}	104.65±4.32^{b}
1	2,2,6-三甲基环己酮	$C_9H_{16}O$	2408-37-9	7.66±0.83^{b}	6.87±0.28^{b}	9.94±0.72^{a}	11.54±1.36^{a}	3.47±0.46^{c}
2	3-辛烯-2-酮	$C_8H_{14}O$	1669-44-9	0.86±0.46^{b}	1.05±0.26^{b}	1.10±0.03^{b}	8.26±1.34^{a}	1.36±0.95^{b}

续表 3

序号	化合物	结构简式	CAS号	相对含量(μg/kg)				
				60 ℃	70 ℃	80 ℃	90 ℃	100 ℃
3	2-十一酮	$C_{11}H_{22}O$	112-12-9	8.93±0.30^{a}	3.03±0.15^{b}	1.20±0.02^{d}	1.43±0.09^{d}	2.26±0.17^{c}
4	4-氧代异佛尔酮	$C_9H_{12}O_2$	1125-21-9	3.55±0.10^{b}	2.76±0.58^{c}	4.42±0.61^{b}	7.02±0.82^{a}	6.69±0.53^{a}
5	六氢假紫罗酮	$C_{13}H_{26}O$	1604-34-8	6.34±0.26^{b}	5.28±0.41^{b}	6.45±0.84^{b}	9.49±0.63^{a}	6.11±0.54^{b}
6	香叶基丙酮	$C_{13}H_{22}O$	3796-70-1	19.93±0.89^{a}	12.86±1.93^{b}	13.01±2.13^{b}	16.55±1.08^{a}	17.74±0.67^{a}
7	*β*-紫罗兰酮	$C_{13}H_{20}O$	14901-07-6	78.38±3.12^{a}	33.07±14.56^{c}	33.75±8.59^{c}	57.64±3.45^{b}	65.48±1.18^{a}
8	植酮	$C_{18}H_{36}O$	502-69-2	7.96±0.76^{a}	5.62±1.80^{ab}	3.43±0.50^{b}	3.96±0.18^{b}	7.65±0.36^{a}
	酸类			13.78±0.97^{a}	8.89±3.27^{bc}	8.36±1.06^{bc}	11.02±2.28^{ab}	5.44±0.72^{c}
1	2-乙基丁酸	$C_6H_{12}O_2$	88-09-5	1.67±0.23^{c}	3.73±0.77^{b}	5.01±0.20^{b}	6.69±0.85^{a}	–
2	庚酸	$C_7H_{14}O_2$	111-14-8	0.93±0.01^{a}	0.72±0.28^{a}	–	–	–
3	壬酸	$C_9H_{18}O_2$	112-05-0	4.83±0.21^{a}	2.27±1.11^{ab}	1.90±0.38^{b}	2.62±1.13^{a}	3.43±0.30^{a}
4	月桂酸	$C_{12}H_{24}O_2$	143-07-7	0.59±0.05^{a}	0.44±0.13^{a}	0.24±0.09^{a}	0.21±0.13^{a}	0.31±0.02^{a}
5	硬脂酸	$C_{18}H_{36}O_2$	57-11-4	0.88±0.34^{a}	–	–	–	–
6	肉豆蔻酸	$C_{14}H_{28}O_2$	544-63-8	4.88±0.13^{a}	1.73±0.98^{b}	1.21±0.39^{b}	1.50±0.17^{b}	1.70±0.40^{b}
	酯类			1.40±0.23^{bc}	1.70±0.39^{bc}	1.90±0.41^{bc}	2.10±0.06^{a}	1.24±0.06^{c}
1	乙酸薄荷酯	$C_{12}H_{22}O_2$	89-48-5	–	1.09±0.26^{b}	1.08±0.22^{b}	2.10±0.06^{a}	1.24±0.06^{b}
2	庚酸烯丙酯	$C_{10}H_{18}O_2$	142-19-8	1.4±0.23^{a}	0.61±0.13^{b}	0.82±0.19^{b}	–	–
	醇类			55.50±1.06^{b}	38.04±8.39^{c}	55.09±6.30^{b}	80.66±4.94^{a}	30.41±5.35^{c}
1	1-戊烯-3-醇	$C_5H_{10}O$	616-25-1	3.53±0.34^{b}	3.86±0.43^{b}	4.87±0.17^{b}	9.22±0.27^{a}	4.94±0.14^{b}
2	1-辛烯-3-醇	$C_8H_{16}O$	3391-86-4	33.51±0.14^{b}	28.97±6.28^{bc}	37.72±4.54^{b}	57.73±3.32^{a}	21.13±4.95^{c}
3	1-十三醇	$C_{13}H_{28}O$	112-70-9	14.81±0.38^{a}	3.05±1.25^{c}	9.28±0.91^{b}	8.70±1.27^{b}	–
4	5-甲基糠基硫醇	C_6H_8OS	59303-5-8	3.65±0.20^{a}	2.16±0.43^{b}	3.22±0.68^{a}	5.01±0.08^{a}	4.34±0.26^{a}
	呋喃			–	4.12±0.12^{b}	4.68±0.18^{b}	6.12±0.32^{a}	6.18±0.81^{a}
1	2-乙酰基-5-甲基呋喃	$C_7H_8O_2$	1193-79-9	–	4.12±0.12^{b}	4.68±0.18^{b}	6.12±0.32^{a}	6.18±0.81^{a}
	总相对含量			375.74±27.69^{ab}	306.88±52.10^{bc}	283.00±30.13^{cd}	423.80±32.79^{a}	248.98±23.06^{d}

表 4　不同烘干温度样品 OAV 分析

Table 4　OAV analysis of kelp powder samples with different drying temperatures

序号	化合物	CAS号	风味描述	阈值(μg/kg)	OAV				
					60 ℃	70 ℃	80 ℃	90 ℃	100 ℃
1	(Z)-4-庚烯醛	6728-31-0	青草、油脂、奶油	0.025	–	60.62	50.80	90.16	79.73
2	壬醛	124-19-6	脂肪、花香、绿色、柠檬	1.1	69.26	77.74	46.20	49.49	31.24
3	反式-2-壬醛	18829-56-6	脂肪	0.119	39.36	53.76	84.10	166.19	–
4	月桂醛	112-54-9	柑橘、脂肪	0.29	31.98	34.28	–	–	–
5	1-辛烯-3-醇	3391-86-4	黄瓜、泥土、脂肪、花卉、蘑菇	1.5	22.41	19.31	25.14	38.48	14.09
6	*β*-紫罗兰酮	14901-07-6	花香、紫罗兰香	3.5	22.39	9.45	9.64	16.47	18.71
7	2,4-癸二烯醛	2363-88-4	芫荽、油炸、脂肪、油、氧化	0.3	19.48	16.94	22.05	43.65	22.14
8	辛醛	124-13-0	柑橘、脂肪、绿色、油、辛辣	0.587	8.66	9.59	8.05	10.64	4.91
9	*β*-环柠檬醛	432-25-7	草本	3	6.35	–	–	–	–
10	庚醛	111-71-7	柑橘、脂肪、绿色、坚果	2.8	2.76	2.75	1.31	1.71	1.51
11	癸醛	112-31-2	花香、油炸、橙子、脂肪	3	2.45	4.24	1.77	2.26	1.92
12	2-十一酮	112-12-9	清新、绿色、橙子、玫瑰	5.5	1.62	0.55	0.22	0.26	0.41
13	反-2-辛烯醛	2548-87-0	脂肪、水果、草、绿色、香料	3	1.23	1.85	2.28	3.49	1.34
14	(E,E)-2,4-庚二烯醛	4313-03-5	脂肪、坚果	15.4	0.51	0.65	1.27	2.33	0.77
	醛类物质总OAV				182.04	262.42	217.83	369.92	143.56

注：“–”表示无数据。

高的均是醛类物质，且碳原子数都大于 5，大多数醛类在低浓度下都表现出专有的脂肪香气，但当浓度超过一定阈值时，它们会产生酸腐的滋味[33]。醛类物质中 OAV 值最高的主要为(Z)-4-庚烯醛、壬醛和反式-2-壬醛。(Z)-4-庚烯醛在各种乌龙茶、绿茶和红茶等茶类的风味研究中经常被报道，被认为是奶香味的主要来源之一[34−35]，而且因其阈值较低，在整体气味特征中发挥着重要作用。壬醛是由油酸和亚油酸氧化产生，呈脂肪、花香、绿色和柠檬味，虽然阈值不低但是其物质含量高，对嫩芽海带整体风味也作出了

重要贡献。反式-2-壬醛可能来自脂肪酸氧化，给烘干嫩芽海带带来脂香风味。醛类物质的总 OAV 值随着烘干温度的上升大致呈现先上升后下降的趋势，这可能是因为在烘干过程中会发生美拉德反应从而产生醛类物质，且随着温度的增加美拉德反应会加剧，而当烘干温度为 100 ℃ 时，过高温度会加速醛类物质的挥发和降解，因此在 100 ℃ 时醛类物质 OAV 值下降。

5 组样品的醇类物质中，仅有 1-辛烯-3-醇 OAV 值较高超过了 10，其他醇的 OAV 值皆小于 1。因此 1-辛烯-3-醇是烘干嫩芽海带风味的主要贡献物质之一，醇类物质一般来源于脂质的氧化以及醛、酮类物质的还原，通常阈值较高，对产品的风味品质影响不大，但一些不饱和醇阈值较低如 1-辛烯-3-醇，具有典型的蘑菇味和泥土味[36]，被认为是海带中的主要腥味物质之一。

5 组样品中 OAV 值>1 的酮类化合物只有 2 种，分别为 β-紫罗兰酮和 2-十一酮。酮类化合物主要来源于氨基酸的降解过程以及不饱和脂肪酸的氧化反应[37]。紫罗兰酮被认为是形成海带特有花香味的重要物质，β-紫罗兰酮也具有花香和紫罗兰香，虽然其阈值较高但同时物质含量也很高，因此 OAV 值也不低，是烘干嫩芽海带花香风味的重要贡献者。2-十一酮有着清新、绿色、橙子、玫瑰的气味描述，都是令人愉悦的风味描述，但是仅在 60 ℃ 组中 OAV>1，这可能是因为烘干温度提高后，2-十一酮发生了分解。

综上所述，醛类物质的 OAV 值随着烘干温度的上升呈现上升趋势，当温度为 100 ℃ 时，醛类物质 OAV 值下降，由于大多数醛类物质在低浓度下都表现出专有的脂肪香气，但当浓度超过一定阈值时，它们会产生刺激性气味，而 OAV 值与物质的浓度成正比，因此可以认为醛类物质的 OAV 值较低的 60 ℃ 组和 100 ℃ 组可能会表现出更好的风味。形成海带特有花香味的 β-紫罗兰酮，在烘干温度为 60 ℃ 时 OAV 值最高，仅在 60 ℃ 时，具有清新、绿色、橙子、玫瑰气味的 2-十一酮的 OAV 值>1。烘干海带中的主要腥味物质 1-辛烯-3-醇的 OAV 值从大到小依次为：90 ℃>80 ℃>60 ℃>70 ℃>100 ℃。综合上述分析，选择 β-紫罗兰酮和 2-十一酮 OAV 值最高且醛类和腥味物质 OAV 值均较低的 60 ℃ 作为冻干嫩芽海带汤块制作过程中海带粉调味料的烘干温度。

2.5 真空冷冻干燥工艺对嫩芽海带中挥发性风味物质的影响

由于冻干复水后嫩芽海带的水分与冻干前相差较大，因此用干重来计算风味化合物含量。由图 4 和表 5 可知，在冻干前后嫩芽海带中共鉴定出 31 种挥发性风味化合物，包括醛类 19 种、酮类 7 种、酸类 1 种、酯类 1 种、醇类 2 种及呋喃类 1 种。冻干前的嫩芽海带样品鉴定出 28 种挥发性风味化合物，包括醛类 17 种、酮类 6 种、酸类 1 种、酯类 1 种、醇类 2 种及呋喃类 1 种。冻干复水后的嫩芽海带样品鉴定出 27 种挥发性风味化合物，其中醛类 18 种、酮类 4 种、酸类 1 种、酯类 1 种、醇类 1 种及呋喃类 1 种。两组海带共有挥发性物质 23 种。由图 4 和表 5 可知，冻干工艺对嫩芽海带中挥发性风味物质的种类、总相对含量及醛类、酮类等各种物质含量均无显著（P>0.05）影响，表明冻干工艺未对嫩芽海带的风味产生显著改变。

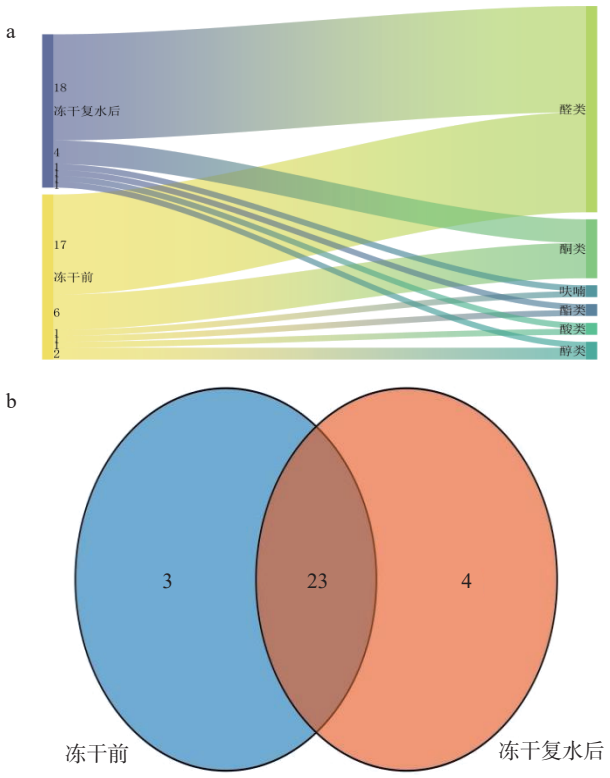


图 4 冻干前后嫩芽海带挥发性风味物质组成

Fig.4 Composition of volatile flavor compounds in tender kelp before and after freeze-drying

注：a 为种类桑基图；b 为韦恩图。

醛类化合物相对含量变化不大，受冻干影响较小，与冻干前相比多了 2-己烯醛和对甲氧基苯甲醛，少了 2,4-二甲基苯甲醛，这几种醛都是碳原子数大于 5 的醛，均不具有强烈刺激性气味的物质。酮类物质相对含量变化也无显著性（P>0.05）差异，受冻干工艺的影响也较小，与冻干前相比少了 2,2,6-三甲基环己酮和 6-甲基-5-庚烯-2-酮，多检测到了 2-十一酮。醇类化合物仅检测出 1-辛烯-3-醇和芳樟醇，两种物质在冻干前后的含量变化无显著性（P>0.05）差异。酸类化合物则变化较大，壬酸在冻干后相对含量显著降低（P<0.05），但壬酸的阈值较高对风味影响很小。酯类和呋喃也是同理。因此，冻干工艺对海带风味的影响不显著（P>0.05），主要表现为风味减淡。

2.6 冻干前后嫩芽海带 OAV 分析及关键风味化合物

将 GC-MS 检测到的挥发性物质根据各自嗅觉阈值，计算 OAV，分析各物质对整体气味的贡献度，结果如表 6 所示，冻干前和冻干复水后都检测出 18 种 OAV 大于 1 的关键风味化合物。

表 5　冻干前后样品中挥发性风味化合物的含量(μg/kg, 干基)

Table 5　Amount of volatile flavour compounds in the sample before and after lyophilisation(μg/kg, dry basis)

序号	化合物	结构式	CAS号	冻干前	冻干复水后
	醛类			4673.19±545.33[a]	4578.29±559.24[a]
1	正己醛	$C_6H_{12}O$	66-25-1	317.69±27.61[a]	332.15±28.13[a]
2	庚醛	$C_7H_{14}O$	111-71-7	30.38±6.79[a]	23.91±2.14[a]
3	2-己烯醛	$C_6H_{10}O$	505-57-7	–	162.76±113.68
4	辛醛	$C_8H_{16}O$	124-13-0	128.31±15.58[a]	131.15±28.65[a]
5	壬醛	$C_9H_{18}O$	124-19-6	699.39±164.86[a]	747.30±146.71[a]
6	反-2-辛烯醛	$C_8H_{14}O$	2548-87-0	763.08±30.38[a]	682.10±67.61[a]
7	(2E,4E)-庚二烯醛	$C_7H_{10}O$	4313-03-5	367.04±69.86[a]	262.07±40.43[a]
8	癸醛	$C_{10}H_{20}O$	112-31-2	289.78±42.41[a]	274.88±42.54[a]
9	2-壬烯醛	$C_9H_{16}O$	2463-53-8	632.46±30.84[a]	629.51±37.96[a]
10	反-4-癸醛	$C_{10}H_{18}O$	65405-70-1	46.27±16.96[a]	40.47±3.08[a]
11	(E,Z)-2,6-壬二烯醛	$C_9H_{14}O$	557-48-2	460.81±70.32[a]	447.75±31.70[a]
12	*β*-环柠檬醛	$C_{10}H_{16}O$	432-25-7	372.13±22.21[a]	358.27±2.98[a]
13	2-癸烯醛	$C_{10}H_{18}O$	3913-81-3	200.49±17.43[a]	154.67±4.24[a]
14	(E,E)-2,4-壬二烯醛	$C_9H_{14}O$	5910-87-2	45.96±4.94[a]	38.01±2.21[a]
15	2,4-二甲基苯甲醛	$C_9H_{10}O$	15764-16-6	22.98±4.63	–
16	2-十一烯醛	$C_{11}H_{20}O$	2463-77-6	23.29±1.54[a]	18.47±1.14[a]
17	(E,Z)-2,4-癸二烯醛	$C_{10}H_{16}O$	25152-83-4	227.94±13.42[a]	200.26±1.47[a]
18	2-反式-6-顺式十二二烯醛	$C_{12}H_{20}O$	21662-13-5	45.19±5.55[a]	45.51±4.18[a]
19	对甲氧基苯甲醛	$C_8H_8O_2$	123-11-5	–	29.05±0.33
	酮类			1130.74±120.13[a]	1078.06±94.25[a]
1	1-辛烯-3-酮	$C_8H_{14}O$	4312-99-6	150.83±16.81[a]	151.50±21.94[a]
2	2,2,6-三甲基环己酮	$C_9H_{16}O$	2408-37-9	26.06±1.39	–
3	6-甲基-5-庚烯-2-酮	$C_8H_{14}O$	110-93-0	48.89±6.32	–
4	2-十一酮	$C_8H_{14}O$	112-12-9	–	18.87±5.74[a]
5	香叶基丙酮	$C_{11}H_{22}O$	3796-70-1	256.31±41.02[a]	256.4±19.56[a]
6	*β*-紫罗兰酮	$C_{13}H_{22}O$	14901-07-6	648.65±54.59[a]	651.29±47.01[a]
7	植酮	$C_{13}H_{10}O$	502-69-2	17.12±13.73	–
	酸类			22.98±1.08[a]	16.76±0.65[b]
1	壬酸	$C_9H_{18}O_2$	112-05-0	22.98±1.08[a]	16.76±0.65[b]
	酯类			23.60±3.55[a]	3.49±0.57[b]
1	二氢猕猴桃内酯	$C_{11}H_{16}O_2$	17092-92-1	23.60±3.55[a]	3.49±0.57[b]
	醇类			302.43±27.45[a]	305.4±23.76[a]
1	1-辛烯-3-醇	$C_8H_{16}O$	3391-86-4	265.57±24.52[a]	270.61±20.88[a]
2	芳樟醇	$C_{10}H_{18}O$	78-70-6	36.86±2.93[a]	34.79±2.88[a]
	呋喃			86.36±17.12[a]	90.91±2.52[a]
1	2-戊基呋喃	$C_9H_{14}O$	3777-69-3	86.36±17.12[a]	90.91±2.52[a]
	总相对含量			6239.30±714.66[a]	6072.91±680.99[a]

表 6　冻干前后样品 OAV 分析

Table 6　OAV analysis of samples before and after freeze-drying

序号	化合物	CAS号	风味描述	阈值(μg/kg)	OAV	
					冻干前	冻干复水后
1	1-辛烯-3-酮	4312-99-6	泥土、蘑菇	0.003	50276.67	50500.00
2	2-壬烯醛	2463-53-8	脂肪, 紫罗兰	0.1	6324.60	6295.10
3	(E,Z)-2,4-癸二烯醛	25152-83-4	天竺葵、绿色、蜡味	0.04	5698.50	5006.50
4	壬醛	124-19-6	脂肪、花香、绿色、柠檬	1.1	635.81	679.36
5	(E,Z)-2,6-壬二烯醛	557-48-2	黄瓜、绿色、蜡	0.8	576.01	559.69
6	(E,E)-2,4-壬二烯醛	5910-87-2	谷物、油炸、脂肪、西瓜	0.1	459.60	380.10
7	辛醛	124-13-0	柑橘、脂肪、绿色、油、辛辣	0.587	218.59	223.42
8	1-辛烯-3-醇	3391-86-4	黄瓜、泥土、脂肪、花卉、蘑菇	1.5	177.05	180.41
9	芳樟醇	78-70-6	香菜、花香、柠檬、玫瑰	0.22	167.55	158.14
10	*β*-环柠檬醛	432-25-7	草本	3	124.04	119.42

续表 6

序号	化合物	CAS号	风味描述	阈值(μg/kg)	OAV	
					冻干前	冻干复水后
11	癸醛	112-31-2	花香、油炸、橙子、脂肪	3	96.59	91.63
12	β-紫罗兰酮	14901-07-6	花香、紫罗兰香	8.4	77.22	77.53
13	(2E,4E)-庚二烯醛	4313-03-5	脂肪、坚果	15.4	23.83	17.02
14	2-戊基呋喃	3777-69-3	黄油、花香、水果、绿豆	5.8	14.89	15.67
15	2-癸烯醛	3913-81-3	脂肪, 鱼, 橙子	17	11.79	9.10
16	庚醛	111-71-7	柑橘、脂肪、绿色、坚果	2.8	10.85	8.54
17	正己醛	66-25-1	苹果, 脂肪, 新鲜, 绿色, 油	61.5	5.17	5.40
18	反-4-癸醛	65405-70-1	新鲜柑橘、橙子味	25	1.85	1.62
	总OAV值				64900.61	64328.65

醛类也是这两组样品的主要风味物质种类, 与冻干前相比, 冻干复水后大多数醛类物质的 OAV 值整体呈现下降趋势, 但是关键风味物质的组成没有改变。两组嫩芽海带中 OAV 值最高的几种醛类物质都为 2-壬烯醛和(E,Z)-2,4-癸二烯醛。2-壬烯醛和(E,Z)-2,4-癸二烯醛都是亚油酸的主要挥发物氧化的产物, 具有脂香味。酮类化合物 OAV 值大于 1 的只有 β-紫罗兰酮和 1-辛烯-3-酮。醇类物质 OAV 值大于 1 的只有芳樟醇, 具有花香和柠檬味。

综上所述, 冻干工艺对嫩芽海带风味组成的影响不大, 冻干前后关键风味物质组成不变, 但是各物质 OAV 值普遍下降, 主要起到减淡风味的作用。

3 结论

本文研究了嫩芽海带在冻干嫩芽海带汤块加工过程中挥发性风味物质的变化, 利用 HS-SPME-GC-MS 探究了煮制、烘干和真空冷冻干燥等产品关键加工工艺对嫩芽海带中挥发性风味物质组成及关键香气成分的影响, 主要结论如下:

醛类和酮类是煮制嫩芽海带中相对含量较多的挥发性风味物质, 煮制工艺显著(P<0.05)降低嫩芽海带的挥发性风味物质的种类和相对含量, 而煮制时间对醛类、酸类、酯类和呋喃类物质的相对含量和所有挥发性风味物质的总相对含量无显著性(P>0.05)影响, 酮类和 1-辛烯-3-醇的相对含量则随着煮制时间的增加显著减少(P<0.05)。不同煮制时间嫩芽海带的关键风味物质数量差距较小。1-辛烯-3-酮的 OAV 值在各组样品中均为最高, 且远高于其他化合物的 OAV 值, 是煮制嫩芽海带最关键的挥发性风味物质, 被认为是海带腥味主要贡献物质, 当煮制时间为 3 min 时其 OAV 值最小, 腥味最淡。

醛类和酮类也是烘干嫩芽海带中相对含量较多的挥发性风味物质。随着烘干温度的上升, 挥发性风味物质种类的数量呈现先上升后下降的趋势, 70 ℃组的风味物质种类最多, 醛类、酮类等各类物质的含量随着烘干温度的改变并无规律性变化。60 ℃组的 β-紫罗兰酮和 2-十一酮 OAV 值最高, 且醛类物质和腥味物质的 OAV 值较低, 因此选择 60 ℃作为冻干嫩芽海带汤块制作过程中海带粉调味料的烘干温度。

真空冷冻干燥工艺对嫩芽海带中挥发性风味物质的种类和相对含量均未产生显著(P>0.05)影响, 表明该工艺并未显著改变嫩芽海带的整体风味。通过 OAV 分析, 冻干前后关键风味物质的组成不变, 但是各物质的 OAV 值普遍下降, 主要起到减淡风味的作用。

© 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] 宋武林. 海带的主要功能及加工利用研究现状[J]. 渔业研究, 2016, 38(1): 81−86. [SONG W L. Research on the primary functions and utilization of *Laminaria japonica*[J]. Journal of Fisheries Research, 2016, 38(1): 81−86.]

[2] JESUMANI V, DU H ASLAM M, et al. Potential use of seaweed bioactive compounds in skincare —A Review[J]. Marine Drugs, 2019, 17(12): 688-688.

[3] 赵红波, 吴晓晶, 杨云, 等. 慢性功能性便秘与中医体质类型及相关危险因素的 Logistic 回归分析[J]. 中医杂志, 2017, 58(16): 1393−1398. [ZHAO H B, WU X J, YANG Y, et al. Logistic regression analysis of relative risk factors for chronic functional constipation and chinese medicine constitution types[J]. Journal of Traditional Chinese Medicine, 2017, 58(16): 1393−1398.]

[4] HUANG P M, WANG Z R, SHI Y, et al. Deodorizing effects of rosemary extract on silver carp (*Hypophthalmichthys molitrix*) and determination of its deodorizing components[J]. Journal of Food Science, 2022, 87(2): 636−650.

[5] LIU L, ZHAO Y H, ZENG M Y, et al. Research progress of fishy odor in aquatic products: Fromsubstance identification, formation mechanism, to elimination pathway[J]. Food Research International, 2024, 178: 113914.

[6] 焦明月. 热风干燥工艺对海带品质及风味物质的影响研究[D]. 长春: 吉林大学, 2024. [JIAO M Y. Study on the effects of hot air drying process on the quality andflavor compounds of kelp[D]. Changchun: Jilin University, 2024.]

[7] 陈丽丽. 海带糕加工关键技术的研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2012. [CHEN L L. Study on processing key technologies of kelp jelly[D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2012.]

[8] 张李, 聂诗明, 陈运中, 等. 海带脱腥工艺优化及复方海带代

餐粉的研制[J]. 食品工业, 2021, 42(7): 23−28. [ZHANG L, NIE S M, CHEN Y Z, et al. Optimization of kelp deodorization process and development of compound kelp meal substitute powder[J]. The Food Industry, 2021, 42(7): 23−28.]
[9] 顾赛麒, 胡彬超, 张月婷, 等. 基于电子鼻、气-质联用技术和感官评价方法优化海带发酵脱腥工艺[J]. 食品与发酵工业, 2020, 46(19): 124−129. [GU S Q, HU B C, CHEN Y Z, et al. Optimization of fermentation deodorization of *Laminaria japonica* based on electronic nose, GC-MS and sensory evaluation[J]. Food and Fermentation Industries, 2020, 46(19): 124−129.]
[10] 岳翠男, 秦丹丹, 李文金, 等. 基于 HS-SPME-GC-MS 和 OAV 鉴定浮梁红茶关键呈香物质[J]. 食品工业科技, 2022, 43(9): 251−258. [YUE C N, QIN D D, LI W J, et al. Identification of key aroma components in fuliang black tea based on HS-SPME-GC-MS and OAV[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(9): 251−258.]
[11] WANG J T, SHI J, ZHU Y, et al. Insights into crucial odourants dominating the characteristic flavour of citrus-white teas prepared from citrus reticulata Blanco 'Chachiensis' and Camellia sinensis 'Fudingdabai'[J]. Food Chemistry, 2022, 377132048.
[12] 张馨月, 郭琳琳, 王苑欣, 等. 三种霉苋菜梗挥发性风味成分分析[J]. 食品工业科技, 2025, 46(16): 301−310. [ZHANG X Y, GUO L L, WANG W X, et al. Analysis of volatile flavor components of three mouldy amaranth atalks[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(16): 301−310.]
[13] 安会敏, 陈圆, 李适, 等. 六大茶类加工关键工序及风味物质研究进展[J]. 中国茶叶加工, 2023(4): 5−14. [AN H M, CHEN Y, LI S, et al. Research progress on key processes and flavor substances of six basic tea types[J]. China Tea Processing, 2023(4): 5−14.]
[14] 祝闻旸. 海带腥味物质分析与生物法脱腥研究[D]. 无锡: 江南大学, 2022. [ZHU W Y. Analysis of kelp fishy-odor compounds andresearch on deodorization by biological method[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2022.]
[15] 张乐, 魏依馨, 史冠莹, 等. 基于 GC-IMS 和 GC-MS 技术结合化学计量法分析干燥方式对香椿挥发性成分的影响[J]. 食品工业科技, 2024, 45(11): 222−234. [ZHANG L, WEI Y X, SHI G Y, et al. Analysis of the effect of drying methods on volatile components of toona sinensis based on GC-IMS and GC-MS combined with chemometrics[J]. Science and Technology of FoodIndustry, 2024, 45(11): 222−234.]
[16] ZHU Y, LÜ H P, SHAO C Y, et al. Identification of key odorants responsible for chestnut-like aroma quality of green teas[J]. Food Research International, 2018, 108: 74−82.
[17] TAKAHASHI H, SUMITANI H, INADA Y, et al. Identification of volatile compounds of kombu (*Laminaria* spp.) and their odor description [Japanese][J]. 日本食品科学工学会誌, 2002, 49(4): 228−237.
[18] PHILIPPE D, MONIQUE P, ROBERT H, et al. Impact odorants contributing to the fungus type aroma from grape berries contaminated by powdery mildew (*Uncinula necator*); incidence of enzymatic activities of the yeast *Saccharomyces cerevisiae*[J]. Journal of agricultural and food chemistry, 2002, 50(11): 3277−3282.
[19] 毛红艳, 祖力皮牙·买买提, 王佳敏, 等. 基于电子感官技术结合 HP-SPME-GC-MS 分析不同馕的关键风味物质[J]. 中国粮油学报, 2025, 40(4): 176−185. [MAO H Y, ZULIPIYA M, WANG J M, et al. Analysis of key aroma components of different naan by HS-SPME-GC-MS coupled with electric-sense technology [J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2025, 40(4): 176−185.]
[20] FORSS D A. Odor and flavor compounds from lipids[J], Progress in the Chemistry of Fats and other Lipids. 1973, 13: 177−258.
[21] 赵赵, 刘薇, 王卅, 等. 基于 GC-MS 比较不同炸制时间猪肉丸挥发性风味成分的变化[J]. 现代食品科技, 2025, 41(1): 273−283. [ZHAO Z, LIU W, WANG S, et al. Comparison of the changes in volatile flavor components of porkmeatballs prepared over different frying time periods based on GC-MS[J]. Modern Food Science and Technology, 2025, 41(1): 273−283.]
[22] ZHANG Y G, HO C T. Volatile compounds formed from thermal interaction of 2, 4-decadienal with cysteine and glutathione [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 1989, 37: 1016−1020.
[23] MARINA R, LIU Z B, MIRIAM H, et al. Aroma and catechin profile and *in vitro* antioxidant activity of green tea infusion as affected by submerged fermentation with Wolfiporia cocos (Fu Ling)[J]. Food Chemistry, 2021, 361130065.
[24] 刘兴平, 唐密, 余永, 等. 水煮鱼风味组成与主体风味物质挖掘[J]. 食品与发酵工业, 2024, 50(19): 331−340. [LIU X P, TANG M, YU Y, et al. Mining of flavor composition and main flavor substances in boiled fish[J]. Food and Fermentation Industries, 2024, 50(19): 331−340.]
[25] 王鑫, 任巧, 龚燕燕. 海带风味复合调味料的研制[J]. 中国调味品, 2019, 44(10): 112−115,125. [WANG X, REN Q, GONG Y Y. Devilopment of kelp flavor compound seasoning[J]. China Condiment, 2019, 44(10): 112−115,125.]
[26] ZHU W Y, JIANG B, ZHONG F, et al. Effect of microbial fermentation on the fishy-odor compounds in kelp (*Laminaria japonica*)[J]. Foods, 2021, 10(11): 2532.
[27] FERRACES C P, LAGE-Y A M, QUIRÓS D R A, et al. Rapid identification of volatile compounds in fresh seaweed[J]. Talanta, 2013, 115798-115800.
[28] 麦雅彦, 杨锡洪, 连鑫, 等. SDE/GC-MS 测定南美白对虾的挥发性香气成分[J]. 现代食品科技, 2014, 30(1): 206−210. [MAI Y Y, YANG X H, LIAN X, et al. Determination of volatile aroma compounds of *P. vannamei* by SDE/GC-MS[J]. Modern Food Science and Technology, 2014, 30(1): 206−210.]
[29] MALDONADO R G, RODRIGUEZ B E, SANCHEZ C A, et al. Production of tobacco aroma from lutein. Specific role of the microorganisms involved in the process[J]. Appl. Microbiol. Biot., 2003, 62(5): 484−488.
[30] 王丽, 蒋美娟, 任丹丹, 等. 海带类胡萝卜素微胶囊的制备工艺研究[J]. 食品工业科技, 2015, 36(7): 219−223. [WABG L, JIANG M J, REN D D, et al. Study on preparation of carotenoids microcapsules from kelp[J]. Science and Technology of Food Industry, 2015, 36(7): 219−223.]
[31] 米鑫鑫, 郑茜, 唐密, 等. 过热蒸汽技术对烤鱼"外酥里嫩"品质特性和风味的影响[J]. 食品与发酵工业, 2025, 51(16): 61−71. [MI X X, ZHEN X, TANG M, et al. Impact of superheated steam technology on 'crispy outside and tender inside'quality characteristics and flavor of roasted fish[J]. Food and Fermentation Industries, 2025, 51(16): 61−71.]
[32] OLIVARES A, NAVARRO L J, FLORES M. Effect of fat content on aroma generation during processing of dry fermented sausages[J]. Meat Science, 2010, 87(3): 264−273.
[33] 郭娅慧, 刘云娜, 吴海玥, 等. 基于 GC-IMS 分析不同区域牦牛肉特征风味化合物[J]. 食品工业科技, 2025, 46(14): 332−340. [GUO Y H, LIU Y N, WU H Y, et al. Analysis of characteristic

flavor compounds of yak meatin different regions based on GC-IMS[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(14): 332−340.]

[34] 阳景阳, 陈远权, 梁贤智, 等. HS-SPME-GC-MS 结合 OAV 对乌龙茶树品种制花香型红茶的香气评价[J]. 食品工业科技, 2025, 46(6): 315−324. [YANG J Y, CHEN Y Q, LIANG X Z, et al. HS-SPME-GC-MS coupled with OAV to evaluate the aroma of flowery black tea made from oolong tea varieties[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(6): 315−324.]

[35] 阳景阳, 梁光志, 李子平, 等. 基于气味活度值法的凌云白毫发酵茶香气特征分析[J]. 食品科学, 2023, 44(14): 336−343. [YANG J Y, LIANG G Z, LI Z P, et al. Analysis of aroma characteristics of fermented lingyun baihao tea based on odor activity value[J]. Food Science, 2023, 44(14): 336−343.]

[36] ZHENG X S, JI H W, ZHANG D, et al. The identification of three phospholipid species role-s on the aroma formation of hot-air-dried shrimp (*Litopenaeus vannamei*) by gas chromatography–ion mobility spectrometry and gas chromatography- mass spectrometry [J]. Food Research International, 2022, 162(PB): 112191.

[37] ZHANG J H, CAO J, PEI Z S, et al. Volatile flavour components and the mechanisms underlying their production in golden pompano (*Trachinotus blochii*) fillets subjected to different drying methods: A comparative study using an electronic nose, an electronic tongue and SDE-GC-MS[J]. Food Research International, 2019, 123217−123225.