

四种微藻的风味成分及其特征分析

郭桂筱, 苏伟明, 岳 瑶, 李雁群, 胡雪琼

Volatile Flavor Compositions and the Odorant Feature Analysis of Four Microalgae

GUO Guixiao, SU Weiming, YUE Yao, LI Yanqun, and HU Xueqiong

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2022030151>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

微藻类胡萝卜素生物合成代谢途径的研究进展

Research Progress of Biosynthetic Metabolic Pathway of Carotene in Microalgae

食品工业科技. 2020, 41(9): 348-356

椴木木耳和袋栽木耳挥发性成分及特征风味物质比较分析

Comparative Analysis of Volatile Components and Key Flavor Compounds of Basswood and Bagging *Auricularia auricula*

食品工业科技. 2019, 40(5): 249-252,269

三种马尾藻不同部位挥发性成分的比较分析

Comparative Analysis of Volatile Components in Different Parts of Three Species of *Sargassum*

食品工业科技. 2018, 39(24): 281-288,293

基于GC-MS与GC-IMS技术对四种柚皮精油挥发性风味物质的检测

Analysis of Volatile Flavour Components in Four Pomelo Peel Essential Oils Based on GC-MS and GC-IMS

食品工业科技. 2021, 42(15): 256-268

冷藏小黄鱼优势腐败菌致腐能力评价及其对挥发性成分的影响

Evaluation of Spoilage Potential of Specific Spoilage Organisms of Refrigerated Little Yellow Croaker and Its Influence on the Volatile Compound

食品工业科技. 2018, 39(16): 230-235,242

母乳挥发性成分固相微萃取-气质联用检测条件的优化及测定

Optimization of analysis conditions of volatile compounds in human breast milk by SPME-GC-MS

食品工业科技. 2018, 39(6): 199-203



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

郭桂筱, 苏伟明, 岳瑶, 等. 四种微藻的风味成分及其特征分析 [J]. 食品工业科技, 2022, 43(23): 291–300. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2022030151

GUO Guixiao, SU Weiming, YUE Yao, et al. Volatile Flavor Compositions and the Odorant Feature Analysis of Four Microalgae[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(23): 291–300. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2022030151

· 分析检测 ·

四种微藻的风味成分及其特征分析

郭桂筱^{1,2}, 苏伟明^{1,3}, 岳瑶^{1,2}, 李雁群^{1,2,3,*}, 胡雪琼^{1,2}

(1. 广东海洋大学食品科技学院, 广东湛江 524088;

2. 广东海洋大学海洋药物研究所, 广东湛江 524088;

3. 广东省水产品加工与安全重点实验室, 广东湛江 524088)

摘要:目的: 钝顶螺旋藻、富油新绿藻、三角褐指藻和湛江等鞭金藻是常见的食(饲)用微藻, 它们可能通过食物链传递作用影响食品或水产及畜禽肉类食品的风味。本研究通过分析这四种微藻的风味特性, 为其相关食品风味研究提供基础数据。方法: 应用固相微萃取-气相色谱-质谱联用技术结合电子鼻技术, 检测微藻的挥发性化合物, 进而分析微藻的风味特征。结果: 上述四种微藻分别检出挥发性成分 33 种、35 种、23 种和 29 种。钝顶螺旋藻的主要呈味成分为己醇、1-辛烯-3-醇、(E,Z)-2,4-癸二烯醛, (E)-2-壬烯醛、己醛, 赋予其青草、泥土和脂肪味; 富油新绿藻的主要呈味成分为 (E,Z)-2,4-癸二烯醛、(E,E)-2,4-癸二烯醛、辛醛、1-辛烯-3-醇、己醛和己醇, 赋予其脂肪、泥土、鱼腥和青草味; 三角褐指藻的主要呈味成分为庚醛、茶、辛醛、己醛和 1-辛烯-3-醇, 赋予其脂肪味; 湛江等鞭金藻的主要呈味成分为 (E,Z)-2,4-癸二烯醛、(E,E)-2,4-癸二烯醛、1-辛烯-3-醇、己醇、己醛和 (E,E)-2,4-庚二烯醛, 赋予其脂肪、青草和鱼腥味。结论: 四种微藻的主要呈味成分为己醛、己醇、1-辛烯-3-醇和 7~10 个碳原子的烯醛和二烯醛类, 使这几种微藻主要呈现青草、泥土、鱼腥和脂肪等风味特征。

关键词: 微藻, 挥发性成分, 特征不良风味

中图分类号: TS207.3

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2022)23-0291-10

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2022030151



本文网刊:

Volatile Flavor Compositions and the Odorant Feature Analysis of Four Microalgae

GUO Guixiao^{1,2}, SU Weiming^{1,3}, YUE Yao^{1,2}, LI Yanqun^{1,2,3,*}, HU Xueqiong^{1,2}

(1. College of Food Science and Technology, Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524088, China;

2. Research Institute for Marine Drugs and Nutrition, Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524088, China;

3. Guangdong Provincial Key Laboratory of Aquatic Product Processing and Safety, Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524088, China)

Abstract: Objective: *Spirulina platensis*, *Neochloris oleoabundans*, *Phaeodactylum tricornutum* and *Isochrysis zhanjiangensis* are common microalgae for food and feed. Their odors can affect the flavor of foods made from the aquaculture and farm animals through the food-chain transfer. This study aimed at analyzing the flavor characteristics of these four microalgae to provide fundamental data for the further researches of the relative foods. Methods: HS-SPME-GC-MS and electronic nose techniques were applied to identify the volatile compounds and the flavor profiles of the microalgae were analyzed thereafter. Results: In the four microalgae mentioned above, 33, 35, 23 and 29 volatile compounds were identified respectively. The results showed that hexanol, 1-octen-3-ol, (E,Z)-2,4-decadienal, (E)-2-nonenal and hexanal were the main compounds in *S. platensis* contributing to its grassy, earthy and fatty odor; (E,Z)-2,4-decadienal, (E,E)-2,4-decadienal, octanal, 1-octen-3-ol, hexanal and hexanol were the key volatile compounds in *N. oleoabundans* and gave it a

收稿日期: 2022-03-14

基金项目: 广东省国际合作项目 (2017A050501038)。

作者简介: 郭桂筱 (1997-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 微藻生物活性物质研究与开发, E-mail: 951489414@qq.com。

* 通信作者: 李雁群 (1963-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 微藻与微生物工程, E-mail: yqli@gdou.edu.cn。

flavor feature of fatty, earthy, fishy and grassy note; heptanal, naphthalene, octanal, hexanal and 1-octen-3-ol were the main volatile compounds in *P. tricornutum* contributing to its fatty odor; (E,Z)-2,4-decadienal, (E,E)-2,4-decadienal, 1-octen-3-ol, hexanol, hexanal and (E,E)-2,4-heptadienal were the primary volatile substances in *I. zhanjiangensis* giving it fatty, grassy and fishy odor. Conclusion: Hexanal, hexanol, 1-octen-3-ol and olefin/diolefin aldehyde with 7~10 carbon atoms are the main odorous compounds in the four microalgae, contributing to their grassy, earthy, fishy and fatty odorous feature.

Key words: microalgae; volatile compound; specific undesirable odor

微藻是具有光合作用能力的水生微生物,光合色素主要为叶绿素、叶黄素、类胡萝卜素、藻胆蛋白等,与大型水生植物——大藻不同,微藻不仅个体微小大多需要在显微镜下才能观察,而且没有根、茎、叶等植物分化^[1]。微藻形态多样、适应性强、分布广泛。许多微藻富含蛋白质、脂质、多糖、维生素、矿物质等营养物质,具有很好的营养价值。微藻是鱼、虾、贝等水生动物的天然饵料。现代水产品养殖业,人们主动利用养殖微藻给水产品作饵料甚至添加到加工饲料中,利用微藻调节水产养殖池塘水质也有广泛应用。微藻的食用历史有数千年,近数十年来人们认识到微藻营养和保健作用,微藻作为食品或食品配料的应用得到了大力发展。但是,由于微藻常常含有一些不良风味,对微藻在食品领域的应用产生了很大的影响。不仅在食品中,由于食物链传递作用,即使微藻不是直接用作食品配料,在微藻用作饲料和饵料的时候,其不良风味也可能最终带到食品中。

钝顶螺旋藻(*Spirulina platensis*)是蓝藻的一种,蛋白质含量可高达 60%(对干重),具有很高的营养价值。螺旋藻大规模人工养殖和加工始于 20 世纪 60 年代,经过几十年的发展,目前已经是世界范围内产量最高的人工养殖微藻,其中我国产量占世界第一位。螺旋藻最初主要作为保健食品原料和藻蓝蛋白提取原料,随着藻产量的增加,现在也开发多种用途,包括用作为一般食品的配料,一些提取藻蓝蛋白的藻渣也用作饲料原料,甚至在鱼粉等饲料原料价格昂贵的时候有用螺旋藻做饲料蛋白补充料的尝试。可以说,螺旋藻是与食品紧密相关的微藻。富油新绿藻(*Neochloris oleoabundans*)是一种淡水真核绿藻,脂质含量为干重的 20%~54%,其中的三脂肪酰甘油酯占总脂质含量的 80%,其中油酸和亚麻酸的含量达到总脂肪酸的 48.98%^[2-3]。富油新绿藻在油脂生产和饲料应用方面具有很大潜力。富油新绿藻用作为贝类养殖饵料已有报道^[4]。三角褐指藻(*Phaeodactylum tricornutum*)是一种海洋硅藻,可高产二十碳五烯酸(EPA)和其他不饱和脂肪酸^[5]以及岩藻黄素^[6]。三角褐指藻是常见的水产饵料藻之一,也有培养其用于生产岩藻黄素等的应用。湛江等鞭金藻(*Isochrysis zhanjiangensis*)是一种海洋微藻,为等鞭金藻属金藻,20 世纪 70 年代在湛江海域发现,作为鱼虾养殖的饵料已经有几十年的历史,现已大量用于滤食性水产动物^[7]和各种水产养殖动物幼苗的饵料。湛江等鞭金藻含有大量高营养价值的多不饱和脂肪酸,包

括 EPA 和 DHA(二十二碳六烯酸),在食品和医药方面也有很好的开发应用前景。这四种微藻都具有良好的营养特性,它们在食品和饲料中具有很高的应用价值,但是它们都存在某些不良风味,影响了它们的应用。因此,研究这些微藻的风味特征及不良风味成分具有重要意义。

目前,有关藻类的风味研究报告还比较少,少量的报道主要是针对大型藻类的研究,如坛紫菜(*Pyropia haitanensis*)^[8]、红毛藻(*Bangia fusco-purpurea*)^[9]、马尾藻(*Sargassum*)^[10]等,还有一部分研究是针对微藻对环境和饮用水源气味的影响^[11-12]。有关微藻对食品风味的影响的研究报道有限,但是现有的研究依然能够看到微藻风味对食品确实有不可小觑的影响^[13-15]。研究表明,用微藻补充饲料喂养的牡蛎具有强烈的青草味^[16],奶酪中添加 1.5% 钝顶螺旋藻其风味就难以被消费者接受^[17]。对于已经是食品材料的钝顶螺旋藻对食品风味的影响有少量的报道,但是对其风味的化学成分阐明尚缺乏,而富油新绿藻、三角褐指藻和湛江等鞭金藻三种已经作为饲料和饵料,又具有作为食品原料前景的微藻,有关风味研究尚未见报道。因此,本文拟研究上述四种微藻挥发性成分,在此基础上分析这些微藻风味的特征,找出产生不良风味的主要挥发性物质,为进一步深入开展微藻风味研究提供数据支撑和研究基础。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

富油新绿藻 UTEX#1185 购自德克萨斯大学奥斯汀分校藻种保藏中心;三角褐指藻 CCMP2561 藻种 暨南大学李宏业教授馈赠;湛江等鞭金藻藻种 广东海洋大学黄翔鹄教授馈赠;钝顶螺旋藻藻泥(藻细胞物质) 广西北海生巴达生物科技有限公司馈赠;2-甲基-3-庚酮 色谱纯,上海 Macklin 生物技术有限公司;正构烷烃混合物(C₁₀~C₂₅) 色谱纯,上海安谱实验科技股份有限公司;其余试剂 均为国产分析纯,广州化学试剂厂。

SCIENTZ-IIID 超声细胞粉碎仪 宁波新芝生物科技股份有限公司;TU-20H 恒温水浴锅 英国 Bibby Scientific 公司;PEN3 电子鼻 德国 AirSense 公司;65 μ m PDMS/DVB 固相微萃取头、固相微萃取手柄 美国 Supelco 公司;GCMS-TQ8050NX 三重四级杆气相色谱质谱联用仪 日本岛津仪器有限公司;X-30R 高速冷冻离心机 贝克曼库尔特商贸(中国)有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 培养基配制 BG11 淡水培养基组成: NaNO_3 1.5 g/L, K_2HPO_4 0.04 g/L, $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 0.075 g/L, $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 0.036 g/L, Na_2CO_3 0.02 g/L, A_4 溶液 1 mL/L 和 A_5 溶液 1 mL/L。 A_4 溶液: $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7$ 0.60 mg/L, $(\text{NH}_4)_3\text{Fe}(\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7)_2$ 0.60 mg/L, Na_2EDTA 0.10 mg/L; A_5 溶液: H_3BO_3 2.86×10^{-3} g/L, $\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 1.81×10^{-3} g/L, $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 0.22×10^{-3} g/L, $\text{Na}_2\text{MoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 0.39×10^{-3} g/L, $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 0.80×10^{-4} g/L, $\text{Co}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 0.49×10^{-4} g/L。BG11 培养基用于富油新绿藻培养。

f/2 海水培养基组成: NaNO_3 75 mg/L, $\text{NaH}_2\text{PO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 5 mg/L, $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ 30 mg/L, 微量金属溶液 1 mL/L, 维生素 B_{12} 溶液 1 mL/L, 维生素 H 溶液 1 mL/L, 维生素 B_1 溶液 1 mL/L。微量金属溶液: $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 23 mg/L, $\text{MnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 152 mg/L, $\text{Na}_2\text{MoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 7.3 mg/L, $\text{CoSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 14 mg/L, $\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 6.8 mg/L, $\text{Fe}(\text{NH}_4)_2(\text{SO}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 4.6 g/L, $\text{Na}_2\text{EDTA} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 4.4 g/L; 维生素 B_{12} 溶液: HEPES 缓冲液 2.4 g/200 mL dH_2O , 维生素 B_{12} 0.027 g/200 mL dH_2O ; 维生素 H 溶液: HEPES 缓冲液 2.4 g/200 mL dH_2O , 维生素 H 0.005 g/200 mL dH_2O ; 维生素 B_1 溶液: HEPES 缓冲液 2.4 g/200 mL dH_2O , 维生素 B_1 0.067 g/200 mL dH_2O 。f/2 培养基用于三角褐指藻培养。

湛江等鞭金藻海水培养基: NaNO_3 0.3 g/L, KH_2PO_4 2×10^{-2} g/L, NaHCO_3 0.5 g/L, FeCl_3 1.25×10^{-3} g/L, VB_1 0.2 mg/L, VB_{12} 5×10^{-7} g/L。

1.2.2 前处理 微藻培养方法: 在 500 mL 玻璃瓶中加入 400 mL 相应培养基, 加入 10%(v/v) 对数生长期藻种, 磁力搅拌器 300~500 r/min 连续搅拌, 同时通入 400~500 mL/min 含有 5% CO_2 的空气。培养温度为 $(28 \pm 2)^\circ\text{C}$, 连续光照强度为 2000 lux。培养 5~8 d 处于对数生长期(根据藻种不同确定培养时间), 离心收集新鲜藻细胞并立即储存在 -80°C 待分析使用。

风味分析样品准备参考岳敏等^[18]的方法做修改: 取约 2 g 在 -80°C 冻存的藻细胞样品加入 30 mL 4°C 预冷纯水, 于冰浴中超声破碎藻细胞(超声 1 s, 间隔 1 s, 550 W, 总时间 20 min), 待破碎完后, 立即用于上机分析。

1.2.3 微藻气味电子鼻分析 参考卢佳芳等^[19]方法做修改: 取 10 mL 破碎后的藻悬液于 50 mL 离心管中并加盖密封, 置于 4°C 过夜 24 h, 从冰箱取出后在室温(25°C)静置 30 min 后, 插入电子鼻探头于试管顶部空间进行取样检测。检测程序设置为样品制备时间 5 s, 测试时间 120 s, 传感器清洁时间 180 s, 进样流量 300 mL/min。采用 Win Muster 软件对样品的气味进行分析, 见表 1。

1.2.4 微藻挥发性化合物测定 取 7.5 mL 破碎后的

表 1 电子鼻的传感器阵列及其主要特性

Table 1 Sensor array of electronic nose and its main characteristics

序号	传感器名称	主要性能描述
1	W1C	对芳香型化合物敏感
2	W5S	对氮氧化合物敏感
3	W3C	对氨类和芳香型化合物敏感
4	W6S	对氢类敏感
5	W5C	对烷烃、芳香族化合物敏感
6	W1S	对甲基类敏感
7	W1W	对无机硫化物和萜烯类敏感
8	W2S	对醇类和部分芳香族化合物敏感
9	W2W	对芳香族化合物和有机硫化物敏感
10	W3S	对烷烃敏感

藻悬液于 20 mL 带 PTFE/Si 隔垫孔盖的顶空瓶中, 加入 5 μL 0.8160 mg/mL 2-甲基-3-庚酮内标溶液和 2.5 g NaCl, 混合均匀, 密封, 在恒温水浴中 40°C 预热平衡 10 min。然后, 将固相微萃取针插入瓶中暴露于顶部空间吸附 25 min。然后将样品立即注入 GC-MS, 250°C 解吸 3 min, 进行检测分析, 平行重复 3 次检测。

气相色谱条件: Rtx-5MS 色谱柱, 30 m $\times$ 0.32 mm i.d. $\times$ 0.25 μm 毛细管柱。程序升温参考闫爽等^[20]: 柱初温 40°C , 保持 3 min; 以 $4^\circ\text{C}/\text{min}$ 升至 150°C , 保持 2 min; 以 $8^\circ\text{C}/\text{min}$ 升至 250°C , 保持 6 min。载气: He, 流速: 1 mL/min, 进样口温度 250°C , 不分流进样。

质谱条件: 电子轰击离子源(EI), 电子能量 70 eV; 离子源温度: 230°C , 接口温度: 250°C ; 质量扫描范围: 40~450 amu。

定性、定量分析参考潘晓倩等^[21]的方法做修改: 挥发性化合物通过与 NIST 和 FFNSC 3 标准谱库匹配并结合正构烷烃混合物计算保留指数进行定性, 计算公式参考式(1), 仅报告匹配度大于 80% 的鉴定结果。

$$\text{RI} = 100 \times \frac{t_x + t_n}{(t_{n+1} + t_n) + n} \quad \text{式 (1)}$$

式中, t_x 、 t_n 、 t_{n+1} 分别为化合物、含 n、n+1 个碳原子的正构烷烃的保留时间, min。

以内标物(IS)2-甲基-3-庚酮的含量进行定量分析, 计算公式参考式(2)。

$$C_i(\mu\text{g}/\text{kg}) = \frac{1}{f} \times \frac{C_{\text{IS}} \times 5 \times A_i}{A_{\text{IS}}} \quad \text{式 (2)}$$

式中, C_i 为化合物 i 的含量, $\mu\text{g}/\text{kg}$; f 为藻悬液中所含新鲜藻生物量质量, kg; C_{IS} 为内标物 IS 浓度, $\mu\text{g}/\mu\text{L}$; A_i 为化合物 i 的峰面积; A_{IS} 为内标物 IS 峰面积。

气味活度值(Odor activity value, OAV)分析: 根据计算公式(3)计算 OAV, 并定义 $\text{OAV} \geq 1$ 的挥发性化合物是关键的风味化合物, 对微藻风味起重要贡

献作用; $0.1 \leq OAV < 1$ 的挥发性化合物为重要风味成分, 对微藻风味起修饰作用。

$$OAV = \frac{C_i}{T_i} \quad \text{式 (3)}$$

式中, C_i 为挥发性化合物浓度, $\mu\text{g/kg}$; T_i 为挥发性化合物在水中的嗅觉阈值, $\mu\text{g/kg}$ 。

1.3 数据处理

所有样品检测平行重复 3 次, 用 SPSS25.0 软件对数据进行计算分析, 图形采用 GraphPad Prism 8.0.2 软件及 genescloud 平台(<https://www.genescloud.cn>)进行图形绘制, 数据结果以平均值 $\pm$ 标准差($\bar{x} \pm s$)的形式表示。

2 结果与分析

2.1 电子鼻结果分析

根据电子鼻传感器对不同微藻气味响应值, 利用电子鼻自带软件 Win Muster 对检测数据进行 Loadings(负荷加载分析)和 LDA(线性判别分析)分析, 结果分别如图 1(a)、(b)所示。Loadings 分析判别传感器对样品中挥发性成分的敏感程度, 反映样品中挥发性化合物的类别。LDA 分析能评估样品间所收集挥发性化合物数据的分布及其之间的距离^[19]。由图 1(a)可知, 主成分 1(Loadings 1)的贡献率为 98.32%, 主成分 2(Loadings 2)的贡献率为 1.65%, 累计贡献率达 99.97%, 足以反映样品实际情况, 且主成分 Loadings 1 贡献率起决定性作用, 表明 W1S 传感器对微藻样品挥发性化合物最为敏感。根据表 1, 结

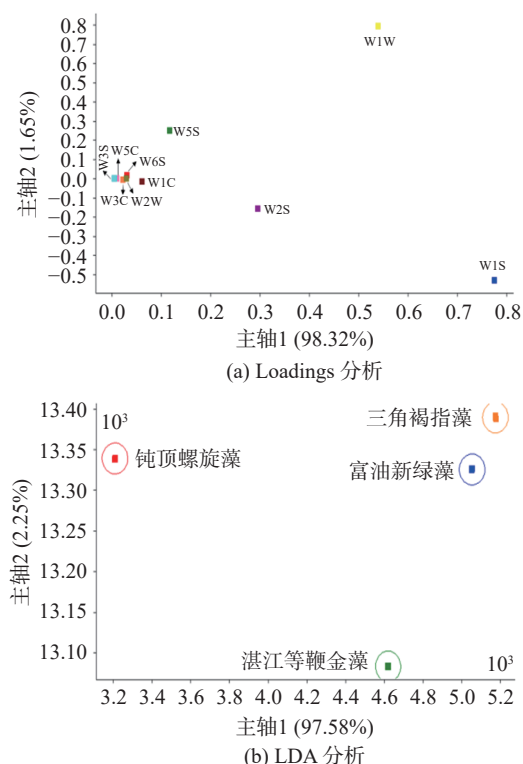


图 1 四种微藻电子鼻检测 Loadings 分析(a)和 LDA 分析(b)

Fig.1 Loadings analysis (a) and LDA analysis (b) of electronic nose detection of four microalgae

合 PEN3 电子鼻传感器类型, 微藻中挥发性化合物主要是含甲基类化合物。LDA 分析如图 1(b)所示, 判别式 1(LDA1)的贡献率为 97.58%, 判别式 2(LDA2)的贡献率为 2.25%, 累计贡献率达 99.83%。微藻样品的组分信号在图中均无重叠, 能够较好地反映样品间的差距, 表明这四种微藻有各自特有的风味特征。其中, 钝顶螺旋藻和湛江等鞭金藻均与其他微藻的距离相隔较远, 表明这两种微藻与其他微藻间的挥发性气味成分较为不同。富油新绿藻和三角褐指藻的距离较相近, 表明这两种微藻间可能具有较为相似的挥发性气味成分。

2.2 四种微藻挥发性成分分析

采用 HS-SPME-GC-MS 技术对四种微藻挥发性化合物进行分析。分析结果由表 2 和图 2(a)所示, 钝顶螺旋藻、富油新绿藻、三角褐指藻和湛江等鞭金藻中分别检测出的挥发性化合物有 33、35、23、29 种, 它们各自特有的挥发性化合物分别有 10、9、12、8 种, 共性的挥发性化合物仅有 3 种, 表明这四

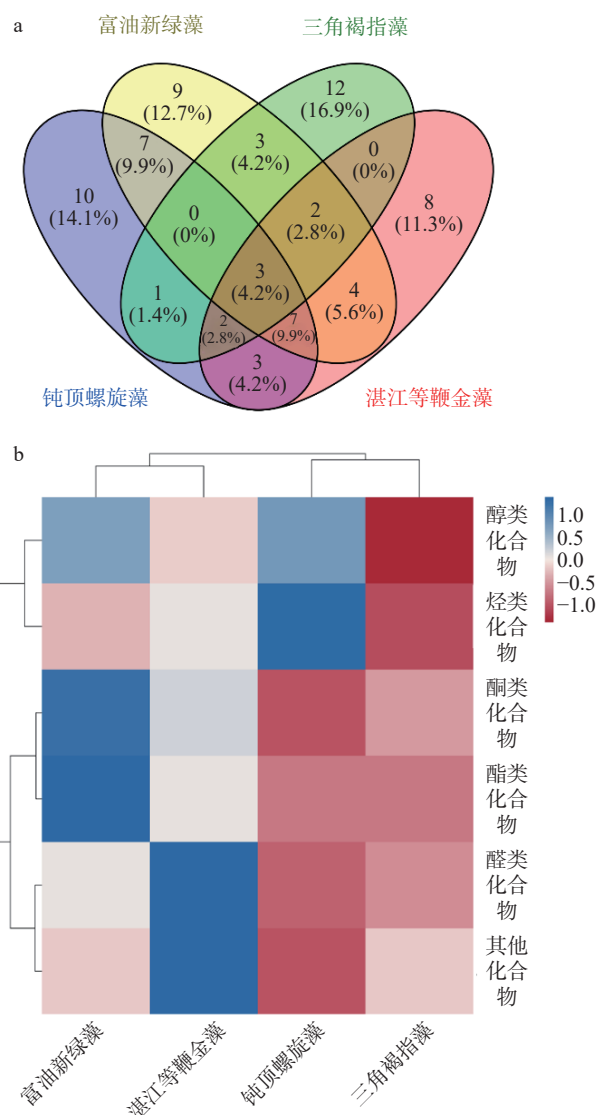


图 2 四种微藻中挥发性化合物韦恩图(a)和动态热图(b)

Fig.2 Venn diagram (a) and dynamic heat map (b) of volatile compounds in four microalgae

表 2 四种微藻挥发性成分
Table 2 Volatile compounds identified in four microalgae

挥发性成分	阈值 (μg/kg)	保留指数 (RI)	气味 描述 ^[22-29]	挥发性成分浓度(μg/kg)				OAV			
				钝顶 螺旋藻	富油 新绿藻	三角 褐指藻	湛江等 鞭金藻	钝顶 螺旋藻	富油 新绿藻	三角 褐指藻	湛江等 鞭金藻
醛类化合物											
己醛	5	698	鱼腥味、青草味	24.29±3.61	220.24±82.62	15.63±3.79	72.35±26.04	5	44	3	14
(E)-2-庚烯醛	13	954	氧化油脂味、刺鼻味	2.75±2.56	163.53±69.63	—	—	<1	13	—	—
(E,E)-2,4-庚二烯醛	15.4	1009	脂肪味	—	150.72±70.20	—	108.82±37.27	—	10	—	7
(E)-2-辛烯醛	3	1056	脂肪味	4.12±0.93	39.97±22.57	—	16.16±4.03	1.37	13	—	5
β-环柠檬醛	5	1215	发霉味	4.51±2.78	52.61±15.62	—	—	<1	11	—	—
(E,Z)-2,4-癸二烯醛	0.04	1312	鱼腥味	1.15±0.68	6.36±1.31	—	9.14±1.26	15	159	—	229
(E,E)-2,4-癸二烯醛	0.077	1373	脂肪味、煎炸味	—	8.21±3.75	—	12.75±1.22	—	107	—	166
苯甲醛	350	957	苦杏仁味	20.12±7.83	—	14.28±10.92	1335.64±308.06	<1	—	<1	4
苯乙醛	6.3	1040	—	2.12±1.24	—	—	12.47±0.73	<1	—	—	2
(E)-2-壬烯醛	0.19	1157	脂肪味、青草味	1.09±0.35	—	—	—	6	—	—	—
辛醛	0.587	1002	脂肪味	—	58.44±44.41	6.28±2.07	—	—	100	11	—
癸醛	0.1	1202	蜡质味	—	4.52±3.95	4.69±0.60	—	—	2	2	—
月桂醛	10	1404	—	—	7.11±3.85	1.42±0.27	—	—	<1	<1	—
庚醛	2.8	899	脂肪味、木头味	—	—	83.48±6.10	—	—	—	30	—
2,4-二甲基苯甲醛	—	1208	—	—	—	155.40±92.83	—	—	—	—	—
2-丙基-2-庚醛	—	1179	—	—	—	—	10.16±0.86	—	—	—	—
酮类化合物											
3-辛酮	21.4	984	蘑菇味	29.20±3.32	85.99±19.90	—	54.31±10.53	1	4	—	3
α-紫罗兰酮	10.6	1416	甜紫罗兰味	—	12.02±2.44	—	—	—	1	—	—
β-紫罗兰酮	8.4	1473	紫罗兰花香味	3.43±0.83	22.58±5.19	—	25.62±8.42	<1	3	—	3
4-[2,2,6-三甲基-7-氧杂二 环[4.1.0]庚-1-基]-3-丁烯-2-酮	—	1475	—	1.72±0.64	—	—	—	—	—	—	—
6-甲基-5-庚烯-2-酮	—	983	—	—	—	5.23±0.88	—	—	—	<1	—
异氟尔酮	11000	1115	藏红花味	—	—	46.25±16.43	—	—	—	<1	—
香叶基丙酮	—	1440	—	—	—	2.07±1.22	—	—	—	—	—
醇类化合物											
1-戊烯-3-醇	358.1	629	果香味	—	1780.67±1146.86	—	—	—	5	—	—
(Z)-2-戊烯-1-醇	720	676	清新味、鲜草味	—	453.58±102.24	—	—	—	<1	—	—
叶醇	110	851	青草味	—	55.54±5.50	—	32.05±3.01	—	<1	—	<1
己醇	5.6	871	青草味	627.92±105.54	120.81±81.98	—	128.25±8.68	112	22	—	23
(E)-2-庚烯-1-醇	4172	967	—	10.11±2.83	—	—	—	<1	—	—	—
1-辛烯-3-醇	1	979	脂肪味、泥土味	77.11±6.40	79.10±29.90	2.79±0.91	64.45±5.64	77	79	3	64
(E)-2-辛烯-1-醇	20	1066	青草味	15.75±2.50	—	—	—	<1	—	—	—
辛醇	125.8	1070	脂肪味	12.15±7.30	—	14.00±3.25	18.15±11.48	<1	—	<1	<1
3-辛烯-2-醇	—	1106	—	3.63±1.95	18.39±6.07	—	—	—	—	—	—
十六烷醇	—	1679	—	12.15±3.76	—	—	—	—	—	—	—
戊醇	150.2	674	果香味	78.86±28.80	—	—	136.13±17.22	<1	—	—	<1
正庚醇	5.4	969	坚果味	18.42±3.82	—	20.62±11.88	—	3	—	4	—
2-乙基己醇	300	1028	泥土味	2.33±0.77	36.82±8.96	8.46±1.76	44.25±5.82	<1	<1	<1	<1
(Z)-3-壬烯-1-醇	—	1151	—	3.20±0.62	—	—	—	—	—	—	—
(E)-2-壬烯-1-醇	—	1165	—	1.31±0.38	—	—	—	<1	—	—	—
壬醇	280	1169	蜡质味	3.03±1.70	—	—	12.91±2.28	<1	—	—	<1
月桂醇	16	1479	脂肪味	0.71±0.09	—	—	—	<1	—	—	—
2-甲基-3-庚醇	—	964	—	—	43.54±5.66	12.25±2.81	18.69±4.18	—	<1	<1	<1
苯乙醇	—	1108	—	—	20.66±1.42	—	—	—	<1	—	—
1-壬烯-3-醇	—	1079	泥土味	—	—	9.31±2.51	—	—	—	—	—
3,5-二甲基苯甲醇	—	1251	—	—	—	5.17±1.67	—	—	—	—	—
2,5-二甲基-3-己醇	—	1032	—	—	—	—	31.51±4.84	—	—	—	<1
2,6-二甲基环己醇	—	1106	—	—	—	—	33.27±8.39	—	—	—	—

续表 2

挥发性成分	阈值 (μg/kg)	保留指数 (RI)	气味 描述 ^[22-29]	挥发性成分浓度(μg/kg)				OAV			
				钝顶 螺旋藻	富油 新绿藻	三角 褐指藻	湛江等 鞭金藻	钝顶 螺旋藻	富油 新绿藻	三角 褐指藻	湛江等 鞭金藻
烃类化合物				—	—	—	—	—	—	—	—
十四烷		1396		1.53±0.57	—	—	—	—	—	—	—
十七烷		1700		814.27±448.20	32.35±8.74	—	—	—	—	—	—
十六烷		1597	鱼腥味	59.78±34.75	38.14±14.34	—	—	—	—	—	—
十五烷		1496		126.19±54.78	102.43±28.15	—	—	—	—	—	—
十二烷	10000	1197		—	—	2.33±1.21	—	—	—	<1	—
(Z,Z)-8,11-庚烷		1264		—	—	—	27.43±6.07	—	—	—	—
3-乙基-1,5-辛二烯		942		—	120.16±9.06	—	—	—	—	—	—
2-甲基-2-壬烯		1032		3.84±1.56	52.24±7.72	—	—	—	—	—	—
1-溴-5-十七碳烯		1669		5.83±1.80	—	—	—	—	—	—	—
3,5,5-三甲基-1-己烯		972		—	—	—	132.82±13.87	—	—	—	—
3-乙烯基-环己烯		1069		—	—	—	27.12±8.95	—	—	—	—
酯类化合物				—	—	—	—	—	—	—	—
邻苯二甲酸二乙酯		1580		2.72±1.40	29.31±27.85	—	28.34±26.82	—	—	—	—
2-甲基丁基乙酸酯		875		—	103.40±22.40	—	—	—	—	—	—
茉莉酯		1065		—	15.79±14.73	—	—	—	—	—	—
苯甲酸丙酯		1265		—	13.37±8.37	—	—	—	—	—	—
2,2,4-三甲基-1,3-戊 二醇二异丁酸酯		1583		—	19.76±7.24	—	—	—	—	—	—
2-苯基-癸-2-丁酸酯		1168		—	—	1.46±0.26	—	—	—	—	—
4-辛基戊酸酯		1338		—	—	—	26.36±1.62	—	—	—	—
肉豆蔻酸乙酯		1794		—	—	—	15.61±14.66	—	—	—	—
其他化合物				—	—	—	—	—	—	—	—
甲氧基苯基胍		901		27.51±8.31	78.87±51.57	—	197.83±44.70	—	—	—	—
2,4-二叔丁基苯酚	500	1500		—	7.45±2.40	6.56±1.48	11.53±3.00	—	<1	<1	<1
1,3-二叔丁基苯		1245		—	21.07±2.08	—	49.43±11.97	—	—	—	—
5-甲基茚满		1134		—	—	6.70±1.36	—	—	—	—	—
1,2,4,5-四甲苯		1111		—	—	4.54±0.61	—	—	—	—	—
萘	6	1178	樟脑味	—	—	89.52±13.54	—	—	—	15	—

注: 阈值: 化合物在水中的嗅觉阈值; 保留指数(RI): 化合物在Rtx-SMS色谱柱上的保留指数; “—”表示该化合物未检出。

种挥发性有各自特有的风味特征,与电子鼻检测结果相符。为进一步分析微藻中各类化合物的特点,将所测得的化合物分为六大类,并对六大类挥发性化合物进行聚类动态热图分析,如图 2(b)所示,图中蓝色越深表示该类化合物的浓度越高,红色越深表示该类化合物的浓度越低。由图 2(b)所示,四种微藻各类化合物含量有明显的区别,钝顶螺旋藻中,其醛类化合物的含量相较其他三种微藻低,但醇类和烃类化合物的含量较高。在富油新绿藻中还含有较高含量的醇类化合物。醛、酮、醇、烃类化合物均属于含甲基类化合物,验证了电子鼻能够较好区分这四种微藻的风味轮廓。醛、酮、醇类化合物的嗅觉阈值通常较低,对风味起较大的贡献作用。初步可以判断微藻的风味特征主要由这几类物质贡献产生。

为进一步探讨这些化合物对风味所起作用,根据所测得的挥发性化合物含量和在水中嗅觉阈值计算 OAV,见表 2。选取微藻中 OAV≥1 的化合物进行聚类动态热图分析,如图 3 所示。图中蓝色越深表示风味成分的浓度越高,红色越深表示风味成分的浓度越低。

2.2.1 钝顶螺旋藻挥发性成分分析 在钝顶螺旋藻中鉴定出 33 种挥发性化合物,其中醛类 8 种,酮类 3 种,醇类 14 种,烷烃类 6 种,酯类 1 种,其他化合物 1 种。在这些挥发性化合物中,含量最高的为十七烷,其次为己醇、十五烷、戊醇、1-辛烯-3-醇、十六烷、3-辛酮、甲氧基苯胍、己醛、苯甲醛、正庚醇等。选取该藻中 OAV≥1 的化合物进行排序,如图 4 所示。结合 OAV 考虑,OAV≥1 的化合物有 8 种。其中,己醇的 OAV>100 且其被认为具有青草味^[22],因此对钝顶螺旋藻整体风味起重要作用。十七烷是该藻中含量最高的化合物,但由于烷烃化合物阈值较高,因此对螺旋藻的整体风味影响不大。另外,在该藻中还测得三种含量较高的醇类物质。其中,1-辛烯-3-醇 OAV 高达 77,对该藻风味的影响仅次于己醇,具有泥土气味^[22],因此它可能是钝顶螺旋藻不良风味的主要来源之一。据报道,1-辛烯-3-醇是水产品中主要挥发性醇类物质(例如草鱼、鲢鱼、鲈鱼和文蛤)^[30]。正庚醇具有坚果的气味^[23],其 OAV 为 3,相比上述两种醇类组分 OAV 较低,对该藻风味有贡献作用但低于上述两种醇类。另外,戊醇含量高达

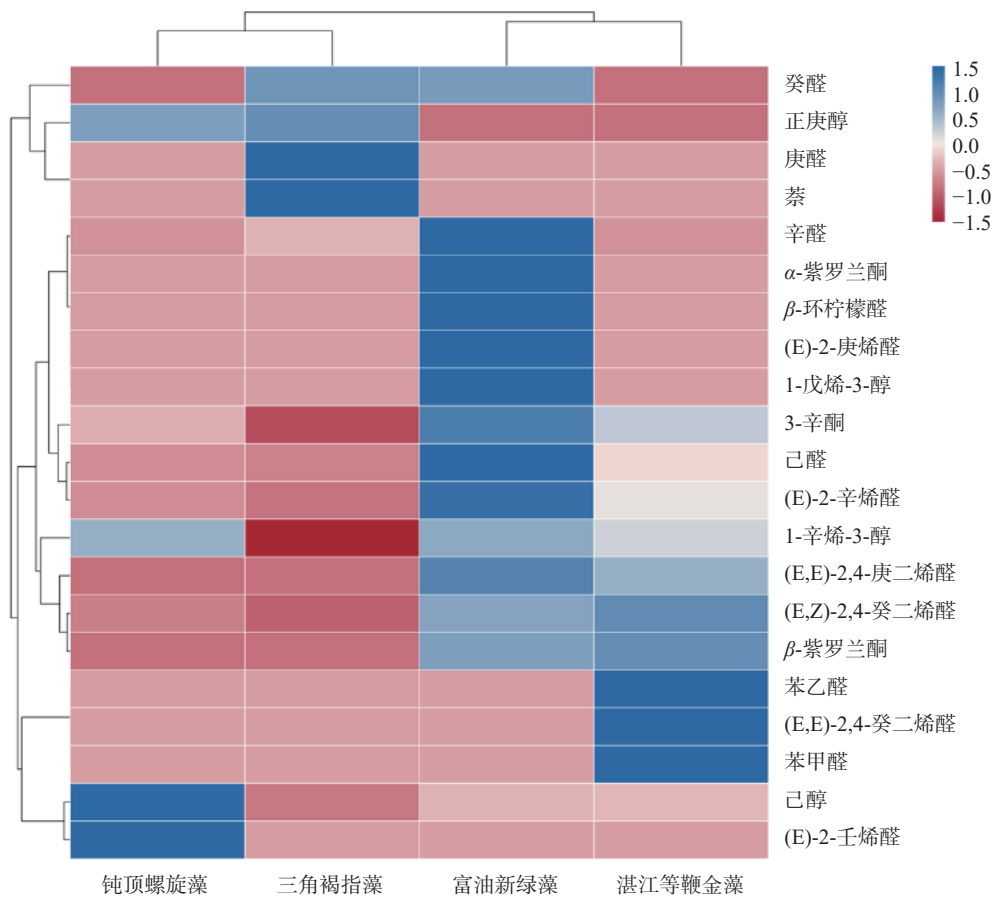


图 3 四种微藻 OAV≥1 的挥发性化合物动态热图

Fig.3 Dynamic heat map of volatile compounds of four microalgae with OAV ≥ 1

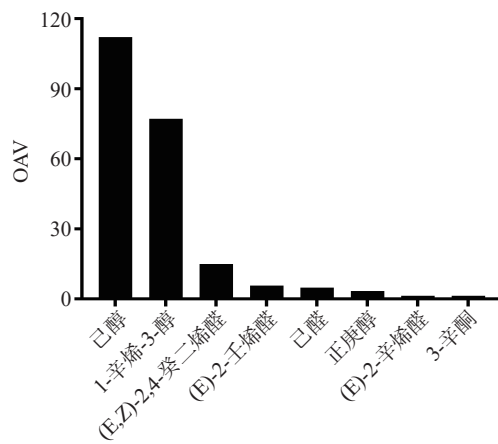


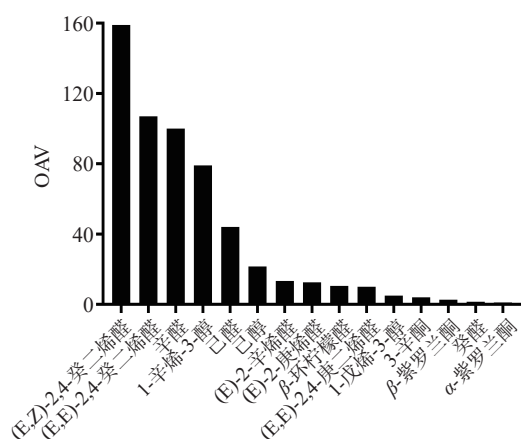
图 4 钝顶螺旋藻中 OAV≥1 的挥发性化合物

Fig.4 The volatile compounds in *S. platensis* with OAV ≥ 1

78.86 $\mu\text{g/kg}$, 显著高于其他醇类物质,但其 OAV 相对较低,因此其对螺旋藻风味影响较小。醛类组分中, (E,Z)-2,4-癸二烯醛含量较低(1.15 $\mu\text{g/kg}$),但其阈值较低,因此具有较高的 OAV,是钝顶螺旋藻中重要的风味化合物之一,具有强烈的鱼腥味^[24]。己醛和 (E)-2-壬烯醛的 OAV 也相对较高,分别为 5 和 6。己醛具有鱼腥味和青草味^[25],其阈值低,对钝顶螺旋藻的不良风味也起到了显著的影响作用。(E)-2-壬烯醛则具有脂肪气味^[26],尽管其含量较低,为 1.09 $\mu\text{g/kg}$,但其阈值低,因此气味活度较高,其所产

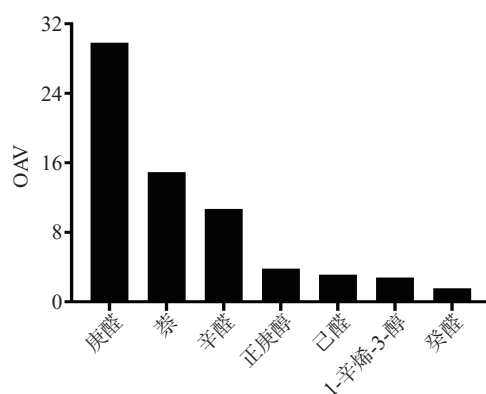
生的风味作用不容忽视。综上所述,己醇、1-辛烯-3-醇、(E,Z)-2,4-癸二烯醛、(E)-2-壬烯醛和己醛是对钝顶螺旋藻青草、泥土和脂肪风味特征起重要作用的主要挥发性成分。

2.2.2 富油新绿藻挥发性成分分析 富油新绿藻中检测发现含有 35 种挥发性化合物。其中,含量最高的化合物为 1-戊烯-3-醇(1780.67 $\mu\text{g/kg}$, OAV 5)。其次是(Z)-2-戊烯-1-醇(453.58 $\mu\text{g/kg}$, OAV<1)和己醛(220.24 $\mu\text{g/kg}$, OAV 44)。选取该藻中 OAV≥1 的化合物进行排序,如图 5 所示。在所有挥发性化合物中, OAV≥1 的化合物有 15 种, OAV>100 的化合物有 3 种,分别为 (E,Z)-2,4-癸二烯醛(159)、(E,E)-2,4-癸二烯醛(107)、辛醛(100)。(E,E)-2,4-癸二烯醛被认为是多不饱和脂肪酸的氧化产物^[31]。(E,Z)-2,4-癸二烯醛和(E,E)-2,4-癸二烯醛在富油新绿藻中 OAV 较高,对其风味起主要贡献作用。其中, (E,E)-2,4-癸二烯醛具有脂肪和煎炸气味^[27], (E,Z)-2,4-癸二烯醛具有鱼腥味^[24]。另外,在该藻中还测得辛醛,其具有脂肪和刺鼻的气味^[28],由于 OAV 较高,因此赋予富油新绿藻脂肪味的风味特征。辛醛也曾被研究发现存在于氧化橄榄油中,是一种脂肪酸氧化产物。富油新绿藻中还检测到 1-辛烯-3-醇、己醛和己醇,且具有较高 OAV,均能影响其风味特征。除此之外, (E)-2-庚烯醛和(E,E)-2,4-庚二

图5 富油新绿藻中 OAV ≥ 1 的挥发性化合物Fig.5 The volatile compounds in *N. oleoabundans* with OAV ≥ 1

烯醛含量也较高,但由于阈值较高,对富油新绿藻风味的贡献相对较小。其他醛和酮的含量和 OAV 较低,对富油新绿藻风味的贡献可能较小。因此,(E,Z)-2,4-癸二烯醛、(E,E)-2,4-癸二烯醛、辛醛、1-辛烯-3-醇、己醛和己醇是关键的不良挥发性化合物,赋予富油新绿藻脂肪、泥土、鱼腥味和青草味的风味特征。

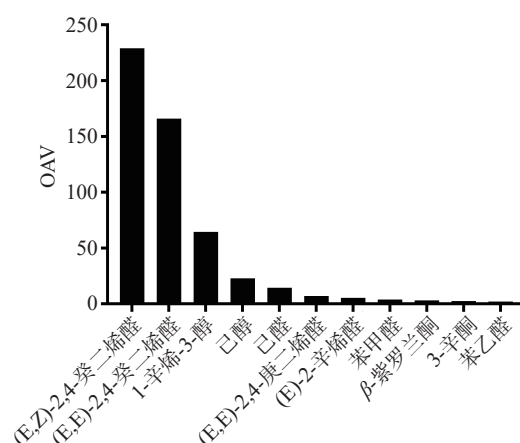
2.2.3 三角褐指藻挥发性成分分析 三角褐指藻中共检测出 23 种挥发性化合物,其中醛类 7 种,酮类 3 种,醇类 7 种,烃类 1 种,酯类 1 种,其他化合物 4 种。含量最高的化合物为 2,4-二甲基苯甲醛,目前还较少报道,其具体风味还有待进一步研究。选取该藻中 OAV ≥ 1 的化合物进行排序,如图 6 所示。OAV ≥ 1 的化合物有 7 种,OAV 较高的化合物有 3 种,分别为庚醛、萘和辛醛。其中,庚醛具有油腻、脂肪和木质气味^[28]。Zhao 等^[32]在研究藻类爆发产生鱼腥味的水库中也检测到了它。三角褐指藻是一种硅藻,庚醛是硅藻的一种具有特征性的代谢物,在三角褐指藻不良风味特征中发挥重要作用^[32]。萘有类似樟脑的气味^[27],有研究发现其对鲜枣香味有贡献作用^[27],一般不认为是不良风味。但由于萘的含量相对较高,其樟脑气味可能会给三角褐指藻带来刺鼻的气味。辛醛具有强烈的脂肪气味^[27],对三角褐指藻不良风味特征产生重要影响作用。除此之外,三角褐指藻

图6 三角褐指藻中 OAV ≥ 1 的挥发性化合物Fig.6 The volatile compounds in *P. tricornutum* with OAV ≥ 1

中含量较高的化合物还包括正庚醇、己醛和 1-辛烯-3-醇。正庚醇具有坚果气味,一般不认为是不良风味。另外两种化合物的阈值相对较低,OAV >1 ,因此它们对三角褐指藻风味的影响较大。其他化合物的含量均低于上述六种,对整体风味的贡献程度较低。因此,可以认为,庚醛、萘、辛醛、己醛和 1-辛烯-3-醇这五种化合物是三角褐指藻的主要风味化合物,赋予三角褐指藻以脂肪味为主的风味特征。

2.2.4 湛江等鞭金藻挥发性成分分析 在湛江等鞭金藻中共检出 29 种挥发性化合物,其中醛类 8 种,酮类 2 种,醇类 10 种,烃类 3 种,酯类 3 种,其他化合物 3 种。在这些挥发性化合物中,含量最高的为苯甲醛。据研究报道,苯甲醛具有苦杏仁味,被认为是微藻中酶促反应的产物^[29]。它在烤花生仁中被检测认为是具有坚果和杏仁的香气的主要单羰基化合物。但由于其阈值较高,对湛江等鞭金藻的风味影响较小。其次含量较高的化合物是甲氧基苯酚,一种含氮化合物,关于其风味特征的研究较少。一些研究人员将认为其来自萃取针的污染物^[33],也有研究人员在一些食品中发现了它^[34]。因此,它对风味的贡献还需进一步研究。选取该藻中 OAV ≥ 1 的化合物进行排序,如图 7 所示。在这些挥发性化合物中,OAV >1 的有 11 种,其中 OAV >10 的有 5 种,分别是(E,E)-2,4-癸二烯醛、(E,Z)-2,4-癸二烯醛、1-辛烯-3-醇、己醇和己醛,均对该藻不良风味起重要的贡献作用。除此之外,(E,E)-2,4-庚二烯醛的 OAV >1 ,2,4-庚二烯醛和(E,E)-2,4-庚二烯醛都有鱼腥味,在水库中藻类繁殖期间,它们在水中的浓度会增加^[24, 32]。因此,(E,E)-2,4-庚二烯醛在一定程度上引起了微藻的不良风味。综上,(E,Z)-2,4-癸二烯醛、(E,E)-2,4-癸二烯醛、1-辛烯-3-醇、己醇、己醛和(E,E)-2,4-庚二烯醛这六种化合物是湛江等鞭金藻的主要不良风味物质,这些化合物使湛江等鞭金藻产生脂肪味、青草味和鱼腥味的风味特征。

除了上述不良风味化合物外,本研究在螺旋藻

图7 湛江等鞭金藻中 OAV ≥ 1 的挥发性化合物Fig.7 The volatile compounds in *I. zhanjiangensis* with OAV ≥ 1

和富油新绿藻中还检测到了 β -环柠檬醛和 β -紫罗兰酮。据报道,这两种物质参与了蓝藻水华期间水环境中恶臭的形成^[11]。 β -环柠檬醛也在其他真核微藻中检测得到,被认为是微藻的典型气味化合物^[35-36],由藻类中的类胡萝卜素降解产生的。

由上述分析可知,己醛、1-辛烯-3-醇、(E,Z)-2,4-癸二烯醛和己醇是这四种微藻中关键的不良气味化合物。

3 结论

钝顶螺旋藻的风味特征以青草、泥土和脂肪风味为主,己醛、己醇、1-辛烯-3-醇、(E,Z)-2,4-癸二烯醛和(E)-2-壬烯醛起主要贡献作用。富油新绿藻的风味特征主要是脂肪、泥土、鱼腥味和青草味,(E,Z)-2,4-癸二烯醛、(E,E)-2,4-癸二烯醛、辛醛、1-辛烯-3-醇、己醛和己醇是关键的不良挥发性化合物。三角褐指藻主要呈现脂肪味,由庚醛、蔡、辛醛、己醛和 1-辛烯-3-醇起主要风味贡献作用。湛江等鞭金藻的风味特征主要是脂肪味、青草味和鱼腥味,起主要贡献的挥发性化合物为(E,Z)-2,4-癸二烯醛、(E,E)-2,4-癸二烯醛、1-辛烯-3-醇、己醇、己醛和(E,E)-2,4-庚二烯醛。己醛、1-辛烯-3-醇、(E,Z)-2,4-癸二烯醛和己醇是主要的不良风味化合物,普遍存在于四种微藻中。

参考文献

- [1] A. 里士曼. 微藻培养指南: 生物技术与应用藻类学[M]. 北京: 科学出版社, 2014. [RICHMOND A. Handbook of microalgal culture: Biotechnology and applied phycology[M]. Beijing: Science Press, 2014.]
- [2] 杨雪峰, 李雁群, 许英桃, 等. 富油新绿藻在不同培养期油脂的脂肪酸组成[J]. 广东海洋大学学报, 2017, 37(4): 128-132. [YANG Q F, LI Y Q, XU Y T, et al. Fatty acid composition of *Neochloris (Ettlia) oleoabundans* in different cultivation periods[J]. Journal of Guangdong Ocean University, 2017, 37(4): 128-132.]
- [3] 王冬琴. 微藻油脂湿法提取技术研究[D]. 湛江: 广东海洋大学, 2013. [WANG D Q. Research on the lipid extraction from wet microalgae[D]. Zhanjiang: Guangdong Ocean University, 2013.]
- [4] SICURO B. Freshwater bivalves rearing: A brief overview[J]. International Aquatic Research, 2015, 7(2): 93-100.
- [5] QIAO H J, CONG C, SUN C X, et al. Effect of culture conditions on growth, fatty acid composition and DHA/EPA ratio of *Phaeodactylum tricornutum*[J]. Aquaculture, 2016, 452: 311-317.
- [6] GAO B Y, CHEN A L, ZHANG W Y, et al. Co-production of lipids, eicosapentaenoic acid, fucoxanthin, and chrysolaminarin by *Phaeodactylum tricornutum* cultured in a flat-plate photobioreactor under varying nitrogen conditions[J]. Journal of Ocean University of China, 2017, 16(5): 916-924.
- [7] 蔺红苹, 卢冬梅. 湛江等鞭金藻培养条件优化[J]. 基因组学与应用生物学, 2020, 39(4): 1751-1757. [LIN H P, LU D M. Optimization of culture conditions of *Isochrysis zhanjiangensis*[J]. Jiyinzuxue Yu Yingyong Shengwuxue (Genomics and Applied Biology), 2020, 39(4): 1751-1757.]
- [8] 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[J]. 渔业科学进展, 2016, 37(5): 147-156. [LI W, OMANNISA·MAMAT, XU J L, et al. Comparative study of volatile components from two strains of *Pyropia haitanensis* in different culture areas[J]. Progress in Fishery Sciences, 2016, 37(5): 147-156.]
- [9] 徐玉雪, 陈艳红, 陈昭华, 等. 红毛藻复合脱腥工艺的优化及其挥发性成分 GC-MS 分析[J]. 食品研究与开发, 2021, 42(16): 99-106. [XU Y X, CHENG Y H, CHENG Z H, et al. Optimization of compound deodorization progress and GC-MS analysis of volatile components of *Bangia fusco-purpurea*[J]. Food Research and Development, 2021, 42(16): 99-106.]
- [10] 李红, 党晨阳, 张金荣. 三种马尾藻不同部位挥发性成分的比较分析[J]. 食品工业科技, 2018, 39(24): 281-288, 293. [LI H, DANG C Y, ZHANG J R. Comparative analysis of volatile components in different parts of three species of *Sargassum*[J]. Science and Technology of Food Industry, 2018, 39(24): 281-288, 293.]
- [11] ZHANG K J, LIN T F, ZHANG T Q, et al. Characterization of typical taste and odor compounds formed by *Microcystis aeruginosa*[J]. Journal of Environmental Sciences (China), 2013, 25(8): 1539-1548.
- [12] LEE J, RAI P K, JEON Y J, et al. The role of algae and cyanobacteria in the production and release of odorants in water[J]. Environmental Pollution, 2017, 227: 252-262.
- [13] LAFARGE C, CAYOT N. Insight on a comprehensive profile of volatile compounds of *Chlorella vulgaris* extracted by two "green" methods[J]. Food Science & Nutrition, 2019, 7(3): 918-929.
- [14] ZEN C K, TIEPO C B V, SILVA R V, et al. Development of functional pasta with microencapsulated *Spirulina*: Technological and sensorial effects[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2020, 100(5): 2018-2026.
- [15] ISLETEN H M. Aroma characterization of five microalgae species using solid-phase microextraction and gas chromatography-mass spectrometry/olfactometry[J]. Food Chemistry, 2018, 240: 1210-1218.
- [16] PENNARUN A L, PROST C, HAURE J, et al. Comparison of two microalgal diets. 2. Influence on odorant composition and organoleptic qualities of raw oysters (*Crassostrea gigas*) [J]. Journal of Agricultural & Food Chemistry, 2003, 51(7): 2011-2018.
- [17] GOLMAKANI M T, SOLEIMANIAN-ZAD S, ALAVI N, et al. Effect of *Spirulina (Arthrospira platensis)* powder on probiotic bacteriologically acidified feta-type cheese[J]. Journal of Applied Phycology, 2018, 31(2): 1085-1094.
- [18] 岳敏, 赵熙宁, 宋亚楠, 等. 蛋白核小球藻超声波破壁方法的优化[J]. 山西农业大学学报(自然科学版), 2018, 38(10): 37-42. [YUE M, ZHAO X N, SONG Y N, et al. Optimization study on the ultrasonic treatment for cell wall disruption of *Chlorella pyrenoidosa*[J]. Journal of Shanxi Agricultural University (Nature Science Edition), 2018, 38(10): 37-42.]
- [19] 卢佳芳, 朱煜康, 徐大伦, 等. 不同剂量电子束辐照对花鲈鱼肉风味的影响[J]. 食品科学, 2021, 42(12): 153-158. [LU J F, ZHU Y K, XU D L, et al. Effect of electron beam irradiation on with different doses on flavor of *Lateolabrax japonicus* meat[J]. Food

- Science, 2021, 42(12): 153–158.]
- [20] 闫爽, 王黎颖, 王聪, 等. 杜氏盐藻挥发性物质的 HS-SPME-GC-MS 分析[J]. 食品工业科技, 2017, 38(1): 304–307. [YAN S, WANG L Y, WANG C, et al. Analysis of volatile compounds in *Dunaliella salina* with HS-SPME-GC-MS method[J]. Science and Technology of Food Industry, 2017, 38(1): 304–307.]
- [21] 潘晓倩, 周慧敏, 李素, 等. 卤牛肉贮藏过程中气味活性化合物变化及异味分析[J]. 食品科学, 2021, 42(22): 240–248. [PAN X Q, ZHOU H M, LI S, et al. Changes in odor-active compounds during storage and analysis of off-flavor substances in stewed marinated beef[J]. Food Science, 2021, 42(22): 240–248.]
- [22] MISHRA P K, TRIPATHI J, GUPTA S, et al. Effect of cooking on aroma profile of red kidney beans (*Phaseolus vulgaris*) and correlation with sensory quality[J]. Food Chemistry, 2017, 215: 401–409.
- [23] GIRI A, OSAKO K, OHSHIMA T. Identification and characterisation of headspace volatiles of fish miso, a Japanese fish meat based fermented paste, with special emphasis on effect of fish species and meat washing[J]. Food Chemistry, 2010, 120(2): 621–631.
- [24] WATSON S B, SATCHWILL T, DIXON E, et al. Under-ice blooms and source-water odour in a nutrient-poor reservoir: Biological, ecological and applied perspectives[J]. Freshwater Biology, 2010, 46(11): 1553–1567.
- [25] 雷乙, 陈竞豪, 涂金金, 等. 鱼肉加工过程特征气味物质变化研究进展[J]. 食品研究与开发, 2020, 41(15): 201–210. [LEI Y, CHEN J H, TU J J, et al. Research progress on changes of characteristic odor substances in fish processing[J]. Food Research and Development, 2020, 41(15): 201–210.]
- [26] CZERNY M, CHRISTLBAUER M, CHRISTLBAUER M, et al. Re-investigation on odour thresholds of key food aroma compounds and development of an aroma language based on odour qualities of defined aqueous odorant solutions[J]. European Food Research and Technology, 2008, 228(2): 265–273.
- [27] CHEN Q Q, SONG J X, BI J F, et al. Characterization of volatile profile from ten different varieties of Chinese jujubes by HS-SPME/GC-MS coupled with E-nose[J]. Food Research International, 2018, 105: 605–615.
- [28] KALUA C M, ALLEN M S, BEDGOOD D R, et al. Olive oil volatile compounds, flavour development and quality: A critical review[J]. Food Chemistry, 2007, 100(1): 273–286.
- [29] VAN DURME J, GOIRIS K, DE WINNE A, et al. Evaluation of the volatile composition and sensory properties of five species of microalgae[J]. Journal of Agricultural & Food Chemistry, 2013, 61(46): 10881–10890.
- [30] 解万翠, 卢宽, 于靖, 等. 水产品香气研究进展[J]. 食品科学技术学报, 2022, 40(1): 11–21. [JIE W C, LU K, YU J, et al. Research progress on aroma of aquatic products[J]. Journal of Food Science and Technology, 2022, 40(1): 11–21.]
- [31] SELLI S, CAYHAN G G. Analysis of volatile compounds of wild gilthead sea bream (*Sparus aurata*) by simultaneous distillation-extraction (SDE) and GC-MS[J]. Microchemical Journal, 2009, 93(2): 232–235.
- [32] ZHAO Y Y, YU J W, SU M, et al. A fishy odor episode in a north China reservoir: Occurrence, origin, and possible odor causing compounds[J]. Journal of Environmental Sciences (China), 2013, 25(12): 2361–2366.
- [33] GRIMM C, CHAMPAGNE E, OHTSUBO K I. Analysis of volatile compounds in the headspace of rice using SPME/GC/MS[M]. Flavor, Fragrance, and Odor Analysis, 2002.
- [34] GUNESER O, DEMIRKOL A, YUCEER Y K, et al. Production of flavor compounds from olive mill waste by *Rhizopus oryzae* and *Candida tropicalis*[J]. Brazilian Journal of Microbiology, 2017, 48(2): 275–285.
- [35] 金星. 藻类代谢产物中典型异味物质及其变化规律研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2009. [JIN X. Research on typical odorous compounds from algae metabolites and the variation rule[D]. Nanjing: Nanjing University of Science & Technology, 2009.]
- [36] KHIARI D. AWWA's taste and odor committee: Seeks to understand and solve taste and odor problems in drinking water[J]. Journal-American Water Works Association, 2004, 96(2): 32–36.