

文章编号: 1000-0615(2019)04-1048-10

DOI: 10.11964/jfc.20171211111

三十烷醇对铜藻生长及岩藻黄素含量的影响

吕芳^{1,2}, 吴海一^{1,2}, 丁刚^{1,2}, 詹冬梅^{1,2}, 郭文^{1*}

(1. 山东省海洋生物研究院, 山东 青岛 266104;

2. 青岛市大型海藻工程技术研究中心, 山东 青岛 266104)

摘要: 为探讨三十烷醇对铜藻生长的影响, 本研究采用不同浓度(0、0.1、0.5、1.0和2.0 mg/L)的三十烷醇连续施用20 d, 或用三十烷醇浸泡处理24 h后, 再恢复正常条件培养20 d, 分别测定了铜藻的生长、生理生化指标(光合色素、可溶性蛋白、可溶性糖)以及岩藻黄素含量的变化情况。结果显示, 连续施用5 d时, 各组藻体的比生长速率(RGR)、叶绿素a(Chl.a)、类胡萝卜素(Car)、可溶性蛋白、可溶性糖的含量均显著高于对照组; 15 d时, 2.0 mg/L浓度组的铜藻生长受到抑制, 各项生理指标均显著下降; 20 d时, 除了0.1 mg/L浓度组的铜藻生长仍有促进外, 其他3个较高浓度的施用组均受到不同程度的抑制, 且三十烷醇的浓度越高, 抑制作用越明显。经三十烷醇浸泡处理的藻体恢复正常条件培养5 d时, 各组藻体的RGR、Chl-a、Car、可溶性蛋白和可溶性糖的含量均显著上升; 10 d时, 0.5和1.0 mg/L浓度组的铜藻生长速率仍显著高于对照组, 但15 d时已与对照组无显著差异, 且综合各项生理生化指标, 1.0 mg/L组的促进作用最为明显, 这种促生长的作用能持续到处理后10 d左右。岩藻黄素的含量除连续施用2.0 mg/L组在实验20 d时低于对照组外, 其余各实验组在培养20 d内均显著高于对照组, 其中1.0 mg/L三十烷醇浸泡处理24 h恢复培养10 d, 可使岩藻黄素的含量提高79.5%。研究表明, 连续施用低浓度的三十烷醇(0.1 mg/L) 20 d或以1.0 mg/L三十烷醇每10 d浸泡处理24 h, 对铜藻的生长和岩藻黄素的积累有显著的促进作用。

关键词: 铜藻; 三十烷醇; 连续施用; 浸泡; 生长; 岩藻黄素

中图分类号: S 968.42

文献标志码: A

铜藻(*Sargassum horneri*)是一种大型经济褐藻(Phaeophyta), 是我国沿海海藻场的重要组成部分, 对海水中的富营养物质以及重金属等具有较强的生物吸附能力, 具有重要的生态价值。近年来, 随着铜藻中次生代谢产物及活性物质的开发和应用, 铜藻在医药保健、生物制品以及化学工业等领域也极具开发潜力。铜藻定生种群多生长在潮下带-4 m的浅海岩礁或低潮带石沼上, 其种群的繁衍以有性生殖为主, 残枝营养繁殖藻株约占种群藻株总数的5%^[1]。2007年以来, 黄海浒苔(*Ulva sp.*)绿潮暴发过程中, 还

夹着一些漂浮的褐藻, 经鉴定该漂浮褐藻为铜藻^[2-3]。2017年6月, 黄海海域连续第11年暴发绿潮灾害, 而且夹杂着的漂浮铜藻的生物量显著高于往年同期, 形成“马尾藻金潮”, 因此, 对铜藻资源进行合理地开发和利用是目前亟待解决的问题。

岩藻黄素(fucoxanthin)是一种特殊的类胡萝卜素, 与叶绿素a和叶绿素c组成捕光复合物, 进行光捕获和光传递, 在光合作用的光化学系统中具有重要的作用。此外, 岩藻黄素还具有抗氧化^[4]、抗肿瘤^[5]、降血脂^[6]、降血糖^[7]等多种生

收稿日期: 2017-12-28 修回日期: 2018-02-05

资助项目: 海洋公益性行业科研专项(201505022); 山东省现代农业产业技术体系创新团队项目(SDAIT26); 山东省农业重大应用技术创新项目

通信作者: 郭文, E-mail: guowen1963@126.com

物学活性,具有广阔的研究和应用前景。对铜藻的营养品质进行分析和评价中发现,铜藻富含岩藻黄素^[8],一些企业已经将铜藻用于岩藻黄素的提取,因此,对铜藻进行可控的定向培育来提高其岩藻黄素的含量,这对提高产量和品质,促进产业发展有重要意义。

三十烷醇(triacontanol)是一种植物生长调节剂,具有促进植物生长、能量代谢和干物质积累等特殊的生理功能,已广泛应用于农作物生产,并取得了显著的增产效果^[9]。三十烷醇在藻类上的应用实验也有一些相关报道,主要集中在对一些微藻^[10-11]以及大型经济海藻生长的影响方面^[12-14],结果发现,适宜浓度的三十烷醇具有明显的促生长作用,对绳江藻(*Gracilaria chorda*)、海萝(*Gloiopeltis furcate*)的孢子萌发也有显著效果^[15-16]。因此,将三十烷醇应用于藻类生产,进一步对其生理效应进行系统研究,从而筛选出明确的使用方法和使用浓度,是实现藻类高产优质的的重要途径。

本研究以“马尾藻金潮”漂浮铜藻为材料,在室内培养条件下,分析了不同浓度三十烷醇连续培养和浸泡这两种方法处理后,恢复正常条件培养,对铜藻生长、生理生化指标(光合色素、可溶性蛋白、可溶性糖)以及岩藻黄素含量的影响,以期三十烷醇在铜藻生产中的合理应用提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 实验材料

铜藻于2017年7月采自山东青岛黄岛金沙滩海域(35°96'N, 120°25'E),用低温箱运回实验室,海水反复清洗去除泥沙及杂质后,置于温度15℃,光照5 000 lx,光周期为12 L:12 D的循环水箱中充气培养,5 d后用于实验。选取生长良好、形态较一致,分枝尖端长度为(8.0±0.5) cm的藻植段进行实验。

1.2 实验设计

实验1组(连续施用组):培养液为加不同质量浓度三十烷醇的过滤海水,三十烷醇浓度设为0.1、0.5、1.0和2.0 mg/L,以天然过滤海水作为对照组。

实验2组(浸泡组):用不同质量浓度的三十烷醇溶液(浓度设置同上)浸泡24 h,浸泡结束

后,吸干各组藻体表面的多余处理液,用过滤海水冲洗2遍,然后更换天然过滤海水,恢复正常条件充气培养。

实验在容积为1 000 mL的三角瓶中进行,每个三角瓶放置质量为(4.0±0.1) g的铜藻藻体,装1 000 mL培养液。实验在温度15℃、光照强度为5 000 lx、光周期为12 L:12 D的植物培养箱内充气进行,每2天更换培养液。每个实验组设置12个重复,于实验的第0、5、10、15、20天随机选取3个平行样进行以下指标的测定。

1.3 生长速率测定

生长速率以比生长速率(relative growth rate, RGR)表示,取出各实验组的藻体,用滤纸吸干藻体表面的水分,称得鲜重,RGR的计算公式: $RGR(\%) = [(W_t/W_0)^{1/t} - 1] \times 100\%$,式中 W_t 为实验结束时藻体鲜重(g), W_0 为实验开始时藻体鲜重(g), t 为培养时间(d)^[17]。

1.4 光合色素含量测定

取0.1 g新鲜藻体研磨成匀浆状,加入8 mL 80%丙酮置于4℃黑暗处抽提24 h。浸提液于4℃,4 000 r/min离心10 min后取上清液定容至10 mL。以80%丙酮作为空白对照,用分光光度计测定665、652、510、480 nm波长处的吸光值。叶绿素a的含量按照公式^[18] $w(\text{Chl.}a) = (16.29 \text{ OD}_{665} - 8.54 \text{ OD}_{652}) \times V/W/1\ 000$ 计算,类胡萝卜素的含量按照公式 $w(\text{Car}) = 7.6 \times (\text{OD}_{480} - 1.49 \times \text{OD}_{510}) \times V/W/1\ 000$ 计算,单位为mg/g,式中 V 为浸提丙酮的体积(mL), W 为藻体质量(g)。

1.5 可溶性蛋白含量测定

可溶性蛋白采用南京建成蛋白检测试剂盒考马斯亮蓝法测定,取1.0 g新鲜藻体于液氮中研磨成匀浆状,加蒸馏水后离心定容到10 mL,作为待测溶液。

1.6 可溶性糖含量测定

可溶性糖含量采用南京建成植物可溶性糖检测试剂盒蒽酮比色法测定,取0.2 g新鲜藻体于液氮中研磨成匀浆状,加8 mL蒸馏水后于80℃水浴30 min,冷却后离心定容至10 mL,作为待测溶液。

1.7 岩藻黄素含量的测定

岩藻黄素的含量参照闫相勇等^[19]的方法测定。称取1.0 g新鲜藻体研磨成匀浆状,加入15 mL

甲醇在40 °C的条件下避光静置,浸提2次,每次1 h。浸提液于4 °C, 4 000 r/min,离心10 min后取上清液定容至30 mL,摇匀后稀释5倍。用分光光度计在岩藻黄素特定吸收波长450 nm下测吸光度值,按公式:岩藻黄素含量(mg/g)=(OD₄₅₀×n×V×1 000)/(A_{1cm}^{1%}×M×100)计算其含量,式中n为稀释倍数,V为提取液总体积,A_{1cm}^{1%}为在1 cm光程长的比色皿中1 g/L岩藻黄素的理论吸收值,即1 600,M为样品重量(g)。

1.8 数据分析

实验数据以平均值±标准差(mean±SD)表示,采用SPSS 13.0软件进行单因素方差分析,用Duncan氏法进行组间多重比较,显著性水平设为0.05。

2 结果

2.1 铜藻生长情况

连续施用组藻体的RGR在实验5 d时均显著高于对照组($P<0.05$),但不同浓度三十烷醇实验组间RGR差异不显著($P>0.05$);随后各实验组均呈下降趋势,至10 d时已与对照组无显著差异($P>0.05$);15 d时,除2.0 mg/L组的RGR显著低于对照组外,其余3个实验组与对照组无显著差异($P>0.05$);20 d时各实验组的变化趋势却呈现差异性,其中0.1 mg/L组的RGR仍显著高于对照组

($P<0.05$),0.5和1.0 mg/L组间RGR差异不显著($P>0.05$),但略低于对照组($P<0.05$),而2.0 mg/L组的RGR显著下降,比对照低36.5%(图1-a)。

经三十烷醇浸泡处理的藻体恢复正常条件培养5 d时,各实验组间的RGR差异不显著,但均显著高于对照组($P<0.05$);10 d时,0.5和1.0 mg/L组的RGR显著高于对照组,但2组间相差不大,其余2组的RGR与对照组无显著差异;15、20 d时各实验组与对照组均无显著差异($P>0.05$)(图1-b)。

2.2 光合色素含量

连续施用组Chl.a含量在实验第5天时,各组均显著高于对照组($P<0.05$),且1.0 mg/L组最高;10 d时,除2.0 mg/L组Chl.a含量与对照组无显著差异外($P>0.05$),其余均显著高于对照组,其中以1.0 mg/L组最高;15 d时,0.5 mg/L组的Chl.a含量显著高于对照组($P<0.05$),0.1 mg/L组与对照组无显著差异,其余2个高浓度组均显著低于对照组;20 d时,0.1 mg/L组Chl.a含量高于对照组($P<0.05$),2.0 mg/L组显著低于对照组($P<0.05$),其余2组与对照组均无显著差异($P>0.05$)(图2-a)。浸泡组在实验第5天时均显著高于对照组($P<0.05$),且2.0 mg/L组的Chl.a含量最高;10 d时,1.0 mg/L组的Chl.a含量显著高于对照组($P<0.05$),0.1和0.5 mg/L组与对照组无显著差异($P>0.05$),而2.0 mg/L组显著低于对照组($P<0.05$);15 d时,除0.5 mg/L组

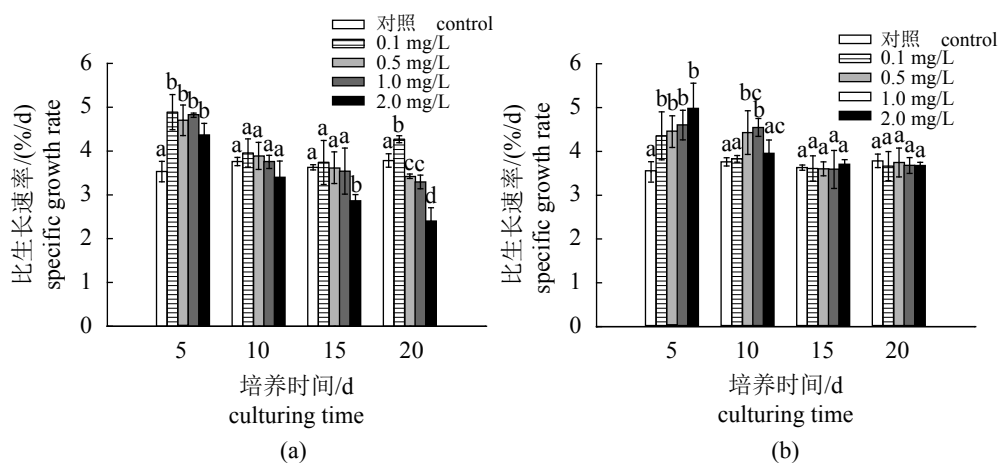


图1 不同浓度三十烷醇及施用方法对铜藻生长速率的影响

(a)连续施用组,(b)浸泡组;不同字母表示同一培养时间不同组间有显著性差异($P<0.05$);下同

Fig. 1 Effects of different concentration and application methods of triacontanol on the relative growth rate of *S. horneri*

(a) continuous application group, (b) immersion group; different letters mean significant difference ($P<0.05$); the same below

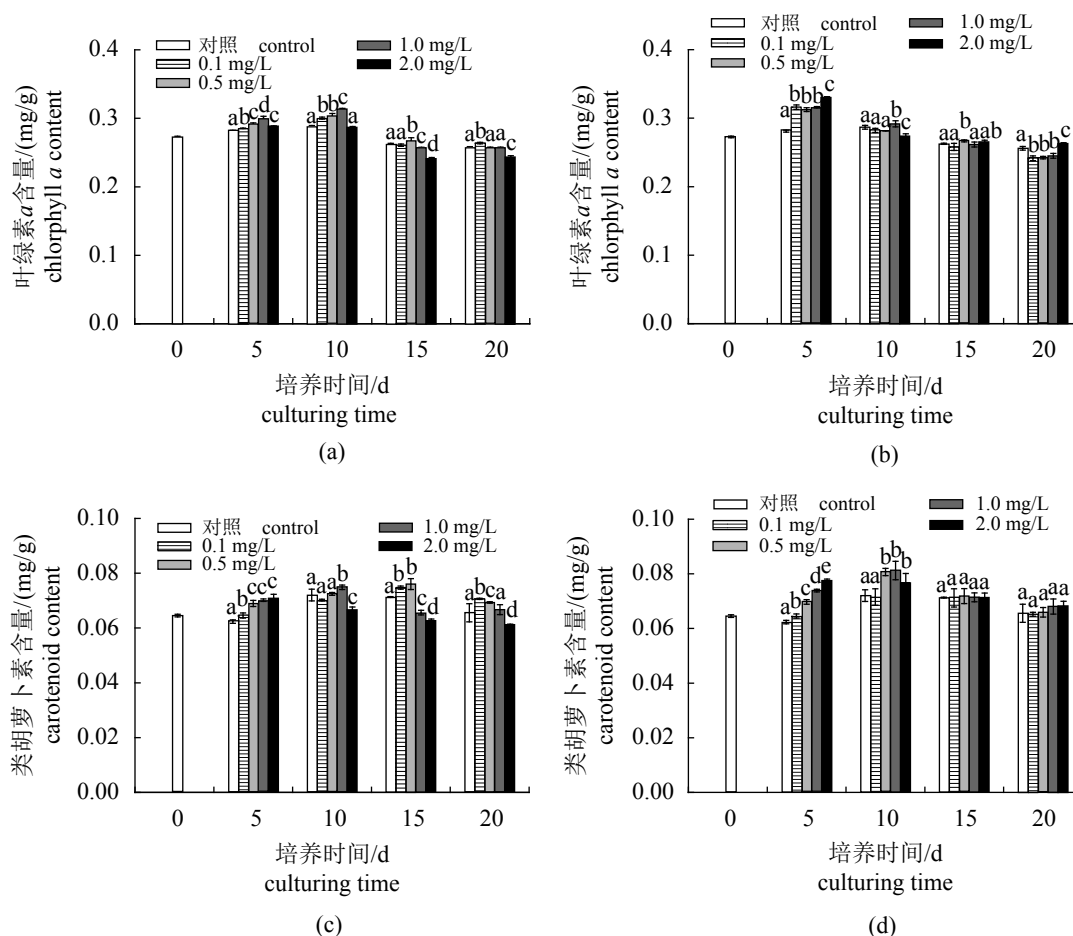


图 2 不同浓度三十烷醇及施用方法对铜藻色素含量的影响

(a)(c) 连续施用组; (b)(d) 浸泡组

Fig. 2 Effects of different concentration and application methods of triacontanol on pigment contents of *S. horneri*

(a) (c) continuous application group; (b) (d) immersion group

显著高于对照组外, 其余均与对照组无显著差异 ($P > 0.05$); 20 d时, 除 2.0 mg/L 组的 Chl. *a* 含量略高于对照组外 ($P < 0.05$), 其余 3 组显著低于对照组 ($P < 0.05$) (图 2-b)。

连续施用组的 Car 含量在实验前 5 d 内均显著高于对照组 ($P < 0.05$), 随着培养时间的延长而呈现差异性, 0.1 和 0.5 mg/L 组随着培养时间的延长逐渐升高, 至 20 d 时略有下降, 但仍显著高于对照组; 1.0 mg/L 组在实验前 10 d 内显著高于对照组, 20 d 时与对照组无显著差异 ($P > 0.05$); 2.0 mg/L 组在培养 10 d 后就显著低于对照组 ($P < 0.05$) (图 2-c)。浸泡组 Car 含量在实验前 5 d 内均显著高于对照组 ($P < 0.05$), 且三十烷醇浓度越高, Car 含量越高; 10 d 时, 除 0.1 mg/L 组与对照组无显著差异外 ($P > 0.05$), 其余均显著高于对照组; 15 d 后, 各组的 Car 含

量与对照组均无显著差异 ($P > 0.05$) (图 2-d)。

2.3 可溶性蛋白含量

连续施用三十烷醇 5 d 后, 藻体内的可溶性蛋白含量均显著升高 ($P < 0.05$), 且三十烷醇浓度越高, 增幅越大, 较对照组分别增加了 15.3%、25.7%、36.4% 和 48.1%; 10 d 时, 除 2.0 mg/L 组的可溶性蛋白含量有所下降外, 其余 3 组均持续升高; 15 d 时, 2.0 mg/L 组的可溶性蛋白含量仍持续下降, 已与对照组无显著差异 ($P > 0.05$), 其余 3 组仍显著高于对照组, 且以 0.1 mg/L 组为最高; 20 d 时, 只有 2 个低浓度实验组高于对照组, 最大值出现在 0.1 mg/L 组中 (图 3-a)。

浸泡组的可溶性蛋白含量在实验前 10 d 内均显著高于对照组, 其中 1.0 mg/L 组中最高; 随后

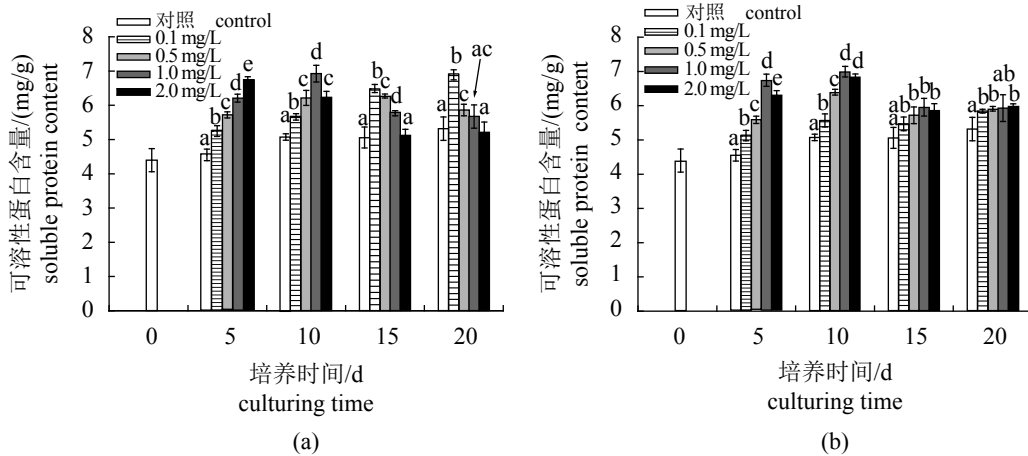


图 3 不同浓度三十烷醇及施用方法对铜藻可溶性蛋白含量的影响

Fig. 3 Effects of different concentration and application methods of triacontanol on soluble protein contents of *S. horneri*

除0.1 mg/L组在第15天, 1.0 mg/L组在第20天时与对照组无显著差异外($P>0.05$), 其余组仍显著高于对照组($P<0.05$), 但各组间的差异不显著(图3-b)。

对照组, 随后高浓度的2组呈上升趋势, 20 d时仍显著高于对照组($P<0.05$), 低浓度的2组与对照组无显著差异($P>0.05$) (图4-b)。

2.4 可溶性糖含量

2.5 岩藻黄素含量

连续施用组在实验前5 d时均显著高于对照组($P<0.05$), 且三十烷醇浓度越高, 可溶性糖含量越高; 10 d时, 浓度 ≤ 1.0 mg/L的3组进一步升高; 2.0 mg/L组则变化不大; 15 d时, 低浓度的3组仍显著高于对照组, 最高值出现在0.1 mg/L组中, 而2.0 mg/L组则呈下降趋势, 显著低于对照组; 20 d时各组均有所下降, 只有0.1 mg/L组显著高于对照组($P<0.05$) (图4-a)。

连续施用组的岩藻黄素含量除2.0 mg/L组在实验20 d时低于对照组外($P<0.05$), 其余各组在实验期间均显著高于对照组, 但变化趋势随着培养时间呈现差异性, 培养5 d时较高浓度的2组岩藻黄素含量最高, 10 d时1.0 mg/L组最高, 15 d时0.5 mg/L组最高, 20 d时0.1 mg/L组最高(图5-a)。

浸泡组的岩藻黄素含量在实验期间均显著高于对照组, 培养5 d时藻体岩藻黄素的含量随着三十烷醇浓度的增加而升高, 10 d时1.0 mg/L

浸泡组的可溶性糖含量在前10 d均显著高于

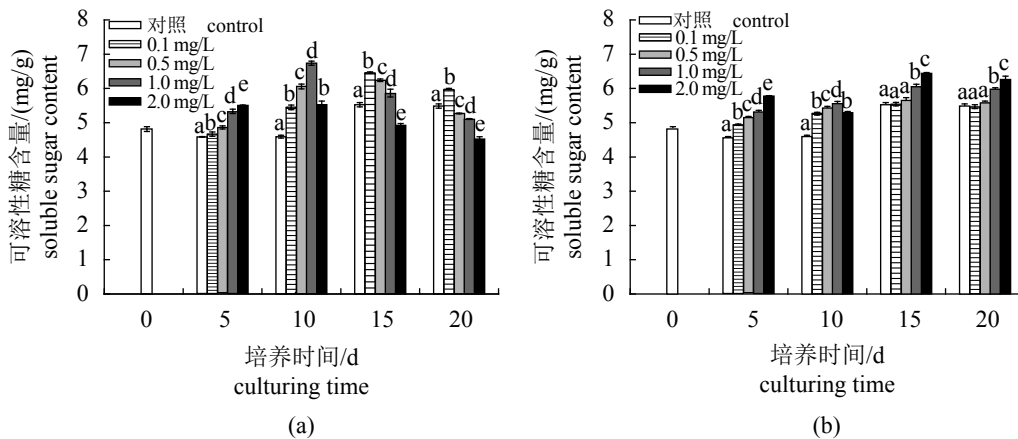


图 4 不同浓度三十烷醇及施用方法对铜藻可溶性糖含量的影响

Fig. 4 Effects of different concentration and application methods of triacontanol on soluble sugar contents of *S. horneri*

组最高, 15 d时0.5 mg/L组最高, 这与连续施用组的变化相似, 20 d时较高的3个浓度实验组间

差异不显著($P>0.05$), 但都显著高于0.1 mg/L组($P<0.05$) (图5-b)。

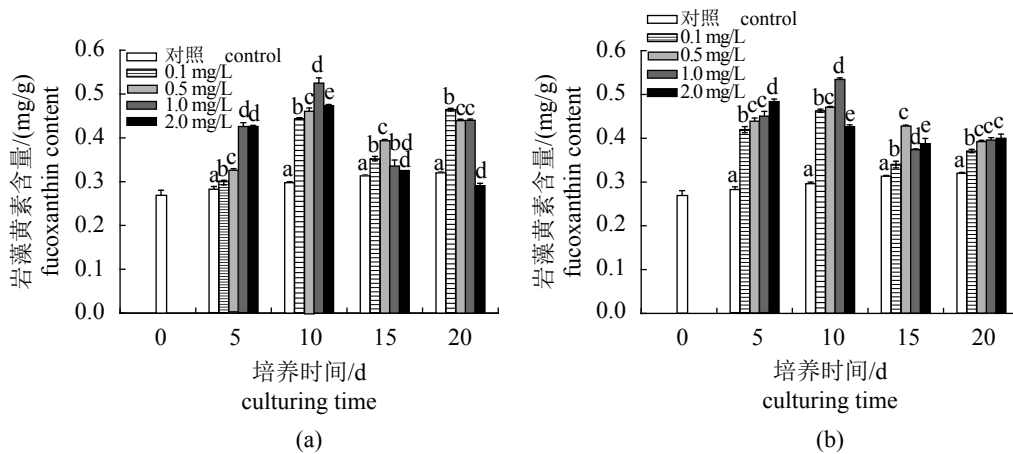


图5 不同浓度三十烷醇及施用方法对铜藻岩藻黄素含量的影响

Fig. 5 Effects of different concentration and application methods of triacontanol on the fucoxanthin contents of *S. horneri*

3 讨论

3.1 三十烷醇对铜藻生长的影响

三十烷醇是一种绿色健康、高效的植物生长调节剂, 在农作物生产和藻类培育方面已显示出广阔的应用前景。研究发现, 相同浓度的三十烷醇对不同海藻却产生了不同的促进生长的效果^[16, 20]。本研究中, 经三十烷醇连续施用和浸泡处理后恢复培养5 d时, 都显著提高了铜藻的生长速率, 且不同施用浓度间没有显著差别, 但随着施用时间的延长, 施用浓度大于等于0.5 mg/L的3组藻体的生长速率逐渐下降, 连续施用20 d时已显著低于对照组, 表明三十烷醇浓度过高对铜藻的生长产生显著的抑制作用, 这与绝大多数的大型海藻研究结果相同。本研究还发现0.5和1.0 mg/L浸泡组在恢复培养10 d时仍表现出较高的生长速率, 但15 d后已与对照组无显著差异, 说明用0.5和1.0 mg/L的三十烷醇浸泡24 h即可起到明显的促生长作用, 且处理1次的作用效果可以持续10 d左右。张丽娟^[15]的研究表明, 0.5~16 mg/L的三十烷醇均能促进绳江菖藻体的生长, 最适浓度为1.0 mg/L。陈素文等^[16]对海萝的研究发现, 三十烷醇对海萝孢子的最适浓度为0.5 mg/L, 对其幼苗的最适浓度为1.0 mg/L, 每隔15 d用三十烷醇浸泡处理1次的效果更好, 2.0 mg/L则对盘状体的生长及存活有抑制作用。

张欢欢等^[12]在用三十烷醇处理坛紫菜(*Pyropia haitanensis*)叶状体的研究中报道浸泡处理1次的作用效果可以持续20 d左右。以上结果说明, 三十烷醇对不同种类最适的施用方法存在显著差异, 对同种藻类的不同生长阶段也存在差异性。因此, 在生产应用中需根据实际情况进一步地调整、完善, 以达到最佳的促生长作用。

目前, 三十烷醇对藻类的作用机制尚无统一的定论。陈敬祥等^[21]研究发现, 作物紫云英(*Astragalus sinicus*)经三十烷醇处理后最突出的表现是能量物质增多, 首先表现在叶片中三磷酸腺苷(ATP)含量明显增多, 再导致光合强度的提高和干物质积累。夏民州等^[22]研究表明, 三十烷醇能有效地提高湿地松(*Pinus elliotii*)幼苗内源玉米素(ZT)、玉米素核苷(ZR)、腺嘌呤(Ade)、吲哚乙酸(IAA)和赤霉素(GA3)含量水平, 降低内源脱落酸(ABA)的水平, 提示三十烷醇可能通过改变内源激素的水平来对植物的生长进行调节, 但是具体作用机制还需进一步研究。

3.2 三十烷醇对铜藻生理生化指标的影响

光合作用是藻类最基本、最重要的生理生化活动, 光合色素的含量直接影响到光合作用及物质合成速率, 是衡量藻类生长状况的首要指标。已有研究表明, 三十烷醇能显著提高藻类叶绿素的含量, 增强光合速率^[12-13]。Chl.a和

Car是铜藻的主要光合色素, 本研究发现2种施用方法处理5 d时, 三十烷醇能显著地提高藻体Chl.a和Car的含量, 随着施用时间的延长, 低浓度(0.1 mg/L)三十烷醇对藻体Chl.a和Car的含量仍有促进作用, 高浓度的三十烷醇(2.0 mg/L)反而会导致Chl.a和Car含量的下降, 因此, 适宜浓度的三十烷醇能提高铜藻光合色素的含量, 促进光合作用, 这与生长速率的变化趋势是一致的, 提示三十烷醇的促生长效应与藻体光合色素的合成密切相关。刘东艳等^[23]在对海带(*Laminaria japonica*)的研究中发现, 三十烷醇处理后能改变叶绿体的形态, 使类囊体片层增多、基质变厚, 其外形更为饱满, 光合色素含量升高, 光合作用增强, 从而促进生长和营养物质的积累, 与本实验所得结论一致。

植物体内的可溶性蛋白质大多数是参与各种代谢的酶类, 可溶性糖是植物的主要光合产物, 也是碳水化合物代谢和暂时贮藏的主要形式, 是衡量植物代谢水平的重要指标^[24]。相关研究表明, 三十烷醇能提高硝酸还原酶、淀粉酶等多种酶的活性^[25-26], 增加植物体内可溶性蛋白质、糖等物质的含量, 从而提高植物体内干物质的积累^[27]。本研究发现, 0.1 mg/L的三十烷醇在连续施用20 d内均能显著提高藻体的可溶性蛋白和可溶性糖的含量; 而较高浓度的三十烷醇对藻体可溶性蛋白和糖的含量只有短期的促进作用, 长时间的施用反而会导致可溶性蛋白和糖含量的下降, 且浓度越高, 下降趋势越明显。以浸泡方式施用三十烷醇对铜藻藻体可溶性蛋白和糖的含量同样有显著的促进作用, 且以1.0 mg/L浸泡组的效果最好。这种促进作用的可能原因是三十烷醇在一定浓度范围内提高了藻体内功能蛋白的数量或激活藻细胞内一些相关酶的活性, 进而促进藻细胞的代谢, 而高浓度的三十烷醇长期施用则会影响藻体叶绿素和类胡萝卜素的合成, 降低藻体捕获光能的能力, 影响蛋白质的合成或促使蛋白变性而降解, 导致可溶性蛋白和糖含量的降低, 但是这一推测还需要进一步的工作论证。

3.3 三十烷醇对铜藻岩藻黄素含量的影响

姚南瑜等^[13]研究表明, 三十烷醇能提高海带叶绿素和岩藻黄素含量, 促进光合作用。刘德盛等^[28]发现三十烷醇能显著提高海带岩藻黄

素、碘、褐藻胶、甘露醇等的含量, 并可显著提高海带的产量和品质。这些研究表明, 三十烷醇可促进藻类次生代谢产物的积累。本实验也证明了三十烷醇对铜藻岩藻黄素的积累有显著的提高, 其中经1.0 mg/L三十烷醇浸泡处理24 h恢复培养10 d, 可使岩藻黄素的含量提高79.5%, 这对岩藻黄素的提取和应用具有重要的指导意义。

植物中岩藻黄素的合成途径已经被阐明^[29], 但褐藻中岩藻黄素的合成途径尚未被完全揭示。一般认为, 合成途径的前体物质牻牛儿基牻牛儿基焦磷酸(GGPP)在八氢番茄红素合成酶(PYS)的作用下生成八氢番茄红素, 该色素进一步由八氢番茄红素脱氢酶(PDS)、 ζ -胡萝卜素脱氢酶(ZDS)和类胡萝卜素异构酶(CRTISO)3种酶的共同作用下生成番茄红素, 由 β -番茄红素环化酶(LCYB)生成 β -胡萝卜素, 然后经 β -胡萝卜素羟化酶(BCH)催化下生成玉米黄素, 最后在玉米黄质环化酶(ZEP)的作用下生成岩藻黄素。推测三十烷醇影响铜藻岩藻黄素含量的作用机理可能与其他一些植物生长调节剂类似, 通过调节岩藻黄素合成关键基因的转录, 来控制岩藻黄素的积累。

综上所述, 三十烷醇对促进铜藻的生长发育有显著作用, 使藻体生长速率明显增加, 光合色素、可溶性蛋白、可溶性糖和岩藻黄素的含量显著升高, 以连续施用低浓度的三十烷醇(0.1 mg/L) 20 d或以1.0 mg/L三十烷醇每10 d浸泡处理24 h的效果最佳。因此, 在藻类的规模化培育中, 合理利用植物生长调节剂, 是一条优化藻类质量、提高产量、实现藻类定向培育的有效途径。

参考文献:

- [1] 孙建璋, 庄定根, 陈万东, 等. 铜藻*Sargassum horneri*繁殖生物学及种苗培育研究[J]. 南方水产, 2008, 4(2): 6-14.
Sun J Z, Zhuang D G, Chen W D, et al. Studies on sexual reproduction and seedling production of the brown alga *Sargassum horneri*[J]. South China Fisheries Science, 2008, 4(2): 6-14(in Chinese).
- [2] 蔡永超, 孙彬, 马家海, 等. 我国南黄海海域漂浮铜藻的分子生物学鉴定[J]. 海洋渔业, 2014, 36(2): 102-106.
Cai Y C, Sun B, Ma J H, et al. Molecular identification of floating *Sargassum horneri* in the southern Yellow Sea[J]. Marine Fisheries, 2014, 36(2): 102-106(in

- Chinese).
- [3] 陈军, 王寅初, 余秋璐, 等. 绿潮暴发期间我国青岛漂浮铜藻的分子鉴定[J]. *生物学杂志*, 2016, 33(1): 39-42. Chen J, Wang Y C, Yu Q R, *et al.* Molecular phylogenetic analysis of floating *Sargassum horneri* associated with green tides in coastal area of Qingdao[J]. *Journal of Biology*, 2016, 33(1): 39-42(in Chinese).
- [4] Yan X J, Chuda Y, Suzuki M, *et al.* Fucoxanthin as the major antioxidant in *Hijikia fusiformis*, a common edible seaweed[J]. *Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry*, 1999, 63(3): 605-607.
- [5] 徐戎, 张悦, 王倩, 等. 昆布有效成分岩藻黄质对人体7种肿瘤细胞增殖与凋亡的影响[J]. *中药药理与临床*, 2009, 25(4): 21-24. Xu R, Zhang Y, Wang Q, *et al.* Anti-proliferation effects of active components fucoxanthin from *Thallus japonica* on seven kinds of human cancer cells[J]. *Pharmacology and Clinics of Chinese Materia Medica*, 2009, 25(4): 21-24(in Chinese).
- [6] Jeon S M, Kim H J, Woo M N, *et al.* Fucoxanthin-rich seaweed extract suppresses body weight gain and improves lipid metabolism in high-fat-fed C57BL/6J mice[J]. *Biotechnology Journal*, 2010, 5(9): 961-969.
- [7] Maeda H, Hosokawa M, Sashima T, *et al.* Effect of medium-chain triacylglycerols on anti-obesity effect of fucoxanthin[J]. *Journal of Oleo Science*, 2007, 56(12): 615-621.
- [8] 詹冬梅, 王翔宇, 辛美丽, 等. 三种马尾藻的营养组成分析[J]. *广西科学院学报*, 2016, 32(3): 221-225. Zhan D M, Wang X Y, Xin M L, *et al.* Nutritional constituents of three kinds of *Sargassum*[J]. *Journal of Guangxi Academy of Sciences*, 2016, 32(3): 221-225(in Chinese).
- [9] 刘德盛, 陆修闽, 何明忠, 等. 植物生长调节剂三十烷醇(TA)乳粉对水稻产量的影响[J]. *中国工程科学*, 2002, 4(11): 82-88. Liu D S, Lu X M, He M Z, *et al.* Effect of plant growth regulator triacontanol (TA) on the yield of rice[J]. *Engineering Science*, 2002, 4(11): 82-88(in Chinese).
- [10] 谢群, 王明学, 闫洪海, 等. 三十烷醇对3种单细胞藻类生长的影响[J]. *华中农业大学学报*, 2006, 25(3): 286-290. Xie Q, Wang M X, Yan H H, *et al.* The effect of triacontanol on the growth of unicellular algae[J]. *Journal of Huazhong Agricultural University*, 2006, 25(3): 286-290(in Chinese).
- [11] 张跃平, 王大志, 高亚辉, 等. 三十烷醇对极大螺旋藻生物量及生化组成的影响[J]. *海洋学报*, 2006, 28(1): 106-110. Zhang Y P, Wang D Z, Gao Y H, *et al.* The effects of triacontanol on biomass and biochemical composition of *Spirulina maxima*[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2006, 28(1): 106-110(in Chinese).
- [12] 张欢欢, 李琳, 严兴洪. 三十烷醇对坛紫菜叶状体生长的影响[J]. *上海海洋大学学报*, 2013, 22(6): 876-881. Zhang H H, Li L, Yan X H. The effect of triacontanol on the growth of gametophytic blades in *Pyropia haitanensis*[J]. *Journal of Shanghai University*, 2013, 22(6): 876-881(in Chinese).
- [13] 姚南瑜, 陈敏资. 三十烷醇对海带生长和生理活性的影响[J]. *水产学报*, 1989, 13(2): 133-137, 151. Yao N Y, Chen M Z. The effects of triacontanol on growth and physiological activities of *Laminaria japonica*[J]. *Journal of Fisheries of China*, 1989, 13(2): 133-137, 151(in Chinese).
- [14] 张丽娟, 吴志明. 三十烷醇对小石花菜藻体生长发育的影响研究[J]. *中国生态农业学报*, 2004, 12(4): 117-118. Zhang L J, Wu Z M. The influence of triacontanol on the growth and development of *Gelidium divaricatum martens*[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2004, 12(4): 117-118(in Chinese).
- [15] 张丽娟. 三十烷醇对绳江藻(*Gracilaria chorda* Holm)的生长与孢子萌发的影响[J]. *厦门水产学院学报*, 1996, 18(2): 8-12. Zhang L J. The influence of triacontanol on the growth of *Gracilaria chorda* Holm and the sprout of spore[J]. *Journal of Jimei Fisheries College*, 1996, 18(2): 8-12(in Chinese).
- [16] 陈素文, 吴进锋, 陈利雄, 等. 三十烷醇对海萝孢子萌发、幼苗及藻体生长的影响[J]. *华南农业大学学报*, 2011, 32(1): 78-82. Chen S W, Wu J F, Chen L X, *et al.* The effect of triacontanol on the germination of spore and the growth of germling and frond of *Gloiopeltis furcata*[J]. *Journal of South China Agricultural University*, 2011, 32(1): 78-82(in Chinese).
- [17] Lignell Å, Pedersén M. Agar composition as a function

- of morphology and growth rate. Studies on some morphological strains of *Gracilaria secundata* and *Gracilaria verrucosa* (Rhodophyta)[J]. *Botanica Marina*, 1989, 32(3): 219-227.
- [18] Wellburn A R. The spectral determination of chlorophylls *a* and *b*, as well as total carotenoids, using various solvents with spectrophotometers of different resolution[J]. *Journal of Plant Physiology*, 1994, 144(3): 307-313.
- [19] 闫相勇, 刘翼翔, 吴永沛, 等. 海带岩藻黄素的提取及纯化工艺研究[J]. *中国食品学报*, 2014, 14(3): 115-121.
Yan X Y, Liu Y X, Wu Y P, *et al.* Optimizing the processes of extracting and purifying fucoxanthin from *Laminaria japonica*[J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2014, 14(3): 115-121(in Chinese).
- [20] 谢松平. 三十烷醇浸泡海带苗养殖效果试验[J]. *福建水产*, 2013, 35(2): 161-164.
Xie S P. Trial research on kelp seedlings soaked in triacontanol[J]. *Journal of Fujian Fisheries*, 2013, 35(2): 161-164(in Chinese).
- [21] 陈敬祥, 叶叙丰, 王维光, 等. 三十烷醇提高紫云英产量的生理基础[J]. *植物生理学通讯*, 1982, 18(1): 45-47.
Chen J X, Ye X F, Wang W G, *et al.* Physiological basis of triacontanol to increase the yield of *Astragalus sinicus*[J]. *Plant Physiology Communications*, 1982, 18(1): 45-47(in Chinese).
- [22] 夏民州, 汪安琳. 三十烷醇对湿地松苗内源激素含量的影响[J]. *植物生理学通讯*, 1995, 31(6): 427-428.
Xia M Z, Wang A L. Effects of triacontanol on endogenous hormones in *Pinus elliottii*[J]. *Plant Physiology Communications*, 1995, 31(6): 427-428(in Chinese).
- [23] 刘东艳, 孙军, 刘东旭, 等. 三十烷醇对海带叶绿体超微结构的效应[J]. *海洋湖沼通报*, 1999(4): 27-30.
Liu D Y, Sun J, Liu D X, *et al.* Effect of triacontanol on the ultrastructure of chloroplasts from *Laminaria japonica*[J]. *Transaction of Oceanology and Limnology*, 1999(4): 27-30(in Chinese).
- [24] 孔祥生, 易现峰. 植物生理学实验技术[M]. 北京: 中国农业出版社, 2008: 135-136, 160-161.
Kong X S, Yi X F. Experimental techniques of plant physiology plant physiology experimental techniques[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2008: 135-136, 160-161(in Chinese).
- [25] Moorthy P, Kathiresan K. Physiological responses of mangrove seedling to triacontanol[J]. *Biologia Plantarum*, 1993, 35(4): 577-581.
- [26] 陈敏资. TA乳粉对海带的生理效应[J]. *辽宁师范大学学报(自然科学版)*, 1995, 18(1): 59-63.
Chen M Z. The physiological reaction of triacontanol on *Laminaria*[J]. *Journal of Liaoning Normal University (Natural Science Edition)*, 1995, 18(1): 59-63(in Chinese).
- [27] Rakesh K, Maheshwari D K, Kumar R. Growth and yield response of *Triticum aestivum* L. cv. HD 1553 to triacontanol application[J]. *Agricultural Science Digest*, 1995, 15(3): 163-166.
- [28] 刘德盛, 张群. 植物生长调节剂TA乳粉对海带产量和品质的影响[J]. *中国工程科学*, 2000, 2(2): 68-73.
Liu D S, Zhang Q. The effect of plant growth regulator TA emulsive powder on the yield and quality of kelp[J]. *Engineering Science*, 2000, 2(2): 68-73(in Chinese).
- [29] 朱长甫, 陈星, 王英典. 植物类胡萝卜素生物合成及其相关基因在基因工程中的应用[J]. *植物生理与分子生物学学报*, 2004, 30(6): 609-618.
Zhu C F, Chen X, Wang Y D. Carotenoid biosynthesis in plants and application of its relative genes in gene engineering[J]. *Journal of Plant Physiology and Molecular Biology*, 2004, 30(6): 609-618(in Chinese).

Effects of triacontanol on the growth and fucoxanthin content of *Sargassum horneri*

LÜ Fang^{1,2}, WU Haiyi^{1,2}, DING Gang^{1,2}, ZHAN Dongmei^{1,2}, GUO Wen^{1*}

(1. Marine Biology Institute of Shandong Province, Qingdao 266104, China;

2. Qingdao Macroalgae Engineering Technology Research Center, Qingdao 266104, China)

Abstract: In order to investigate the effect of triacontanol on growth of *Sargassum horneri*, different concentration of triacontanol applied continuously for 20 days, or the thalli were immersed in triacontanol solution at concentration of 0.1, 0.5, 1.0 and 2.0 mg/L) for 24 h and then cultured in normal conditions for 20 days, and then the relative growth rate (RGR), physiological and biochemical indexes (photosynthetic pigment, soluble protein, soluble sugar) and fucoxanthin contents were determined, respectively. The results showed that after continuous application of 5 days, the RGR, chlorophyll a (Chl-*a*), carotenoid (Car), soluble protein, soluble sugar contents were significantly higher than the control; on the 15th day, the growth of the 2.0 mg/L group was inhibited, and all the physiological indexes decreased significantly; on the 20th day, the growth of the 0.1 mg/L group was still promoted, the other three higher concentration groups were inhibited by different degrees, and the higher concentration of triacontanol, the more obvious inhibitory effect. The immersed group after 5 days of culture, the RGR, Chl-*a*, Car, soluble protein and soluble sugar contents increased significantly; on the 10th day, the RGR of 0.5 and 1.0 mg/L groups were significantly higher than the control; on the 15th day, there was no significant difference with the control, and considering the physiological and biochemical indexes, 1.0 mg/L group was the most obvious effective group, and the promotion effect could maintain about 10 days after treatment. Fucoxanthin contents were significantly higher than control in treatment groups except continuous application with 2.0 mg/L triacontanol for 20 days, among which the fucoxanthin content increased 79.5% on the 10th day after immersed treatment in 1.0 mg/L triacontanol solution for 24 h. Therefore, continuous application of low concentration of triacontanol (0.1 mg/L) or immersed in 1.0 mg/L triacontanol solution for 24 h every 10 days could significantly promote the growth and accumulation of fucoxanthin of *S. horneri*.

Key words: *Sargassum horneri*; triacontanol; continuous application; immerse; growth; fucoxanthin

Corresponding author: GUO Wen. E-mail: guowen1963@126.com

Funding projects: National Special Research Fund for Non-Profit Marine Sector (201505022); Earmarked Fund for Modern Agro-industry Technology Research System in Shandong Province (SDAIT26); Major Agricultural Application Technology Innovation Project of Shandong Province