褐藻提取物对条斑紫菜生长的促进作用研究

周玉凡[1]，王雨晴[2]，张馨予[1]，杜国英[1]，公衍军[3]

（1. 中国海洋大学 海洋生命学院，山东 青岛 266003；2. 烟台大学 特里尔可持续发展技术学院，山东 烟台 264005；
3. 青岛中科兴海生物科技有限公司，山东 潍坊 261500）

［摘 要］海藻提取物在农业上已被广泛应用，但其在经济海藻上尚处于初始研究阶段。就海带、裙带菜、萱藻、幅叶藻及鼠尾藻的酶解提取物对条斑紫菜叶状体生长和光合生理的作用进行研究，比较分析不同褐藻提取物的促进效果，并对酶解提取物主要活性物质含量进行测定，以探究其促进生长的物质基础及可能的作用机制。结果表明，鼠尾藻提取物稀释1 500倍浸泡条斑紫菜30 min的处理促进效果最佳，日生长率为22.41%，海带提取物稀释2 000倍浸泡30 min日生长率为21.49%，均显著高于对照（9.48%），并且相应的光合作用指标也显著高于对照及其他处理。5种褐藻提取物活性物质含量中，海带和鼠尾藻提取物的可溶性多糖含量高于其他提取物，鼠尾藻提取物叶绿素a及类胡萝卜素含量也高于其他提取物。本研究可为海藻提取物开发提供新资源，并可拓展海藻提取物在经济海藻上的应用，从而促进海藻产业的健康可持续性发展。

［关键词］褐藻提取物；条斑紫菜；生长促进

［中图分类号］TQ449+.24 ［文献标志码］A ［文章编号］2097-4566（2025）01-0058-06

Enhance function of brown algae extracts on growth of *Neopyropia yezoensis*

ZHOU Yufan[1], WANG Yuqing[2], ZHANG Xinyu[1], DU Guoying[1], GONG Yanjun[3]

（1. *College of Marine Life Sciences, Ocean University of China, Qingdao* 266003, *China*; 2. *Trier College of Sustainable Technology, Yantai University, Yantai* 264005, *China*; 3. *Qingdao Zhongke Xinghai Biotechnology Co., Ltd., Weifang* 261500, *China*）

Abstract: Seaweed extracts have been widely applied in agriculture, but their application in economic seaweeds is still in the early stages. The effects of the enzymatic extracts from *Saccharina japonica*（SJ）, *Undaria pinnatifida*（UP）, *Scytosiphon lomentarius*（SL）, *Petalonia fascia*（PF）*and Sargassum thunbergii*（ST）on *Neopyropia yezoensis* are compared and analyzed, the content of the main active substances in the enzymatic extracts is determined to explore the material basis and possible mechanism of their growth promotion. The results show that the treatment of soaking *Neopyropia yezoensis* in 1 500 fold dilution of ST extract for 30 minutes has the best promotion effect, with daily growth rate of 22.41%, while the treatment of SJ extract in 2 000 fold dilution for 30 minutes has daily growth rate of 21.49%, both significantly higher than the control（at 9.48%）. In addition, the corresponding photosynthetic indicators are also significantly higher than the control and other treatments. Among the five types of brown algae extracts, the polysaccharide content of SJ and ST is higher than that of other extracts, and the chlorophyll a and carotenoid content of ST is also higher than that of other extracts. This study can provide new resources for the exploitation of seaweed extracts and expand their application in economic seaweeds, promoting the healthy and sustainable development of the seaweed industry.

Key words: brown algae extracts; *Neopyropia yezoensis*; growth improvement

海藻提取物作为一种生物刺激素，在农业中已被广泛应用于粮食作物（小麦、玉米、土豆等）、蔬菜（黄瓜、番茄等）、果树（柑橘、葡萄、苹果、梨等）、花卉、苗圃等[1]。海藻提取物中富含营养物质，除大量和微量矿物质外，还有多糖、多酚等物质以及包括生长素、细胞激动素、甜菜碱、脱落酸、赤霉素、乙烯和多胺等植物激素，这些活性物质具有促进植物生长，提升抗逆、抗病性的作用，可显著提高农作物的产量和品质[1-2]。海藻提取物还可以用于土壤改良，如马尾藻制成的生

［收稿日期］2024-10-08

［作者简介］周玉凡（2002-），女，内蒙古包头人，生物科学专业。

［通信作者］杜国英，教授级高工，研究方向为藻类学；公衍军，工程师，研究方向为生物有机肥研发。

［基金项目］国家重点研发计划（2022YFD2400105，2023YFD2400101）；江苏省双创人才项目（JSSCRC2021432）；江苏省盐城市“黄海明珠”领军人才计划

物刺激素用于酸化土壤修复，可显著提高水稻的氮利用率，增强抗氧化活性及光合活性，从而促进水稻生长[3]。

2006年南非的Robertsson-Anderson等将海藻提取物应用在海藻上进行陆上水池实验，尝试将褐藻大昆布*Ecklonia maxima*提取物商业产品用于绿藻石莼和红藻江蓠上，但促生长效果不明显[4]。其后，陆续有研究者就泡叶藻提取物的商业产品（*Ascophyllum* marine plant extract powder，AMPEP）对养殖海藻的作用开展了研究。实验海藻以卡帕藻居多，少数为江蓠、凹顶藻、海带、浒苔等[5]。研究表明，海藻提取物可提高无性繁殖育苗的效率，减轻ice-ice病及附生物和内生菌的影响，促进室内培养和海上栽培的海藻生长，提高热带海藻卡帕藻的耐受致死低温能力和温寒带海藻海带的耐受高温能力。近年来，韩国Kim课题组研究发现经海藻提取物Kelpak®处理过的褐藻马尾藻的孢子体有更强的耐高温胁迫能力，具有更高的存活率和生长活力[6-7]；而褐藻中铜藻（*Sargassum horneri*）的提取物可提高条斑紫菜（*Neopyropia yezoensis*）的耐高温能力[8-9]。

条斑紫菜是重要的经济海藻之一，主要养殖于中、日、韩3国，年产量达300万t，年产值28.3亿美元[10]。但近年来，随着气候变化加剧，海水表层温度上升，沿海海域环境人为干扰加剧，营养盐比例不平衡，紫菜生长受到影响，生理性及病理性病害多发，造成严重经济损失[11-14]。因此，利用海藻提取物促进条斑紫菜生长及提升其抗性，对紫菜产业的健康可持续发展具有重要意义。

本研究就我国北方沿海常见的5种褐藻的酶解提取物对条斑紫菜的生长和光合生理的作用进行比较分析，并测定褐藻提取物的主要活性物质含量，综合分析不同褐藻提取物对条斑紫菜生长的促进作用，以期为海藻提取物开发提供新资源，拓展海藻提取物在经济海藻上的应用。

1　材料与方法

1.1　实验材料

野生褐藻海带（*Saccharina japonica*，SJ）、裙带菜（*Undaria pinnatifida*，UP）、萱藻（*Scytosiphon lomentarius*，SL）、幅叶藻（*Petalonia fascia*，PF）及鼠尾藻（*Sargassum thunbergii*，ST）采自青岛潮间带，由青岛中科兴海生物科技有限公司褐藻胶裂解酶进行生物酶解，获得5种褐藻酶解提取物。

条斑紫菜品系为RZ（由中国海洋大学藻类遗传学与育种实验室种子库提供），经有性繁殖获得叶状体。采用2%PES培养液在温度10 ℃、光照强度40 μmol/(m·s)、光照周期12L:12D条件下通气培养，3 d更换一次培养液，培养至紫菜叶长3 cm左右进行实验处理。

1.2　实验方法

1.2.1　稀释倍数和浸泡时间条件的筛选

稀释倍数和浸泡时间预实验：分别用1 000、1 500和2 000倍稀释的海带提取物，浸泡条斑紫菜30、60 min处理叶状体，然后进行叶面积测定；叶状体置于上述培养条件培养15 d，测定叶面积，计算生长率。

1.2.2　条斑紫菜生长和光合生理测定

5种不同褐藻提取物稀释1 500和2 000倍，浸泡30 min处理条斑紫菜叶状体，取出后立即进行叶面积和叶绿素荧光参数测定，再置于上述培养条件下培养15 d。每个处理设置3个重复，每5 d测定叶绿素荧光参数，培养15 d时测定叶面积，计算生长率。

1）　叶面积测定及生长率计算

将条斑紫菜叶状体平铺于玻璃平皿中，擦干周围水分，RGB相机拍照，利用Image J软件（NIH，美国）计算叶状体的面积。日生长率（DGR）的计算公式为：$DGR=[(A_t/A_0)^{1/t}-1]\times 100\%$，其中$A_0$为实验初始叶状体面积，$A_t$为$t$天的叶状体面积[15]。

2）　叶绿素荧光参数测定

条斑紫菜叶状体经20 min暗适应，使用叶绿素荧光成像系统FluorCam MF 800（PSI，捷克）运行Inductive curve程序进行测定，导出表征光合生理特征的相关叶绿素荧光参数：最大光量子效率（Fv/Fm）、实际光量子效率（$\Phi_{PS\text{Ⅱ}}$）、光化学猝灭（qP）[16]。

1.2.3　褐藻提取物主要活性物质含量测定

测定5种褐藻提取物中主要活性物质：海藻水溶性多糖和海藻多酚，以及叶绿素a和类胡萝卜素等色素的含量。

海藻水溶性多糖采用蒽酮–硫酸法测定[17]，以1:3加提取试剂蒽酮显色，100 ℃水浴加热15 min，接着冰水浴冷却15 min，在转速8 000 r/min下离心10 min，取上层清液在620 nm波长测定吸光度。以无水葡萄糖作标准品，构建标准曲线。将样品吸光度代入回归方程计算海藻水溶性多糖含量。

海藻多酚采用Folin-Ciocalteu比色法测定[18]：取0.1 mL样品，加0.75 mL Folin-Ciocalteu试剂，摇匀反应5 min后，加入0.75 mL的$w(Na_2CO_3)$ 6% 碳

酸钠溶液，摇匀后置于50 ℃水浴锅中5 min，冷却避光放置2 h后，用紫外可见分光光度计在765 nm波长下测定吸光度。选用没食子酸作标准品，构建标准曲线和回归方程。通过回归方程计算海藻多酚含量。

色素含量测定采用分光光度法，样本去除表面水分后称鲜质量，液氮速冻研磨，加80%丙酮置于暗条件提取20 min以上，高速离心10 min，取上层清液在663、645、630、440 nm波长处测定吸光度。叶绿素a和类胡萝卜素含量计算参考Wellburn方法[19]。

1.3 数据分析

利用IBM SPSS Statistics 20软件，使用一般线性模型单因素方差分析（One-Way Analysis of Variation，简称ANOVA）对数据进行差异性分析。采用单因素方差分析和t检验比较不同褐藻提取物及其不同稀释倍数处理对条斑紫菜生长和光合参数影响的差异性。

2 结果与讨论

2.1 不同稀释倍数及处理时间比较

海带提取物处理与对照相比，在各稀释倍数和处理时间条件下多显著促进条斑紫菜生长（$p<0.05$），仅稀释2 000倍、浸泡60 min处理日生长率低于对照处理，但与对照处理差异不显著（见图1，不同字母表示差异显著，下同）。处理时间上，除稀释1 000倍外，不同稀释倍数浸泡条斑紫菜30 min的日生长率均显著高于浸泡60 min（$p<0.05$）。不同稀释倍数处理对条斑紫菜日生长率的作用在浸泡时间为60 min条件下差异显著（$p<0.05$），而在处理30 min条件下差异不显著（$p>0.05$）。基于30 min处理效果普遍优于60 min处理，1 000倍处理与1 500倍处理30 min的差异不显著，后续实验采用浸泡时长30 min、稀释倍数为1 500倍和2 000倍处理条件。

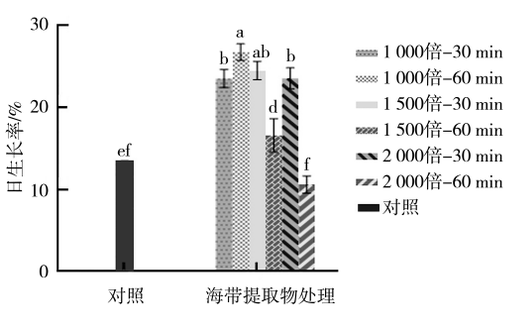


图1 海带提取物不同稀释倍数及时间处理条斑紫菜的日生长率

Fig. 1 Daily growth rate of *Neopyropia yezoensis* treated by *Saccharina japonica* extracts with different dilution ratios and times

2.2 褐藻提取物对条斑紫菜生长的影响

不同处理中，仅幅叶藻提取物处理和萱藻提取物稀释2 000倍处理对条斑紫菜生长促进效果不显著，其他4种提取物的两种稀释倍数处理相比对照均显著促进了条斑紫菜生长（$p<0.05$），其中鼠尾藻提取物稀释1 500倍处理组的日生产率最高，为22.41%，海带提取物稀释2 000倍处理次之，为21.49%，均显著高于对照（9.48%）（见图2）。稀释1 500倍条件下，5种褐藻提取物对条斑紫菜生长促进效果由高到低为鼠尾藻提取物>海带提取物>裙带菜提取物>萱藻提取物>幅叶藻提取物；而稀释2 000倍条件下，则为海带提取物>鼠尾藻提取物>裙带菜提取物>萱藻提取物>幅叶藻提取物。

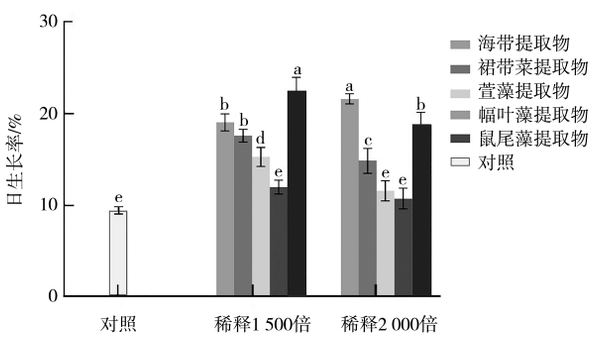


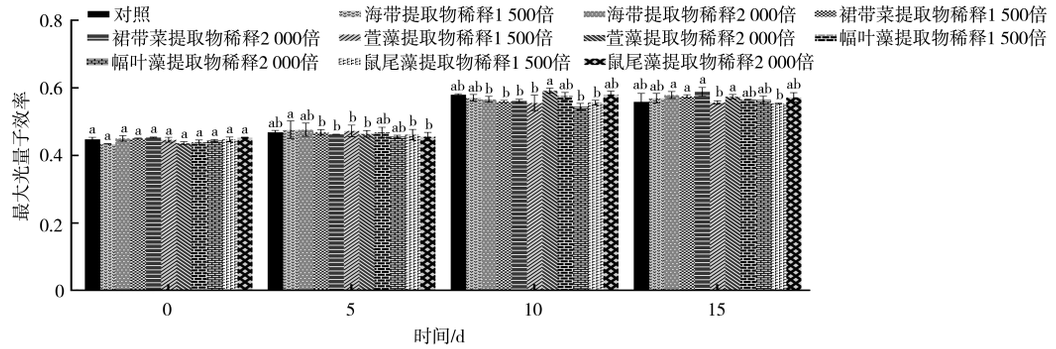
图2 5种褐藻提取物与对照处理的条斑紫菜日生长率

Fig. 2 Daily growth rate （DGR） of *Neopyropia yezoensis* treated by 5 brown algae extracts

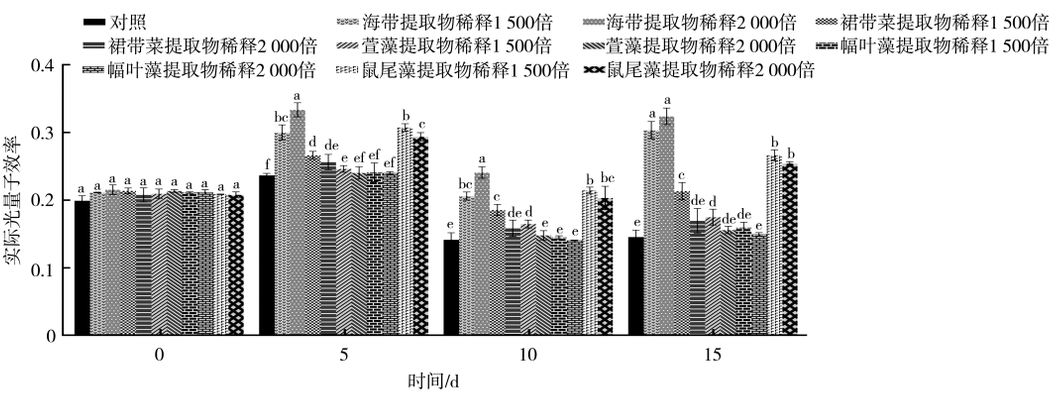
2.3 褐藻提取物对条斑紫菜光合生理的影响

5种野生褐藻提取物两个稀释倍数30 min处理下，条斑紫菜光合生理参数变化有所不同。各处理条件下，条斑紫菜最大光量子效率在培养初始及培养5 d均无差异，且与对照相近；培养10 d，萱藻提取物2 000倍稀释处理的最大光量子效率显著高于幅叶藻提取物稀释2 000倍和鼠尾藻提取物稀释1 500倍处理；培养15 d，裙带菜提取物稀释2 000倍处理的最大光量子效率显著高于萱藻提取物稀释1 500倍和鼠尾藻提取物稀释1 500倍处理（见图3a.）。整体上，最大光量子效率各处理间差异不大，且在培养10 d和15 d时整体有所升高。

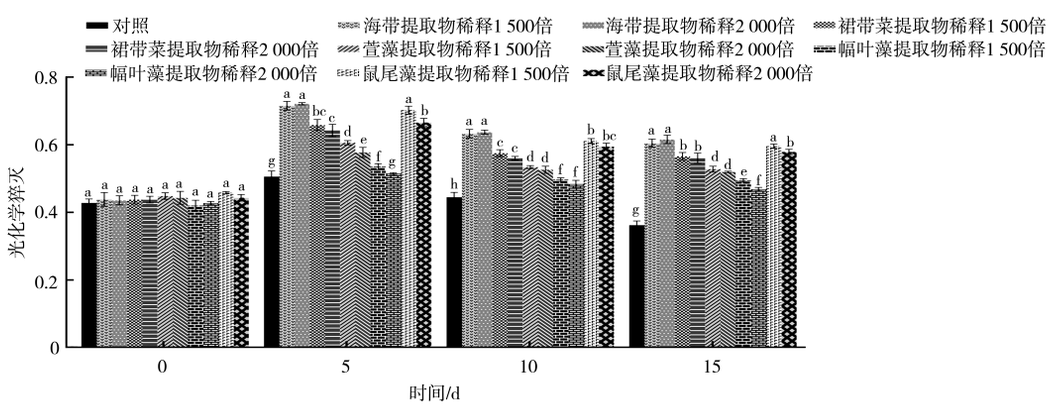
海带和鼠尾藻提取物稀释1 500和2 000倍数处理的实际光量子效率显著高于其余处理和对照（$p<0.05$），而其余各处理与对照之间均无显著差异（见图3b.）。海带提取物稀释1 500倍处理的实际光量子效率低于稀释2 000倍处理，而鼠尾藻提取物



a. 最大光量子效率



b. 实际光量子效率



c. 光化学猝灭

图 3　5 种褐藻提取物与对照处理的条斑紫菜光合生理参数变化

Fig. 3　Changes of photosynthetic parameters of *Neopyropia yezoensis* treated by 5 brown algae extracts

反之，稀释 1 500 倍的效果略高于稀释 2 000 倍（见图 3b.）。

除幅叶藻提取物稀释 2 000 倍处理培养 5 d 时与对照的光化学猝灭（qP）无显著差异外，其余各个处理均比同时期对照有显著增加（$p < 0.05$，见图 3c.）。5 种提取物中，海带和鼠尾藻提取物处理的提升效果最为显著（$p < 0.05$），且以海带提取物处理的略高些（见图 3c.）。海带提取物稀释 2 000 倍的光化学猝灭略高于稀释 1 500 倍的处理，但两者无显著差异；而鼠尾藻提取物稀释 1 500 倍的光化学猝灭高于稀释 2 000 倍的处理（见图 3c.）。

2.4　褐藻提取物中活性物质含量

5 种褐藻提取物中各活性物质含量有所不同。可溶性多糖含量指标，鼠尾藻提取物最高，ρ（可溶性多糖）均值为 39.52 mg/mL，其次是海带提取物，均值为 37.73 mg/mL，最少的是幅叶藻提取物；除海带和裙带菜提取物可溶性多糖含量差异不显著外，其他褐藻提取物间可溶性多糖含量差异显著（见表 1）。海藻多酚含量指标，萱藻提取物最高，ρ（海藻多酚）为 131.62 μg/mL，其次是幅叶藻

提取物，为122.35 μg/mL，鼠尾藻提取物的为114.54 μg/mL，最少的是海带提取物，ρ（海藻多酚）为75.52 μg/mL，各提取物海藻多酚含量差异显著（$p<0.05$）。叶绿素a指标，鼠尾藻提取物的ρ（叶绿素a）最高，为32.73 μg/mL，且显著高于其他提取物（$p<0.05$），萱藻和幅叶藻提取物含量相近，裙带菜提取物中ρ（叶绿素a）最低。类胡萝卜素指标，鼠尾藻提取物ρ（类萝卜素）为9.42 μg/mL，显著高于其他提取物（$p<0.05$），其他海藻提取物中类胡萝卜素含量差异不大，最少的是裙带菜提取物。

表1 5种褐藻提取物主要活性物质含量

Table 1 Content of main active components in 5 brown algae extracts

海藻种类	ρ（可溶性多糖）/（mg·mL⁻¹）	ρ（海藻多酚）/（μg·mL⁻¹）	ρ（叶绿素a）/（μg·mL⁻¹）	ρ（类胡萝卜素）/（μg·mL⁻¹）
海带	37.73±0.25b	75.52±0.79e	24.52±0.26c	7.33±0.21b
裙带菜	36.63±0.36b	91.13±1.37d	21.47±0.19d	6.92±0.14b
萱藻	33.71±0.24c	131.62±2.51a	27.61±0.25b	7.11±0.25b
幅叶藻	30.44±0.38d	122.35±1.43b	26.74±0.31b	7.51±0.18b
鼠尾藻	39.52±0.35a	114.54±1.69c	32.73±0.27a	9.42±0.23a

注：不同小写字母表示差异显著（$p<0.05$）。

3 讨论

海藻提取物属于绿色环保生物刺激素，能够促进农作物生长、提高其抗逆抗病性。由于褐藻的自然生物量和养殖产量普遍高于其他大型海藻（如红藻和绿藻），目前市场化使用的海藻多为野生或养殖的大型褐藻[20]。本研究中，5种褐藻提取物对条斑紫菜生长均有不同程度的促进作用，其中海带和鼠尾藻提取物的促进效果最显著。从光合生理参数上也可看出，褐藻提取物尤其是海带和鼠尾藻提取物有效提升了条斑紫菜的实际光合效率（$\Phi_{PS\text{Ⅱ}}$）和光化学反应能力（qP），这是促进条斑紫菜生长的生理基础。本研究结果表明，海带提取物稀释2 000倍和鼠尾藻提取物稀释1 500倍处理促进效果最为显著，综合考虑效果和用量，稀释倍数为2 000的海带提取物可作为最优处理。

海藻提取物应用于陆地作物、蔬菜及果木上，主要进行叶面喷施和根际土壤灌施，也有对种子和幼苗进行浸泡或蘸根处理的[1,3,20-22]。对于经济海藻，因其为水上养殖，喷施等方式不适用，更为实用可行的方式是对幼苗进行浸泡处理，提升苗期生长和抗性，室内实验研究时也有采用含海藻提取物的培养液进行定期培养的处理方法[5-7]。本研究从后期实用性角度出发，采用苗期浸泡处理方法，在处理条件筛选实验中发现，浸泡时间上30 min和60 min处理差异并不显著，因此选择更短的30 min进行后续实验。实验所用的褐藻提取物是酶解清液，在比较了各稀释倍数下效果差异性后，也是选择稀释倍数1 500倍和2 000倍处理方式进行进一步实验，以便于后期生产使用中减少成本。

海藻的活性组分复杂、种类多，据报道有60多种，除大量钙、铁、镁、锌等矿质营养元素外，还有褐藻淀粉、岩藻多糖、褐藻糖胶、木聚糖、葡聚糖等海藻多糖，糖醇、氨基酸、维生素、细胞色素、甜菜碱以及酚类化合物等，此外，还含有生长素、细胞激动素、赤霉素、脱落酸等天然激素类物质[1,5,19]。经生物酶解获得的褐藻酶解液可最大限度地保有这些活性物质[23-24]。研究发现，褐藻中海藻多糖含量较高，主要形式为褐藻胶、褐藻糖胶以及海带淀粉等，褐藻也含有比绿藻和红藻更高的多酚。海藻多糖对促进植物生长和光合作用效果较好，也具有提升抗逆性的作用[25-26]。本研究中，海带提取物和鼠尾藻提取物的可溶性多糖和多酚含量均高于其他提取物，也是对条斑紫菜生长和光合作用促进效果最好的。褐藻的类胡萝卜素以岩藻黄素为主。海藻提取物中叶绿素a和类胡萝卜素对植物的作用研究尚不透彻。本研究中鼠尾藻提取物类胡萝卜素含量高于其他褐藻提取物，对条斑紫菜生长和光合效率促进作用也最佳，表明类胡萝卜素或许在促进条斑紫生长和光合作用上发挥了作用。海藻提取物中生长素、细胞分裂素（细胞激动素）、赤霉素和脱落酸等天然激素类物质促生长作用潜能很大，本研究中未进行测定分析，需要在今后实验中进行更深入细致的分析。再者，由于海藻提取物是一类混合物，发挥作用时并不是单一物质的作用，因此在后续研究中，也极有必要既进行单种活性物质的作用机制研究，又进行多种活性物质复合作用机制研究。

本研究对5种褐藻提取物比较实验中，发现同为显著促进条斑紫菜生长和光合作用的海带和鼠尾藻提取物，海带提取物稀释2 000倍处理效果高于稀释1 500倍，而鼠尾藻提取物反之，是稀释1 500倍效果更显著。原本推测可能是因为海带中起促进作用的活性物质浓度较高，更高稀释倍数有助于其发挥作用，然而所测的活性物质含量中，海带提取物中没有成分含量高于鼠尾藻提取物的，这让我们转而推测或许有我们未测定的活性物质或者是某些活性物质的复合作用的原因。更细致的实验需要开

展，即一方面扩展测定更多种活性物质含量，另一方面，细化不同处理条件对生长和生理的作用，包括提纯活性物质进行单因素和复合因素实验，并将促进效果与特定活性物质含量进行相关性分析，以探究其中内在的机制。

4　结论

实验的5种褐藻提取物中，海带提取物稀释2 000倍和鼠尾藻提取物稀释1 500倍浸泡条斑紫菜30 min的处理促进条斑紫菜生长和光合效率效果最佳，2种提取物活性物质的可溶性多糖含量高于其他提取物，鼠尾藻提取物类胡萝卜素和叶绿素a含量也高于其他提取物。海藻提取物对条斑紫菜生长促进作用的差异可能来源于其活性物质含量的差别，但尚需开展进一步研究。本研究结果可为海藻提取物开发提供新资源、拓展新应用途径，促进海藻产业的健康可持续性发展。

[参考文献]

[1] 陈芊如，褚德朋，NAILA I，等.海藻提取物的农业应用研究进展[J].江苏农业科学，2021，49(20)：49-56.
CHEN Q R，CHU D P，NAILA I，et al. Research progress on agricultural application of seaweed extracts [J]. Jiangsu Agricultural Sciences，2021，49(20)：49-56.

[2] KULKARNI M G，GUPTA S，NGOROYEMOTO N，et al. Smoke，seaweed extracts，and vermicompost leachates-classical natural plant biostimulants [J]. Biostimulants for Crops from Seed Germination to Plant Development，2021：73-85.

[3] CHANTHINI K M，PAVITHRA G S，MURUGAN P，et al. Management of excessive soil H^+ ion induced toxicities by application of organic seaweed amendment enhances photosynthesis and resource use efficiencies in rice (*Oryza sativa*)[J]. Environmental Research，2024，247：118-179.

[4] ROBERTSON-ANDERSSON D V，LEITAO D，BOLTON J J，et al. Can kelp extract (KELPAK®) be useful in seaweed mariculture[J]. Journal of Applied Phycology，2006，18：315-321.

[5] HURTADOA A Q，CRITCHLEY A T. CH4. Time for applications of biostimulants in phyconomy：Seaweed extracts for enhanced cultivation of seaweeds (SEECS) [J]. Sustainable Seaweed Technologies，2020：103-127.

[6] UMANZOR S，SHIN S，MARY-RIVERA M，et al. Preliminary assessment on the effects of the commercial seaweed extract，AMPEP，on growth and thermal tolerance of the kelp *Saccharina* spp. from the Northwest Atlantic [J]. Journal of Applied Phycology，2019，31：3823-3829.

[7] UMANZOR S，SHIN S，YARISH C，et al. Exploratory evaluation of the effects of Kelpak® seaweed extract on cultivated kelp *Saccharina* spp. exposed to sublethal and lethal temperatures[J]. Journal of the World Aquaculture Society，2020，51(4)：960-969.

[8] HAN S，PARK J S，UMANZOR S，et al. Effects of extraction methods for a new source of biostimulant from *Sargassum horneri* on the growth of economically important red algae，*Neopyropia yezoensis*[J]. Science Report，2022，12：11878.

[9] XING Q，HAN S，PARK J S，et al. Comparative transcriptome analysis reveals the molecular mechanism of heat-tolerance in *Neopyropia yezoensis* induced by *Sargassum horneri* extract [J]. Frontiers of Marine Science，2023，10：1142483.

[10] FAO. Fishery and aquaculture statistics yearbook 2020 [M]. Rome：[s.n.]，2023.

[11] 杨慧超.条斑紫菜(*Pyropia yezoensis*)的病害调查及其绿斑病病原的PCR检测方法[D].上海：上海海洋大学，2019.
YANG H C. Disease investigation of *Pyropia yezoensis* and development of PCR detection method for *P. yezoensisgreen* spot disease[D]. Shanghai：Shanghai Ocean University，2019.

[12] 杨佳丽，冯泽中，牛建峰，等.低盐、高温诱导的条斑紫菜(*Pyropia yezoensis*)病烂机制研究[J].海洋与湖沼，2021，52(5)：1214-1223.
YANG J L，FENG Z Z，NIU J F，et al. Preliminary study on the mechanism of rotten diseases induced by low salinity and high temperature in *Pyropia yezoensis*[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica，2021，52(5)：1214-1223.

[13] 文茜，马家海，刘一萌.坛紫菜附着硅藻的形态特征及在福建省的分布[J].广东农业科学，2012，39(16)：142-145.
WEN Q，MA J H，LIU Y M. Morphological characteristics and distribution of epiphytic diatoms on *Porphyra haitanensis* in Fujian province[J]. Guangdong Agricultural Sciences，2012，39(16)：142-145.

[14] 刘一萌，马家海，文茜.坛紫菜赤腐病与拟油壶菌病并发病的初步研究[J].大连海洋大学学报，2012，27(6)：546-550.
LIU Y M，MA J H，WEN Q. Simultaneous infection by red rot and olpidiops disease in laver *Porphyra haitanensis*[J]. Journal of Dalian Ocean University，2012，27(6)：546 -550.

[15] MA L H，TIAN L，WANG Y Q，et al. Physiological and transcriptome analysis of acclimatory response to cold stress in marine red alga *Pyropia yezoensis*[J]. Algae，2024，39(1)：17-30.

[16] DU G Y，LI X J，WANG J C，et al. Discrepancy in photosynthetic responses of the red alga *Pyropia yezoensis* to dehydration stresses under exposure to desiccation，high salinity，and high mannitol concentration [J]. Marine Life Science and Technology，2021，4(1)：1-8.

[17] 胡德分，刘金美，李凤娇，等.蒽酮－硫酸法测定乌天麻多糖含量的条件优化[J].云南民族大学学报(自然科学版)，2023，32(6)：687－694.
HU D F，LIU J M，LI F J，et al. Determination and optimization of the polysaccharide content of *Gastrodia Elata* Bl. F. glauca by anthrone -sulfuric acid methods [J]. Journal of Yunnan Minzu University (Natural Sciences Edition)，2023，32(6)：687-694.

[18] JESUMANI V，DU H，PEI P B，et al. Comparative study on skin protection activity of polyphenol-rich extract and polysaccharide-rich extract from *Sargassum vachellianum* [J]. PLoS ONE，2020，15(1)：0227308.

[19] WELLBURN A R. The spectral determination of chlorophylls *a* and *b*，as well as total carotenoids，using various solvents with

(下转第95页)