孙颖颖, 杨梦娇, 陈真, 等. 裙带菜配子体类菌胞素氨基酸高效生物合成的环境因子调控与功能活性分析 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(16): 260−269. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025070037

SUN Yingying, YANG Mengjiao, CHEN Zhen, et al. Regulation of Environmental Factors and Functional Activity of Efficient MAAs Biosynthesis in *Undaria pinnatifida* Gametophytes[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(16): 260−269. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025070037

· 工艺技术 ·

裙带菜配子体类菌胞素氨基酸高效生物合成的环境因子调控与功能活性分析

孙颖颖[1,2,3], 杨梦娇[1], 陈　真[1], 潘明轩[4], 焦　学[4], 王欣冉[1], 胡亚东[4], 韦　欣[1,*]

（1.江苏省海洋生物资源与环境重点实验室, 江苏海洋大学, 江苏连云港 222005;
2.江苏省海洋生物产业技术协同创新中心, 江苏海洋大学, 江苏连云港 222005;
3.江苏省海洋种质资源与遗传育种重点实验室, 江苏海洋大学, 江苏连云港 222005;
4.江苏省沿海开发投资有限公司, 江苏南京 210000）

摘　要: 为构建裙带菜（*Undaria pinnatifida*）配子体的营养增殖体系并实现类菌孢素氨基酸（Mycosporine–like amino acids，MAAs）的高效积累，本研究采用单因素实验结合均匀设计，系统分析了光质、光照强度、光周期、温度、营养盐等培养条件对配子体生长及其 MAAs 积累的影响。通过 DPPH 和 $ABTS^+$自由基清除实验，以及斑马鱼炎症模型，进一步评估了配子体中 MAAs 的体外抗氧化和体内抗炎活性。结果表明，不同培养条件对配子体生长及其 MAAs 含量具有显著影响。其中，在红光、20 ℃、32 μmol·m^{-2}·s^{-1} 光照强度及 12L:12D 光周期下，配子体相对生长率和 MAAs 含量分别达到最高值 6.41%±0.11% 和 327.19±1.59 mg/g。紫外-可见光谱分析显示提取物具有典型 MAAs 的吸收特征。活性评价结果显示，配子体 MAAs 提取物对 DPPH 和 $ABTS^+$自由基的半数清除浓度（IC_{50}）分别为 12.04 和 10.34 mg/mL；在 100 μg/mL 浓度下，其对斑马鱼巨噬细胞聚集的抑制率达 52.31%，且呈剂量依赖性增强趋势。综上，本研究确定了裙带菜配子体生长及其 MAAs 积累的最适培养条件，验证了其 MAAs 具有中等水平的抗氧化能力和较强的抗炎潜力，为实现裙带菜配子体 MAAs 的高效生物制备提供了理论依据和实验基础。

关键词: 裙带菜, 配子体, 类菌孢素氨基酸, 抗氧化, 抗炎
中图分类号: TS209　　**文献标识码:** B　　**文章编号:** 1002−0306(2026)16−0260−10
DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025070037
本文网刊:

Regulation of Environmental Factors and Functional Activity of Efficient MAAs Biosynthesis in *Undaria pinnatifida* Gametophytes

SUN Yingying[1,2,3], YANG Mengjiao[1], CHEN Zhen[1], PAN Mingxuan[4], JIAO Xue[4], WANG Xinran[1], HU Yadong[4], WEI Xin[1,*]

（1.Jiangsu Key Laboratory of Marine Bioresources and Environment, Jiangsu Ocean University, Lianyungang 222005, China;
2.Co-innovation Center of Jiangsu Marine Bio-industry Technology, Jiangsu Ocean University, Lianyungang 222005, China;
3.Jiangsu Key Laboratory of Marine Germplasm Resources and Genetic Breeding, Jiangsu Ocean University, Lianyungang 222005, China;
4.Jiangsu Coastal Development Investment Co., Ltd., Nanjing 210000, China）

收稿日期: 2025−07−04
基金项目: 江苏省农业自主创新项目（CX(24)3063）; 连云港市“521 工程”科研项目（LYG065212024015）; 连云港市科技项目重点研发计划（CG2415）; 江苏省药学会—靳培英基金项目（J2025006）。
作者简介: 孙颖颖（1978−）, 女, 博士, 教授, 研究方向: 海洋生物提取与分离工程, E-mail: syy-999@163.com。
*** 通信作者:** 韦欣（1995−）, 女, 博士, 讲师, 研究方向: 海洋生物提取与分离工程, E-mail: weixin@jou.edu.cn。

Abstract: To establish a sustainable vegetative propagation system for *U. pinnatifida* gametophytes and enhance mycosporine–likeamino acids (MAAs) accumulation, this study systematically investigated the effects of key culture conditions—such as light quality, light intensity, photoperiod, temperature, and nutrient availability—on gametophyte growth and MAAs accumulation using a combination of single-factor and uniform design experiments. The antioxidant activity of MAAs extract was evaluated *in vitro* via DPPH and $ABTS^+$ radical scavenging assays, while their anti-inflammatory potential was assessed *in vivo* using a zebrafish inflammation model. Results indicated that culture conditions significantly affected both gametophyte growth and MAAs content. Optimal conditions —red light, 20 ℃, a light intensity of 32 μmol·m^{-2}·s^{-1}, and a 12L:12D photoperiod—yielded the highest relative growth rate (6.41%±0.11%) and MAAs content (327.19±1.59 mg/g). UV-visible spectroscopy confirmed the characteristic absorption profiles of MAAs in the extracts. The MAAs extract exhibited IC_{50} values of 12.04 and 10.34 mg/mL against DPPH and $ABTS^+$ radicals, respectively. Furthermore, at 100 μg/mL, the extract reduced macrophage aggregation in zebrafish by 52.31%, demonstrating a clear dose-dependent anti-inflammatory effect. In summary, this work identifies optimal culture conditions for enhancing both gametophyte growth and MAAs production, and confirms that gametophyte-derived MAAs possess moderate antioxidant and notable anti-inflammatory activities, thereby providing a theoretical and experimental foundation for their efficient biosynthesis and potential application.

Key words: *Undaria pinnatifida*; gametophyte; mycosporine-like amino acids (MAAs); antioxidant activity; anti-inflammatory

裙带菜（*Undaria pinnatifida*）隶属于色藻界（Chromista）、不等鞭毛门（Heterokontophyta），是西北太平洋沿岸广泛分布的重要经济型大型褐藻之一。作为全球最大的裙带菜生产国，我国在山东、辽宁、福建等沿海省份已形成规模化的裙带菜养殖产业链。根据《中国渔业统计年鉴（2024）》[1]，2023 年我国裙带菜年产量超过 20 万吨，产值突破 50 亿元人民币，显示出强劲的产业增长潜力。裙带菜不仅是人类膳食的重要海洋蔬菜来源，也因其富含多种活性成分，如多糖[2]、多酚[3]、蛋白质[4] 以及类菌孢素氨基酸（mycosporine-like amino acids, MAAs）[5]，被广泛应用于水产饲料、功能性食品、保健品、化妆品及医药原料等多个领域，具有较高的经济价值和广阔的综合开发前景。

裙带菜具有孢子体与配子体异型世代交替的生活史，尤其是配子体在实验室条件下能够通过营养方式持续增殖，维持较高的细胞活性而不进入性别分化阶段，这一特性使其不仅成为藻类种质资源长期保存的理想材料，也被广泛用于藻类细胞工程育苗及新品种创制[6−7]。相比孢子体，配子体生长周期短、生物量积累快，对外界环境响应敏感，因而具备作为功能活性物质生产载体的潜力。近年来，我国在裙带菜人工育苗、遗传育种等方面取得显著进展，如显著提高幼苗成活率、单位面积产量以及抗高温、抗病等性状的改良[8−9]。然而，现有研究多聚焦于温度、光照强度、氮源形态、光周期等因素对配子体形态建成与生物量增长的影响[7]，而关于配子体在不同环境条件下活性物质（如 MAAs）合成能力的研究仍较为匮乏。

MAAs 是一类广泛存在于海洋藻类和浮游生物中的低分子量天然水溶性紫外线吸收化合物，具有独特的吸光性能（最大吸收波长为 310~360 nm）和优异的生理活性，包括抗紫外、抗氧化和抗炎等功能[10−13]，近年来被视为天然防晒剂及抗老化功能原料，在医药和护肤品领域显示出巨大的市场潜力。裙带菜虽为褐藻，但其 MAAs 含量在同类藻类中相对较高[5,14]，虽略低于某些红藻（如紫菜，其 MAAs 含量可达 2~5 mg/g 干重）[14]，但因其特有的稀有 MAA 成分具备独特结构与活性，使裙带菜在功能性成分的提取与高值化利用中具有不可替代性。近年来，有研究发现裙带菜配子体在合适光照及营养条件下可诱导 MAAs 富集，显示出利用配子体进行 MAAs 生物制备的良好可行性，为藻类资源的功能拓展提供了新方向。

基于上述背景，本文以裙带菜配子体为研究对象，系统探究光质、光照强度、光周期、温度、营养盐等培养条件对其生长特性及 MAAs 积累水平的影响，旨在明确影响配子体营养增殖及 MAAs 合成的关键环境因子。进一步，通过体外自由基清除实验与斑马鱼炎症模型评价其 MAAs 的抗氧化与抗炎活性。本研究致力于构建高效的裙带菜配子体营养增殖与 MAAs 积累体系，不仅为 MAAs的绿色高值制备提供技术支撑，也为揭示裙带菜应对环境胁迫的生理生态机制提供理论依据。

1　材料与方法

1.1　材料与仪器

裙带菜配子体　购自中国科学院海洋研究所，并保存在 f/2 培养基[15] 中；本研究所用的斑马鱼品系为携带巨噬细胞荧光标记基因（*EGFP*）的 Tg:zlyz-EGFP 转基因斑马鱼　由山东省科学院生物研究所斑马鱼药物筛选平台提供，用于评估裙带菜配子体 MAAs 提取物的体内抗炎活性；斑马鱼培养水：1 mmol/L 硫酸镁、0.5 mmol/L 氯化钾、15 mmol/L 氯化钠、0.05 mmol/L 磷酸铵、0.15 mmol/L 磷酸二氢钾、0.7 mmol/L 碳酸氢钠和 1 mmol/L 氯化钙。

SHZ-D（III）循环水式多用真空泵　上海尚普仪器设备有限公司；TGL-25M 高速冷冻离心机　上海卢湘仪离心机仪器有限公司；Entris® II 分析天平

赛多利斯科学仪器有限公司; MGC-1000BP-2 光照培养箱、DHG-9070A 电热鼓风干燥箱　上海一恒科学仪器有限公司; VP-6 L 真空过滤装置　群安科学仪器(浙江)有限公司; HY-2 水浴振荡器　常州苏瑞仪器有限公司; UV1901 紫外-可见分光光度计　上海棱光技术有限公司; APS-8026PLUS 高效液相色谱仪　奥普斯仪器设备有限公司。

1.2　实验方法

1.2.1　裙带菜配子体培养　实验开始前, 在超净工作台中使用无菌人工海水对裙带菜配子体进行冲洗, 以去除杂质。随后, 将配子体置于经过消毒处理的破碎装置中切割成 150~200 μm 的藻段。所得藻段转移至已灭菌的锥形瓶中, 在充气条件下进行为期 6 d 的预培养, 所用培养基为标准 f/2 培养基或根据实验设定配制的改良培养基。培养条件为温度 18 ℃、光照强度 30 μmol·m^{-2}·s^{-1}、光周期 12L∶12D。正式实验前, 将预培养藻段经离心处理后用于接种。所用天然海水(盐度约为 33‰)经 0.22 μm 聚四氟乙烯膜过滤后, 装入聚碳酸酯瓶中, 在 121 ℃ 高压灭菌 20 min, 冷却备用。

1.2.2　单因素实验　本研究系统分析光照(光质、光照强度及光周期)、温度、营养盐(氮盐与磷盐)等培养条件对裙带菜配子体相对生长率及其 MAAs 含量的影响。各因素的设定水平见表 1。配子体初始接种密度为 2 g/500 mL(藻鲜重/培养基体积), 总培养周期为 16 d, 每 4 d 更换一次培养液, 培养方法同 1.2.1 节所述。在营养盐(氮磷)处理实验中, 根据设定浓度对 f/2 培养基中的 NO_3^-和 PO_4^{3-}进行调整。每次更换培养液时, 均需重新配制与对应实验组设定浓度一致的新培养基, 以确保氮磷营养水平在整个培养周期内保持稳定。

表 1　单因素实验因素与水平

Table 1　Factors and levels of single factor tests

因素	水平				
	1	2	3	4	5
光质	白光	红光(620~750 nm)	黄光(570~590 nm)	蓝光(450~476 nm)	绿光(495~570 nm)
光照强度(μmol·m^{-2}·s^{-1})	20	24	30	32	36
光周期(L/D)	10∶14	12∶12	14∶10	16∶8	18∶6
温度(℃)	14	16	18	20	22
初始NO_3^-浓度(mg/L)	11	37	44	75	150
初始PO_4^{3-}浓度(mg/L)	1	2	3.5	5	10

1.2.3　均匀试验设计　为进一步明确主要环境因子对裙带菜配子体生长及 MAAs 积累的综合影响, 本研究选用均匀设计表 $U_5(5^3)$, 选取第 1、2、3 列作为试验因素, 分别对应光质(A)、温度(B)与光照强度(C), 开展三因素五水平的均匀设计试验。具体试验水平设置详见表 2。试验过程中, 培养液初始 NO_3^-浓度设定为 150 mg/L, PO_4^{3-}浓度设定为 10 mg/L, 光周期统一设定为 12L:12D。其他培养条件同 1.2.1 节所述。通过对配子体相对生长率及 MAAs 含量的测定, 分析各因子及其组合对裙带菜配子体营养增殖及 MAAs 积累的影响, 为优化培养条件提供理论依据。

表 2　均匀试验设计

Table 2　Uniform experimental design

序号	因素		
	A光质	B温度(℃)	C光照强度(μmol·m^{-2}·s^{-1})
1	1(白光)	2(16)	5(36)
2	2(红光)	4(20)	4(32)
3	3(黄光)	1(14)	3(30)
4	4(蓝光)	3(18)	2(24)
5	5(绿光)	5(22)	1(20)

1.2.4　相对生长率的测定　配子体在培养结束后用 80 目尼龙滤网过滤, 用一次性镊子将配子体挑出并用无菌吸水纸吸掉多余水分后, 称量配子体质量。根据以下公式计算相对生长率(Relative growth rate, RGR)[16]:

$$RGR(\%) = \ln(Wt/Wo)/t \times 100$$

式中: Wo 为藻体初始鲜重(g); Wt 为试验结束后藻体鲜重(g); t 为培养天数(d)。

1.2.5　MAAs 的提取　取 1.00 g 裙带菜配子体干粉, 加入 25 mL 体积分数为 25% 的甲醇水溶液, 密封后置于恒温摇床中, 在 45 ℃ 条件下振荡提取 2 h, 转速设定为 1800 r/min。提取结束后, 溶液冷却至室温, 随后在 10000 r/min 条件下离心 20 min, 收集上清液。将滤渣加入相同体积的 25% 甲醇水溶液, 重复上述提取过程两次, 合并所有上清液。合并后的上清液在 45 ℃ 条件下进行减压浓缩, 获得浓缩液。按体积比 4∶1 向浓缩液中加入无水乙醇, 置于−20 ℃ 静置 6 h 后离心分离。收集上清液并进行冷冻干燥, 得到 MAAs 提取物并称重。MAAs 含量按照以下公式[14]进行计算:

$$W(mg/g) = m/M$$

式中: W 为 MAAs 含量(mg/g); m 为 MAAs 提取物质量(mg); M 为配子体干粉末质量(g)。

1.2.6　MAAs 的定性检测　采用前期研究建立的薄层层析方法对 MAAs 提取物进行初步分离鉴定[15]。取 0.010 g MAAs 提取物, 溶解于 2 mL 蒸馏水中, 点样于硅胶 G 板上。展开剂为甲醇∶无水乙醇∶蒸馏水=8∶10∶0.5(体积比), 显色剂为碘化铋钾溶液。待展开干燥后, 通过观察 Rf 值及显色特征判断 MAAs 的存在。将 MAAs 提取物溶液经 0.22 μm 滤膜过滤后, 进行紫外-可见光谱扫描分析。高效液相色谱分析使用 C_{18} 反相色谱柱(5 μm, 4.6 mm×150 mm), 柱温设定为 25 ℃, 进样体积为 10 μL。流动相 A 为

0.1%(v/v)甲酸水溶液，流动相 B 为甲醇，梯度洗脱程序为 0~20 min 内 B 从 10% 线性升至 70%[17]，流速为 0.8 mL/min。检测波长为 330 nm。

1.2.7　MAAs 提取物的体外抗氧化活性检测　为评价裙带菜配子体 MAAs 提取物的体外抗氧化活性，采用 DPPH 自由基清除实验测定其清除能力。分别配制 MAAs 提取物质量浓度为 1、2、4、6、8、10 mg/mL 的溶液，逐一取样加入 100 μL 0.2 mmol/L DPPH 甲醇溶液中，充分混匀后置于室温避光条件下静置 30 min。以不同浓度的维生素 C 溶液为对照，反应结束后测定混合溶液在 517 nm 处的吸光度(OD_{517})，并按照以下公式计算 DPPH 自由基清除率：

$$\text{DPPH 自由基清除率}(\%) = [1-(A_1-A_2)/A_0]\times 100$$

式中：A_1 为 MAAs 和 DPPH 自由基溶液混合物的 OD_{517}；A_2 为 MAAs 和蒸馏水的混合物 OD_{517}；A_0 为 DPPH 自由基溶液和蒸馏水混合物的 OD_{517}。

采用 $ABTS^+$自由基清除实验测定 MAAs 提取物的体外抗氧化能力。取 0.010 g MAAs 提取物溶解于 1 mL 蒸馏水中，经 0.45 μm 滤膜过滤除杂。反应体系中，将 100 μL ABTS 工作液与 100 μL MAAs 提取物溶液混合，充分振荡后于室温避光条件下静置 10 min。以不同浓度的维生素 C 溶液为对照，反应结束后，测定混合溶液在 734 nm 处的吸光度(OD_{734})，并按照以下公式计算 $ABTS^+$自由基清除率：

$$ABTS^+\text{自由基清除率}(\%) = [1-(A_1-A_2)/A_0]\times 100$$

式中：A_1 为 MAAs 和 ABTS 溶液混合物 OD_{734}；A_2 为 MAAs 和蒸馏水混合物 OD_{734}；A_0 为 ABTS 溶液和蒸馏水混合物 OD_{734}。

MAAs 提取物对 DPPH 和 $ABTS^+$自由基的清除能力均以 IC_{50} 值表示，即提取物使自由基清除率达到 50% 时所对应的浓度。IC_{50} 值越小，表明其抗氧化能力越强。

1.2.8　MAAs 提取物的体内抗炎活性检测　本研究选用携带绿色荧光标记巨噬细胞的转基因斑马鱼品系 Tg(zlyz:EGFP)，通过体视显微镜选取发育至 72 hpf(小时受精后)的健康幼鱼作为实验对象[18]。随机分组后，将幼鱼转移至 24 孔培养板，每孔放置 10 尾，每次每组两个重复孔。每孔培养体系总体积为 2 mL，由标准斑马鱼培养液及相应浓度的待测溶液组成。实验设置如下分组：空白对照组(仅含斑马鱼培养水)、模型组(含 20 μmol/L $CuSO_4$)、阳性对照组(含 20 μmol/L 吲哚美辛)以及样品组(25 μg/mL、50 μg/mL、100 μg/mL 的 MAAs 分离物溶液)。实验采用标准化斑马鱼炎症模型评价体系。在将待测样品及阳性对照药物加入 24 孔板后，于 28 ℃ 恒温培养箱中预孵育 2 h。随后加入 20 μmol/L $CuSO_4$ 溶液诱导急性炎症反应，继续避光孵育 1 h。根据标准化评价体系规程，暴露时间在 24 h 及以内不需要更换溶液。采用荧光显微成像技术，以双眼对齐为定位标准，定量分析巨噬细胞向体侧侧线神经丘区域的迁移情况。样品对斑马鱼炎症反应的抑制率以神经丘周围的巨噬细胞数量的减少量表示，计算公式如下：

$$\text{炎症反应抑制率}(\%) = [(C_1-C_0)/C_0]\times 100$$

式中，C_1 表示样品组的巨噬细胞个数；C_0 表示硫酸铜处理组的巨噬细胞个数。

1.3　数据处理

每个样品均设 3 个平行重复，实验数据以“平均值±标准差”表示，采用 SPSS 14.0 软件进行单因素方差分析(One-way ANOVA)，采用 LSD 法进行事后多重比较。$P<0.05$ 被认为差异具有统计学意义。图表绘制使用 GraphPad Prism 10 和 OriginPro 2021 完成，以直观展示实验结果的差异性与趋势。

2　结果与分析

2.1　光照和温度对裙带菜配子体生长和 MAAs 含量的影响

在本研究中，不同光质、光照强度和光周期均对裙带菜配子体的生长和 MAAs 合成产生了显著影响。如图 1A 所示，不同光质对裙带菜配子体的相对生长率和 MAAs 含量均产生影响。在所有光质处理中，白光组的配子体相对生长率最高，达 3.75%，分别为蓝光组和黄光组的 1.52 倍和 1.27 倍。相比之下，红光组的生长最弱，相对生长率仅为 2.07%±0.15%。在 MAAs 含量方面，黄光组表现最优，达到 242.9 mg/g，显著($P<0.05$)高于其他处理组；其次为蓝光组(214.8 mg/g)，红光组的 MAAs 含量最低，仅为 137.5 mg/g，提示不同波长光信号可能在调控配子体生长和次生代谢途径中发挥差异化作用。在光照强度方面，本研究结果显示，裙带菜配子体在 24~32 $\mu mol\cdot m^{-2}\cdot s^{-1}$ 下生长与 MAAs 合成都达到较高水平，而当光强增加至 36 $\mu mol\cdot m^{-2}\cdot s^{-1}$ 时，出现明显下降(图 1B)。这与其他藻类的研究结果具有一致性。例如，礁膜配子体在低光(5~30 $\mu mol\cdot m^{-2}\cdot s^{-1}$)条件下能维持生长，而在 60~90 $\mu mol\cdot m^{-2}\cdot s^{-1}$ 时生长显著增强，但当光强进一步升高至 120 $\mu mol\cdot m^{-2}\cdot s^{-1}$ 时则出现光抑制现象[19]。类似的趋势也在多肋藻配子体[20] 和笼目海带配子体[21] 中被观察到。相比之下，本研究中裙带菜配子体在低光下保持了一定的相对生长率，显示其具备一定的耐低光特性，但在高光下 MAAs 含量下降，提示其光适应能力可能弱于典型的高光适应型藻类。

光周期实验结果进一步揭示了适度延长光照时间有利于促进裙带菜配子体的生长与 MAAs 合成，而过长的光周期则会产生抑制作用。这一趋势与多肋藻配子体[20] 和笼目海带配子体[21] 的研究结果相似。在这些藻类中，中等长度光周期有利于配子体的正常发育和生殖生长，而当光周期延长至 20L:4D 时，尽管部分种类的孢子体发育率较高，但也存在能量消

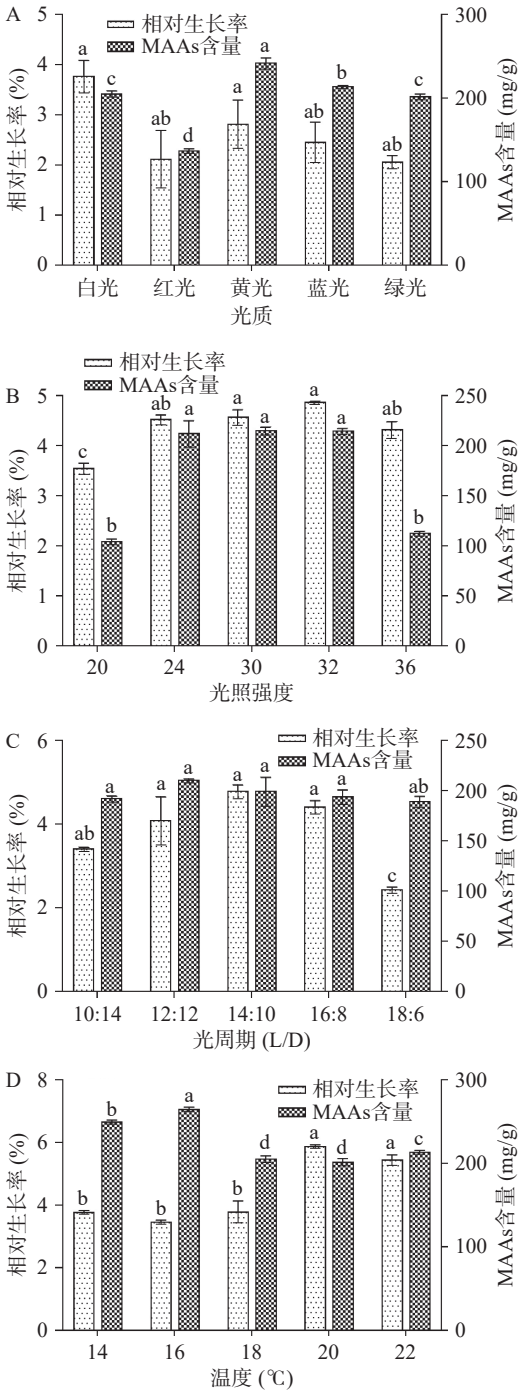


图 1 不同光质(A)、光照强度(B)、光周期(C)和温度(D)对裙带菜配子体相对生长率与 MAAs 含量的影响

Fig.1 Effects of different light qualities (A), light intensities (B), photoperiods (C) and temperatures (D) on relative growth rate and MAAs content of *U. pinnatifida* gametophytes

注: 数据以均值±标准差表示。图中不同小写字母代表组间差异具有统计学意义(P<0.05), 图 2 同。

耗过度、抑制配子体营养生长的情况。与之对比, 本研究发现裙带菜在 12L:12D、14L:10D 和 16L:8D 等中等长度光周期条件下表现最优, 而 18L:6D 下配子体生长率下降, 说明其对光周期的最优需求与其他褐藻存在一定差异, 可能与其生活史特征及能量分配策略有关。此外, 研究表明在高光和高温条件下, 裙带菜配子体会出现负增长[22], 这与本研究中高光及过长光周期导致生长受抑的现象相呼应。

图 1D 进一步揭示了温度对裙带菜配子体生长和 MAAs 积累的双重调控效应。在 20~22 ℃ 范围内, 配子体相对生长率显著(P<0.05)高于 14 ℃ 和 16 ℃ 处理组, 其中 20 ℃ 处理组生长率约为低温处理组的 1.5 倍。与之相反, MAAs 含量在较低温度条件下更易积累, 其中 16 ℃ 处理组 MAAs 含量最高(265.13 mg/g), 14 ℃ 次之。结果表明, 较高温度有利于裙带菜配子体的营养生长, 而较低温度则更适合 MAAs 的合成与积累, 这体现了生长与次生代谢之间的能量分配差异。

类似的温度调控作用在其他大型藻类研究中也有所报道。例如, 礁膜配子体在 15~25 ℃ 区间内表现出较快的生长, 而低于 15 ℃ 则出现明显抑制, 高于 25 ℃ 则趋于成熟放散[19], 表明温度的适宜范围对其生长和生殖具有决定性作用。同样地, 裙带菜配子体在 27 ℃ 下出现负增长, 而在 21~24 ℃ 条件下生长最佳[22], 这与本研究 20~22 ℃ 的结果基本一致, 说明裙带菜配子体普遍对中等温度具有较好的适应性。

然而, 不同研究之间也存在一定差异。例如, 钱瑞等[23] 发现裙带菜雌配子体在 16 ℃ 下表现最佳, 而本研究则表明 20 ℃ 更有利于生长, 这可能与实验中光强及光周期条件的不同有关, 也可能反映了地理种群的差异。对萱藻配子体的相关研究也显示, 大连与温州两地的萱藻幼配子体在最适温度上存在差异, 分别为 12 ℃ 和 14 ℃[24], 这进一步说明不同种群的适应性可能受到地理环境与进化背景的影响。在 6~20 ℃ 范围内萱藻均能萌发, 但不同温度下幼苗发育形态差异明显, 较低温度更有利于形态发育的正常进行[25]。这些结果表明, 温度不仅直接决定藻体的生长速率, 还影响其代谢分配和生活史进程。

2.2 营养盐浓度对裙带菜配子体生长和 MAAs 含量的影响

如图 2A 所示, 配子体相对生长率随初始 NO_3^- 浓度的升高呈现上升趋势。在初始 NO_3^- 浓度为 150 mg/L(高氮处理)时, 配子体相对生长率达到 4.20%, 显著(P<0.05)高于其他处理组。而其他处理组的相对生长率较低。这一结果表明, 裙带菜配子体在中低氮水平下存在一定的耐受性, 而在较高氮水平下则被促进。值得注意的是, 与生长趋势不同, 初始 NO_3^- 浓度对 MAAs 含量的调控表现为“低氮促进效应”。在 11~44 mg/L 范围内, 配子体的 MAAs 含量显著高于中高氮处理组, 提示氮限制条件下, 藻体可能会增强次生代谢途径以应对外界胁迫, 从而促进 MAAs 的合成与积累。

这一现象与其他大型海藻相关研究结果具有一致性。例如, 礁膜配子体在不同 $NaNO_3$ 浓度下的生长率呈现先升后降的趋势, 当氮磷比例达到饱和点时生长速率最大, 随后过量氮水平会抑制藻体的进一步生长[26]。这与本研究中裙带菜在中低氮水平下保持

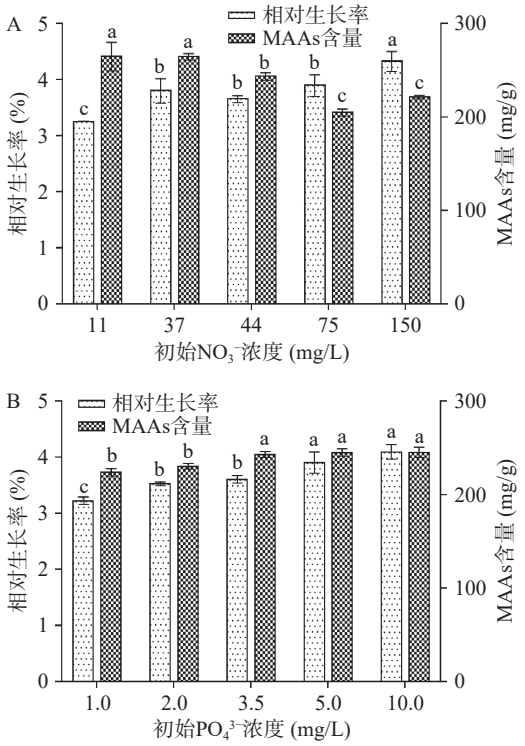


图 2　初始氮源浓度(A)和磷源浓度(B)对裙带菜配子体相对生长率与 MAAs 含量的影响

Fig.2　Effects of initial nitrogen source concentration (A) and phosphorus source concentration (B) on relative growth rate and MAAs content of *U. pinnatifida* gametophytes

稳定生长、高氮水平促进显著生长的结果相呼应。同时，该研究还指出，N/P 比是影响藻类生长的重要因子，不同藻类具有不同的最优 N/P 需求，说明不同种类的大型藻类对氮磷比例具有特异的适应性。

图 2B 显示，配子体相对生长率随初始 PO_4^{3-}浓度的增加而升高。在高磷处理组(10 mg/L)下，配子体相对生长率最高，达到 4.17%，表明较高磷水平可促进配子体的营养生长。与氮处理结果不同，初始 PO_4^{3-}浓度对 MAAs 含量的影响趋势与其对生长的作用一致，即高磷水平有利于 MAAs 的积累。当 PO_4^{3-}浓度处于 3.5~10 mg/L 之间时，MAAs 含量显著(P<0.05)高于低磷处理组，说明磷不仅是藻类细胞合成核酸和磷脂的重要元素，也可能作为调控因子促进 MAAs 代谢途径的活性。这一结果与礁膜配子体中的 N/P 比例效应[26] 相互印证，即氮磷均衡供应是藻类实现快速生长与代谢物高效积累的关键条件。

综合光照、温度及营养盐浓度的结果可见，裙带菜配子体的生长与 MAAs 合成具有环境依赖性。通过上述单因素实验，确定了配子体生长和 MAAs 积累的最佳培养条件：在白光、20 ℃、光照强度 32 μmol·m^{-2}·s^{-1} 及 14L:10D 光周期下，配子体相对生长率达到最大值(5.14%±1.11%)；而在黄光、16 ℃、光照强度 24~32 μmol·m^{-2}·s^{-1} 及 12L:12D 光周期条件下，配子体 MAAs 含量最高(269.45±0.32 mg/g)。与此同时，高氮、高磷水平促进配子体营养生长，而低氮水平则有利于 MAAs 的积累。这表明裙带菜配子体在不同环境因子作用下存在碳氮代谢分配的动态调节机制，即在营养条件适宜时优先支持细胞生长，而在氮素受限时则倾向于转向功能性次生代谢产物的合成，从而实现对环境胁迫的适应。这些结果不仅揭示了裙带菜配子体在生长与代谢调控中的调节机制，也为规模化培养及高效获得 MAAs 提供了理论依据和实践参考。

2.3　均匀试验优化

均匀设计实验结果显示，第 2 号实验组合条件下裙带菜配子体的相对生长率与 MAAs 含量均达到最高值，分别为 6.20% 和 321.99 mg/g(表 3)。将表 3 中配子体的相对生长率与 MAAs 含量数据分别导入 DPS 软件，进行二次多项式逐步回归分析，得到如下回归方程：$Y_{相对生长率}$=−165.893+9.344A+14.863AC+5.685BC，该模型 R^2=0.9992，回归方差分析结果为 F=220.32，P<0.05，表明回归方程具有显著性。$Y_{MAAs\ 含量}$=27.16+0.086C^2+19.627AC+8.478BC，该模型 R^2=0.9995，F=359.27，P<0.05，同样具备良好的预测精度。根据回归模型求解，配子体相对生长率和 MAAs 含量在光质为红色、温度为 20 ℃、光照强度为 32 μmol·m^{-2}·s^{-1} 条件下均可达到最优。为验证优化参数组合的有效性，进一步开展验证实验。结果表明，在该优化条件下培养裙带菜配子体，所得配子体相对生长率和 MAAs 含量分别达到 6.41%±0.11% 和 327.19±1.59 mg/g，均高于均匀设计中各组处理，验证了回归模型的可靠性与预测的准确性。

表 3　均匀试验结果

Table 3　Uniform experimental results

序号	因素			MAAs含量 (mg/g)	相对生长率 (%)
	A光质	B温度 (℃)	C光照强度 (μmol·m^{-2}·s^{-1})		
1	1(白光)	2(16)	5(36)	211.59±7.54	−2.49±0.93
2	2(红光)	4(20)	4(32)	321.99±13.34	6.20±1.53
3	3(黄光)	1(14)	3(30)	231.44±12.17	1.18±0.84
4	4(蓝光)	3(18)	2(24)	232.69±10.78	2.67±0.92
5	5(绿光)	5(22)	1(20)	168.88±12.14	−1.73±0.89

2.4　MAAs 的定性检测

如图 3A 所示，裙带菜配子体提取物在硅胶薄层板上显现出清晰的黄色斑点，为典型的含氮化合物阳性反应，表明该提取物中可能含有 MAAs 类化合物。紫外光谱分析结果(图 3B)显示，配子体提取物在 300 nm 附近出现明显吸收峰，为 MAAs 的特征吸收区[27]。此外，在 200~270 nm 波段也观察到一系列吸收峰，可能与 MAAs 前体物质的存在有关，亦可能受核酸、蛋白质等杂质干扰所致[17]。高效液相色谱分析结果(图 3C)显示，裙带菜配子体 MAAs 提取物中存在多个分离峰。将该色谱图与已有文献数据[14]进行对比，初步判定提取物中可能含有多种 MAAs。

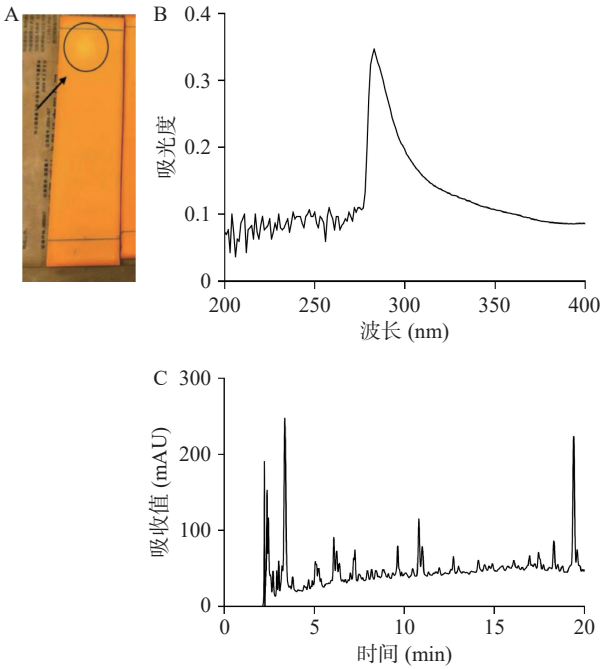


图 3　MAAs 提取物的薄层层析(A)、紫外光谱扫描(B)和 HPLC(C)检测

Fig.3　Detection of MAAs extracts by thin-layer chromatography (A), UV spectral scanning (B) and HPLC (C)

2.5　MAAs 提取物的体外抗氧化活性

如图 4A 所示，裙带菜配子体 MAAs 提取物对 DPPH 自由基的清除能力呈现出剂量依赖性，清除率随提取物浓度的升高而持续上升，但是总体清除效果不如维生素 C。在浓度为 10 mg/mL 时，MAAs 提取物对 DPPH 自由基的清除率达到 47.82%，表明其具有良好的抗氧化潜力。根据拟合的线性回归方程(y=3.1404x+12.195，R^2=0.9276)，计算得出其对 DPPH 自由基的半数清除浓度(IC_{50})为 12.04 mg/mL。

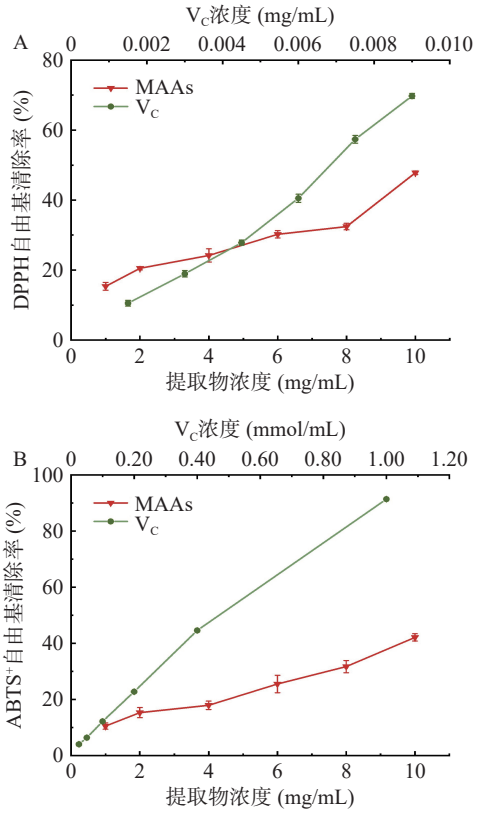


图 4　MAAs 提取物对 DPPH 自由基(A)和 $ABTS^+$ 自由基(B)的清除率

Fig.4　Scavenging rates of MAAs extracts on DPPH radicals (A) and $ABTS^+$ radicals (B)

图 4B 进一步表明，裙带菜配子体 MAAs 对 $ABTS^+$自由基的清除活性亦表现出浓度依赖性。随着提取物浓度的增加，总抗氧化能力持续增强，但总体清除效果不如维生素 C。基于回归方程(y=0.0388x+0.0988，R^2=0.9354)计算得出，其 $ABTS^+$自由基清除活性的 IC_{50} 值为 10.34 mg/mL。总的来说，裙带菜配子体中提取的 MAAs 粗提物对 DPPH 自由基和 $ABTS^+$自由基均表现出一定的清除活性，表明其具备一定的抗氧化能力。然而，该粗提物的整体清除效果仍低于维生素 C，这可能与其所含杂质成分的干扰有关。因此，在后续研究中，有必要对该粗提物进行更深入的分离与纯化，以提高 MAAs 的纯度，从而更准确地评估其抗氧化活性，并探究其在功能食品或化妆品等领域的应用潜力。

2.6　MAAs 提取物的体内抗炎活性

以绿色荧光蛋白转基因斑马鱼为模型，评价了裙带菜配子体 MAAs 提取物的体内抗炎活性。图 5 和

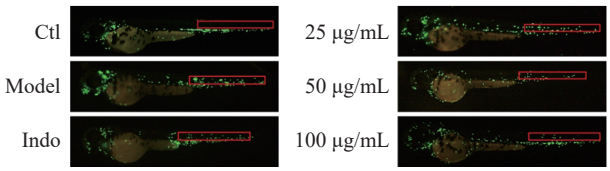


图 5　MAAs 提取物对斑马鱼炎症模型的干预效果(荧光标记炎症区域)

Fig.5　Intervention effect of MAAs extracts on zebrafish inflammation model (fluorescently labeled inflammatory regions)

注：Ctl 组(空白对照)荧光信号弱且分布少，无异常炎症反应；Model 组(炎症模型)荧光显著增强，集中于标记区域，表明炎症部位存在大量炎症相关荧光物质；Indo(阳性对照)组荧光较 Model 组减弱，证实抗炎处理的有效性。

表 4　MAAs 提取物对斑马鱼炎症模型神经丘周围巨噬细胞数量的影响

Table 4　Effects of MAAs extracts on the number of macrophages around neuromasts in zebrafish inflammation model

组别	浓度(μmol/L)	神经丘周围巨噬细胞个数	抑制率(%)
空白对照组	–	1.33±0.42	–
$CuSO_4$模型组	20	29.00±0.58$^{\#\#}$	–
吲哚美辛组	20	7.17±0.87***	75.28±3.00***
MAAs提取物组	25	25.33±1.23	12.66±4.24
MAAs提取物组	50	17.50±1.15**	39.66±3.96**
MAAs提取物组	100	13.83±1.35**	52.31±4.65**

注：##表示模型组与空白组相比具有极显著性差异(P<0.001)，**表示阳性药物组、样品组与$CuSO_4$模型组相比具有显著性差异(P<0.01)，***表示阳性药物组、样品组与$CuSO_4$模型组相比具有极显著性差异(P<0.001)。“–”表示未计算抑制率。

表 4 数据显示，空白对照组神经丘周围的巨噬细胞基线数为 1.33±0.42，而 $CuSO_4$ 诱导的模型组（Model，20 μmol/L）显著升高至 29.00±0.58（升高 21.8 倍，$P<0.001$），验证了炎症模型的构建有效性与稳定性。阳性药物吲哚美辛（Indo，20 μmol/L）可使巨噬细胞数下降至 7.17±0.87（$P<0.001$，相较模型组），抑制率达 75.28%。在 MAAs 处理组中，随着浓度从 25 μg/mL 逐步升高至 100 μg/mL，炎症抑制率依次为 12.66%、39.66% 和 52.31%，呈现出浓度依赖性正相关（$r=0.98$，$P<0.05$）。上述结果表明，裙带菜配子体 MAAs 提取物可有效抑制 $CuSO_4$ 诱导的炎症反应，具有良好的体内抗炎潜力。

3　讨论与结论

目前，国内外关于 MAAs 的研究大多集中于大型海藻的孢子体阶段或浮游藻类[14,28]，对配子体阶段的研究相对较少[29]。本研究系统考察了光照、温度、营养盐等培养条件对裙带菜配子体生长与 MAAs 积累的影响，明确了光质、温度和光照强度是调控配子体生长与 MAAs 合成的关键环境因子。实验结果表明，白光和黄光可促进配子体生长，而黄光、白光及绿光处理下 MAAs 含量均较高。已有研究表明，光质对海藻光合代谢具有重要影响，如白光可促进条斑紫菜（*Neopyropia yezoensis*）自由丝状体的生长[30]，而坛紫菜（*Pyropia haitanensis*）丝状体在蓝光下光合速率低于白光和绿光[31]，说明不同物种对光质的敏感性存在差异。尽管单因素实验中绿光对配子体生长的促进作用不如白光，但其可能通过激活特定光敏受体和信号通路诱导 MAAs 合成。在脐型紫菜（*Porphyra umbilicalis*）中，绿光与紫外线联合作用可提高 MAAs 含量[32]，说明不同物种对光质的敏感性存在差异。提示光质在调控 MAAs 合成中可能存在物种特异性和光信号敏感性差异。光照强度实验显示，配子体在 24~32 $\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ 光照强度下生长速率和 MAAs 含量达到高峰，而过强光照（36 $\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$）会抑制 MAAs 积累，与礁膜及笼目海带配子体的研究结果相符。光周期实验表明，中等长度光周期（12L:12D、14L:10D、16L:8D）有利于生长和 MAAs 合成，而过长光照（18 h）抑制生长[33]，提示配子体在光能利用和代谢调控上具有节律性适应。这些结果为进一步优化光环境以同时提高生长与 MAAs 积累提供了实验依据。

在明确光环境影响的基础上，本研究进一步揭示了温度和营养盐对配子体生长及 MAAs 积累的调控作用。在 20 ℃ 时达到最高生长率，而在 16 ℃ 时具有最高 MAAs 含量。呈先升后降趋势，显示二者在不同温度下达到各自最适值，与已有研究中礁膜和裙带菜配子体[19,22] 的温度响应基本一致。此外，氮磷营养盐水平调控海藻配子体的生长与 MAAs 积累[34−35]。高氮处理（150 mg/L NO_3^-）促进配子体生长，而中低氮水平（11~75 mg/L）仍能维持稳定生长，MAAs 含量则在低氮条件（11~44 mg/L）下升高，提示氮限制可能通过激活次生代谢增强 MAAs 合成。这与礁膜配子体在不同 $NaNO_3$ 浓度下呈现的“先升后降”生长趋势[26] 一致。磷元素对配子体生长与 MAAs 积累同样具有正向调控作用，高磷（10 mg/L PO_4^{3-}）可提高生长速率，同时在 3.5~10 mg/L 范围内 MAAs 含量达到峰值，表明氮磷协同供应是实现高效生长与代谢物富集的关键条件。这些结果揭示了裙带菜配子体在不同营养环境下的生理响应机制，为构建高效培养体系提供了理论基础。

在探明环境因子对生长和代谢的调控规律后，本研究进一步评价了配子体 MAAs 的生物活性。实验结果表明，裙带菜配子体 MAAs 提取物在 DPPH 及 $ABTS^+$ 自由基清除实验中呈现出剂量依赖性抗氧化活性，IC_{50} 值分别为 12.04 mg/mL 和 10.34 mg/mL，其抗氧化水平处于中等水平。体内实验显示，MAAs 对 $CuSO_4$ 诱导的斑马鱼炎症反应具有缓解作用，呈浓度依赖性抑制趋势，100 μg/mL 处理组抗炎效果接近阳性对照吲哚美辛，表明其在体内抗炎活性方面具有较大应用潜力。尽管大型海藻来源的 MAAs 已被证实具有良好的抗氧化[36−37] 和抗炎活性[38]，但裙带菜配子体 MAAs 的生物活性研究仍非常有限。本研究结果显示其抗炎活性尤为突出，为开发海洋功能性膳食补充剂或抗敏修复护肤品提供了新思路。此外，裙带菜被报道含有稀有 MAA 成分 palythenic acid[5,14]，本文仅进行了紫外吸收和色谱图谱的定性分析，未来仍需结合分离纯化与结构鉴定技术，明确其 MAAs 种类与组成。

综上所述，本研究系统明确了光质、光照强度、光周期、温度及营养盐对裙带菜配子体生长与 MAAs 积累的影响规律，为高效培养和规模化制备 MAAs 提供理论依据和实践参考。未来研究可通过多组学手段（如转录组、代谢组、蛋白组）结合环境因子互作实验，深入解析配子体对环境因子的代谢调控网络及信号通路，并进一步探讨其抗炎机制，从而推动 MAAs 在功能性食品、抗敏修复护肤品及海洋天然膳食补充剂中的应用。

© The Author(s) 2026. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

参考文献

[1] 中国渔业统计年鉴编辑部. 中国渔业统计年鉴[M]. 北京：中国渔业出版社，2024. [China Fishery Statistics Yearbook Editorial Board. China fishery statistics yearbook[M]. Beijing: China Fisheries Publishing House, 2024.]

[2] CHEN Xuewu, SUN Xinyuan, TANG Guhua, et al. Sulfated *Undaria pinnatifida* polysaccharide inhibits the formation of kidney stones by inhibiting HK-2 cell damage and reducing the adhesion of nano-calcium oxalate crystals[J]. Biomaterials Advances, 2022,

134: 112564.
[3] HE Shan, ZHANG Yang, YUAN Yang, et al. Process optimization and antioxidative activity of polyphenols derived from different seaweed species *Sargassum Miyabei, Undaria Pinnatifida* Suringar, and *Sargassum Thunbergii*[J]. Food Science & Nutrition, 2022, 10(6): 2021−2028.
[4] NADEESHANI H, HASSOUNA A, LU J. Proteins extracted from seaweed *Undaria pinnatifida*and their potential uses as foods and nutraceuticals[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2022, 62(22): 6187−6203.
[5] 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. [ZHU W X, QIAN L L, CHENG T J, et al. Process optimization and identification of four mycosporine-like amino acids from large brown marine macroalgae[J]. Food Research and Development, 2023, 44(4): 114−121.]
[6] SHAN Tifeng, LI Yuqian, PANG Shaojun. Genetic diversity of *Undaria pinnatifida* populations from China and their genetic relationship with those from Japan and Korea as revealed by mitochondrial and nuclear DNA sequences[J]. Botanica Marina, 2022, 65(3): 185−195.
[7] 邓海临. 裙带菜配子体培养及其 cAMP 系统研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2012. [DENG H L. Gametophyte culture and cAMP system study of *Undaria pinnatifida*[D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2012.]
[8] 李晓东. 经济海藻裙带菜品种培育和养殖相关问题的研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2023. [LI X D. Study on breeding and cultivation-related issues of economic marine macroalgae *Undaria pinnatifida*[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2023.]
[9] 逄少军, 单体锋, 刘明泰, 等. 辽东半岛裙带菜室内常温全人工育苗: 双高光控制、温度变化和配子体发育[J]. 渔业科学进展, 2011, 32(5): 74−83. [PANG S J, SHAN T F, LIU M T, et al. Indoor full artificial seedling culture of *Undaria pinnatifida* in Liaodong Peninsula at room temperature: Effects of dual high light, temperature changes, and gametophyte development[J]. Progress in Fisheries Science, 2011, 32(5): 74−83.]
[10] MIYAMOTO K T, KOMATSU M, IKEDA H. Discovery of gene cluster for mycosporine-like amino acid biosynthesis from actinomycetales microorganisms and production of a novel mycosporine-like amino acid by heterologous expression[J]. Applied and Environmental Microbiology, 2014, 80(16): 5028−5036.
[11] RASTOGI R P, RICHA, SINHA R P, et al. Photoprotective compounds from marine organisms[J]. Journal of Industrial Microbiology & Biotechnology, 2010, 37(6): 537−558.
[12] ISHIHARA K, WATANABE R, UCHIDA H, et al. Novel glycosylated mycosporine-like amino acid, 13-O-(*β*-galactosyl)-*Porphyra*-334, from the edible *Cyanobacterium Nostoc sphaericum*-protective activity on human keratinocytes from UV light[J]. Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology, 2017, 172: 102−108.
[13] ZAYTSEVA A, CHEKANOV K, ZAYTSEV P, et al. Sunscreen effect exerted by secondary carotenoids and mycosporine-like amino acids in the aeroterrestrial chlorophyte *Coelastrella rubescens* under high light and UV-a irradiation[J]. Plants, 2021, 10(12): 2601.
[14] SUN Yingying, ZHANG Naisheng, ZHOU Jing, et al. Distribution, contents, and types of mycosporine-like amino acids (MAAs) in marine macroalgae and a database for MAAs based on these characteristics[J]. Marine Drugs, 2020, 18(1): 43.
[15] GUILLARD R R L, RYTHER J H. Studies of marine planktonic diatoms: I. *Cyclotella nana* hustedt, and *Detonula confervacea* (cleve) gran[J]. Canadian Journal of Microbiology, 1962, 8(2): 229−239.
[16] ZHANG Yuyang, YU Shuangen, WANG Wenlei, et al. Temperature sensitivity of marine macroalgae for aquaculture in China[J]. Aquaculture, 2023, 567: 739262.
[17] 胡晓琪, 徐沈晨, 王思宇, 等. 石莼类菌孢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. [HU X Q, XU S C, WANG S Y, et al. Extraction process of mycosporine-like amino acids from *Monostroma* species and their antibacterial mechanism against *Vibrio parahaemolyticus*[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(18): 175−183.]
[18] 冯立新. 基于斑马鱼模型对海洋来源天然产物抗炎活性评价与机制研究[D]. 济南: 齐鲁工业大学, 2025. [FENG L X. Evaluation of anti-inflammatory activity and mechanism of marine-derived natural products based on zebrafish model[D]. Jinan: Qilu University of Technology, 2025.]
[19] 陈心怡. 光照强度、温度和盐度对大型绿藻礁膜配子体生长、光合生理及生化的影响[D]. 湛江: 广东海洋大学, 2025. [CHEN X Y. Effects of light intensity, temperature, and salinity on growth, photosynthesis, and biochemical characteristics of gametophytes of large green algae *Reef membrane*[D]. Zhanjiang: Guangdong Ocean University, 2025.]
[20] 陈书秀, 史良, 赵楠, 等. 不同光照强度和光照周期对多肋藻配子体发育的影响[J]. 水产养殖, 2023, 44(5): 36−40. [CHEN S X, SHI L, ZHAO N, et al. Effects of different light intensities and photoperiods on the development of gametophytes of *Saccharina* species[J]. Aquaculture, 2023, 44(5): 36−40.]
[21] 陈书秀, 孙娟, 李霞, 等. 光照强度和光照周期对笼目海带配子体发育的影响[J]. 渔业研究, 2021, 43(2): 153−159. [CHEN S X, SUN J, LI X, et al. Effects of light intensity and photoperiod on the development of gametophytes of *Laminariales*[J]. Fisheries Research, 2021, 43(2): 153−159.]
[22] 徐群, 刘岩, 徐静娟. 裙带菜(*Undaria pinnatifida*)配子体培养条件的优化[J]. 海洋湖沼通报, 2017(5): 102−108. [XU Q, LIU Y, XU J J. Optimization of gametophyte culture conditions of *Undaria pinnatifida*[J]. Marine and Lake Bulletin, 2017(5): 102−108.]
[23] 钱瑞, 张壮志, 孙娟, 等. 温度和光照条件对裙带菜配子体生长的影响[J]. 河北渔业, 2016(5): 9−11,16. [QIAN R, ZHANG Z Z, SUN J, et al. Effects of temperature and light conditions on the growth of *Undaria pinnatifida* gametophytes[J]. Hebei Fisheries, 2016(5): 9−11,16.]
[24] 毕萌, 宫相忠, 庄英瑞, 等. 温度对不同地理种群萱藻孢子附着、萌发及幼配子体早期发育的影响[J]. 海洋湖沼通报, 2022, 44(3): 71−77. [BI M, GONG X Z, ZHUANG Y R, et al. Effects of temperature on spore attachment, germination, and early gametophyte development of *Sargassum* populations from different geographic regions[J]. Marine and Lake Bulletin, 2022, 44(3): 71−77.]
[25] 姜佳豪. 温度对萱藻丝状体生长发育的影响[D]. 大连: 大连海洋大学, 2022. [JIANG J H. Effects of temperature on growth and development of *Sargassum* filamentous thalli[D]. Dalian: Dalian Ocean University, 2022.]
[26] 徐日升. 不同氮源对礁膜配子体生长与生化组分的影响研究[D]. 湛江: 广东海洋大学, 2021. [XU R S. Effects of different

nitrogen sources on growth and biochemical components of gametophytes of reef membrane[D]. Zhanjiang: Guangdong Ocean University, 2021.]
[27] SUN Yingying, HAN Xiu, HU Zhijuan, et al. Extraction, isolation and characterization of mycosporine-like amino acids from four species of red macroalgae[J]. Marine Drugs, 2021, 19(11): 615.
[28] ORFANOUDAKI M, HARTMANN A, KARSTEN U, et al. Chemical profiling of mycosporine-like amino acids in twenty-three red algal species[J]. Journal of Phycology, 2019, 55(2): 393−403.
[29] 姚坤志, 李峰, 黄雪颖, 等. 不同盐度和光强对刺枝紫菜自由丝状体生长的影响[J]. 水产学杂志, 2024, 37(3): 50−57. [YAO K Z, LI F, HUANG X Y, et al. Effects of salinity and light intensity on the growth of free filamentous thalli of *Pyropia* species[J]. Journal of Fisheries of China, 2024, 37(3): 50−57.]
[30] WANG Xiujuan, ZHANG Peng, WU Yubo, et al. Effect of light quality on growth, ultrastructure, pigments, and membrane lipids of *Pyropia haitanensis*[J]. Journal of Applied Phycology, 2020, 32(6): 4189−4197.
[31] SHINDO A, BORLONGAN I A, NISHIHARA G N, et al. Interactive effects of temperature and irradiance including spectral light quality on the photosynthesis of a brown *Alga Saccharina japonica* (Laminariales) from Hokkaido, Japan[J]. Algal Research, 2022, 66: 102777.
[32] 珀莱雅化妆品股份有限公司. 一种可提高脐型紫菜中类菌胞素氨基酸含量的培养方法[P]. 201610086706.3[P]. 2020-10-02. Proya Cosmetics Co., Ltd. A culture method for increasing the content of mycosporine-like amino acids in *Pyropia umbilicalis*: 201610086706.3[P]. 2020-10-02.
[33] TORRES P B, CHOW F, FERREIRA M J P, et al. Mycosporine-like amino acids from *Gracilariopsis tenuifrons* (Gracilariales, Rhodophyta) and its variation under high light[J]. Journal of Applied Phycology, 2016, 28(3): 2035−2040.
[34] NAVARRO N P, MANSILLA A, FIGUEROA F L, et al. Short-term effects of solar UV radiation and NO_3^- supply on the accumulation of mycosporine-like amino acids in *Pyropia columbina* (Bangiales, Rhodophyta) under spring ozone depletion in the sub-Antarctic region, Chile[J]. botm, 2014, 57(1): 9−20.
[35] 刘荣. 发状念珠藻中 MAAs 合成条件及性质的研究[D]. 济南: 齐鲁工业大学, 2014. [LIU R. Study on synthesis conditions and properties of MAAs in *Nostoc* sp.[D]. Jinan: Qilu University of Technology, 2014.]
[36] VEGA J, ÁLVAREZ-GÓMEZ F, GÜENAGA L, et al. Antioxidant activity of extracts from marine macroalgae, wild-collected and cultivated, in an integrated multi-trophic aquaculture system[J]. Aquaculture, 2020, 522: 735088.
[37] LI Yuxiang, WANG Jingwen, WANG Siyu, et al. Research on the optimization of preparation and the application analysis of antioxidant activity of mycosporine-like amino acids derived from marine macroalgae[J]. Blue Biotechnology, 2025, 2(1): 2.
[38] YUAN Y V, WESTCOTT N D, HU Chun, et al. Mycosporine-like amino acid composition of the edible red *Alga*, *Palmaria palmata*(dulse) harvested from the west and east coasts of Grand Manan Island, New Brunswick[J]. Food Chemistry, 2009, 112(2): 321−328.