

响应面法坛紫菜类菌孢素氨基酸(MAAs)超声辅助提取工艺优化

赵永斌¹, 钟嘉珑¹, 刘亦菲¹, 吴俊颀², 郭子鑫¹, 李 伟^{1*}, 陈福荣^{1*}

¹聊城大学东昌学院化学与生物系, 山东 聊城

²广州华商学院人工智能学院, 广东 广州

收稿日期: 2025年11月19日; 录用日期: 2025年12月10日; 发布日期: 2025年12月23日

摘 要

为优化坛紫菜(*Pyropia haitanensis*)中类菌孢素氨基酸(Mycosporine-like Amino Acids, MAAs)的提取工艺, 采用响应面法系统优化超声提取工艺参数, 重点考察超声能量密度(35%~45%)、提取时间(30~90 min)及料液比(1:25~1:45 g·mL⁻¹)对提取效果的影响, 并通过高效液相色谱-质谱联用(High Performance Liquid Chromatography-tandem Mass Spectrometry, HPLC-MS/MS)对MAAs组分进行分离鉴定。结果表明, 坛紫菜中主要含有Shinorine和Porphyra-334两种特征性MAAs, 均具有典型的紫外吸收特性; 确定的最佳提取工艺条件为: 以39%乙醇为提取溶剂, 在35℃恒温水浴环境下, 按1:35的料液比混合, 采用500 W功率超声(能量密度40%)连续处理60 min, 此时MAAs得率可达14.63% ± 0.32%。与传统水提法相比, 该工艺不仅使提取时间缩短33.3%, 溶剂消耗量降低20%, 还显著提升了得率17.3% (P < 0.05)。该超声辅助提取工艺为MAAs在防晒化妆品及功能食品领域的应用提供参考。

关键词

坛紫菜, 类菌孢素氨基酸, 超声提取, 响应面法, 工艺优化

Optimization of Ultrasound-Assisted Extraction Process for Mycosporine-Like Amino Acids (MAAs) from *Pyropia haitanensis* by Response Surface Methodology (RSM)

Yongbin Zhao¹, Jialong Zhong¹, Yifei Liu¹, Junjie Wu², Zixin Guo¹, Wei Li^{1*}, Furong Chen^{1*}

¹Department of Chemistry and Biology, Liaocheng University Dongchang College, Liaocheng Shandong

²School of Artificial Intelligence, Guangzhou Huashang College, Guangzhou Guangdong

*共同通讯作者。

文章引用: 赵永斌, 钟嘉珑, 刘亦菲, 吴俊颀, 郭子鑫, 李伟, 陈福荣. 响应面法坛紫菜类菌孢素氨基酸(MAAs)超声辅助提取工艺优化[J]. 水产研究, 2025, 12(4): 259-270. DOI: 10.12677/ojfr.2025.124029

Abstract

To optimize the extraction process of Mycosporine-like Amino Acids (MAAs) from *Pyropia haitanensis*, response surface methodology was employed to systematically optimize the ultrasonic extraction parameters. The effects of ultrasonic energy density (35%~45%), extraction time (30~90 min), and solid-liquid ratio (1:25~1:45 g·mL⁻¹) on extraction efficiency were focused on, and the MAA components were separated and identified by High-Performance Liquid Chromatography-tandem Mass Spectrometry (HPLC-MS/MS). The results showed that *Pyropia haitanensis* mainly contained two characteristic MAAs, namely Shinorine and Porphyrin-334, both of which exhibited typical ultraviolet absorption properties. The optimal ultrasonic extraction conditions were determined as follows: 39% ethanol as the extraction solvent, mixing the sample with the solvent at a solid-liquid ratio of 1:35 in a constant temperature water bath at 35°C, and continuous ultrasonic treatment at 500 W power (corresponding to 40% energy density) for 60 min. Under these conditions, the MAA yield reached 14.63% ± 0.32%. Compared with the traditional water extraction method, this process not only shortened the extraction time by 33.3% and reduced the solvent consumption by 20%, but also significantly increased the MAA yield by 17.3% ($P < 0.05$). This ultrasonic-assisted extraction process provides a reference for the application of MAAs in the fields of sunscreen cosmetics and functional foods.

Keywords

Pyropia haitanensis, Mycosporine-Like Amino Acids, Ultrasonic Extraction, Response Surface Methodology, Process Optimization

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

臭氧层衰减引发的紫外线辐射生物学效应与应对策略研究,已成为全球关注的重要科学议题[1]。UV-B 波段紫外线凭借较强的穿透能力,可诱导表皮细胞 DNA 光化学损伤并抑制免疫功能[2] [3],对生态系统稳定和公共卫生安全构成双重威胁[4]。在环境治理层面,人工合成紫外线防护剂引发的次生污染问题促使科研界将目光转向天然产物的开发与应用[5]。

类菌胞素氨基酸(MAAs)作为海洋生物长期进化形成的分子防御体系,其独特的环状共轭结构赋予其在 UV-A/UV-B 波段的高效光子捕获能力[6]。现有研究表明,红藻门物种中 MAAs 的生物合成能力显著优于其他藻类,其中坛紫菜作为典型代表物种,其代谢产物多样性及次生代谢物积累水平展现出独特的开发价值[7]-[9]。尽管该生物质资源具有可观储量,现有提取技术体系仍存在能效比失衡、产物得率受限等工程化瓶颈,制约着天然光保护剂的产业化进程[10]-[12]。

基于海洋生物资源高值化利用理念[13]-[15],研究以超声场强化传质机制作为工艺创新切入点,通过系统优化过程参数,构建针对 MAAs 的高效分离技术路线[16]该研究着重突破传统提取方法在传质动力学及选择性分离方面的技术瓶颈[17]-[19],同时整合现代分析技术实现产物组分的精准解析,以期开发环境友好型紫外线防护材料提供新的理论支撑[20] [21]。

2. 材料与方法

2.1. 实验材料

有机坛紫菜，霞浦千海蓝食品有限公司；纯净水，湖南娃哈哈食品有限公司；甲醇(色谱纯)，上海麦克林生化科技股份有限公司；乙酸(色谱纯)，上海麦克林生化科技股份有限公司；无水乙醇(分析纯)，天津市科密欧化学试剂有限公司。

2.2. 坛紫菜 MAAs 提取工艺

单因素实验：将紫菜进行烘干用破壁机进行粉碎、35%的乙醇以 1:30 的料液比在 32℃的条件下超声浸提 45 min，冷冻离心得到上清液，调节乙醇的浓度至 80%醇沉 8 h，冷冻离心除去 DNA 和蛋白质[22]。40℃旋转蒸发除去大部分的水和溶剂，冷冻干燥至粉末，得到 MAAs 粗提取物。分别对超声时间、超声频率、乙醇浓度、液料比、超声温度进行预实验。选取影响因素较大的因素进行响应面法试验优化。响应面实验：根据单因素实验结果，采用 Box-Behnken 响应面设计方法，开展四变量三水平的中心组合试验，以液料比、超声时间、超声频率、乙醇浓度为响应因子，以坛紫菜中 MAAs 的提取率(mg/g)为响应变量，采用响应面试验设计法优化其提取工艺参数[23]。具体试验因素及水平配置详见表 1。

Table 1. Table of factors and levels for response surface optimization experiment
表 1. 响应面优化试验的因素水平表

水平	料液比/g·ml ⁻¹	超声时间/min	超声能量密度/%	乙醇浓度/%
-1	30	45	35	30
0	35	60	40	40
1	40	75	45	50

注：超声仪最大频率为 40 KHz 功率 500 W，超声能量密度 40%表示 500 W·40%。Note: The maximum frequency of the ultrasonic instrument is 40 KHz and the power is 500 W, Ultrasonic energy density 40% represents 500W·40%.

2.3. 坛紫菜中 MAAs 得率的量化计算方法

根据文献报道的 MAAs 摩尔消光系数 ε 及方法[24]-[26]，可计算出坛紫菜 MAAs 中 MAAs 总含量，计算公式如下：

$$X = A \times \frac{M}{\varepsilon}$$

式中：X 为 MAAs 质量，mg；A 为特征吸收波长 334 nm 下的吸光度；M 为分子质量 332，g/mol； ε 为 MAAs 摩尔消光系数 43,700，L·mol⁻¹·cm⁻¹。

$$W = \frac{m}{M} \times 100\%$$

式中，W 为 MAAs 得率(%)；m 为初始提取的 MAAs 质量(g)；M 为坛紫菜干粉末质量(g)。

2.4. 坛紫菜 MAAs 化学成分的检测与表征

HPLC 测定：采用 C18 柱(5 μ m, 4.6 mm \times 150 mm)，柱温为 25℃，进样量 20 μ L，流动相 A 为 0.3% 乙酸水溶液，流动相 B 为甲醇，流速为 1.0 mL/min，检测波长为 334 nm，梯度洗脱条件：0~10 min，B%：10%~70% [27]。

ESI-MS 测定：喷雾气压 45 psi，氮气流速 10.0 L/min，干燥温度 350℃，破碎电压 100 V，毛细管电压 4500 V，全扫描(Scan)，参比离子质荷比：121.0509，922.0098，为参比离子对测定结果进行实时矫正，分辨率 m/z 在 922.0098 处全扫描响应为 11,300，质荷比(m/z)范围在 120~1000 [28]。

UV-Vis Spec 测定：扫描范围 200 nm~500 nm，狭缝宽度 3 nm，扫描速度中速扫描，1000 nm/min，响应时间 0.5~1 s，扫描模式 Abs 扫描[29]。

2.5. 坛紫菜 MAAs 标品分离纯化

采用高效液相色谱分离技术根据出峰时间不同分别收集两种氨基酸，经多次减压蒸馏和冻干后得到两种纯的 MAAs 标品[30]，纯度达 99.7%。

2.6. 超声醇提工艺与水提工艺对比

对比两种提取工艺提取时间，溶剂消耗量，得率等，评估该工艺的优势。

3. 结果与分析

3.1. 超声时间变量对坛紫菜 MAAs 得率的作用规律

由图 1 分析可得，在 15~90 min 范围内在前 60 min 提取率随超声时间的增加而增加，60 min 之后略有下降，根据观察发现可能原因为随超声时间的增长，超声所产生的能量累积会引发局部高温，这种物理环境变化可能对 MAAs 的提取过程产生调控作用。因此选取 60 min 为最佳超声提取时间。

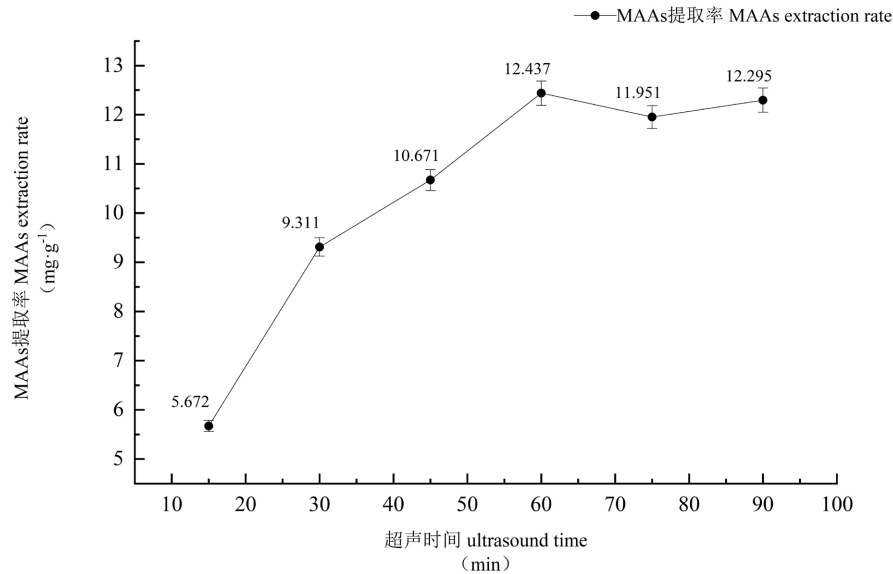


Figure 1. Effect of ultrasound time on MAAs extraction rate
图 1. 超声时间对 MAAs 提取率的影响

3.2. MAAs 提取率受超声功率调控的规律

根据图 2 结果分析，在最大功率 500 W 的超声仪中超声功率在 25%~55%的范围内呈现先上升再下降的趋势，响应值最优区间为 35%~45%，可能影响因素为超声功率较低时不足以破坏紫菜细胞壁从而释放 MAAs，过高的超声能量输入会导致 MAAs 分子结构损伤。为平衡提取效果与能耗成本，500 W 功率和 40%占比被选为工业化生产的最优参数。

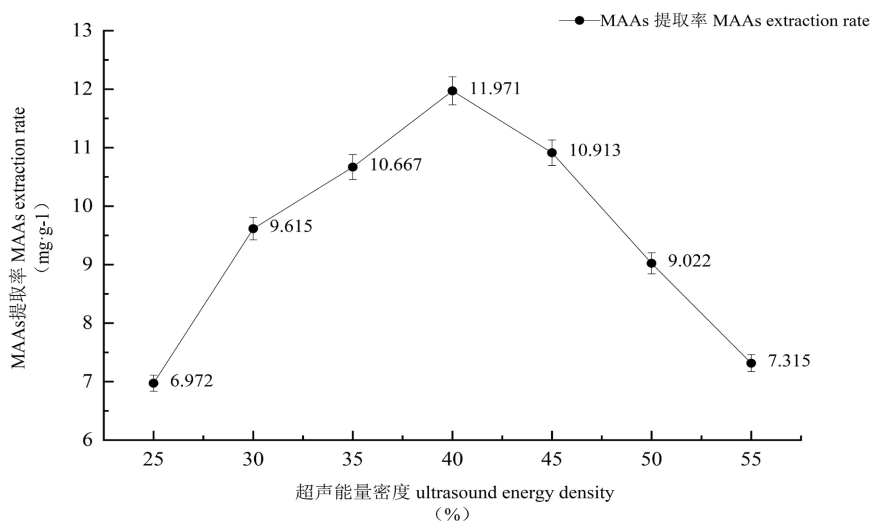


Figure 2. Effect of ultrasonic energy density on MAAs extraction rate

图 2. 超声能量密度对 MAAs 提取率的影响

3.3. 乙醇浓度梯度对坛紫菜 MAAs 提取得率的作用规律

由图 3 实验数据可见, 乙醇浓度对 MAAs 的提取率影响较大。当乙醇浓度较低时, 由于 MAAs 是极性较强的化合物, 低浓度乙醇的极性与水较为接近, 对 MAAs 的溶解性有限, 难以有效破坏细胞结构使 MAAs 释放出来, 同时可能因溶剂对 MAAs 的选择性结合能力不足, 无法有效置换细胞内的结合物质, 最终导致得率偏低。随着乙醇浓度升高到一定程度, 40% 左右, 乙醇既能保持一定的极性来溶解 MAAs, 又具有一定的脂溶性, 可以更好地穿透细胞壁和细胞膜等脂质双分子层结构, 使细胞内的 MAAs 更易被释放到提取溶剂中, 此时 MAAs 的提取率会逐渐升高, 达到一个相对较高的水平。当乙醇浓度继续升高, 超过 60% 甚至更高时, 乙醇的极性进一步降低, 可能会导致 MAAs 在其中的溶解度下降。同时, 过高浓度的乙醇可能会使细胞内的蛋白质等物质过度沉淀, 包裹住 MAAs, 阻碍其被提取出来, 反而使 MAAs 的提取率下降。经多因素交互作用验证, 40% 乙醇浓度被证明是实现最高 MAAs 得率的理想选择。

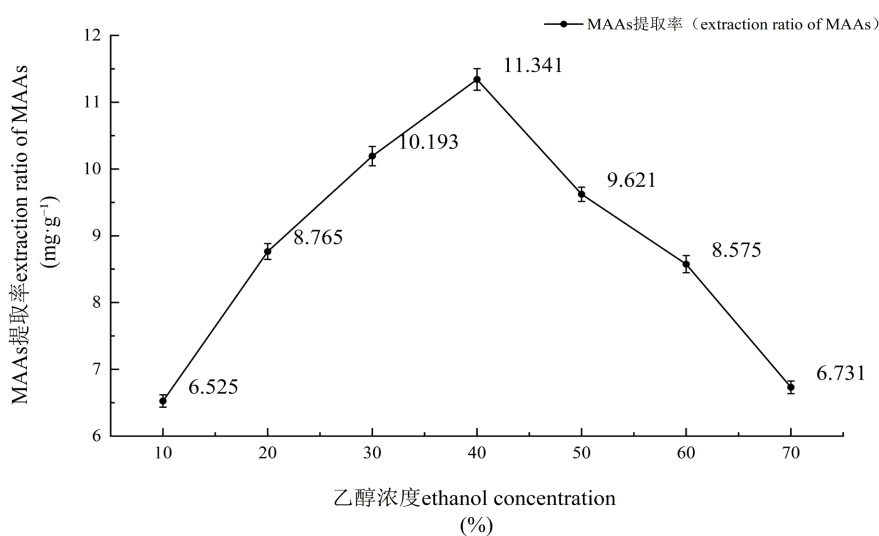


Figure 3. Effect of ethanol concentration on MAAs extraction rate

图 3. 乙醇浓度对 MAAs 提取率的影响

3.4. 料液比对 MAAs 提取率的影响

由图 4 可知, 料液比参数对坛紫菜 MAAs 得率的作用关键在于, 优化固液相间的质量传递的比表面积液体含量较少时, 受溶解度影响紫菜细胞中 MAAs 不能充分析出, 而较大的液体质量时不利于生产, 会增大处理量和造成用料的浪费。因此选取 1:35 为最佳提取工艺的料液比。

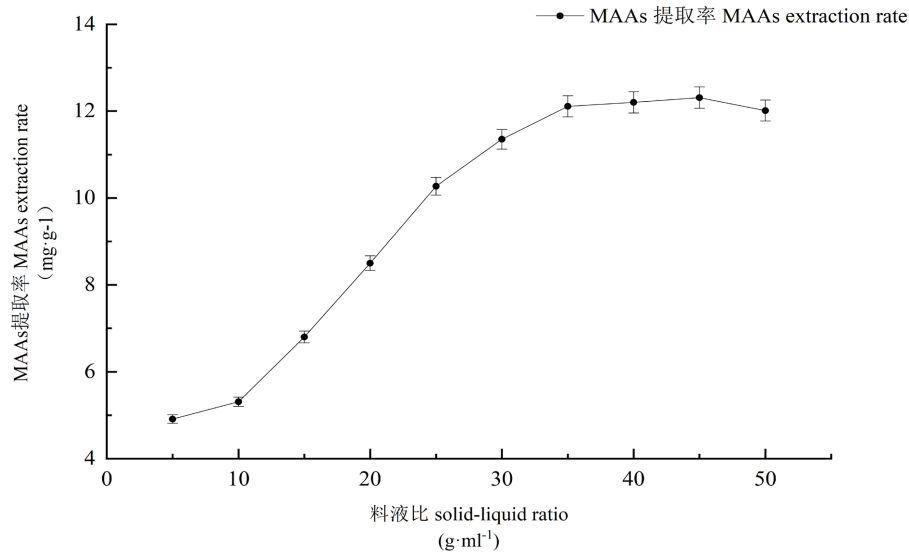


Figure 4. Effect of solid-liquid ratio on MAAs extraction rate

图 4. 料液比对 MAAs 提取率的影响

3.5. 超声温度对 MAAs 提取率的影响

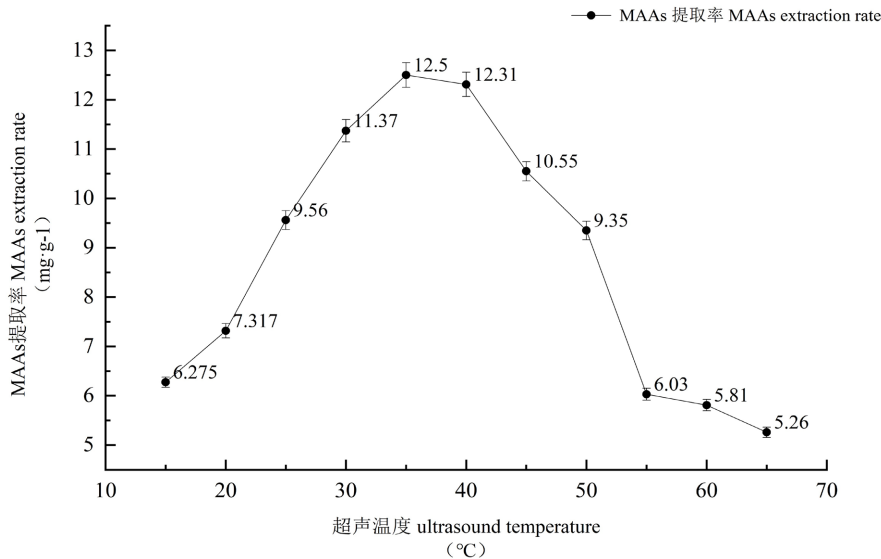


Figure 5. Effect of ultrasound temperature on MAAs extraction rate

图 5. 超声温度对 MAAs 提取率的影响

由图 5 可知, 当超声温度较低时, 分子运动相对缓慢, 溶剂与样品之间的相互作用较弱。此时, 虽然超声能产生一定的空化效应, 但由于温度低, 溶剂对 MAAs 的溶解能力有限, 且细胞等生物结构的破

坏程度也相对较小, MAAs 难以从细胞内充分释放到溶剂中, 导致提取率较低。随着超声温度升高到一定范围, 30℃~45℃, 分子热运动加剧, 溶剂极性优化与超声空化效应的耦合作用, 可通过破坏生物膜结构促进 MAAs 的释放, 并通过改善溶剂与溶质的相互作用提升提取效率。同时, 适宜的温度还可能使 MAAs 的化学结构更稳定, 有利于其在提取过程中的保留, 进一步提高提取率。超声温度超过 50℃ 阈值时, 可能产生双重负面效应: 其一, 高温引发 MAAs 分子的热分解反应, 导致有效成分含量降低; 其二, 溶剂挥发性增加将降低空化效应的作用强度, 同时引发体系热力学参数波动, 最终导致提取效率下降。实验数据显示, 超声处理过程中体系温度以约 10℃/h 的速率递增, 该升温幅度与环境温度及超声功率呈正相关。因此, 综合考虑选取初始超声温度为 33℃, 经一小时超声结束后升至 40℃ 左右提取率较高。

3.6. MAAs 标准曲线的绘制

收集液相色谱流出液福建产有机坛紫菜中的两种 MAAs, Shionrine 和 Porphyra-334 冻干后得到 MAAs 高纯度样品, 配制成标准样液用于紫外检测法标准曲线的绘制[23]。由朗伯比尔定律可知, 在一定浓度范围内吸光度值与样品浓度成正比, 由图 6 可知, MAAs 在 0.04~0.14 mg/ml 的范围内具有良好的线性关系, 并求得紫菜中 MAAs 的线性回归方程为 $y = 5.4893x + 0.0953$, 相关系数 $R^2 = 0.9993$, 说明 MAAs 含量在 MAAs 在 0.04~0.14 mg/ml 的范围内具有良好的线性关系。该曲线为后续研究中 MAAs 浓度的确定提供了标准化方法。

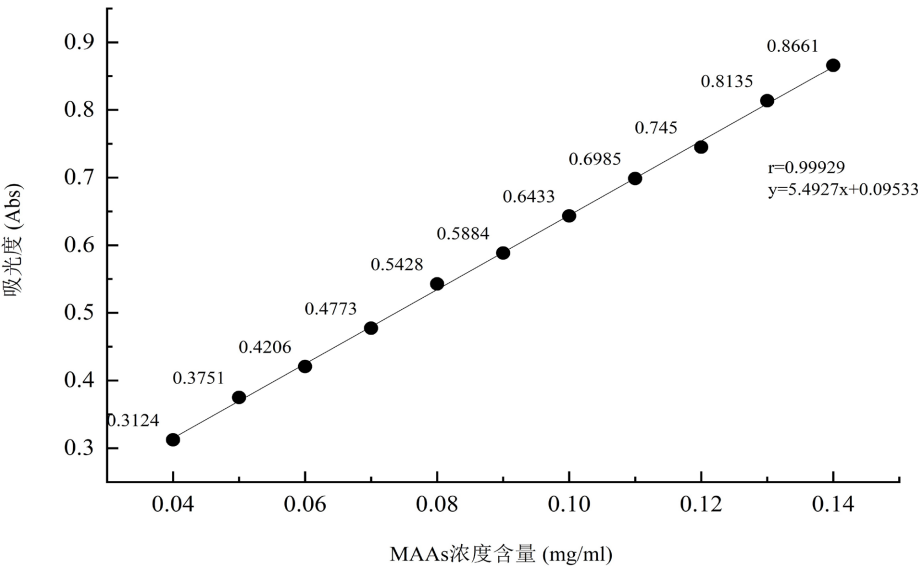


Figure 6. Standard curve of MAAs
图 6. MAAs 标准曲线图

3.7. 响应面实验的结果与分析

为进一步优化坛紫菜 MAAs 提取工艺, 超声空化效应产生的热量导致体系温度呈现线性上升趋势(约 10℃/h), 这种温升行为不仅与超声功率正相关, 还受环境温度等外部条件的综合影响。因此, 综合考虑选取初始超声温度为 33℃, 超声处理 1 小时并伴随体系温度升至 40℃ 时, 坛紫菜 MAAs 的提取效果最为理想。以液料比、超声时间、超声功率、乙醇浓度为自变量, 坛紫菜 MAAs 得率为响应值, 进行响应面试验设计, 结果见表 2。

采用 Design-Expert13.1.0.1 软件对表 2 的试验结果进行回归分析, 得到回归模型:

$$Y = 14.64 + 0.2459 A - 0.0691 B + 0.0813 C - 0.1132 D + 0.6468 AB - 0.1620 AC + 0.1010 AD + 0.7800 BC + 0.2505 BD + 0.3480 CD - 0.8896 A^2 - 1.30 B^2 - 1.53 C^2 - 1.99 D^2。$$

Table 2. Experimental design and results of response surface method
表 2. 响应面法试验设计与结果

实验号 number	料液比/g·ml ⁻¹	超声时间/min	超声能量密度/%	乙醇浓度/%	提取率/mg·g ⁻¹
1	30	45	40	40	13.155
2	40	45	40	40	12.293
3	30	75	40	40	11.361
4	40	75	40	40	13.086
5	35	60	35	30	11.356
6	35	60	45	30	10.968
7	35	60	35	50	10.612
8	35	60	45	50	11.616
9	30	60	40	30	11.812
10	40	60	40	30	12.221
11	30	60	40	50	11.315
12	40	60	40	50	12.128
13	35	45	35	40	12.512
14	35	75	35	40	11.303
15	35	45	45	40	10.965
16	35	75	45	40	12.876
17	30	60	35	40	11.611
18	40	60	35	40	12.368
19	30	60	45	40	12.102
20	40	60	45	40	12.211
21	35	45	40	30	11.762
22	35	75	40	30	10.996
23	35	45	40	50	10.925
24	35	75	40	50	11.161
25	35	60	40	40	14.816
26	35	60	40	40	14.691
27	35	60	40	40	14.831
28	35	60	40	40	14.626
29	35	60	40	40	14.213

为了检验坛紫菜 MAAs 提取工艺回归模型的有效性，对回归模型进行方差分析，从表 3 可以看出，该模型 $F=44.38$ ， $P<0.0001$ ，结果显示坛紫菜 MAAs 提取效果的回归模型具有高度统计学显著性。矫正系数 $R^2(\text{Adj})=0.9559$ 表明试验误差小，准确度高。模型确定系数 $R^2=0.9780$ ，预测相关系数 $R^2(\text{Pred})=0.8962$ 二者数值接近偏差在合理范围；模型失拟项检验结果 $P=0.4662$ (不显著)，说明拟合方程能够有效反映真实响应曲面；变异系数 C.V.%为 2.19%，验证了实验设计的科学性和模型预测的稳定性。信噪比

(Adeq Precision) = 21.0518, 大于临界值 4, 表明模型准确度高。因此, 该方程可用于分析和预测坛紫菜 MAAs 最优提取工艺。

Table 3. Results of Analysis Of Variance (ANOVA) and significance test
表 3. 方差分析及显著性检验结果

变异来源	平方和	自由度	均方差	F-value	p-value	显著性
模型 model	44.81	14	3.2	44.38	<0.0001	**
A-料液比	0.7257	1	0.7257	10.06	0.0068	**
B-超声时间	0.0573	1	0.0573	0.7941	0.3879	
C-超声能量密度	0.0794	1	0.0794	1.1	0.3119	
D-乙醇浓度	0.1537	1	0.1537	2.13	0.1664	
AB	1.67	1	1.67	23.2	0.0003	**
AC	0.105	1	0.105	1.46	0.2476	
AD	0.0408	1	0.0408	0.5658	0.4644	
BC	2.43	1	2.43	33.74	<0.0001	**
BD	0.251	1	0.251	3.48	0.0832	
CD	0.4844	1	0.4844	6.72	0.0213	*
A ²	5.13	1	5.13	71.18	<0.0001	**
B ²	10.93	1	10.93	151.56	<0.0001	**
C ²	15.28	1	15.28	211.92	<0.0001	**
D ²	25.65	1	25.65	355.63	<0.0001	**
残差 residual	1.01	14	0.0721			
失拟项 lack of fit	0.7572	10	0.0757	1.2	0.4662	
纯误差 pure error	0.2525	4	0.0631			
总变异 cor total	45.82	28				

注: **极显著(P < 0.01); *显著(P < 0.05)。Note: **highly significant (P < 0.01); *significant (P < 0.05).

3.8. 自变量对坛紫菜 MAAs 提取率的影响程度

由表 3 可知, 该回归模型的自变量一次项 A 和二次项 A²、B²、C²、D² 对坛紫菜 MAAs 提取率有极显著影响(P < 0.01)。响应面分析结果表明, 各工艺参数对 MAAs 提取得率的影响程度由大到小依次为: 料液比 > 乙醇浓度 > 超声功率 > 超声时间。

3.9. 响应面交互作用分析及验证实验

曲线的走势越陡, 说明该因素对坛紫菜 MAAs 提取率响应越大。当等高线图呈现明显的狭长特征时, 通常意味着两因素间存在较强的交互作用。对坛紫菜 MAAs 提取率影响最大的因素为料液比, 其次为乙醇浓度、超声功率和超时时间, 与表 3 中的分析结果一致。由图 7 可知, 超声时间和超声功率的交互作用对坛紫菜 MAAs 提取率影响最大, 这一现象的潜在原因包括超声参数变化引发的温度波动, 该热效应通过调控物质扩散速率与结构稳定性影响提取效果。同时, 液料比与超声时间的交互作用显著[25], 溶剂用量与处理时长的组合变化可通过改变传质动力学特征影响目标成分的溶出量。由回归模型预测的坛紫菜 MAAs 最佳提取工艺为料液比 1:35.6965, 超声时间 60.1849 min, 超声能量密度 40.1009%, 乙醇浓度

39.7788%，最大提取率预测值为 14.6542%。为了方便生产操作，将优化条件改为料液比 1:35，超声时间 60 min，超声能量密度 40%，乙醇浓度 39%。针对最优工艺参数组合进行三次平行实验验证，坛紫菜 MAAs 的提取率为 $14.375\% \pm 0.09\%$ 这与预测值较接近，因此该模型可较好地预测和模拟坛紫菜 MAAs 的得率和最佳的提取工艺。

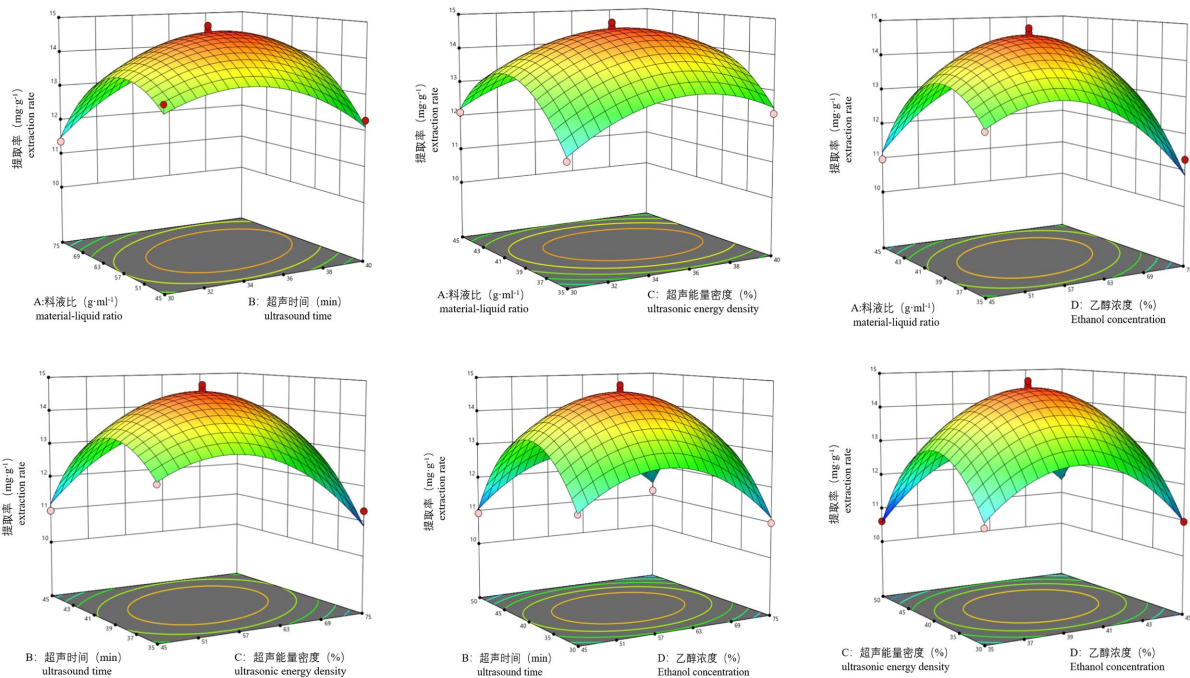


Figure 7. Response surface of the interaction of various factors on the yield of MAAs from *Porphyra haitanensis*
图 7. 各因素交互作用对坛紫菜 MAAs 得率的响应面

3.10. MAAs 化合物种类的分析

由高效液相色谱中的出峰数及时间 3 min 和 3.5 min 确定此品种坛紫菜中有两种 MAAs，分别收集两种组分进行 200 nm 至 500 nm 紫外光谱扫描。得到两种物质均在 334 nm 下有最大吸收峰，又对其进行液质联用检测，得到第一个峰荷质比为 347，第二个峰荷质比为 333，根据文献可判断出第一个峰为 Shionrine 第二个峰为 Porphyra-334。分子结构式及检测数据见下图 8。

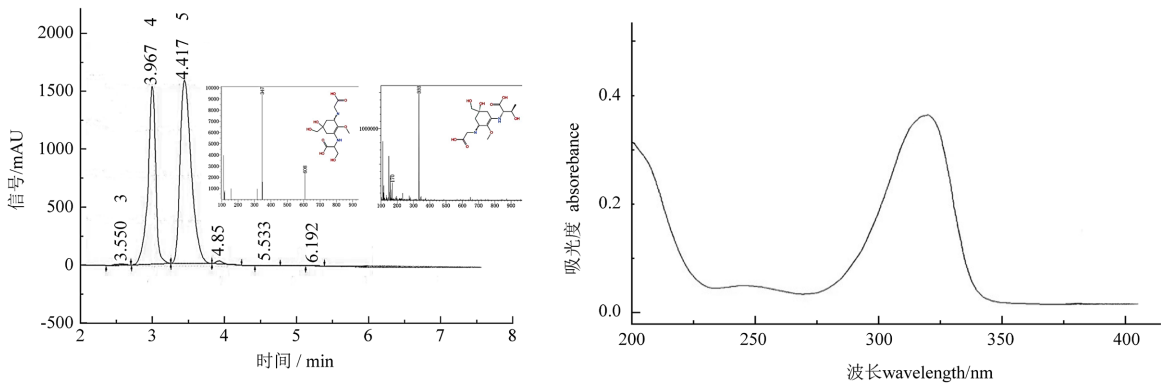


Figure 8. Liquid-chromatography, mass-spectrometry and ultraviolet-spectrum of MAAs
图 8. MAAs 液相色谱、质谱、紫外光谱图

3.11. MAAs 化合物两种提取工艺对比

由表 4 可知，超声浸提法对比水提法在提取时间、溶剂耗量、得率方面均有较好的优势。

Table 4. Comparison of two extraction processes for MAAs
表 4. MAAs 化合物两种提取工艺对比

工艺类型	超声时间/min	乙醇耗量/ml	得率/%
水提法	120	15.84 ± 0.25	12.47 ± 0.35
超声浸提	60	13.2 ± 0.25	14.63 ± 0.32
对比结果	减少 1 h	降低 20%	提升了 17.3%

注：乙醇耗量通过同条件下乙醇用量与乙醇回收量(通过旋转蒸发回收)计算得到，超声工艺乙醇回收率可达 82.4% (旋转蒸发温度 42℃)。

4. 结论

通过高效液相色谱 - 质谱联用分析，确定坛紫菜(*Pyropia haitanensis*)主要含 Shinorine (保留时间 3 min, $[M + H]^+ m/z$ 333)和 Porphyra-334 (保留时间 3.5 min, $[M + H]^+ m/z$ 347)，经紫外光谱扫描其最大紫外吸收特征峰均位于 334 nm；单因素实验表明，液料比对 MAAs 得率影响最为显著($F = 10.06, P < 0.01$)，该工艺参数对结果的影响程度占比 52.6%。经响应面法优化后最佳条件为：超声功率：500 W (设备能量密度 40%)，处理时间：60 min，液料比：1:35 ($g \cdot mL^{-1}$)，乙醇浓度：39% (v/v)，温度：36℃ ± 1℃在此条件下得率达 14.375% ± 0.09% ($n = 3$)，较传统水提法提升 17.3% ($t = 8.41, P < 0.05$)，且乙醇回收率可达 82.4% (旋转蒸发温度 42℃)为坛紫菜类菌胞素氨基酸后续应用提供参考。

基金项目

聊城大学东昌学院大学生创新创业训练计划项目(2025DCA01)。

参考文献

[1] 王锦旗, 宋玉芝, 郑建伟, 等. 紫外辐射时空变化规律研究进展[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(28): 11919-11926.

[2] 许锋, 陈得科, 陈晓刚, 聂金梅, 马志浩, 孙恢礼, 陈忻. 坛紫菜防晒剂 MAAs 提取、鉴定及在化妆品体系的稳定性研究[J]. 南方水产科学, 2022, 18(4): 156-162.

[3] Chen, M.Y., Jiang, Y.J. and Ding, Y.S. (2023) Recent Progress in Unraveling the Biosynthesis of Natural Sunscreens Mycosporine-Like Amino Acids. *Journal of Industrial Microbiology & Biotechnology*, **50**, kuad038.

[4] Amador-Castro, F., Rodriguez-Martinez, V. and Carrillo-Nieves, D. (2020) Robust Natural Ultraviolet Filters from Marine Ecosystems for the Formulation of Environmental Friendlier Bio-Sunscreens. *Science of the Total Environment*, **749**, Article ID: 141576. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141576>

[5] Shih, P.M. (2019) Early Cyanobacteria and the Innovation of Microbial Sunscreens. *mBio*, **10**, e01262-19. <https://doi.org/10.1128/mbio.01262-19>

[6] 杨少玲, 戚勃, 杨贤庆, 林婉玲, 邓建朝, 吴燕燕, 马海霞, 荣辉. 中国不同海域养殖坛紫菜营养成分差异分析[J]. 南方水产科学, 2019, 15(6): 75-80.

[7] 冷檬, 林端权, 翁凌, 张凌晶, 缪松, 曹敏杰, 孙乐常. 坛紫菜蛋白的酶法提取及其理化性质[J]. 南方水产科学, 2023, 19(3): 140-150.

[8] 黄海潮, 王锦旭, 潘创, 杨贤庆, 戚勃, 李来好, 赵永强. 超声波辅助过氧化氢法降解坛紫菜多糖及其抗氧化活性的研究[J]. 南方水产科学, 2020, 16(1): 110-119.

[9] 王小慧, 戚勃, 杨贤庆, 杨少玲, 马海霞, 邓建朝. 响应面法优化末水坛紫菜蛋白酶解工艺及其酶解液抗氧化活性研究[J]. 南方水产科学, 2019, 15(2): 93-101.

- [10] 范高宁. 类菌胞素氨基酸的性质及其在化妆品领域中应用的研究进展[J]. 日用化学工业(中英文), 2022, 52(12): 1366-1372.
- [11] Qoh, A.S., Amine, J., Assobhei, O., *et al.* (2024) Investigation of UV Protection and Anti-Aging Properties of Mycosporine-Like Amino Acids in the Moroccan Red Alga *Gracilaria gracilis* (Gracilariales, Rhodophyta). *Journal of Applied Phycology*, **37**, 1341-1356.
- [12] 韩秀. 大型红藻 MAAs 的纯化制备及其应用研究[D]: [硕士学位论文]. 连云港: 江苏海洋大学, 2022.
- [13] 张萍, 张维娇, 胥睿睿, 等. 防晒化合物类菌胞素氨基酸的生物合成[J]. 合成生物学, 2025, 6(2): 306-319.
- [14] 李田乐, 蒋秀婧, 潘明轩, 等. 马尾藻类菌胞素氨基酸的提取工艺优化及其对酪氨酸酶活性的抑制机理[J/OL]. 食品工业科技, 1-21.
- [15] 朱小山, 黄静颖, 吕小慧, 等. 防晒剂的海洋环境行为与生物毒性 [J]. 环境科学, 2018, 39(6): 2991-3002.
- [16] 王令智, 陈平, 郭振华, 等. 响应面优化超声辅助提取淫羊藿总黄酮工艺及抗氧化活性研究[J]. 饲料研究, 2025(4): 92-97.
- [17] 颜瑞辰, 洪允炬, 李悦, 等. 响应面法优化灵芝多糖提取工艺及其抗氧化活性[J]. 菌物研究, 2024, 22(4): 378-386.
- [18] Figueroa, F.L., Castro-Varela, P., Vega, J., Losantos, R., Peñín, B., López-Cóndor, L., *et al.* (2024) Novel Synthetic UV Screen Compounds Inspired in Mycosporine-Like Amino Acids (MAAs): Antioxidant Capacity, Photoprotective Properties and Toxicity. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, **261**, Article ID: 113050. <https://doi.org/10.1016/j.jphotobiol.2024.113050>
- [19] 邓诗雨, 金建明, 吴华. 阿魏酸在化妆品中的应用研究进展[J]. 日用化学工业(中英文), 2024, 54(12): 1489-1496.
- [20] 孙颖颖, 杨子轩, 周静, 等. 大型海藻类菌胞素氨基酸提取工艺及定性检测研究[J]. 食品科技, 2021, 46(3): 205-211.
- [21] 胡晓琪, 徐沈晨, 王思宇, 等. 石莼类菌胞素氨基酸的提取工艺及对副溶血弧菌的抑菌机理[J]. 食品工业科技, 2024, 45(18): 175-183.
- [22] 赵永斌, 李晓雅, 车小梅, 张艳, 程凯欣, 李伟. 坛紫菜类菌胞素氨基酸(MAAs)储存条件初探及在化妆品防晒体系复配稳定性研究[J]. 中国化妆品科学, 2025, 2(2): 15-21.
- [23] 林颖, 赵书田, 熊灵, 等. 响应面法优化桑葚果渣花青素提取工艺及成分分析[J]. 中国调味品, 2025, 50(3): 206-211.
- [24] 朱文轩, 钱亮亮, 程同杰, 等. 4 种大型褐藻类菌胞素氨基酸的提取工艺优化及鉴定[J]. 食品研究与开发, 2023, 44(4): 114-121.
- [25] 金宁宁, 张朝辉, 李八方. 江蓠中类菌胞素氨基酸(MAAs)成分分析及提取研究[J]. 海洋科学, 2012, 36(3): 74-80.
- [26] 牛美英. 麒麟菜中类菌胞素氨基酸(MAAs)的提取、纯化、鉴定及抗氧化活性研究[D]: [硕士学位论文]. 青岛: 中国海洋大学, 2014.
- [27] 徐世洁, 胡志泉, 沈国良, 等. 响应面法优化深共晶溶剂催化制备己二酸二异辛酯[J]. 工程塑料应用, 2024, 52(4): 148-153.
- [28] 郑伊琦, 张安强, 张小军, 等. 响应面优化猪苓菌核多糖超声辅助提取工艺及抗氧化活性分析[J]. 食品工业科技, 2023, 44(16): 255-263.
- [29] 林凌霄. 生物信息学在海洋甲藻研究中的发展与应用[D]: [硕士学位论文]. 厦门: 厦门大学, 2017.
- [30] 朱文轩. 大型褐藻 MAAs 的筛选、分离纯化及其初步应用研究[D]: [硕士学位论文]. 连云港: 江苏海洋大学, 2022.