Open Access

两种养殖模式对琼枝生长和品质的影响

黄良夫[1#]，陈云鹏[2]，吴翔宇[1]，程　芬[1]，唐贤明[1]，杨守国[1*]

（1. 海南省海洋与渔业科学院/海南省热带海水养殖技术重点实验室，海南 海口 571126 中国；2. 三亚崖州港湾投资有限公司，海南 三亚 572024 中国）

摘　要：以琼枝（*Betaphycus gelatinus*）为研究对象，系统比较陆基工厂化与海区底播两种不同养殖模式对其生长特性及营养品质的影响，旨在为规模化养殖模式优化提供理论依据。通过 60 d 的养殖实验发现，在生长特性方面，海区底播养殖琼枝的分枝数、分枝长度、相对生长速率及质量增加率均显著高于陆基工厂化养殖（$P<0.05$），其中工厂化养殖琼枝的质量增加率为（117.18±6.02）%，相对生长速率为（1.29±0.06）%·d^{-1}；而海区底播养殖琼枝的质量增加率为（196.87±5.72）%，相对生长速率为（1.81±0.04）%·d^{-1}。在色素含量方面，工厂化养殖琼枝的叶绿素 a、类胡萝卜素、藻红蛋白和藻蓝蛋白含量均显著高于海区底播养殖（$P<0.05$）。在卡拉胶含量与凝胶强度方面，两种养殖模式的琼枝均无显著差异（$P>0.05$）。工厂化养殖琼枝的呈味氨基酸含量更高，而海区底播养殖琼枝的氨基酸化学评分更优。此外，工厂化养殖琼枝的钾、锌含量较高，但钙、钠、镁、锰、铝含量低于海区底播养殖琼枝。研究结果表明，海区底播养殖模式有利于藻体生长与产量形成，而工厂化养殖模式有助于光合色素与呈味氨基酸的合成。

关键词：琼枝；养殖模式；生长特性；色素；无机元素

中图分类号：S966.9　**文献标志码：**A　**文章编号：**1674 − 7054(2026)06 − 1062 − 11

黄良夫, 陈云鹏, 吴翔宇, 等. 两种养殖模式对琼枝生长和品质的影响[J]. 热带生物学报 (中英文), 2026, 17(6): 1062−1072.　DOI: 10.15886/j.cnki.rdswxb.20250089　CSTR: 32425.14.j.cnki.rdswxb.20250089

琼枝（*Betaphycus gelatinus*）是红藻门（Rhodophyta）琼枝藻属（*Betaphycus*）的重要经济海藻，生长在热带及亚热带海域，具经济价值与生态功能[1]。该藻类富含膳食纤维、蛋白质及多糖等营养成分，且具有抗病毒、抗肿瘤等生物活性，是食品、医药和化妆品领域的高潜力资源[2-3]。然而，中国琼枝产业当前面临严峻挑战：2023 年全国琼枝干品产量仅 395 t[4]，仅占藻类总产量的 0.01%。目前，其生产高度依赖海南传统的海区底播养殖，规模小且效率低下。产业发展萎缩的核心问题源于种质资源的严重退化（长期无性繁殖导致生长缓慢、抗逆性差、胶质含量下降），病害频发（白斑病等）且缺乏有效防控手段。同时，养殖环境压力加剧（海水污染、水温升高、极端天气）导致生产风险与成本增加。传统海区底播养殖易受环境波动（季节变化、自然海域污染及空间萎缩）制约。相比之下，陆基工厂化养殖凭借环境可控性高、生产效率稳定及周年化生产优势，成为产业升级的关键方向。两种模式在光照周期、水温动态及营养盐供给等环境因子上存在根本性的差异，可能通过调控生理代谢途径，最终影响琼枝的生长性能与品质特征。

琼枝养殖模式与品质性状之间的研究，对于优化养殖技术、提高产品质量至关重要。本研究通过构建工厂化与海区养殖的平行对比体系，旨在阐明两种模式中琼枝的形态特征、生长速率、光合生理及营养品质差异，揭示养殖模式与品质之间的关系。研究成果可为养殖模式优化与工艺参数调控提供理论支撑，有利于推动琼枝产业优质高产转型，并为其他经济海藻的品质定向培育提

CC BY 4.0
收稿日期：2025−07−03　**修回日期：**2025−08−21

基金项目：国家藻类产业技术体系项目（CARS-49）；海南省自然科学基金项目 (321QN367)；国家海洋水产种质资源库项目（2026）
#第一作者：黄良夫（1992—），男，助理工程师。研究方向：大型海藻繁育。E-mail: 284821148@qq.com

***通信作者：**杨守国（1982—），男，副研究员。研究方向：养殖生态与环境。E-mail:yangshouguo82@163.com

供参考。

1　材料与方法

1.1　材料处理　实验材料: 琼枝购自海南省昌江黎族自治县琼枝养殖场。选择红色、生长旺盛的藻体, 去除附着在藻体表面的小贝壳和附生的杂藻, 选取大小和质量均一作为试验海藻, 自然海水中驯化 48 h 后开始实验。驯化温度 27 ~ 29 ℃, 光照强度 3 000 lx, 光周期为 L:D=12 h:12 h。

1.2　实验方法

1.2.1　工厂化、海区两种养殖模式琼枝养殖密度　选取大小、质量约 99 g 的作为试验海藻, 随机取 9 株琼枝用轧带固定在 0.6 m×0.6 m 双层网片水泥框(均匀分布在网片的平面, 上、中、下三层各绑 3 株), 网片由聚乙烯网制成, 网孔大小为 6 cm。

1.2.2　工厂化、海区两种养殖模式条件下环境因子　室内工厂化养殖条件: 与海区养殖属于同一片海域, 自然海水经砂滤后培养琼枝 60 d, 水温 27 ~ 30 ℃, 盐度 29 ‰, 光照强度 0 ~ 3 000 lx, 在培养过程中设定流速 0.83 m·s^{-1} 自动加水。

海区养殖条件: 养殖点中心定位为(19°18.395' N, 110°39.018' E), 水温 23.72 ~ 35.48 ℃, 盐度 29 ‰, 光照强度 0 ~ 85 155 lx, 经测定海区流速 0.25 ~ 34.76 m·s^{-1}。

1.2.3　工厂化、海区两种养殖模式条件下琼枝形态特征的比较　经过 60 d 养殖, 分别取样后使用游标卡尺对藻体的分枝数、分枝长度和宽度等方面进行比较, 测量时两种模式的样品各随机取 6 份, 测量后取平均值。使用相机对两种苗种外观拍照并比较。

1.2.4　工厂化、海区两种养殖模式下生长速率和质量增加率测定分析　60 d 后随机取 10 份测量琼枝的鲜质量, 称量前用吸水纸快速吸干体表层水。计算质量增加率(Weight Gain, WG)和相对长速率(Relative Growth Rate, RGR)。

$$WG(\%)=[(M_t-M_0)/M_0]\times 100,$$

$$RGE(\%\cdot d^{-1})=\left[\ln\left(\frac{M_t}{M_0}\right)/t\right]\times 100。$$

式中: t 为培养时间, 单位 d; M_0 为初始鲜质量, 单位 g; M_t 为 t 天后的鲜质量, 单位 g。

1.2.5　工厂化、海区两种养殖模式条件下琼枝色素和藻胆蛋白的含量分析　60 d 后, 测定琼枝鲜藻的色素和藻胆蛋白的含量, 其中叶绿素 a (Chla.a)和类胡萝卜素(Car)质量分数的测定采用无水甲醇提取法[5]; 藻红蛋白(PE)和藻蓝蛋白(PC)质量分数的测定采用磷酸缓冲液提取法[6]。

1.2.6　工厂化、海区两种养殖模式条件下琼枝卡拉胶含量分析　1)称取经过干燥箱 50 ℃ 干燥的 5.0 g 长心琼枝藻干粉, 置于 500 mL 烧杯中, 加 100 mL 5%KOH 溶液, 70 ℃ 水浴处理 1 h, 200 目筛娟过滤。2)藻体水洗, 加 0.1 mol·L^{-1} 盐酸中和至中性。3)加入 1%NaClO 处理 30 min 后水洗至中性。4)加入 300 mL 去离子水, 85 ℃ 水浴提取 2 h, 200 目筛娟过滤。5)滤液冷却后−20 ℃ 冰箱冷冻过夜。6)在液体已经完全冻结后, 取出解冻, 用 200 目筛绢过滤。7)用去离子水清洗 2 ~ 3 遍, 置于 500 mL 烧杯中, −20 ℃ 冰箱冷冻 8 h。8)置于真空冷冻干燥机(−80 ℃)中干燥。卡拉胶为白色或浅褐色、无臭或微臭, 可溶于约 80 ℃ 水。9)用电子天平对提取的卡拉胶称重(质量)。计算卡拉胶的含量。

$$卡拉胶含量=\frac{卡拉胶质量}{琼枝干品质量}\times 100\%$$

1.2.7　工厂化、海区两种养殖模式条件下琼枝营养成分测定分析　1)基础营养成分含量测定。水分含量的测定采用《GB 5009.3—2016》中直接干燥法[7]; 粗脂肪含量的测定采用《GB 5009.5—2016》中索氏抽提法[7]; 粗蛋白含量的测定采用《GB 5009.5—2016》中凯氏定氮法[7]; 总糖含量的测定采用《GB/T 15672—2009》中的硫酸脱水生成糖醛衍生物法[8]; 灰分含量的测定采用《GB 5009.4—2016》中高温灼烧法[7]。2)氨基酸含量的测定。采用《GB 5009.124—2016》的稀盐酸水解氨基酸法[9]。3)脂肪酸含量的测定。采用《GB 5009.168—2016》中脂肪皂化和脂肪酸甲酯化法[9] 用 Agilent 气相色谱仪测定。4)矿物元素含量测定。采用《GB 5009.268—2016》的硝酸消解法[7] 用美国 Thermo 公司 ICP-MS 仪器测定。5)蛋白质营养价值评价。氨基酸评分参照孙丽慧等[10]、杨少玲等[11] 的评定方法。

$$AAS(\%)=\frac{a}{A}\times 100,$$

$$CS(\%)=\frac{a}{S}\times 100,$$

EEAI =

$$\sqrt[n]{\left[\left(\frac{a_1}{S_1}\times 100\right)\times\left(\frac{a_2}{S_2}\times 100\right)\times\left(\frac{a_3}{S_3}\times 100\right)\cdots\left(\frac{a_n}{S_n}\times 100\right)\right]}。$$

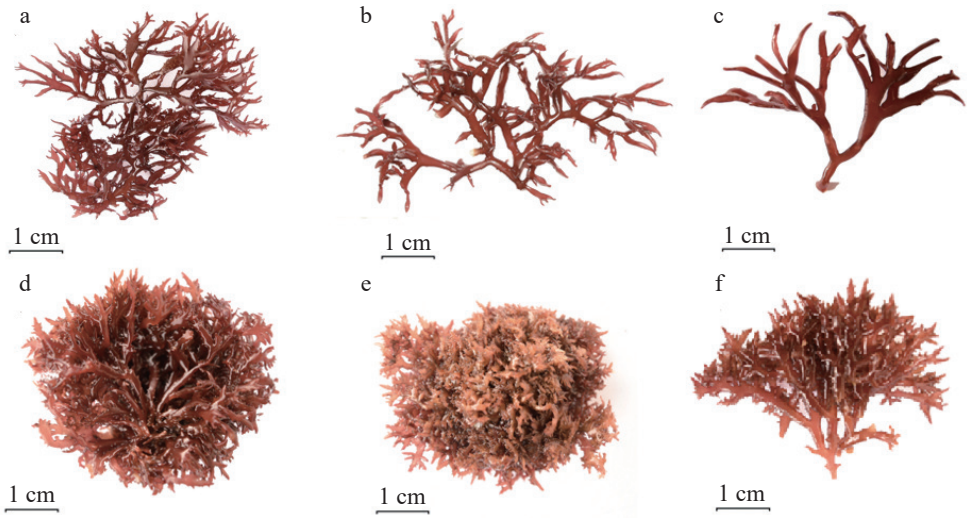
式中：a 为样品中必须氨基酸的含量，单位 mg·g^{-1}；A 为 FAO/WHO 标准模式中对应的必需氨基酸含量，单位 mg·g^{-1}；S 为全鸡蛋蛋白中对应的必需氨基酸含量，单位 mg·g^{-1}；n 为比较的氨基酸数目。

1.3 数据处理 采用 Excel 整理实验数据和 SPSS18.0 统计软件进行数据处理及统计分析。实验结果以（平均值±标准差）表示。用 One-wayANOVA（Turkey）和 t 检验来评估变量之间的差异，P<0.05 表示差异性显著。

2 结果与分析

2.1 形态比较 由图 1 可见，工厂化养殖的琼枝通常生长分散，背腹面（图 a 和图 b）形态差异不明显，分枝间互生或交叉现象较少，分枝长度较短且舒展，卷曲程度较低。而海区养殖的琼枝藻体体积较大，分枝密集且细长，整体呈团簇状，藻体向内卷曲，背腹面（图 d 和图 e）在颜色和形态上均表现出显著差异，分枝方式多样，包括不规则对生、互生或叉状分枝。工厂化养殖的琼枝整体呈鲜艳的深红色，且分枝表面无附着物。海区养殖琼枝背面呈黄绿色，腹面为紫红色。如表 1 所示，工厂化和海区养殖琼枝外观性状测量结果，海区琼枝的分枝数量显著多于工厂化养殖琼枝，分枝长度也明显更长，而在宽度和厚度方面，两种养殖模式下的琼枝无显著差异。

2.2 生长速度分析 两种养殖模式下生长情况如表 2 所示。工厂化养殖琼枝最终质量显著低于海区养殖组（P<0.05），其中工厂化养殖组的最终质量为（217.23±2.08 ）g，而海区养殖组的最终质量为（296.34±4.89）g。工厂化养殖组琼枝的相对生长速率和质量增加率显著低于海区养殖组（P<0.05），其中工厂化养殖组琼枝的相对生长速率为（1.29±0.06）（%·d^{-1}），质量增加率为（117.18±6.02）%；而



a.工厂化养殖琼枝背面；b.工厂化养殖琼枝腹面；c.工厂化养殖琼枝局部；d.海区养殖琼枝背面；e.海区养殖琼枝腹面；f.海区养殖琼枝局部。

a. Back of *Betaphycus gelatinus* in sea area; b. Ventral surface of *Betaphycus gelatinus* in the factory; c. Part of *Betaphycus gelatinus* in the factory; d. Back surface of *Betaphycus gelatinus* in sea area; e. Ventral of *Betaphycus gelatinus* in the factory; f. Part of *Betaphycus gelatinus* in sea area.

图 1 工厂化与海区养殖琼枝形态对比

Fig. 1 Morphological comparison of *Betaphycus gelatinus* between factory and sea area

表 1 琼枝外观性状测量结果

Tab. 1 Measurement results of appearance characters of *Betaphycus gelatinus*

养殖模式 Cultivation mode	分枝数/n Number of branches/n	长度/mm Length/mm	宽度/mm Width/mm	厚度/mm Thickness/mm
工厂化组 Land-based	（16.22±0.91）^{b}	（22.15±0.97）^{b}	（4.23±0.25）	（2.24±0.11）
海区组 Seafloor-sown	（26.59±1.21）^{a}	（31.32±1.48）^{a}	（4.16±0.22）	（1.95±0.13）

注：同一列标注不同字母表示差异性显著（P<0.05）。

Note: Data marked with different letters in a column mean significant difference（P<0.05）.

表 2　工厂化与海区养殖琼枝的生长速度对比

Tab. 2　Comparison of growth rate of *Betaphycus gelatinus* between factory and marine culture

养殖模式 Cultivation mode	初始质量/g Initial weight/g	最终质量/g Final weigth/g	相对生长速率/(%·d^{-1}) Relative growth rate/(%·d^{-1})	质量增加率/% Percent weight gain/%
工厂化组 Percent weight gain/%	(99.05±0.46)	(217.23±2.08)^{b}	(1.29±0.06)^{b}	(117.18±6.02)^{b}
海区组 Seafloorsown	(99.18±0.28)	(296.34±4.89)^{a}	(1.81±0.04)^{a}	(196.87±5.72)^{a}

注: 同一列标注不同字母表示差异性显著(P<0.05)。

Note: Data marked with different letters in a column mean significant difference(P<0.05).

海区养殖组琼枝的相对生长速率为(1.81±0.04)(%·d^{-1}), 质量增加率达为(196.87±5.72)%。

2.3　色素和藻胆蛋白分析　两种养殖模式下色素和藻胆蛋白的含量变化如图 2 所示。工厂化养殖组琼枝在 Chl.a 和 Car 含量显著高于海区养殖组(P<0.05), 其中工厂化养殖组琼枝的 Chl.a 和 Car 含量分别为(31.56±1.22) μg·g^{-1} 和(19.39±3.31) μg·g^{-1}; 而海区养殖组琼枝的 Chl.a 和 Car 含量分别为(21.03±2.03) μg·g^{-1} 和(13.57±0.36) μg·g^{-1}。工厂化养殖组琼枝在 PE 和 PC 含量显著高于海区养殖组(P<0.05), 其中工厂化养殖组琼枝的 PE 和 PC 含量分别为(443.89±4.55) μg·g^{-1} 和(48.88±1.22) μg·g^{-1}; 而海区养殖组琼枝的 PE 和 PC 含量分别为(338.38±37.82) μg·g^{-1} 和(32.32±2.33) μg·g^{-1}。

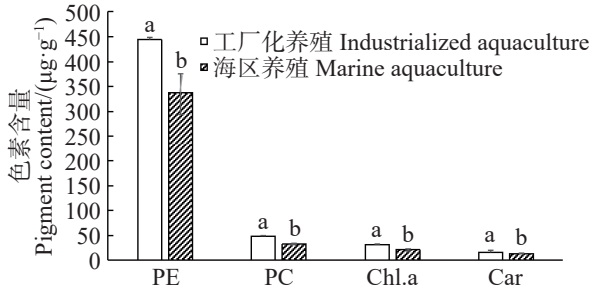


图 2　工厂化与海区养殖琼枝色素和藻胆蛋白含量

Fig. 2　Pigment and phycobiliprotein content of *Betaphycus gelatinus* in factory and marine culture

注: 同一指标不同字母表示差异性显著(P<0.05)。

Note: Different letters of the same indicator indicate significant differences(P<0.05).

2.4　卡拉胶含量分析　如图 3 所示, 对比分析了工厂化养殖与海区养殖琼枝藻株的卡拉胶含量。结果表明, 工厂化养殖琼枝的卡拉胶含量为 34.00±0.67 %, 海区养殖琼枝的卡拉胶含量为 28.67±0.92 %; 工厂化养殖与海区养殖琼枝在卡拉胶含量方面无显著差异(P>0.05)。

2.5　基础营养成分分析　两种养殖模式下基础营养成分含量如表 3 所示。两种养殖模式下的琼枝的水分含量较高, 工厂化和海区养殖组的水分含量分别为(75.06±0.40)% 和(70.91±0.45)%。工厂化养殖组琼枝的粗蛋白、粗脂肪含量显著高于海区养殖组(P<0.05), 其中工厂化养殖组琼枝的粗脂肪、粗蛋白含量分别为(0.50±0.09)%、(3.25±0.11)%, 而海区养殖组琼枝的粗脂肪、粗蛋白含量分别为(0.20±0.01)%、(2.02±0.14)%。工厂化养殖组琼枝的灰分含量显著低于海区养殖组(P<0.05), 其中工厂化养殖组的灰分含量为(9.87±0.34)%, 而海区养殖组灰分含量为(11.65±0.78)%。

2.6　氨基酸组成与营养评价　由表 4 可知, 两种养殖模式下琼枝都含有 17 氨基酸, 包括 8 中必须氨基酸, 6 种呈味氨基酸(DAA), 其中谷氨酸(Glu)含量都是最高, 工厂化养殖和海区养殖组养殖琼枝的 Glu 含量分别达到 4.1、2.2 mg·g^{-1}。工厂化养殖组琼枝 DAA 含量高于海区养殖组, 分别是 11.80 和 7.84 mg·g^{-1}。工厂化养殖组琼枝氨基酸含量最高为 Glu 含量为 4.1 mg·g^{-1}, 氨基酸总量为 25.14 mg·g^{-1}, 必需氨基酸总量为 8.88 mg·g^{-1}, EAA/TAA 为 35 %, EAA/NEAA 为 53 %; 海区养殖组琼枝氨基酸含量最高的是 Glu 含量 2.2 mg·g^{-1}, 氨基酸总量为 17.00 mg·g^{-1}, 必需氨基酸总量为 7.11 mg·g^{-1}, EAA/TAA 为 41.82 %, EAA/NEAA为 71.89 %, 符

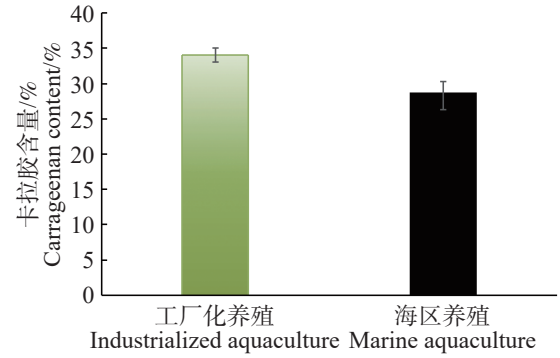


图 3　工厂化与海区养殖琼枝卡拉胶含量

Fig. 3　Carrageenan content of *Betaphycus gelatinus* in factory and marine culture

表 3 工厂化与海区琼枝基本营养成比较

Tab. 3 Basic nutrient composition of *Betaphycus gelatinus* in factory and sea area

模式 Modes	水分/% Moisture/%	粗脂肪/% Crude fat/%	粗蛋白/% Crude protein/%	总糖/% Total sugar/%	灰分/% Ash/%
工厂化组 Landbased	（75.06±0.40）	（0.50±0.09）[a]	（3.25±0.11）[a]	（8.4±0.15）	（9.87±0.34）[b]
海区组 Seafloorsown	（70.91±0.45）	（0.20±0.01）[b]	（2.02±0.14）[b]	（8.8±0.12）	（11.65±0.78）[a]

注：同一列标注不同字母表示差异性显著（P<0.05）。

Note: Data marked with different letters in a column mean significant difference（P<0.05）.

表 4 工厂化与海区琼枝氨基酸组成及含量比较分析

Tab. 4 Comparative analysis of amino acid composition and content of *Betaphycus gelatinus* in factory and sea area

氨基酸 Amino acids	工厂化组含量/（mg·g^{-1}） Amino acids (mg·g^{-1})	海区组含量/（mg·g^{-1}） Contents in Seafloor-sown (mg·g^{-1})
天冬氨酸Asp$^{\triangle}$	2.50±0.07	2.00±0.03
苏氨酸Thr*	1.30±0.05	1.00±0.01
丝氨酸Ser$^{\triangle}$	1.30±0.02	1.00±0.00
谷氨酸Glu$^{\triangle}$	4.10±0.01	2.20±0.6
甘氨酸Gly$^{\triangle}$	1.30±0.08	1.00±0.03
丙氨酸Ala$^{\triangle}$	1.50±0.07	1.20±0.01
胱氨酸Cys*	0.34±0.09	0.13±0.06
缬氨酸Val*	1.50±0.04	1.20±0.02
蛋氨酸Met*	0.26±0.03	0.30±0.07
异亮氨酸IIe*	1.00±0.05	0.88±0.03
亮氨酸Leu*	2.00±0.03	1.60±0.02
酪氨酸Tyr	0.49±0.04	0.44±0.08
苯丙氨酸Phe*	1.30±0.09	1.00±0.11
赖氨酸Lys*	1.10±0.07	1.00±0.06
组氨酸His	0.45±0.02	0.31±0.12
精氨酸Arg	3.60±0.05	1.30±0.01
脯氨酸Pro$^{\triangle}$	1.10±0.09	0.68±0.02
氨基酸总量（TAA）	25.14	17.2
必须氨基酸（EAA）	8.80	7.11
非必须氨基酸（NEAA）	16.34	10.09
呈味氨基酸（DAA）	11.80	8.04
EAA/TAA/%	35.00	41.34
EAA/NEAA/%	53.86	70.47

注：*必须氨基酸，$^{\triangle}$呈味氨基酸。

Note: *is essential amino acids, $^{\triangle}$is the amino acids relating to taste.

合 WHO/FAO 推荐的理想蛋白质模式（EAA/TAA 在 40 %左右，EAA/NEAA 在 60 %以上）。

根据 WHO/FAO 理想蛋白质模式谱以及全鸡蛋蛋白质评分标准模式，计算必需氨基酸的氨基酸评分（AAS）、化学评分（CS）和必需氨基酸指数（EAAI）来评价氨基酸营养价值[12]，结果见表 5。AAS 结果显示两种实验组第一限制氨基酸都是 Lys，第二限制性氨基酸都是 IIe。其中海区养殖组的琼枝氨基酸评分有五种氨基酸评分超过 100，分别是 Thr、Val、IIe、Leu、Tyr+Phe，符合 FAO/WHO 的推荐标准（评分越接近 100，表明该氨基酸越接近 WHO/FAO 模式，营养价值越高）。而工厂化养殖组的琼枝只有 Thr 符合 FAO/WHO 的推荐标准。而根据化学评分（CS）结果表明：海区养殖组琼枝第一限制性氨基酸为 IIe，第二限制氨基酸为 Tyr+Phe；工厂化养殖组琼枝第一限制性氨基酸为 IIe，第二限制氨基酸为 Lys。海区养殖组琼枝化学评分总体高于工厂化养殖组的评分，其中，海区养殖组琼枝的必需氨基酸指数（EAAI）为 111.65，工厂化养殖组琼枝则为 84.05。

2.7 脂肪酸组成与营养评价 由表 6 检测结果可知，工厂化养殖与海区养殖组的琼枝共检测出 5 种脂肪酸，其中 1 种饱和脂肪酸、2 种单不饱和脂肪酸和 2 种多不饱和脂肪酸。饱和脂肪酸是棕榈酸（$C_{16:0}$），其含量占工厂化、海区养殖琼枝中脂肪酸含量的比例分别为 65.52%、48.84%。单不饱和脂肪酸以油酸（$C_{18:1}$）为主，多不饱和脂肪酸富含花生四烯酸（$C_{20:4}$）和二十碳五烯酸（$C_{20:5}$）。

2.8 矿物元素组成分析 由表 7 可知，本实验共检测出 18 种矿物质元素，包括 4 种常量元素 K、Ca、Na、Mg 和 14 种微量元素 Mn、Al、Co、Pb、Zn、Cr、Fe、Ni、Cu、As、Cd、Hg、Ag、Sc。其中常量元素钾元素在工厂化养殖和海区养殖组的含量

表 5　工厂化与海区琼枝蛋白质中必需氨基酸的组成以及比较分析

Tab. 5　The composition and comparative analysis of essential amino acids in protein of *Betaphycus gelatinus* in factory and sea area

必需氨基酸 Essential amino acids	FAO/WHO模式/(mg·g^{-1}) FAO/WHO mode/(mg·g^{-1})	全蛋白模式/(mg·g^{-1}) Whole protein pattern (mg·g^{-1})	工厂化养殖琼枝 Land-based farming			海区养殖琼枝 Seafloor-sown farming		
			质量分数/(mg·g^{-1}) Mass fraction/(mg·g^{-1})	氨基酸评分 Amino acid score	化学评分 Chemical score	质量分数/(mg·g^{-1}) Mass fraction/(mg·g^{-1})	氨基酸评分 Amino acid score	化学评分 Chemical score
苏氨酸(Thr)	40	51	97.06	100	78.43	123.76	97.06	97.06
缬氨酸(Val)	50	73	81.37	92.31	63.22	118.81	81.37	81.37
异亮氨酸(IIe)	40	66	66.00	76.92**	46.62*	108.91**	66.00*	66.00
亮氨酸(Leu)	70	88	90.00	87.91	69.93	113.15	90.00	90.00
苯丙氨酸+酪氨酸(Tyr)(Phe)	60	100	71.28	91.79	55.08	118.81	71.28**	71.28
赖氨酸(Lys)	55	64	77.35	61.54*	52.88**	90.00*	77.35	77.35
必需氨基酸指数 EAAI				84.05			111.65	

注: *, 第一限制性氨基酸; **, 第二限制性氨基酸。

Note: * means the first limited amino acid, ** means the second limited amino acid.

表 6　工厂化与海区琼枝脂肪酸组成及含量

Tab. 6　Composition and proportion of fatty acids in *Betaphycus gelatinus* from factory and sea area

脂肪酸组成 Fatty acid composition	工厂化组含量/(mg·g^{-1}) Contents in Landbased (mg·g^{-1})	海区组含量/(mg·g^{-1}) Contents in Seafloor-sown (mg·g^{-1})
$C_{16:0}$	(5.7±0.02)^a	(2.1±0.01)^b
$C_{18:1}$	(0.7±0.01)^a	(0.3±0.01)^b
$C_{20:4}$	(0.8±0.02)	(0.6±0.03)
$C_{22:1}$	(0.5±0.01)^a	(0.3±0.01)^b
$C_{20:5}$	(1.6±0.04)^a	(1.0±0.03)^b
脂肪酸含量	8.7^a	4.3^b

注: 同一行标注不同字母表示差异性显著(P<0.05)。

Note: Data marked with different letters in a row mean significant difference(P<0.05).

分别为 2 880 mg·kg^{-1} 和 2 750 mg·kg^{-1}。微量元素中铁元素在工厂化养殖和海区养殖组的含量分别为 39.1 mg·kg^{-1} 和 42.5 mg·kg^{-1}。此外, 锰(Mn)、铝(Al)、锌(Zn)工厂化养殖与海区养殖组琼枝的含量差异较大, Mn 的含量海区要比工厂化养殖高, 达到了 9.05 mg·kg^{-1}。锌(Zn)的含量工厂化养殖要比海区高达到了 5.44 mg·kg^{-1}, 铝(Al)的海区比工厂化养殖高达到了 57.1 mg·kg^{-1}。微量元素均未超出国家规定食品安全的标准。

3　讨　论

3.1　两种养殖模式对琼枝生长的影响　面对野生琼枝藻资源日渐枯竭的严峻挑战, 海区水泥框底播养殖模式虽然在一定程度上支撑了规模化生产, 但其对环境因素变化的高度敏感性使其发展受到限制。与此同时, 室内培养技术也面临着核心瓶颈: 传统的高营养盐供给策略与琼枝藻适应低营养盐环境的生理特性相悖, 从而导致其光合效率降低。因此, 迫切需要构建一套与琼枝藻自身代谢特点相契合的优化养殖体系。本研究结果表明, 工厂化养殖与海区传统养殖模式对琼枝的形态特征具有显著影响。工厂化养殖的琼枝藻体呈均一的紫红色, 色泽鲜亮且不受季节变化影响。其分枝较为分散, 背腹面相对对称, 表面洁净无附着物。相比之下, 海区养殖的琼枝藻体腹面呈紫红色, 背面呈黄绿色, 形态呈团块状, 分枝不规则且紧密, 常伴有附着物, 整体不对称性明显。这些形态特征与钱树本[13] 和赵素芬[14] 的报道相符。在分枝数量上, 海区养殖的琼枝多于工厂化养殖; 在分枝长度上, 海区养殖的琼枝也更长。两种养殖模式下琼枝藻体的宽度和厚度差异不显著。海水流速的差异显著影响琼枝海藻生长和形态[15]。水流通过调节营养物质供应(如减少扩散层

表 7 工厂化与海区琼枝矿物元素含量

Tab. 7 Mineral element content of *Betaphycus gelatinus* in factory and sea area

元素 Elements	工厂化组含量/（mg·kg^{-1}）Contents in Landbased (mg·kg^{-1})	海区组含量/（mg·kg^{-1}）Contents in Seafloor-sown (mg·kg^{-1})	元素 Elements	工厂化组含量/（mg·kg^{-1}）Contents in Landbased (mg·kg^{-1})	海区组含量/（mg·kg^{-1}）Contents in Seafloor-sown (mg·kg^{-1})
K	2.88×10^3±135.61	2.75×10^3±122.32	Cr	0.260±0.010	0.675±0.020
Ca	417.00±33.13	618.00±28.32	Fe	39.10±5.12	42.50±6.32
Na	3.80×10^3±145.12	4.75×10^3±189.12	Ni	0.155±0.110	0.579±0.010
Mg	992.00±38.21	1.04×10^3±72.14	Cu	0.784±0.040	0.713±0.020
Mn	2.82±0.56	9.05±0.63	As	0.733±0.040	0.708±0.030
Al	8.98±0.45	57.10±5.78	Cd	0.007 35±0.006 00	0.002 49±0.001 00
Co	0.034 8±0.010 0	0.516±0.030	Hg	0.004 69±0.001 00	0.009 56±0.007 00
Pb	0.101±0.06	0.093 7±0.030 0	Ag	0.062 6±0.010 0	0.062 2±0.020 0
Zn	5.44±1.83	2.21±0.12	Sc	0.005 79±0.005 00	0.029 5±0.040 0

限制）、代谢废物移除、气体交换（如 CO_2 吸收）及光照获取等途径作用于生理过程：适度流速促进营养吸收和光合作用，但过高流速导致养分流失[16]。形态上，水生植物会适应性演化出更小叶片或流线型结构以降低阻力[17]。因此，在琼枝养殖和生态修复中，需进一步优化流速以提升产量和质量，避免极端流速的不利影响。

琼枝的质量增加率和相对生长速率是评价其生长发育的关键指标，其生长受多种因素影响，如海水密度和光照强度等。方哲等[6]研究表明，琼枝在海水相对密度为 1 016 ~ 1 030 范围内可生存，最适生长密度为 1.018 ~ 1.024，过高或过低均会抑制生长。童立豪等[5]发现，琼枝的生长速率和质量增长率随着光照强度增加而显著提升，且紫光和蓝光可能更利于其生长。本研究发现，海区养殖琼枝的质量增加率和相对生长速率均显著高于工厂化养殖琼枝。这种差异可能与光照条件有关，海区通常具有更高的光照强度和更长的光照周期，可能促进了光合作用效率，从而提高了生长速率。

3.2 两种养殖模式对琼枝色素含量的影响 红藻门藻类的主要色素包括 Chl.a、Car 和多种藻胆蛋白（如 PE、PC 和别藻蓝蛋白）[18-19]。藻胆蛋白不仅具有免疫调节、抗病毒和抗氧化等生物活性，在医药领域具有应用潜力 [20]，同时也是一种安全无毒的天然色素，可用于化妆品和食品添加剂[21-22]。光照强度是影响红藻色素含量的关键环境因子之一。本研究结果表明，工厂化养殖琼枝的 Chl.a、Car 及藻胆蛋白含量均显著高于海区养殖琼枝，这与 Cao 等[23] 和 Elsworth 等[24] 的结论一致，即 Chl.a 和藻胆蛋白含量会随光照强度增加而下降。

工厂化养殖模式的优势在于能够精确调控关键环境因子。实验结果与现有文献表明，适宜的光照强度及特定的光质（特别是蓝光和红光）[25]，结合稳定可控的温度条件[26] 以及充足的氮、磷等必需营养元素[27]，能有效促进琼枝光合色素（如叶绿素和藻红蛋白）的生物合成。较高水平的光合色素含量不仅直接提升了光合效率、增加了同化力（ATP 和 NADPH）的供应[28]，为后续代谢提供充足能量，进而促进氨基酸及蛋白质合成，维持藻体旺盛的生长与生理功能。而海区自然环境存在较大波动性及不确定性。暴露于高强度自然光照下，海区养殖的琼枝表现出相对较低的光合色素含量。这很可能是一种避免光损害的适应性生理策略[29]。强光照极易引发光合作用系统的过度激发，诱导活性氧（ROS）爆发性积累[30]，对细胞器（特别是光合器官）造成损伤。因此，海区琼枝色素含量较低的现象，可视为其在该特定环境限制下（强光胁迫）维持生存与基本生理稳态的一种自我调控机制[31]。

3.3 两种养殖模式对琼枝营养品质的影响 琼枝的主要经济价值源于其富含的卡拉胶，为一种硫酸酯化半乳聚糖，凭借其优良的凝胶性、增稠性、稳定性等理化特性，在工业生产中被广泛用作高品质的增稠剂、湿润剂、胶凝剂和上光剂，并在食品工业、废水处理及医药领域具有重要应用前景[32]。本研究核心发现之一是：陆基工厂化养殖与传统海区底播养殖两种模式生产的琼枝在卡拉胶含量

方面无显著差异(P>0.05)。该结果表明,在本研究条件下,工厂化模式能够产出与海区模式卡拉胶含量相当的琼枝原料藻。这为利用陆基工厂化模式稳定供给琼枝原料、支撑相关产业可持续发展提供了重要的实验依据。

本研究对两种养殖模式下的琼枝基础营养成分进行了分析。结果显示,虽然总糖含量相近,但蛋白质、脂肪及灰分含量存在显著差异。工厂化养殖琼枝的粗脂肪(0.50 %)和粗蛋白(3.25 %)含量显著高于海区养殖琼枝。而海区养殖琼枝的灰分含量(11.65 %)显著高于工厂化养殖琼枝。这种差异可能源于营养盐供给模式的不同:工厂化养殖可精准调控营养盐浓度与配比,提供稳定充足的氮、碳源,促进蛋白质和脂肪合成;研究表明,不同营养条件下,海藻的生长、营养吸收、藻类有机质以及能量储存产物存在差异[33]。而海区养殖受自然环境中营养盐浓度波动及复杂微生物群落的影响,可能更倾向于积累矿物质元素,导致灰分含量升高;对龙须菜完整养殖周期的研究表明,发现细菌群落对养殖周期有响应,且细菌群落的结构和功能与沿海养殖区营养物和重金属相关[34]。

在氨基酸组成方面,两种养殖模式下琼枝呈现不同特点。工厂化养殖琼枝的呈味氨基酸总量(11.8 mg·g^{-1})显著较高,特别是 Glu 含量差异显著。Glu 作为重要的风味增强剂,表明工厂化养殖琼枝在食品风味改良方面具有优势。定向光照可能促进了呈味氨基酸的合成[35]。然而,海区养殖琼枝的氨基酸组成均衡性更佳,其必需氨基酸与总氨基酸比值(EAA/TAA, 41.82%)、必需氨基酸与非必需氨基酸比值(EAA/NEAA, 71.89%)更接近 WHO/FAO 推荐的理想蛋白质模式。氨基酸评分(AAS)和化学评分(CS)分析显示,海区养殖琼枝在 Thr、Val、Leu 等五种氨基酸的评分超过 100,显著优于工厂化养殖琼枝(仅 Thr 达标)。海区养殖琼枝的必需氨基酸指数(EAAI, 111.65)也显著高于工厂化养殖琼枝(84.05),表明其蛋白质营养价值更高,更符合人体对优质蛋白的需求。海区养殖的自然光照周期和微量元素供给可能更有利于琼枝氨基酸代谢的均衡调控[36]。

在脂肪酸组成上,两种模式也存在显著差异。工厂化养殖琼枝的棕榈酸(C16: 0)含量(5.7 mg·g^{-1})显著高于海区养殖琼枝。棕榈酸作为人体必需饱和脂肪酸,有益于肠道健康[37]。此外,工厂化养殖琼枝的单不饱和脂肪酸油酸(C18: 1)含量(0.7 mg·g^{-1})高于海区养殖琼枝。油酸具有降血糖、调节血脂和胆固醇等功效[38]。在多不饱和脂肪酸方面,两种养殖模式琼枝均含有花生四烯酸(C20: 4)、二十碳五烯酸(C20: 5)和芥酸(C22: 1),且工厂化养殖琼枝的含量普遍更高。花生四烯酸对神经系统和视网膜发育至关重要[39],二十碳五烯酸则具有抑制肿瘤扩散、调节脂质和糖类代谢等作用[40]。

本研究共检测出 18 种矿物质元素(4 种常量元素、14 种微量元素),表明两种养殖模式下的琼枝均富含无机元素。这与 Thodhal 等[41] 在其他海藻中的研究结论一致,印证了海藻作为天然矿物质来源的属性。不同养殖模式下琼枝的元素积累差异显著:工厂化养殖琼枝的钾含量(2.88×10^3 mg·kg^{-1})更高;而海区养殖琼枝的钙、钠、镁含量占优,其中钠含量高达 4.75×10^3 mg·kg^{-1}。钠、钾元素有助于维持人体渗透压平衡,预防高血压和心血管疾病[42]。在微量元素方面,海区养殖琼枝的锰含量(9.05 mg·kg^{-1})显著更高,可能源于沉积物的自然释放;工厂化养殖琼枝的锌含量(5.44 mg·kg^{-1})则通过外源添加得以提升。这种差异符合 Bonanno 等[43] 提出的理论,即海藻矿物质积累受种类、生长环境及地理位置共同影响。值得注意的是,海藻中无机元素的生物效应具有双重性。部分元素(如碘)具有生物可利用性,但需科学控制膳食摄入量以规避风险[44]。同时,海藻对有毒金属(如镉、铅)的富集能力不容忽视[45]。本研究中,两种养殖模式下的琼枝重金属含量均符合《食品安全国家标准 藻类及其制品》(GB 19643-2016)的限量要求,证实了其食用安全性;然而,鉴于海洋环境的动态变化,仍需持续监测潜在的污染风险。

4　结　论

通过对比分析两养殖模式琼枝的各项指标发现,海区琼枝的质量增加率和相对生长速率比工厂化养殖琼枝高,且在分枝数和分枝长度方面,海区琼枝高于工厂化养殖琼枝。工厂化养殖琼枝的色素含量(包括 Chl.a、Car、PE 和 PC)均高于海区琼枝。工厂化养殖琼枝呈味氨基酸含量高于海区琼枝,而海区琼枝化学评分总体高于工厂化的。此外,在矿物质元素方面,工厂化养殖的琼枝钾含

量高，但钙、钠、镁含量低。在微量元素方面，工厂化养殖的琼枝锌含量高，但锰和铝的含量低于海区。工厂化养殖在色素积累、呈味氨基酸合成及锌富集方面具优势，而海区养殖更利于形态发育与生长速率提升。因此，建议采用“工厂化育苗+海区增殖”的联合接力养殖模式，以兼顾生长效率与营养品质。

参考文献:

[1] 刘涛. 南海常见大型海藻图鉴[M]. 北京: 海洋出版社, 2017: 88.

[2] 邹沐平, 董栋, 王怀玲, 等. 琼枝麒麟菜多糖抗呼吸道病毒活性研究[J]. 海洋科学, 2015, 39(12): 15−20. https://doi.org/10.11759/hykx20141128001

[3] 邹沐平, 董栋, 王怀玲, 等. 琼枝麒麟菜多糖抗单纯疱疹病毒 2 型活性研究[J]. 中国海洋药物, 2015, 34(4): 13−18. https://doi.org/10.13400/j.cnki.cjmd.2015.04.003

[4] 农业农村部渔业渔政管理局, 全国水产技术推广总站, 中国水产学会. 2024 中国渔业统计年鉴[M]. 北京: 中国农业出版社, 2024: 23.

[5] 童立豪, 吴翔宇, 黄良夫, 等. 光照强度与琼枝藻生长、光合色素和颜色值的相关性分析[J]. 南方水产科学, 2021, 17(5): 79−85. https://doi.org/10.12131/20200256

[6] 方哲, 刘敏, 梁磊, 等. 海水相对密度对琼枝麒麟菜的生长及其卡拉胶、色素含量的影响[J]. 热带生物学报, 2012, 3(3): 204−207. https://doi.org/10.15886/j.cnki.rdswxb.2012.03.018

[7] 李继伟, 杨贤庆, 潘创, 等. 琼枝麒麟菜的营养成分分析与评价[J]. 食品与发酵工业, 2020, 46(15): 265−269. https://doi.org/10.13995/j.cnki.11-1802/ts.022869

[8] 李继伟, 杨贤庆, 许加超, 等. 超声波辅助酶法提取琼枝麒麟菜多糖及其理化性质研究[J]. 南方农业学报, 2020, 51(12): 3030−3039. https://doi.org/10.3969/j.issn.2095-1191.2020.12.020

[9] 何伟, 罗辉, 杜思雨, 等. 三种营养类型水库和人工养殖池塘鳙鱼养成品的肌肉品质差异[J]. 渔业科学进展, 2021, 42(6): 135−141. https://doi.org/10.19663/j.issn2095-9869.20200507001

[10] 孙丽慧, 林锋, 黄爱霞, 等. 拟穴青蟹雄蟹蜕壳周期肌肉与肝胰腺营养变化趋势[J]. 海洋渔业, 2019, 41(6): 694−703. https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-2490.2019.06.006

[11] 杨少玲, 戚勃, 杨贤庆, 等. 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. https://doi.org/10.12131/20190066

[12] 樊佳佳, 朱冰, 白俊杰, 等. 白金丰产鲫含肉率及肌肉营养成分分析[J]. 大连海洋大学学报, 2018, 33(3): 347−352. https://doi.org/10.16535/j.cnki.dlhyxb.2018.03.011

[13] 钱树本. 海藻学[M]. 青岛: 中国海洋大学出版社, 2014: 244-245.

[14] 赵素芬. 海藻与海藻栽培学[M]. 北京: 国防工业出版社, 2012: 348.

[15] 李俊, 邱勇, 黄勃, 等. 海洋环境因子对琼枝麒麟菜形态特征的影响[J]. 广东农业科学, 2013, 40(13): 127−128.

[16] Comeau S, Cornwall C E, Pupier C A, et al. Flow-driven micro-scale pH variability affects the physiology of corals and coralline algae under ocean acidification[J]. Scientific Reports, 2019, 9(1): 12829. https://doi.org/10.1038/s41598-019-49044-w

[17] Chen S Y, Lin J Y. Flow resistance adaptation of aquatic macrophytes under different flow velocities[J]. Environmental Engineering Science, 2011, 28(5): 373−383. https://doi.org/10.1089/ees.2010.0291

[18] Chen X C, Yang B Y, Du X P, et al. Rapid prediction of *Porphyra* photosynthetic pigments based on colorimetric parameters[J]. Frontiers in Sustainable Food Systems, 2025, 9: 1553250. https://doi.org/10.3389/fsufs.2025.1553250

[19] Neilan B A, Murray S, Chen M. Genomic contributions to understanding the evolution of red algal plastids and pigment biosynthesis[M]//SECKBACH J, CHAPMAN D J. Red algae in the genomic age. Dordrecht: Springer, 2010: 261-273. doi:10.1007/978-90-481-3795-4_14

[20] Devliya B, Patel B, Prajapati A, et al. An assessment of marine natural pigments for medicinal potency[J]. Thalassas: An International Journal of Marine Sciences, 2024, 40(2): 959−979. https://doi.org/10.1007/s41208-024-00707-0

[21] López-hortas L, Flórez-fernández N, Torres M D, et al. Applying seaweed compounds in cosmetics, cosmeceuticals and nutricosmetics[J]. Marine Drugs, 2021, 19(10): 552. https://doi.org/10.3390/md19100552

[22] Lourenço-lopes C, Fraga-corral M, Jimenez-lopez C, et al. Metabolites from macroalgae and its applications in the cosmetic industry: A circular economy approach[J]. Resources, 2020, 9(9): 101. https://doi.org/10.3390/resources9090101

[23] Cao X X, Wang H T, Zang X N, et al. Changes in the photosynthetic pigment contents and transcription levels of phycoerythrin-related genes in three *Gracilariopsis lemaneiformis* strains under different light intensities[J]. Journal of Ocean University of China, 2021, 20(3): 661−668. https://doi.org/10.1007/s11802-021-4616-4

[24] Elsworth G W, Lovenduski N S, Mckinnon K A, et al. Finding the fingerprint of anthropogenic climate change in marine phytoplankton abundance[J]. Current Climate Change Reports, 2020, 6(2): 37−46. https://doi.org/10.1007/s40641-020-00156-w

[25] Yeh H Y, Wang W L, Nan F H, et al. Enhanced *Colaconema formosanum* biomass and phycoerythrin yield after manipulating inorganic carbon, irradiance, and

photoperiod[J]. Bioresource Technology, 2022, 352: 127073. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.127073

[26] Ruan B P, Gao Z Y, Zhao J, et al. The rice *YGL* gene encoding an Mg^{2+}-chelatase ChlD subunit is affected by temperature for chlorophyll biosynthesis[J]. Journal of Plant Biology, 2017, 60(4): 314−321. https://doi.org/10.1007/s12374-016-0596-0

[27] Ma C, Qin S, Cui H L, et al. Nitrogen enrichment mediates the effects of high temperature on the growth, photosynthesis, and biochemical constituents of *Gracilaria blodgettii* and *Gracilaria lemaneiformis*[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2021, 28(17): 21256−21265. https://doi.org/10.1007/s11356-020-11969-5

[28] Singh P, Chaubey S, Singh C, et al. Highly efficient perylene-based polymer photocatalyst/biocatalyst systems for L-glutamate production under solar light[J]. Bulletin of Materials Science, 2020, 43(1): 198. https://doi.org/10.1007/s12034-020-02170-y

[29] Smolina I, Kollias S, Jueterbock A, et al. Variation in thermal stress response in two populations of the brown seaweed, *Fucus distichus*, from the Arctic and subarctic intertidal[J]. Royal Society Open Science, 2016, 3(1): 150429. https://doi.org/10.1098/rsos.150429

[30] Kale R S, Seep J L, Sallans L, et al. Oxidative modification of LHC II associated with photosystem II and PS I-LHC I-LHC II membranes[J]. Photosynthesis Research, 2022, 152(3): 261−274. https://doi.org/10.1007/s11120-022-00902-1

[31] Thongtha S, Kittiwongwattana C, Incharoensakdi A, et al. Light-emitting diode illumination enhances biomass, pigment, and lipid production in halotolerant cyanobacterium *Aphanothece halophytica*[J]. Phycology, 2025, 5(2): 12. https://doi.org/10.3390/phycology5020012

[32] 刘芳, 赵谋明, 徐建祥, 等. 不同原料卡拉胶的物性比较研究[J]. 华南理工大学学报 (自然科学版), 2001, 29(5): 59−63. https://doi.org/10.3321/j.issn:1000-565X.2001.05.015

[33] Choi W J, Chae A N, Song K G, et al. Effect of trophic conditions on microalga growth, nutrient removal, algal organic matter, and energy storage products in *Scenedesmus (Acutodesmus) obliquus* KGE-17 cultivation[J]. Bioprocess and Biosystems Engineering, 2019, 42(7): 1225−1234. https://doi.org/10.1007/s00449-019-02120-x

[34] Xie X F, He Z L, Wang Q, et al. Diversity, composition and ecological networks of bacterial communities in response to a full cultivation cycle of the seaweed, *Gracilariopsis lemaneiformis*[J]. Environmental Research, 2024, 240: 117453. https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.117453

[35] Ye L, Zhang L Z, Cheng J, et al. Targeted amino acid metabolomic profiling revealed light-mediated quality variations in pink *Auricularia cornea*[J]. Food Bioscience, 2025, 68: 106394. https://doi.org/10.1016/j.fbio.2025.106394

[36] Chen B B, Zou D H, Zhu M J, et al. Effects of CO_2 levels and light intensities on growth and amino acid contents in red seaweed *Gracilaria lemaneiformis*[J]. Aquaculture Research, 2016, 48(6): 2683−2690. https://doi.org/10.1111/are.13100

[37] 张雅莉, 蔡美琴. B-棕榈酸 (OPO 结构脂肪) 对婴幼儿肠道健康的促进作用[J]. 临床儿科杂志, 2015, 33(10): 918−920. https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-3606.2015.10.021

[38] 张伟敏, 钟耕, 王炜. 单不饱和脂肪酸营养及其生理功能研究概况[J]. 粮食与油脂, 2005, 18(3): 13−15. https://doi.org/10.3969/j.issn.1008-9578.2005.03.004

[39] 沈雷, 唐俊, 张云霞, 等. 花生四烯酸油微胶囊配方优化及稳定性研究[J]. 中国油脂, 2016, 41(4): 14−18. https://doi.org/10.3969/j.issn.1003-7969.2016.04.004

[40] Zhang T T, Xu J, Wang Y M, et al. Health benefits of dietary marine DHA/EPA-enriched glycerophospholipids[J]. Progress in Lipid Research, 2019, 75: 100997. https://doi.org/10.1016/j.plipres.2019.100997

[41] Thodhal yoganandham S, Raguraman V, Muniswamy G, et al. Mineral and trace metal concentrations in seaweeds by microwave-assisted digestion method followed by quadrupole inductively coupled plasma mass spectrometry[J]. Biological Trace Element Research, 2018, 187(2): 579−585. https://doi.org/10.1007/s12011-018-1397-8

[42] 黄少军, 马留辉, 孟嗣杰, 等. 桂产肿节风无机元素分析[J]. 南方农业学报, 2022, 53(8): 2272−2280. https://doi.org/10.3969/j.issn.2095-1191.2022.08.020

[43] Bonanno G, Orlando-bonaca M. Chemical elements in mediterranean macroalgae. A review[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2018, 148: 44−71. https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2017.10.013

[44] Circuncisão A R, Catarino M D, Cardoso S M, et al. Minerals from macroalgae origin: Health benefits and risks for consumers[J]. Marine Drugs, 2018, 16(11): 400. https://doi.org/10.3390/md16110400

[45] Rubio C, Napoleone G, Luis-gonzález G, et al. Metals in edible seaweed[J]. Chemosphere, 2017, 173: 572−579. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.01.064

Effects of two cultivation models on the growth and quality of *Betaphycus gelatinus*

Huang Liangfu[1#], Chen Yunpeng[2], Wu Xiangyu[1], Cheng Fen[1],
Tang Xianming[1], Yang Shouguo[1*]

（1. Hainan Academy of Ocean and Fisheries Sciences, Hainan Provincial Key Laboratory of technology for tropical seawater aquaculture, Haikou 571126, China; 2. Sanya yazhou bay investment co., ltd, Sanya 572024）

Abstract: This study systematically investigated the effects of two distinct cultivation models, land-based industrial farming and seafloor sowing, on the growth characteristics and nutritional quality of *Betaphycus gelatinus*, aiming to provide a theoretical foundation for optimizing large-scale cultivation practices. Through a 60-day cultivation experiment, it was observed that seafloor-sown *B. gelatinus* exhibited significantly higher branch number, branch length, relative growth rate, and mass increase rate compared to land-based industrial farming (P<0.05). Specifically, the mass increase rate for land-based industrially cultivated *B. gelatinus* was (117.18±6.02)%, with a relative growth rate of (1.29±0.06) %·d^{-1}, whereas seafloor-sown *B. gelatinus* demonstrated a mass increase rate of (196.87±5.72)% and a relative growth rate of (1.81±0.04) %·d^{-1}. In terms of pigment content, land-based industrially cultivated *B. gelatinus* showed significantly higher levels of chlorophyll a, carotenoids, phycoerythrin, and phycocyanin compared to seafloor-sown specimens (P<0.05). No significant differences were observed in carrageenan content and gel strength between the two cultivation models (P>0.05). Industrially cultivated *B. gelatinus* contained higher levels of flavor-enhancing amino acids, while seafloor-sown *B. gelatinus* exhibited superior amino acid chemical scores. Additionally, industrially cultivated *B. gelatinus* had higher potassium and zinc content but lower levels of calcium, sodium, magnesium, manganese, and aluminum compared to seafloor-sown *B. gelatinus*. The findings indicate that seafloor sowing is more conducive to algal growth and yield formation, whereas industrial farming promotes the synthesis of photosynthetic pigments and flavor-enhancing amino acids.

Keywords: *Betaphycus gelatinus*; breeding mode; growth characteristics; pigment; inorganic element

(责任编辑:钟云芳)