

杨超, 梁璋成, 林晓姿, 等. 龙须菜生物脱腥工艺优化及其挥发性风味物质分析 [J]. 福建农业学报, 2021, 36 (4): 490–500.  
YANG C, LIANG Z C, LIN X Z, et al. Optimization of biological deodorization process and analysis of volatile flavor in *Gracilaria lemaneiformis* [J]. *Fujian Journal of Agricultural Sciences*, 2021, 36 (4): 490–500.

## 龙须菜生物脱腥工艺优化及其挥发性风味物质分析

杨超<sup>1,2</sup>, 梁璋成<sup>2,3</sup>, 林晓姿<sup>2,3</sup>, 苏昊<sup>2,3</sup>, 何志刚<sup>2,3\*</sup>, 郭京波<sup>1\*</sup>, 李维新<sup>2,3</sup>

(1. 山西师范大学食品科学学院, 山西 临汾 041000; 2. 福建省农业科学院农业工程技术研究所, 福建 福州 350003; 3. 福建省农产品(食品)加工重点实验室, 福建 福州 350003)

**摘要:**【目的】优化龙须菜微生物发酵脱腥工艺, 为龙须菜的深加工开发利用提供技术支持。【方法】通过感官模糊综合评价, 在筛选出生物脱腥微生物菌种组合的基础上, 采用 Box-Behnken 响应面法优化基料白砂糖及苹果酸添加量、菌接种量、发酵时间、发酵温度等因素工艺参数。通过 HS-SPME-GC/MS 等技术, 分析发酵前后龙须菜挥发性风味物质的变化。【结果】最优脱腥工艺: 脱腥微生物菌种组合为 1:1 的酿酒酵母 JJ4 和副干酪乳杆菌副干酪亚种 RP38、接种量各 5%; 基料白砂糖添加量 (m/m) 为 2.0%、苹果酸添加量 (m/m) 为 0.2%, 发酵时间 68 h, 发酵温度 29 ℃。发酵脱腥后, 具有脂肪味、腥臭味、鱼腥味的环辛醇、1-甲基环庚醇、辛醛、正壬醛、(E)-2-壬烯醛消失, 具有泥土腥味中的 3-辛酮含量明显降低, 新增了具有芳香味的 β-苯乙醇、水果香的己酸乙酯、酒香的辛酸乙酯、甜蜜香的乙酸苯乙酯、椰子香气的壬酸乙酯等。【结论】采用酿酒酵母 JJ4 和副干酪乳杆菌副干酪亚种 RP38 组合发酵龙须菜, 消除了醇、醛等腥味物质, 增加了 β-苯乙醇及酯类等香味物质, 对龙须菜有明显的脱腥赋香效果。

**关键词:** 龙须菜; 生物脱腥; 工艺优化; 挥发性风味

中图分类号: TS 205.5

文献标志码: A

文章编号: 1008-0384 (2021) 04-0490-11

### Optimization of biological deodorization process and analysis of volatile flavor in *Gracilaria lemaneiformis*

YANG Chao<sup>1,2</sup>, LIANG Zhangcheng<sup>2,3</sup>, LIN Xiaozhi<sup>2,3</sup>, SU Hao<sup>2,3</sup>, HE Zhigang<sup>2,3\*</sup>, GUO Jingbo<sup>1\*</sup>, LI Weixin<sup>2,3</sup>

(1. College of Food Science, Shanxi Normal University, Linfen 041000, China; 2. Institute of Agricultural Engineering Technology, Fujian Academy of Agricultural Sciences, Fuzhou 350003, China; 3. Fujian Key Laboratory of Agricultural Products (Food) Processing, Fuzhou 350003, China)

**Abstract:** 【Objective】Optimize the microbial fermentation and deodorization process of *Gracilaria lemaneiformis* (GL), and provide certain technical support for the deep processing and utilization of GL. 【Method】Through the fuzzy comprehensive evaluation of sensory, on the basis of screening out the combination of biological deodorizing microorganisms, using the Box-Behnken response surface methodology to optimize the added amount of malic acid and sugar, inoculation amount, time of fermentation, fermentation temperature factor parameters. Analyze the changes of volatile flavor compounds in GL before and after fermentation by HS-SPME-GC/MS and other techniques. 【Results】The optimal deodorization process is: the combination of deodorizing microbial strains is 1:1 *Saccharomyces cerevisia* JJ4 and *Lactobacillus paracasei* subsp. *Paracasei* RP38; sugar added 2.0%, malic acid added 0.2%, inoculation amount 5% each, fermentation time 68 h, fermentation temperature 29 ℃. After fermentation and deodorization, cyclooctanol, 1-methylcycloheptanol, octanal, nonanal, 2-nonenal, (E)-which have fatty, fishy and fishy odors disappear, the content of 3-octanone is significantly reduced, added aromatic phenylethyl Alcohol, fruity hexanoic acid, ethyl ester, wine scented octanoic acid, ethyl ester, sweet scented hexanoic acid, 2-

收稿日期: 2020-12-24 初稿; 2020-03-12 修改稿

作者简介: 杨超 (1996-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 生物次生代谢产物的转化 (E-mail: 2461614909@qq.com)

\* 通信作者: 何志刚 (1964-), 男, 研究员, 研究方向: 农产品贮藏与加工、食品发酵方面的研究 (E-mail: njgzx@163.com); 郭京波 (1977-), 男, 博士, 副教授, 研究方向: 生物次生代谢产物的转化 (jingbogu@163.com)

基金项目: 福建省科技计划公益类专项 (2020R1032009)

phenylethyl ester, coconut scented nonanoic acid, ethyl ester. 【Conclusion】 The combination of JJ4 and RP38 is used to ferment GL to remove the smelly substances such as alcohol and aldehydes, and increase the flavor substances such as asphenylethylalcohol and esters. And it has obvious deodorant and fragrance effect on GL.

**Key words:** *Gracilaria lemaneiformis*; biological deodorization; process optimization; volatile flavor

## 0 引言

【研究意义】龙须菜 (*Gracilaria lemaneiformis*) 又名江蓠、凤菜等, 属于红藻门、杉藻目、江蓠属, 是一种红藻类海洋植物<sup>[1]</sup>, 在我国山东、浙江、福建、广东等地<sup>[2,3]</sup>的沿海海域大量栽培生产, 成为继紫菜、海带、裙带菜之后的第四大养殖海藻。其富含海藻多糖、维生素、蛋白质以及磷、钙、碘、铁、锌、镁等多种矿物质以及多种人体必需的微量元素和活性物质, 具有较高的保健和营养价值<sup>[4]</sup>。但因为龙须菜腥味大、适口性差, 目前主要用于提取琼脂及作为鲍鱼等饲料开发, 其深度开发利用受到制约, 大量龙须菜资源未能得到充分的利用<sup>[5]</sup>。【前人研究进展】目前主要的脱腥方法有物理脱腥、化学脱腥、生物脱腥等<sup>[6]</sup>。其中, 物理脱腥是通过采用香辛料、 $\beta$ -环糊精对腥味物质进行掩盖、包埋等, 并没有从根本上去除掉这些腥味成分, 脱腥效果差; 化学脱腥利用一些化学试剂与腥味物质发生化学反应达到除腥的目的, 但化学试剂的添加可能会对其他物质的结构造成破坏; 生物脱腥利用食品微生物或酶技术对原料进行发酵脱腥, 由菌种及其产生的酶类分解或代谢基质中的腥味物质, 并形成特殊的风味物质<sup>[7]</sup>。因此生物脱腥不仅可实现海藻脱腥、改善风味, 甚至有可能使活性物质增加或强化<sup>[8]</sup>。微生物发酵脱腥技术在鱼类、贝类脱除腥味成分方面<sup>[9-11]</sup>的应用取得了良好成效, 但不同原料适宜的发酵微生物菌种及其工艺不尽相同。如马浩田等<sup>[12]</sup>用酵母菌发酵鲶鱼, 在接种量 1.0%, 发酵温度 35 ℃, 发酵时间 90 min 条件下, 脱腥效果最好; Seo 等<sup>[13]</sup>采用米曲霉发酵海带, 在转速 120 r·min<sup>-1</sup>、30 ℃ 条件下发酵 4 d 的海带腥味物质成分下降, 与发酵前相比, 腥味强度下降了 4 倍。【本研究切入点】迄今鲜见生物脱腥在龙须菜中应用的报道。顶空固相微萃取-气相色谱质谱 (HS-SPME-GC-MS) 可定性、定量检测非气态物质里的挥发性气体成分, 在检测挥发性风味物质方面应用广泛<sup>[14-16]</sup>, 可用于检测龙须菜生物脱腥后风味物质的变化。【拟解决的关键问题】本试验以经济型海藻龙须菜为研究对象, 通过感官模糊评判筛选出生物脱腥微生物菌种组合, 优化发酵基料营养成分配比、菌种组合比例及接种量及发酵

工艺参数, 应用 HS-SPME-GC/MS 技术解析发酵前后龙须菜挥发性风味物质的变化, 为龙须菜深加工、提升其高附加值提供重要支持。

## 1 材料与方法

### 1.1 原料与主要试剂

原料: 龙须菜 (鲜品) 由福建省宁德市三都镇基地采收, 当天运回实验室于 -20 ℃ 保存备用; 白砂糖、苹果酸 (食品级)、甘蔗糖蜜, 市购。

菌种: 植物乳杆菌 (*L.plantarum*) R23、副干酪乳杆菌副干酪亚种 (*Lactobacillus paracasei subsp. paracasei*) RP38 和 酿酒酵母 (*Saccharomyces cerevisia*) JJ4, 由福建省农产品 (食品) 加工重点实验室分离、鉴定并保存。

### 1.2 仪器与设备

LDZX-50KBS 立式压力蒸汽灭菌锅, 上海申安医疗器械厂; BC/BD-217CH 冷柜, 河南新飞电器有限公司; BS110S 电子天平, 赛多利斯科学仪器 (北京) 有限公司; SW-CJ-2FD 型超净工作台, 苏净集团苏州安泰空气技术有限公司; TGL16M 台式高速冷冻离心机, 上海诺顶仪器设备有限公司; LRH-160 生化培养箱, 上海一恒科学仪器有限公司; 气相色谱-质谱联用仪, 日本岛津科技有限公司; 色谱柱为 DB-5 毛细管柱 (30 m×0.25 mm, 0.25  $\mu$ m), SPME 手动进样手柄及固定搭载装置 50/30  $\mu$ m DVB/CAR/PDMS 萃取头, 安捷伦科技有限公司; 20 mL 顶空进样瓶, 美国 Supelco 公司

### 1.3 试验方法

1.3.1 培养基的制备 糖蜜培养基制备: 将甘蔗糖蜜稀释至可溶性固形物至质量分数为 5%, 用柠檬酸调节 pH 至 5.0±0.2, 115 ℃ 高压灭菌 30 min, 用于酵母菌液体培养。

LH18 培养基<sup>[17]</sup>: 蛋白胨 15 g·L<sup>-1</sup>, 牛肉膏 10 g·L<sup>-1</sup>, 葡萄糖 30 g·L<sup>-1</sup>, 酵母膏 7.4 g·L<sup>-1</sup>, 柠檬酸铵 2 g·L<sup>-1</sup>, 硫酸镁 0.36 g·L<sup>-1</sup>, 硫酸锰 0.05 g·L<sup>-1</sup>, 吐温-80 1 g·L<sup>-1</sup>, 番茄汁 100 mL·L<sup>-1</sup>, 苹果酸钠 20 g·L<sup>-1</sup>, 调整 pH 至 4.8±0.2, 121 ℃ 高压灭菌 20 min, 用于乳酸菌培养。

1.3.2 种子液制备 供试乳酸菌和酵母菌经活化后, 分别接种于 LH18 培养基和糖蜜培养基中扩培至菌量达 10<sup>9</sup> cfu·mL<sup>-1</sup> 和 10<sup>8</sup> cfu·mL<sup>-1</sup>, 采用 4800 r·min<sup>-1</sup>、4 ℃

离心 10 min，取菌泥加等体积无菌水振荡悬浮，待用。

1.3.3 脱腥菌种筛选 龙须菜洗净沥干，长度切至大约 3 mm，待用。取 30 g 龙须菜，按  $m$ （龙须菜）： $m$ （蒸馏水）=1:2 的比例置于 150 mL 的三角瓶中，添加 2%（ $m/m$ ）白砂糖、0.2%（ $m/m$ ）苹果酸，水浴

灭菌（100 ℃ 10 min）。冷却后按表 1 方案接种，每组处理重复 3 次，每组接种量各为 5%（复合菌种按 1:1 的比例接种），30 ℃ 发酵 3 d。采用感官模糊综合评价对比分析确定适宜菌种。

表 1 菌种接种方案  
Table 1 Bacteria inoculation program

| 处理组 Treatment group | CK                  | 1    | 2   | 3   | 4        | 5        | 6       |
|---------------------|---------------------|------|-----|-----|----------|----------|---------|
| 菌种 Strain           | 未接种 Blank treatment | RP38 | R23 | JJ4 | RP38+R23 | RP38+JJ4 | R23+JJ4 |

1.3.4 脱腥工艺单因素试验 取 30 g 龙须菜，按  $m$ （龙须菜）： $m$ （蒸馏水）=1:2 的比例置于 150 mL 的三角瓶中，调整糖、酸后，100 ℃ 水浴灭菌 10 min，冷却后接种发酵。各单因素设定为白砂糖添加量（ $m/m$ ）为 1%、2%、3%、4%、5%，苹果酸添加量（ $m/m$ ）为 0.1%、0.2%、0.3%、0.4%、0.5%，接种量 1%、3%、5%、7%、9%、发酵温度 21、24、27、30、33 ℃、发酵时间 1、2、3、4、5 d。固定处理参数为糖添加量 2%，苹果酸添加量 0.2%，菌接种量各 5%，发酵温度 30 ℃、发酵时间 3 d。感官模糊综合评价法评价脱腥效果，每次试验处理重复 3 次，取平均值。

1.3.5 Box-Behnken 响应面试验设计 根据单因素试验结果，选择菌种添加量、发酵温度、发酵时间等 3 个因素作为自变量，以感官评价为响应值，对脱腥工艺进行响应面试验设计，因素与水平见表 2。

表 2 响应面试验设计因素与水平  
Table 2 Factors and levels of response surface experimental design

| 因素 Factor                          | 水平 Level |    |    |
|------------------------------------|----------|----|----|
|                                    | -1       | 0  | 1  |
| A: 菌接种量 Inoculation amount/%       | 3        | 5  | 7  |
| C: 发酵温度 Fermentation temperature/℃ | 27       | 30 | 33 |
| D: 发酵时间 Fermentation time/h        | 60       | 72 | 84 |

1.3.6 龙须菜挥发性风味物质分析 参照顾赛麒等<sup>[18-19]</sup>方法，略有修改。取龙须菜样品 5 g 置于 20 mL 的顶空进样瓶中进行萃取。萃取条件：50/30  $\mu\text{m}$  DVB/CAR/PDMS 萃取头老化温度 250 ℃；老化时间 15 min；平衡温度 60 ℃；平衡时间 30 min；250 ℃解吸附 3 min，用于 GC-MS 分析。

GC 条件：DB-5MS（30 m×0.25 mm，膜厚 0.25

$\mu\text{m}$ ）；采用程序升温方式，起始温度 50 ℃，保持 3 min，以 10 ℃·min<sup>-1</sup> 的速率上升至 90 ℃，保持 5 min，以 10 ℃·min<sup>-1</sup> 的速率上升至 230 ℃，保持 2 min；以 20 ℃·min<sup>-1</sup> 的速率上升至 280 ℃，保持 5 min；载气为 He，流速 1.0 mL·min<sup>-1</sup>；不分流进样。MS 条件：电子电离源；电子能量 70 eV；离子源温度 230 ℃；质量扫描为  $m/z$  35~550；发射电流 100  $\mu\text{A}$ 。

气相色谱-质谱联用仪数据通过检索 NIST2014 谱库，选择 RTE 积分器进行积分，并通过选择质量数大于 80 的化合物，结合保留指数  $RI$  实现定性分析。扣除色谱图中的硅氧烷类杂峰及其他非嗅感物质杂峰，计算挥发性风味物质的总峰面积，采用面积归一化法计算各化合物的相对含量<sup>[20]</sup>。其中计算各挥发性组分的  $RI$ （保留指数），公式： $RI=100n+100(t_x-t_n)/(t_{n+1}-t_n)$ ，其中  $t_x$ 、 $t_n$ 、 $t_{n+1}$  分别为被分析组分和碳原子处于  $n$  和  $n+1$  之间的正构烷烃流出峰的保留时间。

1.3.7 感官模糊综合评价

1.3.7.1 感官得分综合评判标准 组织 13 名接受过相关培训的食品专业师生组成评定小组。采用层次分析法建立龙须菜的评价域  $U=\{\text{腥味 } U_1, \text{香味 } U_2, \text{滋味 } U_3, \text{色泽 } U_4\}$ ，设定各评价指标的模糊权向量  $A=\{0.35, 0.35, 0.25, 0.05\}$ ，设定评价等级  $S=\{\text{优等 } S_1, \text{良好 } S_2, \text{合格 } S_3, \text{不合格 } S_4\}$ ，品评标准见表 3。选用  $M(-, +)$  算子建立模糊综合评价模型，各等级的秩值标准见表 4，每个样品构成 1 个普通集合（论域）： $F=\{F_1, F_2, \dots, F_{19}\}$ ， $F_i(i=1, 2, \dots, 19)$ ， $F_i$  表示  $i$  种龙须菜样品，根据隶属度采用秩加权平均原则进行感官模糊综合评价<sup>[21]</sup>。

计算公式如下：13 名评价人员对样品进行腥味、香味、滋味、色泽进行评价并归一化处理，各等级评价人数分别除以总评价人数，得到各指标的模糊权向量： $U_1=\{a_1, b_1, c_1, d_1\}$ ， $U_2=\{a_2, b_2, c_2,$

表 3 龙须菜感官评分标准  
Table 3 Sensory scoring criteria of Asparagus

| 项目<br>Items              | 权重 Weights                                                        |                                                                                |                                                                            |                                                              |
|--------------------------|-------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|
|                          | 优等 Excellent                                                      | 良好 Good                                                                        | 合格 Qualified                                                               | 不合格 Unqualified                                              |
| 腥味 (0.35)<br>Fishy smell | 无腥味<br>Odourless                                                  | 腥味不明显<br>The smell is not obvious                                              | 有腥味<br>Smelly                                                              | 腥味重<br>Strong fishy smell                                    |
| 香味 (0.35)<br>Fragrance   | 发酵香浓郁, 愉悦感强<br>Fermentation fragrance, a strong sense of pleasure | 发酵香明显, 有愉悦感<br>Fermentation fragrance is obvious, there is a sense of pleasure | 发酵香较淡, 一般愉悦感<br>Fermented fragrance is lighter, generally pleasant         | 发酵香不明显, 无愉悦感<br>Fermentation is not obvious, no pleasure     |
| 滋味 (0.25)<br>Taste       | 浓厚的藻味, 适口性强<br>Strong algal smell, palatability                   | 藻味明显, 适口性较好<br>Obvious algae smell, good palatability                          | 藻味较淡, 适口性一般<br>The taste of algae is light and the palatability is average | 藻味不明显, 适口性差<br>Algae smell is not obvious, poor palatability |
| 色泽 (0.05)<br>Color       | 枣红色, 无褐变<br>Maroon red, no browning                               | 枣红色, 轻微褐变<br>Maroon red, slightly browned                                      | 颜色较暗淡, 有褐变<br>The color is dull, with browning                             | 颜色暗淡, 褐变明显<br>The color is dull, browning is obvious         |

表 4 各等级的秩值  
Table 4 Proliferation value of each grade

| 项目<br>Items | 优等<br>Excellent | 良好<br>Good | 及格<br>Qualified | 不及格<br>Unqualified |
|-------------|-----------------|------------|-----------------|--------------------|
| 分值 Points   | (91~100)        | (71~90)    | (41~60)         | (0~40)             |
| 秩 Anecdote  | 90              | 70         | 50              | 20                 |

$d_2\}$ ,  $U_3=\{a_3, b_3, c_3, d_3\}$ ,  $U_4=\{a_4, b_4, c_4, d_4\}$ 。

将 4 个指标写成矩阵形式即： $y=\left\{\begin{matrix} a_1 & b_1 & c_1 & d_1 \\ a_2 & b_2 & c_2 & d_2 \\ a_3 & b_3 & c_3 & d_3 \\ a_4 & b_4 & c_4 & d_4 \end{matrix}\right\}$ ，用

矩阵乘法计算样品的综合评价集  $F_1=A\cdot y=\{S_1\ S_2\ S_3\ S_4\}$ ，最后用各等级的秩值乘以综合评价集的各个向量并进行加和，即：总分  $H=S_1\times 90+S_2\times 70+S_3\times 50+S_4\times 20$ 。

1.4 数据统计分析

采用 SPSS 20.0 软件对数据进行单因素方差分析，用 Design Expert 8.0.6 软件进行响应面设计及分析。

2 结果与分析

2.1 菌种的筛选

由图 1 可知，不同菌种发酵产生的风味不同，组合发酵效果优于单一菌种发酵，以副干酪乳杆菌副干酪亚种 RP38 和酿酒酵母 JJ4 按 1:1 组合发酵的去腥效果最佳，且具有较愉悦的发酵香气和醇香，与其他处理的差异均达显著水平 ( $P<0.05$ )，将该组合处理作为后续试验的发酵菌。

2.2 发酵条件对龙须菜脱腥效果的影响

由图 2 可知，当菌接种量为 5% 时，样品的感官

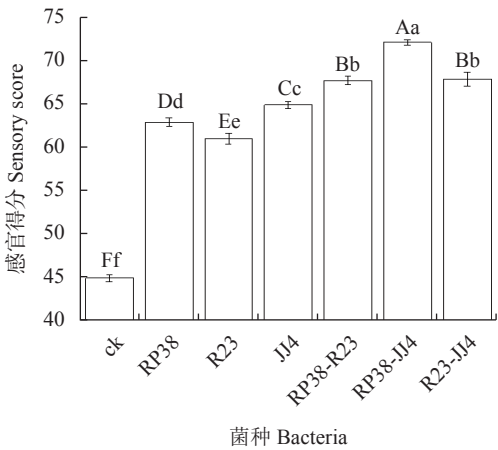


图 1 不同菌种发酵对脱腥效果的影响

Fig. 1 Influence of fermentation of different strains on the effect of deodorization

得分值最高，继续增加接种量，其感官得分变化不显著 ( $P>0.05$ )，考虑到节约成本，确定适宜接种量为 5%；白砂糖添加量为 2% 时，样品感官得分最高，继续增加糖添加量样品感官得分不显著 ( $P>0.05$ )，考虑到节约成本选择适宜的糖添加量为 2.0%；苹果酸添加量过高过低，样品感官得分都较低，说明添加适量苹果酸有利于发酵风味的提高，最适苹果酸添加量为 0.2%，与其他处理的差异均达显著水平 ( $P<0.05$ )；发酵温度对样品的感官得分的影响呈先上升后下降趋势，适宜的发 酵温度为 30℃，与其他处理的差异均达显著水平 ( $P<0.05$ )；发酵时间对样品的感官得分的影响呈先上升后下降趋势，发酵时间为 3 d 与 1、2 d 处理的差异均达极显著水平 ( $P<0.01$ )，与 4、5 d 差异不显著 ( $P>0.05$ )，因此选择适宜的发酵时间为 3 d。

2.3 龙须菜生物脱腥工艺优化

2.3.1 响应面设计与建模分析 为进一步优化发酵

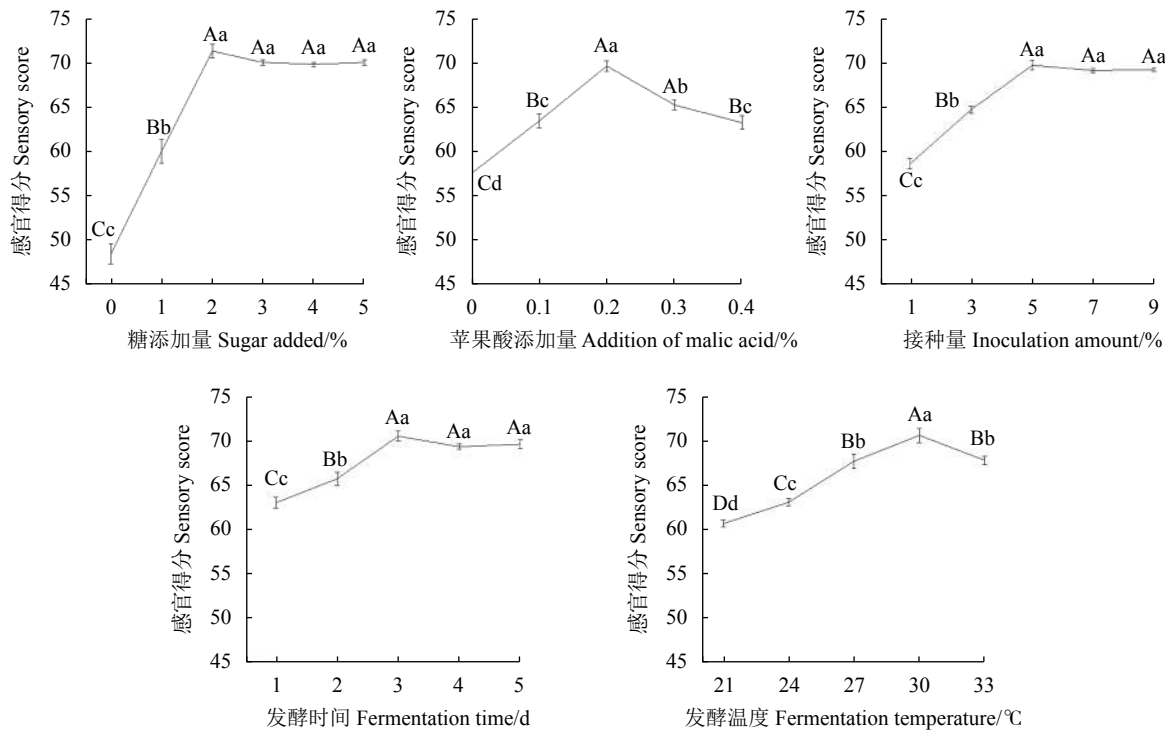


图 2 发酵条件对脱腥效果的影响

Fig. 2 Influence of fermentation conditions on the effect of deodorization

条件，在单因素试验结果的基础上，以菌种添加量（*A*）、发酵温度（*B*）和发酵时间（*C*）为自变量，模糊综合评价分值为响应值（*Y*），响应面试验结果见表 5、6。响应值与各因素之间的二次多项回归方程为：

$$Y = 72.01 + 1.15A - 2.18B - 1.67C - 0.44AB + 1.21AC + 1.67BC - 6.89A^2 - 3.39B^2 - 3.66C^2$$

结果表明，二次回归模型差异极显著（ $P < 0.01$ ），失拟项差异不显著（ $P > 0.05$ ），说明该模型适用于模拟响应值和各因素之间的关系，并且模型的相关系数  $R^2 = 0.970 0$ ，表明模型拟合度较好，可以采用该模型对龙须菜脱腥进行预判。3 个因素对脱腥效果的影响程度大小为  $B > C > A$ ，即发酵温度 > 发酵时间 > 菌接种量。寻优参数为：接种量 5.1%，发酵时间 68.3 h，发酵温度 28.7 ℃，在此条件下响应值为 72.7 分。

2.3.2 响应面交互作用分析 两因素交互作用中，只有发酵温度（*B*）和发酵时间（*C*）的交互作用对感官评分影响显著，因此固定接种量在零水平，绘制出两因素交互作用响应面曲面分析图和等高线分析图（图 3）。当发酵时间一定时，发酵温度低于 29 ℃ 时响应值与发酵温度呈正相关，高于 29 ℃ 时响应值则与发酵温度呈负相关；当发酵温度一定时，发酵时间短于 68 h 时响应值与发酵时间呈正相关，长于 68 h 时响应值与发酵温度呈负相关。在达到中心附

表 5 响应面试验设计与结果

Table 5 Design matrix and experiment results of responsesur-face method

| 处理<br>Group | 菌接种量<br>Inoculation<br>amount | 发酵温度<br>Fermentation<br>temperature | 发酵时间<br>Fermentation<br>time | 感官评分<br>Sensory<br>score |
|-------------|-------------------------------|-------------------------------------|------------------------------|--------------------------|
| 1           | 0                             | 0                                   | 0                            | 73.31                    |
| 2           | 1                             | 0                                   | 1                            | 63.52                    |
| 3           | 0                             | 0                                   | 0                            | 71.21                    |
| 4           | -1                            | -1                                  | 0                            | 63.34                    |
| 5           | 0                             | -1                                  | -1                           | 70.82                    |
| 6           | 0                             | -1                                  | 1                            | 63.4                     |
| 7           | 0                             | 0                                   | 0                            | 71.11                    |
| 8           | 0                             | 1                                   | 1                            | 62.44                    |
| 9           | -1                            | 0                                   | -1                           | 61.83                    |
| 10          | 0                             | 0                                   | 0                            | 71.57                    |
| 11          | 0                             | 0                                   | 0                            | 72.86                    |
| 12          | 1                             | -1                                  | 0                            | 64.52                    |
| 13          | -1                            | 0                                   | 1                            | 56.81                    |
| 14          | 1                             | 1                                   | 0                            | 59.24                    |
| 15          | 1                             | 0                                   | -1                           | 63.69                    |
| 16          | -1                            | 1                                   | 0                            | 59.82                    |
| 17          | 0                             | 1                                   | -1                           | 63.16                    |

表 6 二次回归模型方差分析  
Table 6 Analysis of variance of quadratic regression model

| 方差来源<br>Source of variance | 平方和<br>Sum of square | 自由度<br>Degree of freedom | 均方<br>Mean square | F值<br>F value | P值<br>P value | 显著性<br>Significance |
|----------------------------|----------------------|--------------------------|-------------------|---------------|---------------|---------------------|
| 模型 Model                   | 423.77               | 9                        | 47.09             | 25.18         | 0.000 2       | **                  |
| A                          | 10.51                | 1                        | 10.51             | 5.62          | 0.049 5       | *                   |
| B                          | 37.93                | 1                        | 37.93             | 20.29         | 0.002 8       | **                  |
| C                          | 22.21                | 1                        | 22.21             | 11.88         | 0.010 7       | *                   |
| AB                         | 0.77                 | 1                        | 0.77              | 0.41          | 0.540 4       |                     |
| AC                         | 5.88                 | 1                        | 5.88              | 3.15          | 0.119 4       |                     |
| BC                         | 11.22                | 1                        | 11.22             | 6.00          | 0.044 1       | *                   |
| A <sup>2</sup>             | 199.72               | 1                        | 199.97            | 106.82        | <0.000 1      | **                  |
| B <sup>2</sup>             | 48.52                | 1                        | 48.52             | 25.95         | 0.001 4       | **                  |
| C <sup>2</sup>             | 56.47                | 1                        | 56.47             | 30.20         | 0.000 9       | **                  |
| 残差 Residual                | 13.09                | 7                        | 1.87              |               |               |                     |
| 失拟项 Lack of fit            | 9.03                 | 3                        | 3.01              | 2.97          |               |                     |
| 纯误差 Pure error             | 4.06                 | 4                        | 1.01              |               |               |                     |
| 总和 Sum                     | 436.85               | 16                       |                   |               |               |                     |

注：“\*”表示影响显著，“\*\*”表示影响极显著。  
Note: “\*” Indicates significant impact, “\*\*” Indicates that the impact is extremely significant.

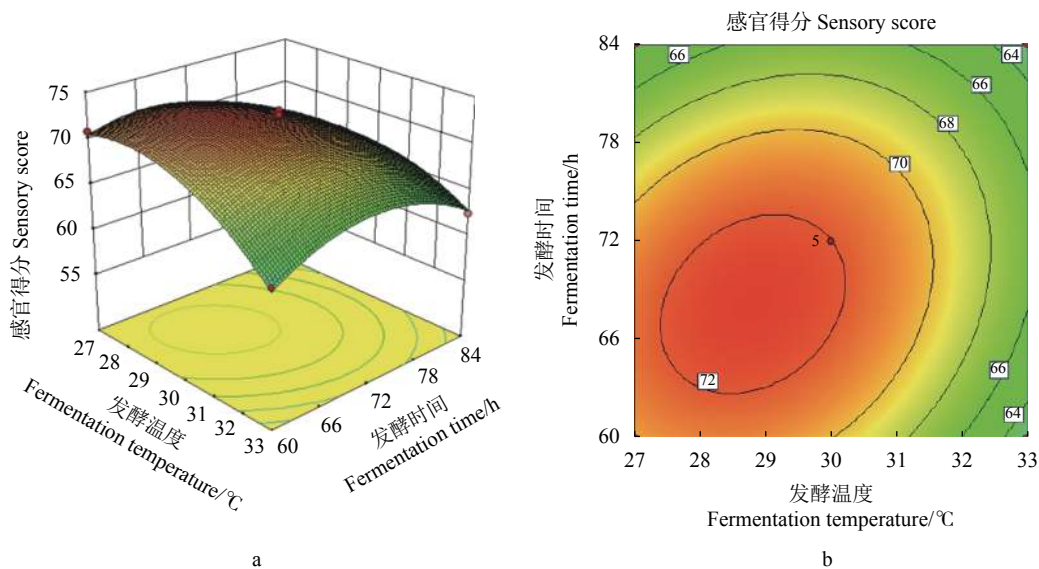


图 3 发酵温度和发酵时间交互作用对感官评分的响应面和等高线  
Fig. 3 Trespone surface and contour map of the interaction between fermentation temperature and fermentation time to sensory score

近点时即 29 ℃ 发酵 68 h，响应值最大，即脱腥效果最好。

2.3.3 最优发酵工艺的验证 为了验证模型的可靠性，在最优发酵脱腥条件下进行 3 次重复验证试验，所得到的响应值为（73.4±0.94）分，实测值与模拟预测值相对误差为 0.96%，差异不显著（*P*>0.05）。

处理组的龙须菜无腥味，并具有愉悦的花果香等发酵香且适口性强。

2.4 脱腥前后龙须菜中的挥发性风味成分变化

采用 HS-SPME-GC/MS 法对脱腥前后的龙须菜样品进行挥发性风味解析，共检出 7 大类 54 种成分，发酵前为 36 种，发酵后为 37 种，检测结果见表 7，

表 7 龙须菜挥发性风味物质 HS-SPME-GC-MS 分析结果  
Table 7 Analysis of volatile flavor components in GL by HS-SPME-GC-MS

| 序号<br>Number      | 保留时间<br>Keep time | 保留指数<br>Retention index | 化合物<br>Compound                                  |                              |                                   | 风味描述 <sup>[20, 22]</sup><br>Flavor description | 相对含量<br>Relative content % |             |
|-------------------|-------------------|-------------------------|--------------------------------------------------|------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------------------|----------------------------|-------------|
|                   |                   |                         | 英文名称<br>English name                             | 中文名称<br>Chinese name         | 分子式<br>Molecular formula          |                                                | CK                         | 处理<br>Group |
| 烃类<br>Hydrocarbon |                   |                         |                                                  |                              |                                   |                                                |                            |             |
| 1                 | 6.963             | 974                     | Cyclopentane, 1,1,3,3-tetramethyl-               | 1,1,3,3 -四甲基环戊烷              | C <sub>9</sub> H <sub>18</sub>    |                                                | 4.42±0.20                  | 0.66±0.16   |
| 2                 | 7.295             | 984                     | Cyclohexane, 1-ethyl-1-methyl-                   | 1-乙基-1-甲基-环己烷                | C <sub>9</sub> H <sub>18</sub>    |                                                | —                          | 3.33±0.02   |
| 3                 | 9.381             | 1045                    | 2,6-Octadiene, 2,6-dimethyl-                     | 2,6-二甲基-2,6-辛二烯              | C <sub>10</sub> H <sub>18</sub>   | 花香味<br>Floral fragrance                        | 1.18±0.20                  | —           |
| 4                 | 14.443            | 1186                    | 1,3-Cyclohexadiene,1,3,5,5,6,6-hexamethyl-       | 1,3,5,5,6,6六甲基-1,3 -环己二烯     | C <sub>12</sub> H <sub>20</sub>   | 果香<br>Fruity                                   | 1.72±0.35                  | 0.56±0.12   |
| 5                 | 16.223            | 1600                    | Pentadecane                                      | 十五烷                          | C <sub>15</sub> H <sub>32</sub>   | 柏木等香气<br>Cypress and other aromas              | 1.69±0.11                  | 0.31±0.09   |
| 6                 | 23.419            | 1734                    | Heptadecane                                      | 十七烷                          | C <sub>17</sub> H <sub>36</sub>   | 花果香<br>Floral and fruity                       | 1.07±0.18                  | —           |
| 7                 | 24.903            | 1870                    | Nonadecane                                       | 正十九烷                         | C <sub>19</sub> H <sub>40</sub>   |                                                | 6.52±0.60                  | 1.1±0.08    |
| 8                 | 26.285            | 2005                    | Eicosane                                         | 正二十烷                         | C <sub>20</sub> H <sub>42</sub>   | 椰子香<br>Coconut fragrance                       | 0.41±0.21                  | —           |
| 9                 | 26.377            | 2014                    | Heneicosane                                      | 正二十一烷                        | C <sub>21</sub> H <sub>44</sub>   |                                                | 0.44±0.13                  | —           |
| 醇类<br>Alcohol     |                   |                         |                                                  |                              |                                   |                                                |                            |             |
| 10                | 10.35             | 1073                    | Cyclooctanol                                     | 环辛醇                          | C <sub>8</sub> H <sub>16</sub> O  | 脂肪味，腥臭味<br>Fatty smell                         | 5.75±0.90                  | —           |
| 11                | 12.05             | 1121                    | 1-Methylcycloheptanol                            | 1-甲基环庚醇                      | C <sub>8</sub> H <sub>16</sub> O  | 青草味、脂肪味<br>Grassy, fatty                       | 1.16±0.18                  | —           |
| 12                | 12.297            | 1128                    | Phenylethyl Alcohol                              | β-苯乙醇                        | C <sub>8</sub> H <sub>10</sub> O  |                                                | —                          | 48.88±0.85  |
| 13                | 15.032            | 1204                    | 5,7-Octadien-3-ol, 2,4,4,7-tetramethyl-, (E)-    | (E)-2,4,4,7-四甲基-5.7 -辛二烯-3-醇 | C <sub>12</sub> H <sub>22</sub> O | 臭味<br>Smelly                                   | —                          | 6.38±0.05   |
| 醛类<br>Aldehyde    |                   |                         |                                                  |                              |                                   |                                                |                            |             |
| 14                | 7.683             | 995                     | Octanal                                          | 辛醛                           | C <sub>8</sub> H <sub>16</sub> O  | 鱼腥味、脂肪味<br>Fishy, fatty                        | 2.35±0.16                  | —           |
| 15                | 11.848            | 1116                    | Nonanal                                          | 正壬醛                          | C <sub>9</sub> H <sub>18</sub> O  | 脂肪味、柑橘味<br>Fat flavor, citrus flavor           | 1.77±0.10                  | —           |
| 16                | 14.082            | 1177                    | 2-Nonenal, (E)-                                  | (E)-2-壬烯醛                    | C <sub>9</sub> H <sub>16</sub> O  | 紫罗兰和黄瓜味<br>Violet and cucumber flavor          | 1.83±0.17                  | —           |
| 17                | 15.563            | 1227                    | Decanal                                          | 癸醛                           | C <sub>10</sub> H <sub>20</sub> O | 酒香<br>Wine flavor                              | 1.31±0.23                  | 0.48±0.06   |
| 18                | 15.933            | 1243                    | 1-Cyclohexene-1-carboxaldehyde, 2,6,6-trimethyl- | β-环柠檬醛                       | C <sub>10</sub> H <sub>16</sub> O |                                                | 1.74±0.09                  | 0.64±0.13   |
| 19                | 17.07             | 1292                    | 2-Undecenal                                      | 2-十一烯醛                       | C <sub>11</sub> H <sub>20</sub> O | 甜蜜香<br>Sweet fragrance                         | 5.42±0.13                  | 0.53±0.10   |
| 20                | 26.734            | 2045                    | 4,8,12-Tetradecatrienal, 5,9,13-trimethyl-       | 5,9,13-三甲基 -4,8,12-十四碳三烯醛    | C <sub>17</sub> H <sub>28</sub> O |                                                | 0.45±0.11                  | 0.67±0.02   |

续上表

| 序号<br>Number | 保留时间<br>Keep time | 保留指数<br>Retention index | 化合物<br>Compound                                                  |                        |                                                | 风味描述 <sup>[20, 22]</sup><br>Flavor description | 相对含量<br>Relative content % |             |
|--------------|-------------------|-------------------------|------------------------------------------------------------------|------------------------|------------------------------------------------|------------------------------------------------|----------------------------|-------------|
|              |                   |                         | 英文名称<br>English name                                             | 中文名称<br>Chinese name   | 分子式<br>Molecular formula                       |                                                | CK                         | 处理<br>Group |
|              |                   |                         | 酮类<br>Ketone                                                     |                        |                                                |                                                |                            |             |
| 21           | 7.158             | 980                     | 3-Octanone                                                       | 3-辛酮                   | C <sub>8</sub> H <sub>16</sub> O               | 蘑菇香、泥土腥<br>Mushroom smell, earthy              | 19.73±0.17                 | 2.39±0.17   |
| 22           | 10.768            | 1085                    | Furylhydroxymethyl ketone                                        | 羟甲基呋喃酮                 | C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> O <sub>3</sub>   |                                                | 12±0.14                    | —           |
| 23           | 16.307            | 1259                    | 1H-Pyrrole-2,5-dione, 3-ethyl-4-methyl-                          | 3-乙基-4-甲基-吡咯-2,5-二酮    | C <sub>7</sub> H <sub>9</sub> NO <sub>2</sub>  | 果香<br>Fruity                                   | 0.59±0.12                  | —           |
| 24           | 20.904            | 1530                    | 5,9-Undecadien-2-one, 6,10-dimethyl-                             | 6,10-二甲基-5,9-十一双烯-2-酮  | C <sub>13</sub> H <sub>22</sub> O              |                                                | 2.09±0.18                  | 0.73±0.06   |
| 25           | 21.508            | 1576                    | 3-Buten-2-one, 4-(2,6,6-trimethyl-1-cyclohexen-1-yl)-            | β-紫罗酮                  | C <sub>13</sub> H <sub>20</sub> O              |                                                | 6.61±0.07                  | 2.68±0.01   |
| 26           | 26.835            | 2054                    | 2-Nonadecanone                                                   | 2-十九烷酮                 | C <sub>19</sub> H <sub>38</sub> O              |                                                | 1.53±0.07                  | —           |
|              |                   |                         | 酯类<br>Ester                                                      |                        |                                                |                                                |                            |             |
| 27           | 7.587             | 992                     | Hexanoic acid, ethyl ester                                       | 己酸乙酯                   | C <sub>8</sub> H <sub>16</sub> O <sub>2</sub>  | 果香<br>Fruity                                   | —                          | 3.65±0.17   |
| 28           | 15.331            | 1217                    | Octanoic acid, ethyl ester                                       | 辛酸乙酯                   | C <sub>10</sub> H <sub>20</sub> O <sub>2</sub> | 酒香<br>Wine flavor                              | —                          | 6.82±0.26   |
| 29           | 16.85             | 1283                    | Acetic acid, 2-phenylethyl ester                                 | 乙酸苯乙酯                  | C <sub>10</sub> H <sub>12</sub> O <sub>2</sub> | 甜蜜香<br>Sweet fragrance                         | —                          | 1.09±0.10   |
| 30           | 17.845            | 1334                    | Nonanoic acid, ethyl ester                                       | 壬酸乙酯                   | C <sub>11</sub> H <sub>22</sub> O <sub>2</sub> | 椰子香气<br>Coconut aroma                          | —                          | 0.4±0.13    |
| 31           | 19.758            | 1450                    | Ethyl trans-4-decenoate                                          | 反式-4-癸烯酸乙酯             | C <sub>11</sub> H <sub>22</sub> O <sub>2</sub> | 臭味<br>Bad smell                                | —                          | 0.98±0.45   |
| 32           | 19.921            | 1461                    | Decanoic acid, ethyl ester                                       | 癸酸乙酯                   | C <sub>12</sub> H <sub>24</sub> O <sub>2</sub> | 椰子香味<br>Coconut fragrance                      | —                          | 2.79±0.29   |
| 33           | 20.866            | 1528                    | Octanoic acid, 3-methylbutyl ester                               | 辛酸异戊酯                  | C <sub>13</sub> H <sub>26</sub> O <sub>2</sub> | 椰子香味<br>Coconut fragrance                      | —                          | 0.65±0.14   |
| 34           | 22.381            | 1646                    | 2(4H)-Benzofuranone, 5,6,7,7a-tetrahydro-4,4,7a-trimethyl-, (R)- | 二氢猕猴桃内酯                | C <sub>11</sub> H <sub>16</sub> O <sub>2</sub> |                                                | 0.89±0.09                  | —           |
| 35           | 23.237            | 1718                    | 2,2,4-Trimethyl-1,3-pentanediol diisobutyrate                    | 2,2,4-三甲基-1,3-戊二醇双异丁酸酯 | C <sub>16</sub> H <sub>30</sub> O <sub>4</sub> |                                                | 0.58±0.09                  | 1.39±0.14   |
| 36           | 23.297            | 1723                    | Dodecanoic acid, ethyl ester                                     | 月桂酸乙酯                  | C <sub>14</sub> H <sub>28</sub> O <sub>2</sub> | 花果香<br>Floral and fruity                       | —                          | 0.91±0.04   |
| 37           | 24.071            | 1792                    | Hexanoic acid, 2-phenylethyl ester                               | 己酸-2-苯乙酯               | C <sub>14</sub> H <sub>20</sub> O <sub>2</sub> |                                                | —                          | 0.66±0.17   |
| 38           | 25.668            | 1945                    | Pentadecanoic acid, ethyl ester                                  | 十五烷酸乙酯                 | C <sub>17</sub> H <sub>34</sub> O <sub>2</sub> |                                                | —                          | 0.34±0.04   |
| 39           | 26.05             | 1982                    | Tetradecanoic acid, ethyl ester                                  | 肉豆蔻酸乙酯                 | C <sub>16</sub> H <sub>32</sub> O <sub>2</sub> |                                                | —                          | 0.94±0.07   |
| 40           | 26.578            | 2032                    | Isopropyl palmitate                                              | 棕榈酸异丙酯                 | C <sub>19</sub> H <sub>38</sub> O <sub>2</sub> |                                                | 0.34±0.06                  | —           |
| 41           | 27.084            | 2077                    | Dibutyl phthalate                                                | 邻苯二甲酸二丁酯               | C <sub>16</sub> H <sub>22</sub> O <sub>4</sub> |                                                | 2.24±0.16                  | 0.65±0.13   |
| 42           | 27.488            | 2112                    | Heptadecanoic acid, ethyl ester                                  | 十七烷酸乙酯                 | C <sub>19</sub> H <sub>38</sub> O <sub>2</sub> | 蜡香、奶油味<br>Wax incense, fragrant cream          | —                          | 0.14±0.06   |
| 43           | 28.296            | 2176                    | Phthalic acid, butyl hexyl ester                                 | 邻苯二甲酸丁基己基酯             | C <sub>18</sub> H <sub>24</sub> O <sub>4</sub> |                                                | 0.83±0.08                  | 0.51±0.10   |

续上表

| 序号<br>Number | 保留时间<br>Keep time | 保留指数<br>Retention index | 化合物<br>Compound                     |                      |                                                | 风味描述 <sup>[20, 22]</sup><br>Flavor description | 相对含量<br>Relative content % |             |
|--------------|-------------------|-------------------------|-------------------------------------|----------------------|------------------------------------------------|------------------------------------------------|----------------------------|-------------|
|              |                   |                         | 英文名称<br>English name                | 中文名称<br>Chinese name | 分子式<br>Molecular formula                       |                                                | CK                         | 处理<br>Group |
| 44           | 28.431            | 2187                    | Ethyl 9-hexadecenoate               | 9-十六碳烯酸乙酯            | C <sub>18</sub> H <sub>34</sub> O <sub>2</sub> |                                                | —                          | 0.2±0.07    |
| 45           | 28.48             | 2191                    | (E)-9-Octadecenoic acid ethyl ester | (E)-9-十八碳烯酸乙酯        | C <sub>20</sub> H <sub>38</sub> O <sub>2</sub> |                                                | —                          | 0.21±0.06   |
| 46           | 28.75             | 2216                    | Nonadecanoic acid, ethyl ester      | 十九烷酸乙酯               | C <sub>21</sub> H <sub>42</sub> O <sub>2</sub> |                                                | —                          | 0.47±0.18   |
|              |                   |                         | 酸类<br>Acid                          |                      |                                                |                                                |                            |             |
| 47           | 14.667            | 1192                    | 4-Methyloctanoic acid               | 4-甲基辛酸               | C <sub>9</sub> H <sub>18</sub> O <sub>2</sub>  |                                                | 2.49±0.03                  | —           |
| 48           | 17.296            | 1303                    | Nonanoic acid                       | 壬酸                   | C <sub>9</sub> H <sub>18</sub> O <sub>2</sub>  |                                                | 2.93±0.07                  | 0.82±0.24   |
| 49           | 19.399            | 1426                    | n-Decanoic acid                     | 癸酸                   | C <sub>10</sub> H <sub>20</sub> O <sub>2</sub> | 臭味<br>Bad smell                                | 0.44±0.17                  | 5.21±0.18   |
| 50           | 22.804            | 1681                    | Tridecanoic acid                    | 十三酸                  | C <sub>13</sub> H <sub>26</sub> O <sub>2</sub> |                                                | 1.8±0.16                   | 1.16±0.12   |
| 51           | 25.728            | 1951                    | Pentadecanoic acid                  | 十五酸                  | C <sub>15</sub> H <sub>30</sub> O <sub>2</sub> |                                                | 0.42±0.03                  | 0.31±0.15   |
| 52           | 28.34             | 2180                    | Octadecanoic acid                   | 十八酸                  | C <sub>18</sub> H <sub>36</sub> O <sub>2</sub> |                                                | 0.93±0.05                  | 0.35±0.02   |
|              |                   |                         | 其他<br>Other                         |                      |                                                |                                                |                            |             |
| 53           | 9.705             | 1054                    | Octanenitrile                       | 正辛腈                  | C <sub>8</sub> H <sub>15</sub> N               | 花香<br>Potpourri                                | 1.99±0.43                  | —           |
| 54           | 22.145            | 1627                    | 1,3-Benzenediol, 5-pentyl-          | 5-戊基间苯二酚             | C <sub>11</sub> H <sub>16</sub> O <sub>2</sub> |                                                | 1.92±0.12                  | —           |

注：“—”表示未检出。  
Note: Means ‘—’not detected.

发酵前后龙须菜的挥发性物质种类和相对含量的差异如图 4、5 所示。烃类物质种类经过发酵由 8 种减为 5 种，总含量由 17.45% 降为 5.96%，醇类物质种类经过发酵未变化，但总含量由 6.91% 升高为 55.26%，脂肪味、腥臭味的环辛醇和 1-甲基环庚醇发酵后消失，新检出具有芳香味的 β-苯乙醇、(E)-2,4,4,7-四甲基-5,7-辛二烯-3-醇。醛类种类经过发酵由 7 种减为 4 种，总含量从 14.87% 降为 2.32%，其中具有鱼腥味的辛醛、脂肪味的正壬醛和 (E)-2-壬烯醛发酵后未检出。酮类种类经过发酵由 6 种降为 3 种，总含量从 42.55% 降为 5.8%，有泥土腥味中的 3-辛酮含量明显降低，羟甲基呋喃酮、3-乙基-4-甲基-吡咯-2,5-二酮和 2-十九烷酮发酵后未检出。酸类种类经过发酵由 6 种减为 5 种，总含量从 6.52% 增加到 7.85%，其中 4-甲基辛酸在发酵后未检出，癸酸相对含量增加。酯类种类经过发酵由 5 种增加为 18 种，总含量从 4.88% 上升到 22.8%，新检出了具有水果香的己酸

乙酯、酒香的辛酸乙酯、甜蜜香的乙酸苯乙酯、椰子香气的壬酸乙酯等 13 种物质，这些酯类物质可能

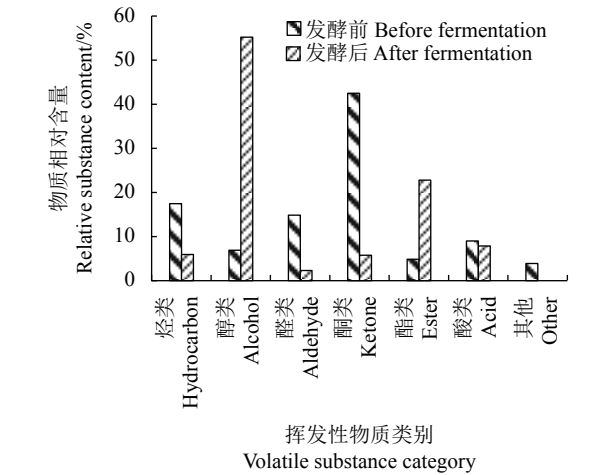


图 4 龙须菜挥发性物质相对含量对比  
Fig. 4 Comparison of relative content of volatile substances in GL

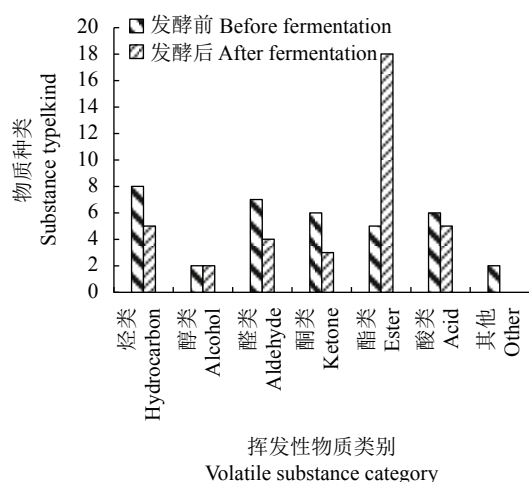


图5 龙须菜挥发性物质种类对比

Fig. 5 Comparison of volatile substances in GL

对龙须菜良好风味贡献较大。总之，经发酵生物转化，具有脂肪味、腥臭味、鱼腥味的环辛醇、1-甲基环庚醇、辛醛、正壬醛、(E)-2-壬烯醛消失、具有泥土腥味中的3-辛酮含量明显降低，新增了具有芳香味的 $\beta$ -苯乙醇、水果香的己酸乙酯、酒香的辛酸乙酯、甜蜜香的乙酸苯乙酯、椰子香气的壬酸乙酯等，这些挥发性风味物质的减增对龙须菜的脱腥增香有重要贡献，这与杨少玲等<sup>[22]</sup>研究认为醛、酮等羰基类化合物是龙须菜腥味形成的主要物质的结果相一致。

### 3 讨论与结论

龙须菜采用生物脱腥具有显著效果，其中以副干酪乳杆菌副干酪亚种 RP38 和酿酒酵母 JJ4 的组合菌脱腥效果最佳。试验中采用组合菌对龙须菜进行脱腥的效果明显优于单一菌种，可能是由于组合菌发酵所利用的底物面宽和代谢产物更丰富，进而风味更好。如王丽红等<sup>[20]</sup>研究了用乳酸菌、酵母菌单菌及组合菌分别发酵海带后风味物质的变化，结果表明组合菌发酵产生的风味物质兼于各单菌种发酵产生的，并且复合菌发酵后风味协调。

影响龙须菜生物脱腥的因素有菌接种量、发酵时间、发酵温度，其影响大小顺序为发酵温度>发酵时间>菌接种量，经 Box-Behnken 响应面优化得到龙须菜最佳的脱腥参数为：白砂糖添加量 2%、苹果酸添加量 0.2%、接种量 5%、发酵时间 68 h 及发酵温度 29℃，该工艺条件发酵下感官评分为 73.4。

龙须菜经副干酪乳杆菌副干酪亚种 RP38 和酿酒酵母 JJ4 的组合菌生物发酵脱腥后，具有脂肪味、腥臭味、鱼腥味的环辛醇、1-甲基环庚醇、辛醛、正壬醛、(E)-2-壬烯醛消失，具有泥土腥味中的 3-辛酮

含量明显降低，新增了具有芳香味的 $\beta$ -苯乙醇、水果香的己酸乙酯、酒香的辛酸乙酯、甜蜜香的乙酸苯乙酯、椰子香气的壬酸乙酯等，这些挥发性风味物质的减增对龙须菜的脱腥增香有重要贡献。

### 参考文献：

- [1] 周峙苗, 何清, 马晓宇. 东海红藻龙须菜的营养成分分析及评价 [J]. 食品科学, 2010, 31 (9): 284-287.  
ZHOU S M, HE Q, MA X Y. Evaluation of nutritional components in *Gracilaria lemaneiformis* [J]. *Food Science*, 2010, 31 (9): 284-287. (in Chinese)
- [2] MOHAMED S, HASHIM S N, RAHMAN H A. Seaweeds: A sustainable functional food for complementary and alternative therapy [J]. *Trends in Food Science and Technology*, 2012, 23 (2): 83-96.
- [3] 张学成, 费修纭, 王广策, 等. 江蓠属海藻龙须菜的基础研究与大规模栽培 [J]. 中国海洋大学学报 (自然科学版), 2009, 39 (5): 947-954.  
ZHANG X C, FEI X G, WANG G C, et al. Genetic studies and large scale cultivation of *Gracilaria lemaneiformis* [J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2009, 39 (5): 947-954. (in Chinese)
- [4] 高英霞. 龙须菜多糖与藻胆蛋白的研究进展 [J]. 中药材, 2010, 33 (3): 474-477.  
GAO Y X. Research progress on the Polysaccharide and Phycobiliprotein [J]. *Journal of Chinese Medicinal Materials*, 2010, 33 (3): 474-477. (in Chinese)
- [5] 刘燕. 龙须菜的发酵及发酵龙须菜对黑鲷生长、免疫和抗氧化能力的影响 [D]. 广州: 华南农业大学, 2016.  
LIU Y. Fermentation of asparagus and effects of fermented asparagus on growth and immunity of black seabream [D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2016. (in Chinese)
- [6] 邓静, 杨蕊, 朱佳倩, 等. 水产原料腥味物质的形成及脱腥技术研究进展 [J]. 食品安全质量检测学报, 2019, 10 (8): 2097-2102.  
DENG J, YANG H, ZHU J Q, et al. Research progress in the formation and deodorization technology of fishy odor for aquatic raw material [J]. *Journal of Food Safety & Quality*, 2019, 10 (8): 2097-2102. (in Chinese)
- [7] CHENG H F. Volatile flavor compounds in yogurt: A review [J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2010, 50 (10): 938-950.
- [8] HUANG F, HONG R Y, ZHANG R F, et al. Physicochemical and biological properties of longan pulp polysaccharides modified by *Lactobacillus fermentum* fermentation [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2019, 125: 232-237.
- [9] 钱攀, 马旭婷, 许刚, 等. 美国鲢鱼挥发性成分和脱腥方法研究 [J]. 中国食品学报, 2016, 16 (12): 169-176.  
QIAN P, MA X T, XU G, et al. Study on volatile components and deodorization of silver carp [J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2016, 16 (12): 169-176. (in Chinese)
- [10] 明庭红, 裴迪红, 周君, 等. 基于植物乳杆菌发酵草鱼脱腥增香的研

- 究[J]. 中国食品学报, 2017, 17 (10): 202–210.
- MING T H, QIU D H, ZHOU J, et al. Analysis of the deodorization and aroma during fermentation of grass carp by *Lactobacillus plantarum* [J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2017, 17 (10): 202–210. (in Chinese)
- [11] 刘慧, 秦小明, 林华娟, 等. 牡蛎蛋白酶解液脱腥技术的研究[J]. 中国食品学报, 2012, 12 (9): 78–86.
- LIU H, QIN X M, LIN H J, et al. Study on deodorization techniques for oyster enzymatic hydrolysate [J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2012, 12 (9): 78–86. (in Chinese)
- [12] 王浩田, 马儒珍, 付翠萍. 鲢鱼肉的脱腥工艺研究[J]. *安徽农业科学*, 2011, 39 (10): 6063–6066.
- WANG H T, MA L Z, FU C P. Research on deodorization technology for catfish meat [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2011, 39 (10): 6063–6066. (in Chinese)
- [13] SEO Y S, BAE H N, EOM S H, et al. Removal of off-flavors from sea tangle (*Laminaria japonica*) extract by fermentation with *Aspergillus oryzae* [J]. *Bioresource Technology*, 2012, 121: 475–479.
- [14] LI X F, YANG R W, LIN S Y, et al. Identification of key volatiles responsible for aroma changes of egg white antioxidant peptides during storage by HS-SPME-GC-MS and sensory evaluation [J]. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 2017, 11 (3): 1118–1127.
- [15] WANG C, LV S, WU Y S, et al. Study of aroma formation and transformation during the manufacturing process of Biluochun green tea in Yunnan Province by HS-SPME and GC-MS [J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2016, 96 (13): 4492–4498.
- [16] CAI J S, ZHU Y Y, MA R H, et al. Effects of roasting level on physicochemical, sensory, and volatile profiles of soybeans using electronic nose and HS-SPME-GC-MS [J]. *Food Chemistry*, 2021, 340: 127880.
- [17] 梁璋成, 何志刚, 任香芸, 等. MLF植物乳杆菌R23培养基优化[J]. *福建农业学报*, 2009, 24 (6): 570–574.
- LIANG Z C, HE Z G, REN X Y, et al. Optimization of culture medium for *Lactobacillus plantarum* R23 for malolactic fermentation [J]. *Fujian Journal of Agricultural Sciences*, 2009, 24 (6): 570–574. (in Chinese)
- [18] 顾赛麒, 唐文燕, 周洪鑫, 等. 响应面法优化海带脱腥工艺及其色泽品质评价[J]. *食品科学*, 2018, 39 (18): 217–226.
- GU S Q, TANG W Y, ZHOU H X, et al. Optimization of deodorization process for *Laminaria japonica* by response surface methodology and evaluation of its color quality [J]. *Food Science*, 2018, 39 (18): 217–226. (in Chinese)
- [19] 张海燕, 吴燕燕, 李来好, 等. 响应面法优化海鲈鱼片脱腥工艺[J]. *食品与发酵工业*, 2019, 45 (11): 143–149.
- ZHANG H Y, WU Y Y, LI L H, et al. Optimized deodorization process of *Lateolabrax japonicus* fillets by response surface methodology [J]. *Food and Fermentation Industries*, 2019, 45 (11): 143–149. (in Chinese)
- [20] 王红丽, 梁璋成, 何志刚, 等. 生物发酵脱腥海带的挥发性风味物质分析[J]. 中国食品学报, 2020, 20 (6): 295–303.
- WANG H L, LIANG Z C, HE Z G, et al. Analysis of volatile flavor compounds from microbial fermented deodorization kelp [J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2020, 20 (6): 295–303. (in Chinese)
- [21] 王红丽, 陈慎, 何志刚, 等. 基于主成分分析法的钙盐漂烫海带质构品质综合评价[J]. *福建农业学报*, 2017, 32 (10): 1124–1129.
- WANG H L, CHEN S, HE Z G, et al. Comprehensive evaluation of texture quality of kelp bleached by calcium salt based on principal component analysis [J]. *Fujian Journal of Agriculture*, 2017, 32 (10): 1124–1129. (in Chinese)
- [22] 杨少玲, 于刚, 戚勃, 等. 顶空固相微萃取法分析龙须菜干品中的挥发性成分[J]. *南方水产科学*, 2016, 12 (6): 115–122.
- YANG S L, YU G, QI B, et al. Analysis of volatile compounds of dried *Gracilaria lemaneiformis* by HS-SPME method [J]. *South China Fisheries Science*, 2016, 12 (6): 115–122. (in Chinese)

(责任编辑: 翁志辉)