

脱腥螺旋藻鲜湿米粉蒸煮品质、体外消化及风味特征分析

陈晓芳¹, 罗婧文^{2*}, 王辉², 宁悦彤¹

(1. 毕节医学高等专科学校大健康产业研究中心, 毕节健康产业重点实验室, 贵州毕节 551700)

(2. 贵州省农科院食品加工研究所, 贵州省农业生物技术重点实验室, 贵州贵阳 550025)

摘要: 为提升传统鲜湿米粉营养价值, 采用香辛料提取液去除螺旋藻“腥味”, 开发脱腥螺旋藻鲜湿米粉, 并对其蒸煮品质、质构、体外消化及风味特性进行研究。结果表明, 柠檬(质量分数 0.25%)复配甘草(质量分数 0.2%)水提液对螺旋藻去腥效果最佳, 感官评分值最高为 24.67 分, 优化工艺条件为螺旋藻添加量 1.4%, 米浆细度 80 目, 料水比 1:1。脱腥螺旋藻米粉蒸煮损失率 9.03%, 断条率显著增加了 11.88%, 吸水率显著增加为 4.24%, 老化程度更高, 入味性更强, 但断条率及 RS 含量(47.40%)显著高于普通米粉(41.51%), 营养价值更高。脱腥螺旋藻米粉与螺旋藻风味组成差异较大, 即保留了米制品的壬醛、己醛、(2Z)-2-辛烯醛、癸醛、苯甲醛及己酸乙酯等风味成分, 导致螺旋藻异味的己醛、反, 反-2,4-癸二烯醛、1-辛烯-3-醇、 β -紫罗兰酮及 2,5-二甲基吡嗪等挥发性成分相对含量降低为 3.99%、0.47%、2.44%、5.02% 及 0.66%。综上, 脱腥螺旋藻米粉易断条, 但蒸煮损失率、入味性、体外消化特性较好, 风味独特, 具有推广价值。

关键词: 螺旋藻米粉; 脱腥; 蒸煮品质; 体外消化; 风味特性

文章编号: 1673-9078(2026)4-265-275

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2026.4.0117

Cooking Quality, *in vitro* Digestion, and Flavor Characteristics of Fresh and Wet Rice Noodles with Deodorized Spirulina

CHEN Xiaofang¹, LUO Jingwen^{2*}, WANG Hui², NING Yuetong¹

(1. Health Industry Research Center, The Key Laboratory for Health Industry of Bijie, Bijie Medical College, Bijie 551700, China)

(2. Institute of Food Processing Technology, Guizhou Key Laboratory of Agricultural Biotechnology, Guiyang 550025, China)

Abstract: To improve the nutritional value of traditional fresh and wet rice noodles, fresh and wet rice noodles with deodorized spirulina were developed by using spice extract to remove the “fishy smell” of spirulina. The cooking quality, texture, *in vitro* digestion, and flavor characteristics of the rice noodles were evaluated. The results showed that the water extract of lemon (with a mass fraction of 0.25%) in combination with licorice (with a mass fraction of 0.2%) had the best deodorizing effect, yielding the highest sensory score (24.67) for rice noodles. The optimal conditions were as follows: 1.4% addition of spirulina, rice slurry fineness of 80 mesh, and a material-to-water ratio of 1:1. The cooking loss rate of the deodorized spirulina

引文格式:

陈晓芳, 罗婧文, 王辉, 等. 脱腥螺旋藻鲜湿米粉蒸煮品质、体外消化及风味特征分析[J]. 现代食品科技, 2026, 42(4): 265-275.

CHEN Xiaofang, LUO Jingwen, WANG Hui, et al. Cooking quality, *in vitro* digestion, and flavor characteristics of fresh and wet rice noodles with deodorized spirulina [J]. Modern Food Science and Technology, 2026, 42(4): 265-275.

收稿日期: 2025-01-24; 修回日期: 2025-04-18; 接受日期: 2025-04-21

基金项目: 贵州省科技支撑计划项目(黔科合支撑[2024]一般121); 毕节市健康产业重点实验室开发课题(毕健重字 BJZDSYS[2024]8号); 毕节市科技创新平台及人才团队(毕科合[2023]66号); 贵州省贵阳市花溪区政府项目([2023]花科技合同字第8号); 毕节医学高等专科学校校级科研团队项目(BJYZXT202401)

作者简介: 陈晓芳(1986-), 女, 硕士, 副教授, 研究方向: 特色资源分子生物学, E-mail: 672409415@qq.com

通讯作者: 罗婧文(1995-), 女, 硕士, 助理研究员, 研究方向: 食品营养与功能, E-mail: 2876483669@qq.com

rice noodles was 9.03%. The breakage rate was significantly increased by 11.88%, the water absorption rate was significantly increased to 4.24%, the aging degree was higher, and flavor absorption was stronger. However, the breakage rate and RS content (47.40%) were significantly higher than those of ordinary rice noodles (41.51%), and the nutritional value was higher. A relatively large difference in flavor composition was observed between the deodorized spirulina rice noodles and spirulina. Specifically, the flavor compounds of rice products, such as nonanal, hexanal, (Z)-oct-2-enal, decanal, benzaldehyde, and ethyl hexanoate, were retained, and the relative contents of volatile compounds that caused the unpleasant odor in spirulina, such as hexanal, trans, trans-2,4-decadienal, 1-octen-3-ol, β -ionone, and 2,5-dimethylpyrazine, were reduced to 3.99%, 0.47%, 2.44%, 5.02%, and 0.66%. In conclusion, rice noodles with deodorized spirulina exhibited a high breakage rate, but they demonstrated superior cooking-loss rate, flavor absorption, and *in vitro* digestion characteristics as well as unique flavor features that indicated strong potential for broader application.

Key words: rice noodles with spirulina; deodorization; cooking quality; *in vitro* digestion; flavor characteristics

螺旋藻是蓝藻门、蓝藻纲、颤藻科、螺旋藻属的低等原核生物,是最著名的微藻之一^[1],也是目前规模化产量最高的一种微藻^[2],富含藻蓝蛋白、 γ -亚麻酸、多糖、 β -胡萝卜素、维生素 E 及酚类化合物等多种营养成分,具有提升免疫力、降血糖、降血压、护肝^[3]、促进肠道健康等功能^[4],近年来常开发为营养强化食品,已应用于开发多种食品,如保健食品^[5]、面制品^[6]、复配代餐粉^[7]、奶制品、肉制品及饮料^[8],但市场转化率较低,上市产品形式较为单一常为粉末或药片形式^[9],与中国市场的契合度不高。

米粉是我国传统特色食品,是以大米为原料经粉碎、加水、发酵、蒸制等工序制作而成^[10],可分为鲜湿米粉、半干米粉和干米粉,其中,鲜湿米粉因质地柔软、口感顺滑、易于蒸煮及入味,深受消费者及市场欢迎,但其营养成分比较简单,难以满足现代人对健康及丰富饮食的需求^[11]。开发螺旋藻鲜湿米粉,有利于提升传统米粉的营养价值,提升全民身体素质。螺旋藻存在令人不愉悦的腥味,对以此为原料开发的食品感官有不利影响。腥味对豆制品及禽畜制品的不利影响多有研究,采用掩盖、加热、微波、高压、发酵、包埋及超临界 CO₂ 萃取^[12]等方法进行去腥,其中,香辛料去腥技术是一种传统掩盖方法,在烹饪中多有应用,但在食品加工业却鲜见,具有成本低、效果好及工艺简便的优势。香辛料是一类由植物组织或其提取物制成的天然植物原料,不仅可以赋予食物丰富的口味,而且一些香辛料还具有多酚、黄酮等抗氧化活性物质,对于食品中危害物的生成具有抑制作用^[13]。

综上,本文优化螺旋藻米粉的加工工艺,开发脱腥螺旋藻鲜湿米粉,并对其蒸煮品质、质构特性、体外消化及风味特征进行研究,提升鲜湿米粉的营养价

值,丰富其产品种类,为螺旋藻及大米制品产业的发展提供思路及理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

螺旋藻,贵州亿康科技兴农有限公司提供;香辛料,淘宝购买;桂朝米,南陵县新塘米厂;葡萄糖标准品,合肥博美生物科技有限公司;DNS (3,5-二硝基水杨酸),醋酸钠缓冲液,北京酷来博科技有限公司;淀粉葡萄糖苷酶,四川省维克奇生物科技有限公司; α -淀粉酶,上海麦克林生化科技股份有限公司。

1.2 仪器与设备

HS-150 米粉机,河南新锐国际机械设备有限公司;GZX-9070MBE 烘箱,上海博讯实业有限公司医疗设备厂;ILC-S 1000N 质构仪,北京盈盛恒泰科技有限公司;L5S 紫外分光光度计,上海仪电分析仪器有限公司;Pegasus BT 气相色谱高通量飞行时间质谱联用仪,LECO。

1.3 脱腥螺旋藻米粉工艺优化

1.3.1 适宜香辛料筛选

分别称取八角桂皮甘草片等香辛料 0.5 g 放入装有 200 g 蒸馏水的广口瓶中,加盖后沸水浴 15 min,冷却过滤制得质量分数 0.25% 的香辛料水提液,按质量分数 0.1% 的比例称取螺旋藻粉加入混匀,比较不同香辛料提取液对螺旋藻的去腥效果,感官评价参照表 1。综合考虑感官评分及描述,从 80 种香辛料中选取枸杞、桂花、薄荷、柠檬、金樱子、甘草片 6 种香辛料进行下一步研究。

表 1 螺旋藻脱腥效果感官评价表		
Table 1 Sensory evaluation of deodorization effect of spirulina		
项目	指标	评分
综合香气提升度	具有浓郁的芳香气味，令人非常愉悦	4~5
	有较好香气提升效果，气味较好	0~3
	无显著香气提升效果，气味一般可接受	-2~0
	综合气味较差，令人不适	-5~-3
去腥程度	去腥效果显著，无明显腥味或无腥味	9~10
	有一定去腥效果，腥味程度小于原螺旋藻液	6~8
	无显著去腥效果，腥味明显存在	3~5
	无任何去腥效果或腥味程度加重	0~2
螺旋藻风味保留度	螺旋藻味得到极大保留，基本察觉不到香料异味	9~10
	螺旋藻味得到较大保留，香料异味可察觉	6~8
	掩盖了部分螺旋藻味，香料异味度较大	3~5
	基本或完全掩盖了螺旋藻的特征风味	0~2

1.3.2 脱腥工艺优化

单一香辛料的优化以感官评分为指标，确定最佳添加量。复合香辛料优化以感官评分为指标，为避免添加量过高影响螺旋藻及米粉的有益风味，将筛选的香辛料以最佳添加量的一半进行 1:1 复配，选择最佳的复合配比作为最优方案。

1.3.3 米粉工艺优化

将桂朝米在常温下水浸泡 8 h 后过滤，以泡米：水质量比 1:1 打浆，以浆水质量（100 g）为基准，添加小麦淀粉 10 g，添加不同含量螺旋藻（质量分数 0.2%~3.0%），匀速倒入米粉机进行挤压出粉，将刚挤压出的米粉装盘，厚度不超过 4 cm，室温 20 ℃下自然阴干 8 h。脱腥螺旋藻米粉成品置于 4 ℃冰箱，2 d 内完成检测。感官评价标准参考 LS/T 6137-2020《米粉条食用品质感官评价方法》，色泽接受度的评价表参考表 2。以感官评价为主要指标对脱腥螺旋藻米粉工艺进行优化，以感官评价及色泽接受度为指标对螺旋藻添加量（0.2%、0.6%、1%、1.4%、1.8%、2.2%、2.6%、3%）进行单因素优化，以感官评价为指标对米浆细度（20、40、60、80、100 目）及料水比（0.8:1、1:1、1:1.2、1:1.4）进行单因素优化。

以螺旋藻添加量（A）、米浆细度（B）、料水比（C）为研究因素，进行 3 因素 3 水平正交试验，以感官评价为指标，确定脱腥螺旋藻米粉的最佳生产工艺。

1.4 蒸煮品质分析

1.4.1 含水量的检测

参考国家标准 GB 5009.3-2016《食品安全国家标准 食品中水分的测定》进行检测。

表 2 脱腥螺旋藻米粉的色泽接受度		
Table 2 Acceptance of the color of deodorized spirulina rice noodles		
项目	指标	评分
光泽度	米粉表面有光泽	21~30
	米粉表面光泽感较好	11~20
	米粉表面暗淡无光泽	0~10
均匀度	米粉表面上色均匀，不存在深浅不一	21~30
	米粉表面上色较为均匀，少部分地方不均等	11~20
	米粉表面上色不均匀	0~10
总体可接受性	食用欲望大，总体可接受度高	18~40
	食用欲望较大，总体可接受度一般	14~17
	食用欲望小，总体可接受度较低	0~13

表 3 脱腥螺旋藻米粉条件优化正交试验因素与水平
Table 3 Orthogonal test factors and levels for the optimization of conditions for deodorized spirulina rice noodles

水平	A 螺旋藻添加量/%	B 米浆细度/目	C 料水比
1	1	60	0.8:1
2	1.4	80	1:1
3	1.8	100	1:1.2

1.4.2 蒸煮损失率的检测

称取粉条完整的样品，记录样品质量 M_0 ，将样品放入盛有 500 mL 沸水中煮沸 3 min，将粉条捞出，继续将剩下的水煮至近煮干，于 105 ℃烘箱中烘干至恒重，记录干制样品质量为 M_1 。按公式计算蒸煮损失率 M 。

$$M = \frac{M_1}{M_2} \times (1 - W) \times 100\%$$

(1)

式中：
 M ——蒸煮损失率，%；
 M_1 ——煮制水烘干恒重质量，g；
 M_2 ——样品质量，g；
 W ——水分含量，%。

1.4.3 断条率的检测

选取 15 根长度为 10 cm 的无机械损伤的粉条，在 1 000 mL 烧杯中加入 900 mL 水，水沸后放粉条并加盖表面皿，微沸煮熟后，滤去水分，用玻璃棒数其断条数 X ，计算断条率 R 。

$$R = \frac{X}{15} \times 100\%$$

(2)

式中：
 R ——断条率，%；
 X ——断条数，根。

1.4.4 吸水率的检测

取 10 cm 长的米粉，质量记为 m_1 ，100 mL 沸水浴 3 min 后捞出，用滤纸吸干米粉和酸粉表面水分后

称重得 m_2 。

$$X = \frac{m_2}{m_1} \times 100\% \quad (3)$$

式中:

X ——吸水率, %;

m_1 ——脱腥螺旋藻米粉质量, g;

m_2 ——脱腥螺旋藻米粉煮制吸水后质量, g。

1.5 质构分析

选择粗细均匀、无弯曲且无裂纹的米粉样品于沸水中煮 5 min, 将米粉捞出后用蒸馏水淋洗, 沥干水分备用。测试参数如下: 探头选择 P/250, 测前速度 $2 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, 测试速度 $1 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, 测后速度 $1 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, 进行两次压缩, 间隔时间 1 s, 触发力 5 g, 压缩比 40%, 测定硬度、弹性、胶粘性、咀嚼性和内聚性 5 个指标。

1.6 体外消化分析

用 DNS (3,5-二硝基水杨酸) 溶液测葡萄糖标准曲线, 分别取葡萄糖标准溶液 ($1 \text{ mg} \cdot \text{mL}^{-1}$) 0、0.1、0.2、0.3、0.4、0.5、0.6、0.7、0.8 mL 于 25 mL 试管中, 分别标准加入 DNS 试剂 0.75 mL, 沸水浴 2 min, 流水冷却, 用水补足到 15 mL 刻度线。在 540 nm 波长下测定吸光度, 绘制标准曲线。

体外消化特性参照吴依云等^[10]的方法来测定消化率将 200 mg 的螺旋藻米粉和普通米粉分别加入在 2 mL 醋酸钠缓冲溶液中一起分散在 25 mL 离心管中, 在 37°C , $120 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 震荡水浴 20 min, 加入 1 mL 酶解液 (淀粉糖苷酶 $30 \text{ U} \cdot \text{mL}^{-1}$ 和 α -淀粉酶 $120 \text{ U} \cdot \text{mL}^{-1}$) 混匀后反应立即计时。 37°C 、 $120 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 水解 120 min, 在 20、40、60、80、100 和 120 min 时分别取样, 并在沸水浴中灭酶, 然后采用 DNS 法测定上清液中葡萄糖含量, 根据测得的葡萄糖含量求出 RDS、SDS 和 RS 的含量, 具体公式如下:

$$\text{RDS} = (G_{20} - FG) \times \frac{0.9}{TS} \times 100\% \quad (3)$$

$$\text{SDS} = (G_{120} - G_{20}) \times \frac{0.9}{TS} \times 100\% \quad (4)$$

$$\text{RS} = (100 - \text{RDS} - \text{SDS}) \times 100\% \quad (5)$$

式中:

RDS——快消化淀粉, 在小肠中能够快速消化的淀粉, %;

SDS——慢消化淀粉, 在小肠中能够缓慢消化的淀粉, %;

RS——抗性淀粉, 不能在小肠进行吸收的淀粉, %;

G_{20} ——酶解 20 min 后上清液中葡萄糖的含量, mg;

FG——酶处理之前淀粉中游离葡萄糖含量, mg;

G_{120} ——酶解 120 min 后上清液中葡萄糖含量, mg;

TS——样品中总淀粉含量, mg。

1.7 挥发性风味物质分析

顶空固相微萃取: 取 7 g 样品于顶空瓶中, 60°C 水浴 10 min 平衡, 用萃取头进行萃取 30 min 后进样。GC 条件: Agilent DB-WAX 弹性石英毛细管柱 ($30 \text{ m} \times 0.25 \text{ mm} \times 0.25 \mu\text{m}$); 升温程序: 在初始温度 40°C 保持 3 min, 以 $10^\circ\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$ 升至 230°C 保持 6 min; 载气为高纯氦气 (He), 流速为 $1 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$; 进样方式为不分流进样。MS 条件: 电子电离 (Electronic Ionization, EI) 源; 电子能量 70 eV; 离子源温度为 200°C ; 传输线温度为 250°C ; 进样口温度为 250°C ; 检测电压为 1 000 V; 质量扫描范围 40~580 m/z 。采用峰面积归一法定量。

1.8 数据分析

使用 SPSS 26.0 对数据进行单因素 ANOVA 检验 ($\alpha=0.05$), 数据结果以“平均值 $\pm$ 标准差”表示, 在 0.05 水平内有显著性差异的在图表中以不同字母标注, 没有显著性差异的以同一字母标注, 采用 Origin 2021 软件进行绘图。

2 结果与讨论

2.1 脱腥螺旋藻米粉工艺优化

2.1.1 脱腥工艺优化

香辛料可应用于肉制品等食品保鲜, 也可提升其感官品质^[14]。本研究筛选了枸杞、桂花、薄荷、柠檬、金樱子、甘草片 6 种香辛料进行螺旋藻去腥, 其中, 金樱子、薄荷、甘草、桂花及枸杞均是我国传统药食同源中药材。以感官综合评分为指标, 研究不同浓度单一香辛料去腥效果, 结果如图 1 所示。不同浓度单一香辛料水提液对螺旋藻去腥效果显著, 适宜浓度区间、最佳浓度及最高感官评价价值均有差异。单一香辛料对螺旋藻最佳去腥味浓度 (质量分数) 不同, 其中, 金樱子 0.75%, 薄荷 0.5%, 甘草片 0.4%, 桂花 0.5%, 柠檬 0.5%, 枸杞 1%。

为避免香辛料复配后浓度过高, 将单一香辛料最佳浓度 (质量分数) 减半进行复配, 结果如表 4 所示。去腥效果最好的组合是柠檬与甘草片, 感官评分为 24.67 分, 显著优于其他组合。柠檬因其独特的风味在食品加工中应用广泛^[15], 早有研究人员将甘草用于鲢鱼脱腥, 脱腥效果优异且安全无风险^[16]。效果最差的是桂花与薄荷组合, 感官评分为 15.33 分。综上, 选择柠檬 (质量分数 0.25%) 复合甘草片 (质量分数 0.2%) 水提液为螺旋藻去腥最佳工艺。

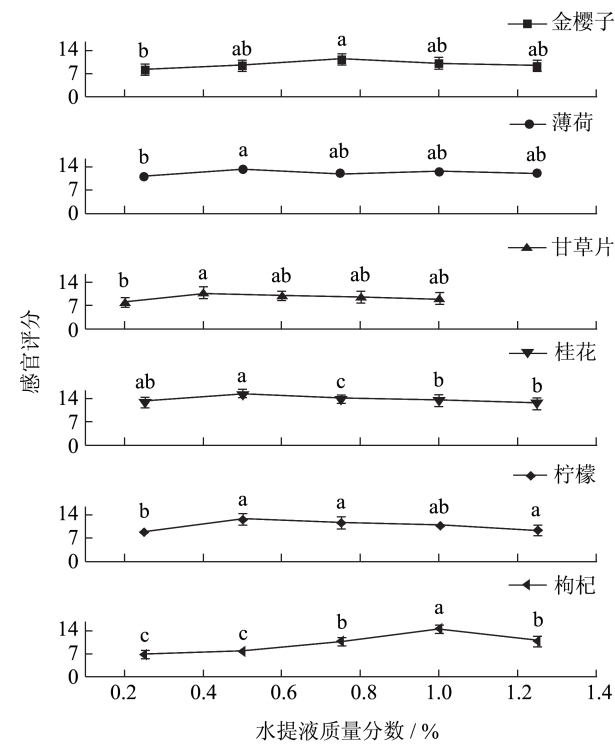


图 1 单一香辛料去腥浓度优化

Fig.1 Optimization of deodorization concentration of single spice

注：图中不同字母表示有显著差异，(P<0.05)。下同。

表 4 香辛料复配去腥工艺优化

Table 4 Optimization of deodorization process of spices compound

序号	组合	感官评分 / 分
1	柠檬 + 桂花	18.67 ± 0.58 ^{cde}
2	柠檬 + 甘草片	24.67 ± 1.15 ^a
3	柠檬 + 薄荷	16.67 ± 1.53 ^{ef}
4	柠檬 + 金樱子	15.67 ± 0.58 ^f
5	柠檬 + 枸杞	20.33 ± 1.53 ^{bcd}
6	桂花 + 甘草片	20.67 ± 1.53 ^{bc}
7	桂花 + 薄荷	15.33 ± 1.53 ^f
8	桂花 + 金樱子	16.67 ± 0.58 ^{ef}
9	桂花 + 枸杞	19.00 ± 1.00 ^{cd}
10	甘草片 + 薄荷	20.67 ± 2.08 ^{bc}
11	甘草片 + 金樱子	19.33 ± 1.53 ^{cd}
12	甘草片 + 枸杞	21.67 ± 1.53 ^b
13	薄荷 + 金樱子	18.33 ± 1.53 ^{de}
14	薄荷 + 枸杞	22.00 ± 2.00 ^b
15	金樱子 + 枸杞	21.67 ± 1.15 ^b

注：表中上标不同字母表示有显著差异，(P<0.05)。下表同。

2.1.2 脱腥螺旋藻米粉工艺优化

对脱腥螺旋藻米粉的螺旋藻添加量（质量分数 0.2%~3%）进行单因素优化，米粉的外观形貌如图 2

所示，感官评价及色泽接受度如图 3 所示。随着螺旋藻添加量增加，米粉机出粉速度减慢，添加量高于质量分数 2.2% 后粘度较大，容易堵住出粉口，较难形成长条米粉。随着螺旋藻添加量质量分数从 0.2% 增加到 1.4%，感官评分由 62.38 分增加到 83.33 分，此后逐渐下降，螺旋藻添加量为 3% 时感官评分最低为 53.33。在螺旋藻添加量质量分数为 1% 时色泽接受度最高为 92.67，其次为 1.4% 时，接受度为 90.33。综合考虑感官评价及螺旋藻添加量色泽接受度，我们选择螺旋藻添加量质量分数为 1.4% 进行脱腥螺旋藻米粉的制作。

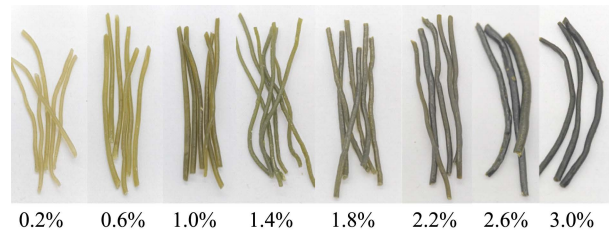


图 2 不同螺旋藻添加量对米粉外观形貌的影响

Fig.2 Influence of different addition amounts of spirulina on the appearance and morphology of rice flour

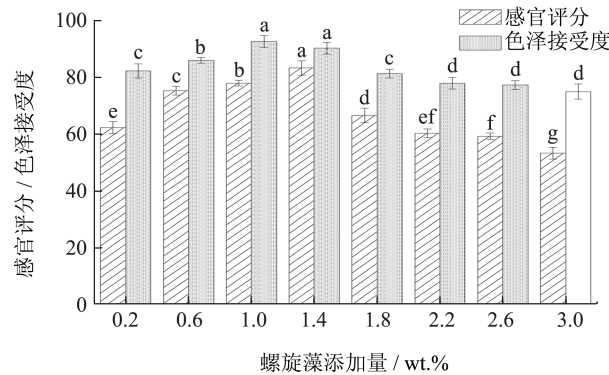


图 3 不同螺旋藻添加量对脱腥螺旋藻米粉感官评价及色泽接受度的影响

Fig.3 Effects of different spirulina additions on sensory evaluation and color acceptance of deodorized spirulina rice flour

米浆细度及料水比对米粉感官评价的影响如图 4 所示。随着米浆细度降低，米粉的口感更细腻，感官评价价值越高，米浆细度在 60 目时与 40 目及 80 目均无显著差异，但细度高于 60 后感官评价无显著差异，这主要是由于磨浆粒度越细，蒸粉时米浆越易吸水膨胀，糊化均匀，易形成致密的凝胶网络结构^[17]。综合考虑能耗，米浆细度在 80 目时最佳。随着料水比的降低，感官评价呈现先上升后降低的趋势，主要是由于在米粉挤压熟化的过程中，水分含量过低不能完全熟化，水分含量过高米粉含水量较大影响其品质甚至不能成型。因此，最佳米浆细度为 80 目，料水比为 1:1。

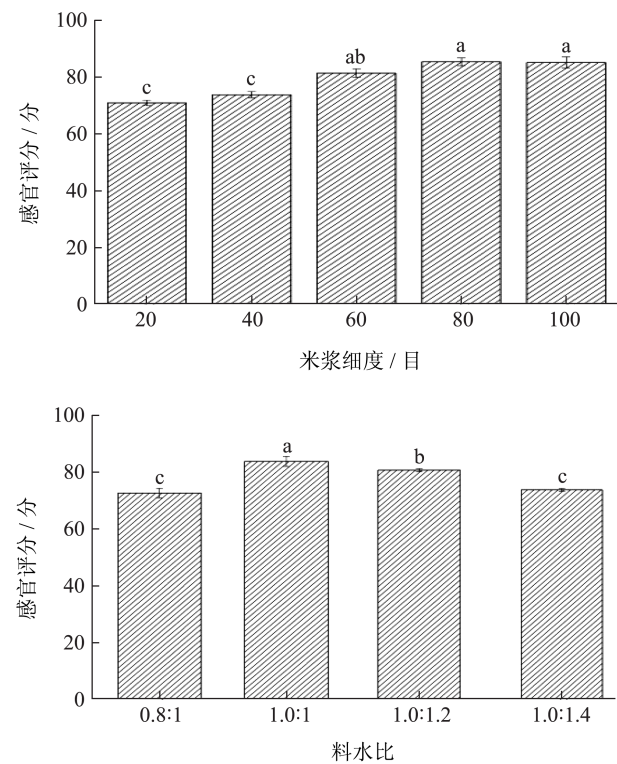


图 4 脱腥螺旋藻米粉米浆细度及料水比工艺优化

Fig.4 Process optimization for the fineness and the ratio of material to water in deodorization of deodorized spirulina rice flour

由表 5 可知，通过极差分析得到影响脱腥螺旋藻米粉感官评价的因素从高到低依次为料水比>螺旋藻添加量>米浆细度，最佳提取工艺条件组合为 A2B2C2。经 3 次平行验证试验可知，脱腥螺旋藻米粉感官评价为 89 分。因此，最佳工艺条件为螺旋藻添加量 1.4%，米浆细度 80 目，料水比 1:1。

表 5 脱腥螺旋藻米粉工艺优化正交试验结果

Table 5 Results of orthogonal tests for process optimization of deodorized spirulina rice noodles

试验号	A	B	C	感官评价
1	1	1	1	80.18 ± 0.9
2	1	2	2	86.63 ± 1.44
3	1	3	3	78.17 ± 1.03
4	2	1	3	80.65 ± 1.07
5	2	2	1	88.23 ± 0.53
6	2	3	2	85.07 ± 2.11
7	3	1	2	80.98 ± 2.22
8	3	2	3	79.34 ± 1.67
9	3	3	1	79.84 ± 1.95
k1	81.66	80.60	82.75	
k2	84.65	84.73	84.23	
k3	80.05	81.03	79.39	
R	4.60	3.71	4.84	

2.2 脱腥螺旋藻米粉蒸煮品质及质构特性

蒸熟损失率、断条率与吸水率是用于反应米粉在煮制过程中的易碎、糊汤及入味程度，即代表米粉的蒸煮品质^[18]。加螺旋藻脱腥米粉的蒸煮品质指标如图 5 所示，蒸煮损失率为 9.03%，比未加螺旋藻脱腥米粉（12.21%）显著降低，这可能是由于添加螺旋藻能够优化米粉蛋白淀粉比例，有利于米粉凝胶特性^[19]。鲜湿米粉断条尚无统一的国标。与未加螺旋藻脱腥米粉相比，加螺旋藻脱腥米粉断条率为 15.06%，显著增加了 11.88%，纯大米鲜湿米粉的断条率在 7.3%~24.71% 之间^[20,21]，与此接近。随着磨浆粒度越小，鲜湿米粉的综合品质越高，螺旋藻粉的细度在 80 目以上，与工艺优化结果接近，因此，影响其断条率的主要因素不是细度，而是由于米粉制作过程中高温或 pH 降低使藻蛋白变性，影响淀粉凝胶中连续相与分散相的相互作用即老化过程^[10]，或是由于选用柠檬去腥，造成微酸性环境，对凝胶结构有影响^[22]。与米粉相比，脱腥螺旋藻米粉吸水率显著增加为 4.24%，表明添加去腥螺旋藻有利于米粉增加入味性，这是由于螺旋藻蛋白的亲水基团在蒸煮过程中快速吸收水分^[23]。综上所述，添加脱腥螺旋藻米粉会影响米粉凝胶结构及老化过程，增加断条率及入味性，降低其蒸煮损失率。

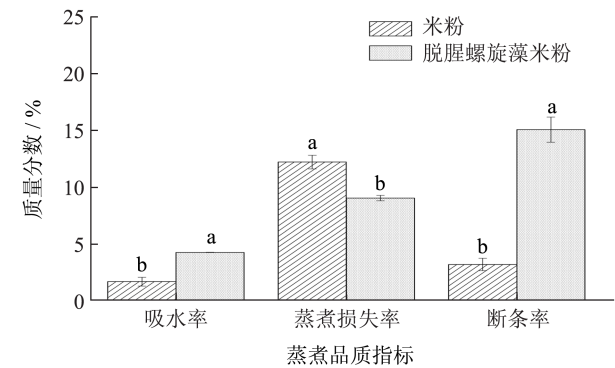


图 5 脱腥螺旋藻米粉蒸煮品质

Fig.5 Cooking quality of deodorized spirulina rice noodles

质构是通过模拟牙齿咬合对样品硬度、粘附性、内聚性、弹性、胶粘性及咀嚼性进行评价。硬度是样品断裂需要的最大力，咀嚼性表示咀嚼样品所需能量，弹性则反映样品的抗变形能力。如表 6 所示，脱腥螺旋藻米粉与普通米粉品质有显著差异。脱腥螺旋藻米粉的硬度、粘附性、弹性、胶粘性 > 咀嚼性显著高于普通米粉，表明脱腥螺旋藻米粉的老化程度更高，这与蒸煮品质的断条率较高的结果一致。添加脱腥螺旋藻有助于提升米粉的弹性、胶粘性 & 粘附性可能是由于螺旋藻蛋白的特性。普通米粉的内聚性优于脱腥螺旋藻米粉，表明淀粉分子间氢键作用力更强^[10]。

表 6 脱腥螺旋藻米粉质构分析

Table 6 Texture analysis of deodorized spirulina rice flour

样品	硬度 2/N	粘附性/N·mm	内聚性/Ratio	弹性/mm	胶粘性/N	咀嚼性/mJ
脱腥螺旋藻米粉	82.80 ± 8.70 ^a	1.12 ± 0.15 ^a	0.53 ± 0.06 ^b	1.50 ± 0.51 ^a	50.93 ± 7.83 ^a	87.60 ± 4.67 ^a
米粉	41.10 ± 7.71 ^b	0.31 ± 0.17 ^b	0.63 ± 0.06 ^a	1.00 ± 0.08 ^b	28.03 ± 7.05 ^b	28.00 ± 2.93 ^b

2.3 脱腥螺旋藻米粉体外消化特征

通常情况下，体外消化根据消化速率及程度的不同分为快消化淀粉（RDS）、慢消化淀粉（SDS）和抗性淀粉（RS）。RS 不能被小肠吸收，能调节肠道菌群结构，食用后血糖不会快速升高^[24]。如图 6 所示，脱腥螺旋藻米粉与米粉淀粉组成有显著差异，脱腥螺旋藻米粉的 RS 含量质量分数（47.40%）显著高于普通米粉（41.51%），这表明脱腥螺旋藻米粉抗性淀粉含量更高，营养价值更优，这可能是由于螺旋藻蛋白与淀粉的相互作用，蛋白质含量越高，淀粉的水解抗性越强^[25]。综上所述，添加了脱腥螺旋藻的米粉能够显著提升米粉消化性能，提高米粉的营养保健价值。

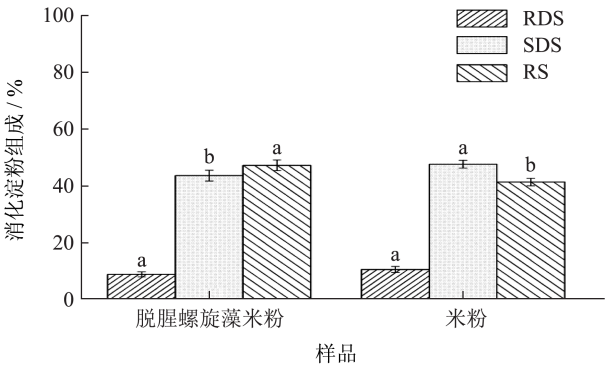


图 6 脱腥螺旋藻米粉的淀粉组成

Fig.6 Starch composition of deodorized spirulina rice flour

2.4 脱腥螺旋藻米粉挥发性风味物质

采用 GC-MS 技术对脱腥螺旋藻米粉及螺旋藻挥发性风味成分进行分析，如图 7 及表 7 所示，共检测出 81 种挥发性风味物质，螺旋藻米粉有 61 种，螺旋藻有 46 种，其中，醛类 14 种，酯类 10 种，醇类 11 种，酮类 20 种，吡嗪类 7 种，其他类 19 种。脱腥螺旋藻米粉以醛类、酮类及醇类相对较高，分别有 14 种、12 种及 11 种，相对含量分别为 50.31%、14.31% 及 9.64%，热加工米饭以酮类、醛类及酯类相对含量较高，表明大米经热加工后酮类及醛类为占比最高的挥发性成分。

醛类化合物主要来源于脂肪酸尤其是不饱和脂肪酸的降解与热氧化^[26]。在脱腥螺旋藻米粉中，相对含量较高的为壬醛、己醛、(2Z)-2-辛烯醛、癸醛及苯甲醛，在大米及米饭制品挥发性成分中已有检测且对风味有贡献，其中己醛为生油脂味，壬醛为玫瑰、柑橘香，

E-2-辛烯醛为脂肪肉类香气，癸醛为橘子香，苯甲醛为甜杏仁香。螺旋藻的醛类物质占比相对较低，己醛及反,反-2,4-癸二烯醛相对含量较高分别为 5.56% 及 3.76%，两者均是螺旋藻不良风味的来源^[27]。己醛及反,反-2,4-癸二烯醛在螺旋藻米粉中相对含量降低，对风味的贡献度也降低，表明脱腥螺旋藻中醛类异味减弱。

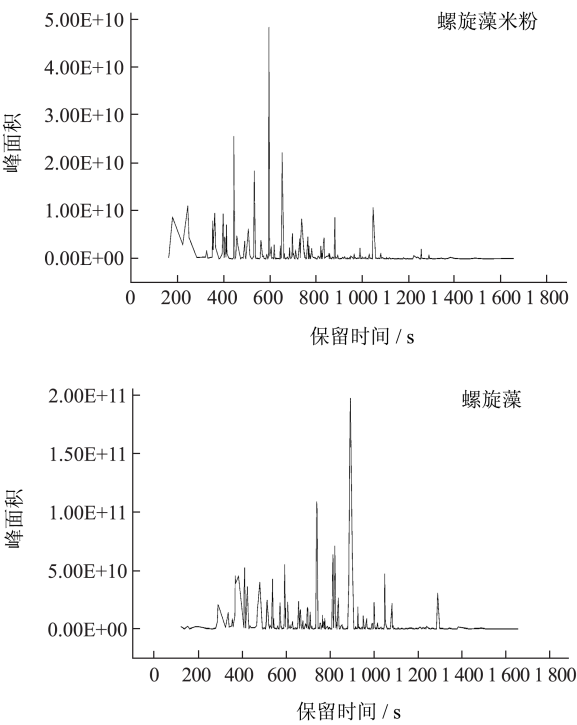


图 7 脱腥螺旋藻米粉与螺旋藻挥发性风味物质离子流图

Fig.7 Ion current diagrams of volatile flavor substances in deodorized spirulina rice flour and spirulina

酯类及醇类物质多表现为花香与果香。脱腥螺旋藻米粉及米粉中酯类物质的相对含量较低，其中己酸乙酯已被证实对米饭风味有重要贡献^[26]，表明脱腥螺旋藻米粉保留了米制品的特征风味。此外，1-辛烯-3-醇也是螺旋藻异味的主要来源^[28]，在螺旋藻及脱腥螺旋藻米粉中均有检测，这可能是米粉中少有螺旋藻异味的来源。

酮类物质主要由蛋白降解产生，多为果香、焦糖或坚果味。酮类物质在螺旋藻挥发性风味成分中占比较高，其中 β -紫罗兰酮是螺旋藻特征风味成分已有证实，在脱腥螺旋藻米粉中有所保留，但含量较低，可能是米粉中少有螺旋藻异味的来源。

表 7 脱腥螺旋藻米粉及螺旋藻挥发性成分分析

Table 7 Analysis of deodorized spirulina rice flour and spirulina volatile components

序号	分类	名称	保留时间/s	英文名	CAS 号	相对含量/%		
						螺旋藻粉	螺旋藻	
1	醛类	己醛	368.26	Hexanal	66-25-1	3.99	5.56	
2		庚醛	460.517	Heptanal	111-71-7	1.29	0.00	
3		辛醛	559.666	Octanal	124-13-0	1.78	0.00	
4		(2Z)-2-庚烯醛	595.078	2-Heptenal, (Z)-	57266-86-1	22.75	0.00	
5		天然壬醛	651.847	Nonanal	124-19-6	10.41	0.00	
6		5-乙基-1-环戊烯-1-甲醛	674.823	5-Ethylcyclopent-1-enecarboxaldehyde	36431-60-4	0.17	0.00	
7		反式-2-辛烯醛	684.295	2-Octenal,(E)-	2548-87-0	1.05	0.00	
8		苯甲醛	764.419	Benzaldehyde	100-52-7	2.16	1.62	
9		癸醛	737.364	Decanal	112-31-2	3.72	0.00	
10		十一醛	817.336	Undecanal	112-44-7	0.22	0.00	
11		β -环柠檬醛	834.344	1-Cyclohexene-1-carboxaldehyde, 2,6,6-trimethyl-	432-25-7	2.04	0.00	
12		邻甲基苯甲醛	838.773	Benzaldehyde, 2-methyl-	529-20-4	0.14	0.00	
13		反,反-2,4-癸二烯醛	964.591	2,4-Decadienal, (E,E)-	25152-84-5	0.47	3.76	
14		金合欢基乙醛	1242.6	4,8,12-Tetradecatrienal, 5,9,13-trimethyl-	66408-55-7	0.13	0.00	
						小计	50.31	10.94
15	酯类	丁酸丁酯	489.844	Butanoic acid, butyl ester	109-21-7	1.71	0.11	
16		己酸乙酯	505.124	Hexanoic acid, ethyl ester	123-66-0	2.94	0.00	
17		庚酸烯丙酯	737.758	Oxalic acid, allyl heptyl ester	142-19-8	0.00	15.50	
18		癸酸乙酯	839.257	Decanoic acid, ethyl ester	110-38-3	0.14	0.00	
19		乙酸苯乙酯	967.675	Acetic acid, 2-phenylethyl ester	103-45-7	0.15	0.00	
20		2,2,4-三甲基-1,3-戊二醇双异丁酸酯	1 002.21	2,2,4-Trimethyl-1,3-pentanediol diisobutyrate	6846-50-0	0.03	0.13	
21		γ -壬内酯	1 105.44	2(3H)-Furanone, dihydro-5-pentyl-	104-61-0	0.15	0.00	
22		棕榈酸乙酯	1 222.97	Hexadecanoic acid, ethyl ester	628-97-7	0.31	0.16	
23		邻苯二甲酸二异丁酯	1 381.98	1,2-Benzenedicarboxylic acid, bis(2-methylpropyl) ester	84-69-5	0.12	0.23	
24		邻苯二甲酸-2-乙基己酯丁酯	1 488.3	1,2-Benzenedicarboxylic acid, butyl 2-ethylhexyl ester	85-69-8	0.00	0.24	
						小计	5.54	16.37
25	醇类	戊醇	525.983	1-Pentanol	71-41-0	0.24	0.41	
26		正己醇	617.269	1-Hexanol	111-27-3	1.37	0.41	
27		1-辛烯-3-醇	697.349	1-Octen-3-ol	3391-86-4	2.44	2.57	
28		庚醇	701.432	1-Heptanol	111-70-6	0.53	0.00	
29		2-乙基己醇	728.813	1-Hexanol, 2-ethyl-	104-76-7	1.96	0.00	
30		辛醇	780.496	1-Octanol	111-87-5	0.98	0.00	
31		反式-2-辛烯醇	824.066	2-Octen-1-ol, (E)-	18409-17-1	0.79	1.36	
32		(+/-)-薄荷醇	843.718	Cyclohexanol, 5-methyl-2-(1-methylethyl)-, (1 α ,2 β ,5 α)-(±)-	15356-70-4	0.24	0.00	
33		壬醇	854.992	1-Nonanol	143-08-8	0.53	0.00	
34		苯甲醇	1 007.62	Benzyl alcohol	100-51-6	0.09	0.11	
35	β -苯乙醇	1 030.2	Phenylethyl Alcohol	60-12-8	0.47	0.00		
						小计	9.64	4.87

续表7

序号	分类	名称	保留时间/s	英文名	CAS 号	相对含量/%	
						螺旋藻粉	螺旋藻
36	酮类	丙酮酸	243.686	Propanoic acid, 2-oxo-	127-17-3	5.19	0.00
37		2-庚酮	464.777	2-Heptanone	110-43-0	0.00	0.37
38		6-甲基-2-庚酮	512.427	2-Heptanone, 6-methyl-	928-68-7	0.30	1.57
39		仲辛酮	560.646	2-Octanone	111-13-7	0.00	0.37
40		1-辛烯-3-酮	575.842	1-Octen-3-one	4312-99-6	0.00	0.35
41		2,2,6-三甲基环己酮	585.659	Cyclohexanone, 2,2,6-trimethyl-	2408-37-9	0.44	0.83
42		2,3-辛二酮	595.929	2,3-Octanedione	585-25-1	0.18	0.28
43		甲基庚烯酮	605.065	5-Hepten-2-one, 6-methyl-	110-93-0	1.15	2.59
44		5-甲基-5-异丙基-3-庚炔-2,6-二酮	664.143	3-Heptyne-2,6-dione, 5-methyl-5-(1-methylethyl)-	63922-44-1	0.00	2.32
45		3-辛烯-2-酮	667.073	3-Octen-2-one	1669-44-9	0.06	0.29
46		3-十一酮	787.268	3-Undecanone	2216-87-7	0.13	0.00
47		6-甲基-3,5-戊二烯-2-酮	813.766	6-Methyl-3,5-heptadiene-2-one	1604-28-0	0.00	1.31
48		苯乙酮	857.997	Acetophenone	98-86-2	0.51	0.00
49		2,6,6-三甲基-环己烯-1,4-二酮	886.655	2,6,6-Trimethyl-2-cyclohexene-1,4-dione	1125-21-9	0.00	13.36
50		右旋香芹酮	915.291	D-Carvone	2244-16-8	0.14	0.00
51		2,6-二甲基-2,6-十一碳二烯-10-酮	972.537	5,9-Undecadien-2-one, 6,10-dimethyl-, (E)-	3796-70-1	1.02	0.00
52		6,10-二甲基-5,9-十一双烯-2-酮	990.441	5,9-Undecadien-2-one, 6,10-dimethyl-	689-67-8	0.00	0.63
53		(E,E)-3,5-壬二烯-2-酮	1014.8	Nona-3,5-dien-2-one	80387-31-1	0.17	0.00
54		β -紫罗酮	1 047.72	trans- β -Ionone	79-77-6	5.02	6.71
55		4-(2,6,6-三甲基-1,3-环己二烯-1-基)-3-丁烯-2-酮	1 085.4	4-(2,6,6-Trimethylcyclohexa-1,3-dienyl) but-3-en-2-one	1203-08-3	0.00	0.38
小计						14.31	31.34
56	吡嗪类	2-甲基吡嗪	542.056	Pyrazine, methyl-	109-08-0	0.00	1.26
57		2,5-二甲基吡嗪	593.375	Pyrazine, 2,5-dimethyl-	123-32-0	0.66	7.82
58		2,6-二甲基吡嗪	597.402	Pyrazine, 2,6-dimethyl-	108-50-9	0.00	2.48
59		2,3-二甲基吡嗪	613.407	Pyrazine, 2,3-dimethyl-	5910-89-4	0.00	0.13
60		2-乙基-5-甲基吡嗪	651.622	Pyrazine, 2-ethyl-5-methyl-	13360-64-0	0.00	0.12
61		2,3,5-三甲基吡嗪	661.348	Pyrazine, trimethyl-	14667-55-1	0.00	1.85
62		3-乙基-2,5-二甲基吡嗪	694.829	Pyrazine,3-ethyl-2,5-dimethyl-	13360-65-1	0.21	2.48
小计						0.87	16.13

续表7

序号	分类	名称	保留时间/s	英文名	CAS 号	相对含量/%	
						螺旋藻粉	螺旋藻
63	其他类	二甲基二硫	351.252	Disulfide,dimethyl	624-92-0	3.71	0.00
64		乙基苯	396.338	Ethylbenzene	100-41-4	4.41	0.00
65		焦化二甲苯	410.033	p-Xylene	106-42-3	2.14	0.00
66		松油烯	433.519	1,3-Cyclohexadiene, 1-methyl-4-(1-methylethyl)-	99-86-5	0.00	0.38
67		异丙苯	441.92	Benzene, (1-methylethyl)-	98-82-8	0.17	0.00
68		邻二甲苯	455.749	o-Xylene	95-47-6	2.22	2.05
69		3-乙基甲苯	494.608	Benzene, 1-ethyl-3-methyl-	620-14-4	0.02	7.45
70		2-正戊基呋喃	500.238	Furan, 2-pentyl-	3777-69-3	1.37	3.42
71		丙烯基苯	536.515	Benzene, 2-propenyl-	300-57-2	0.16	0.00
72		5-丁基-1,3-环己二烯	560.35	1,3-Cyclohexadiene, 5-butyl-	30168-57-1	1.78	0.00
73		2-乙基-4,5-二甲基苯酚	675.248	Phenol, 2-ethyl-4,5-dimethyl-	2219-78-5	0.00	0.94
74		醋酸	710.058	Acetic acid	64-19-7	0.84	2.01
75		1-十五碳烯	755.987	1-Pentadecene	13360-61-7	0.00	0.64
76		2,6-二氯甲苯	768.671	Benzene, 1,3-dichloro-2-methyl-	118-69-4	1.21	0.00
77		1-十六烯	845.233	Cetene	629-73-2	0.00	0.82
78		异戊酸	868.984	Butanoic acid, 3-methyl-	503-74-2	0.18	0.02
79		E-1,6-十一二烯	925.736	E-1,6-Undecadiene	7493-07-2	0.00	2.62
80		2,6-二叔丁基对甲基苯酚	1 026.96	Butylated Hydroxytoluene	128-37-0	0.21	0.00
81		2,4-二特丁基苯酚	1 255.51	2,4-Di-tert-butylphenol	96-76-4	0.90	0.00
小计						19.32	20.35

吡嗪常表现为坚果香及烘烤香^[28]，螺旋藻中吡嗪类化合物相对含量较高，可能是螺旋藻在干制过程中产生^[29]。2,5-二甲基吡嗪相对含量为 7.82%，描述为焙烤味、坚果味、霉味和泥土味，含量远超于阈值即会有霉味、泥土不良风味^[30]。

因此，脱腥螺旋米粉与螺旋藻风味组成差异较大，即保留了米制品的壬醛、己醛、(2Z)-2-辛烯醛、癸醛、苯甲醛及己酸乙酯等风味成分，导致螺旋藻异味的己醛、反,反-2,4-癸二烯醛、1-辛烯-3-醇、β-紫罗兰酮及 2,5-二甲基吡嗪等挥发性成分相对含量降低。

3 结论

柠檬（质量分数 0.25%）复配甘草（质量分数 0.2%）水提液对螺旋藻去腥感官评分值最高为 24.67 分，螺旋藻添加量质量分数 1.4% 时感官评分及色泽接受度最高分别为 83.33 和 90.33 分，优化工艺为螺旋藻添加量 1.4%，米浆细度 80 目，料水比 1:1。脱腥螺旋藻米粉蒸煮损失率 9.03%，但断条率（15.06%）显著高于普通米粉（3.18%），是因为硬度、粘附性、弹性、胶粘性、与咀嚼性高于普通米粉，老化程度更高，增加了 11.88%，吸水率显著增加为 4.24%，入味性更

强。RS 质量分数为 47.40%，高于普通米粉的质量分数 41.51%，营养价值更高。在脱腥螺旋藻米粉及螺旋藻中，共检测出 81 种挥发性风味物质，脱腥螺旋米粉与螺旋藻差风味组成差异较大，即保留了米制品的壬醛、己醛、(2Z)-2-辛烯醛、癸醛、苯甲醛及己酸乙酯等风味成分，导致螺旋藻异味的己醛、反,反-2,4-癸二烯醛、1-辛烯-3-醇、β-紫罗兰酮及 2,5-二甲基吡嗪等挥发性成分相对含量降低，整体风味品质有提升。

参考文献

[1] WANG M, LU X, ZHENG X, et al. Rheological and physicochemical properties of *Spirulina platensis* residues-based inks for extrusion 3D food printing [J]. Food Research International, 2023, 169: 112823.

[2] ALRASHEEDI A A, BASNAWI I A, ALTHAIBAN A M. Effects of *Spirulina platensis* microalgae on renal function and antioxidant defence in rats with streptozotocin-induced diabetes [J]. Journal of Functional Foods, 2024, 122: 106485.

[3] CHALOULAKOU S, LYMPAKI F, TSITSOU S, et al. The effect of different doses of spirulina on glucose metabolism, lipid profile and blood pressure: A systematic review and meta-analysis of randomized controlled trials [J]. Clinical Nutrition ESPEN, 2024, 63: 1129-1130.

[4] 魏艳丽,姜国庆,彭坚,等.螺旋藻的营养健康功能及在食品中应用研究进展[J].食品工业科技,2022,43(8):406-415.

- [5] LI X, FENG J, LV J, et al. Optimization of the preparation process of Spirulina blended liquor and Spirulina fermented wine, analysis of volatile components and *in vitro* antioxidant study [J]. Journal of Food Science, 2024, 89(11): 7228-7243.
- [6] TOMMASO F, CATERINA C, LEONARDO C. Pasta goes green: Consumer preferences for spirulina-enriched pasta in Italy [J]. Algal Research, 2023, 75: 103275.
- [7] YAHSI Y, SENGUN I. Development of fruit-based drinks fortified with probiotics, *Spirulina platensis* and pea protein [J]. Journal of Food Measurement and Characterization, 2024, 18: 9290-9306.
- [8] 闫新路,刘倩倩,侯庆安,等.微藻的功能特性及其在食品中的应用研究进展[J].食品工业科技,2024,45(2):392-400.
- [9] ENDER D A, NILAY S. The prevention role of *Spirulina platensis* (*Arthrospira platensis*) on intestinal health [J]. Food Science and Human Wellness, 2022, 5: 011.
- [10] 吴依云,刘容,覃香妹,等.不同淀粉添加和老化时间对干米粉品质的影响[J].食品研究与开发,2024,45(9):62-66,133.
- [11] XUE Y, CHEN J, WANG L, et al. Impact of *Lactobacillus* fermentation on mung bean Protein's binding to beany flavor: Mechanisms and structural changes [J]. LWT, 2025, 218: 117450.
- [12] TANG M, LIU X, YU Y, et al. Deodorization mechanism of the main aroma compounds on the fishy odor in boiled fish during heating [J]. Food Chemistry, 2024, 465(Pt 2): 142179.
- [13] PARMARK B, MOHITES A, PATHANI D, et al. The use of herbs and spices in fish preservation at chilled temperature storage: opportunities and challenges [J]. International Journal of Food Science & Technology, 2024, 59(10): 6758-6768.
- [14] 张浩,高天珑,易宇文,等.基于电子鼻和气相色谱-离子迁移谱技术分析香辛料对鱼香酱汁风味的影响[J].食品工业科技,2025, 46(9):264-274.
- [15] ISHA D, KAUR R M, ARASHDEEP S. Citric acid crosslinked ternary blended (polyvinyl alcohol, lignin, lemongrass essential oil/nanoemulsions) biopolymeric hydrogel films: structural, functional, antioxidant, antifungal and biodegradable properties [J]. Journal of Food Measurement and Characterization, 2023, 17(4): 3774-3788.
- [16] 张喜才,王焱,胡俊丽,等.绿茶和甘草对鲢鱼脱腥的效果研究及工艺优化[J].荆楚理工学院学报,2024,39(4):40-46,54.
- [17] 邱展英,雷婉莹,吴卫国,等.配米加工鲜湿米粉工艺研究[J].中国粮油学报,2021,36(7):6-12,19.
- [18] 李佳洋,王馨远,殷丽君,等.小麦水溶性阿拉伯木聚糖对大米粉加工特性及鲜湿米粉食用品质的影响[J].食品工业科技, 2025, 46(5):56-62.
- [19] 罗永丹.鲜湿方便米粉的关键生产工艺及其对米粉品质影响的机理研究[D].南宁:广西大学,2019.
- [20] 陶醉,谢岚,包劲松,等.玉米淀粉对鲜湿米粉品质的影响[J].食品与机械,2019,35(1):181-185.
- [21] 刘昭明,高晓惠,郭雪梅,等.红茶粉对鲜湿米粉品质的影响[J].中国粮油学报,2024,39(10):37-43.
- [22] 王慧云,赵阳,陈海华,等.食盐及pH对马铃薯淀粉-亲水胶体体系物性的影响[J].中国粮油学报,2015,30(9):39-44.
- [23] 徐昇,赵香香,刘改改,等.基于挤压技术的SPI添加对大米粉及米面条品质探究[J].中国食品添加剂,2023,34(12):136-146.
- [24] HUANG M, KENNEDY J F, LI B, et al. Characters of rice starch gel modified by gellan, carrageenan, and glucomannan: a texture profile analysis study [J]. Carbohydrate Polymers, 2007, 69(3): 411-418.
- [25] NIU G, YOU G, LIU X. Interactions of hsian-tsao polysaccharide with corn starch to reduce its *in vitro* digestibility [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 265(P1): 130951.
- [26] 李盼盼,郭瑞,何保山,等.稻谷加工过程中挥发性风味物质的变化趋势[J].中国粮油学报,2025,40(4):15-22.
- [27] 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):10.
- [28] CHEN Y, WANG X, GAO Y, et al. Effect of microwave and conduction heating on the adsorption ability of myofibrillar protein to pyrazine flavor compounds [J]. Food Bioscience, 2024, 59: 104127.
- [29] NARMELAA, SAMANEH E, RAMIN M, et al. Effects of roasting on alkylpyrazin compounds and properties of cocoa powder [J]. Journal of Food Science and Technology, 2022, 60(2): 572-580.
- [30] 高雅鑫,张蒙冉,侯丽真,等.纳豆不良风味的研究进展[J].食品工业科技,2022,43(1):6.