

DOI: 10.3969/j.issn.2095-9869.20251113001

http://www.yykxjz.cn/

孙昊鸣, 徐东, 张亚南, 黄馨彤, 孙艳敏, 杨帆, 王亚鹏, 叶乃好. 不同养殖密度对海带生长及碳固定的影响. 渔业科学进展, 2026, 47(2): 26–34

SUN H M, XU D, ZHANG Y N, HUANG X T, SUN Y M, YANG F, WANG Y P, YE N H. Analysis of growth dynamics and carbon sink effects of *Saccharina japonica* under different mariculture densities in Sanggou Bay. Progress in Fishery Sciences, 2026, 47(2): 26–34

## 不同养殖密度对海带生长及碳固定的影响\*

孙昊鸣<sup>1,2</sup> 徐东<sup>2</sup> 张亚南<sup>2,3</sup> 黄馨彤<sup>2,4</sup>  
孙艳敏<sup>2,5</sup> 杨帆<sup>2</sup> 王亚鹏<sup>2</sup> 叶乃好<sup>2①</sup>

(1. 大连海洋大学水产与生命学院 辽宁 大连 116023; 2. 海水养殖生物育种与可持续产出全国重点实验室 中国水产科学研究院黄海水产研究所 山东 青岛 266071; 3. 青岛科技大学生物工程学院 山东 青岛 266042; 4. 海南大学计算机科学与技术学院 海南 海口 571924; 5. 中国海洋大学海洋生命学院 山东 青岛 266003)

**摘要** 为探究不同养殖密度对海带(*Saccharina japonica*)生长动态及其固碳影响,本研究以桑沟湾传统养殖密度 100 绳/筏架(K0)作为对照组,在海带脆嫩期(1月)将海带养殖密度分别降低到 67 绳/筏架(K1)和 50 绳/筏架(K2)。采用现场仪器监测、原位打孔采样、紫外可见吸收光谱和有机碳分析等方法,测定了桑沟湾海带不同养殖密度海区的光衰减速率、表层海水有色溶解有机物(colored dissolved organic matter, CDOM)吸收光谱、海带叶片的伸长率和增厚率,分析了不同密度下海带生长动态差异,并估算了不同养殖密度条件的固碳量。结果显示,3个不同养殖密度海区 0~1 m 深度的光衰减率呈现显著差异。3个养殖密度组的海带叶片伸长率最高值均出现在 E3 阶段(1—3月),增厚率最高值均出现在 E4 阶段(3—4月);实验结束时(6月),K1组和K2组的海带单位个体湿重均显著大于K0组,K1组海带养殖总湿重显著高于其他两组。K0和K1养殖海区 CDOM 在 355 nm 处的吸收系数在 3—6 月均显著高于 K2,而 K0 和 K1 海区在 3 月和 6 月的 254 nm 处的比紫外吸光度均显著高于 K2,实验结束时 K1 组的总碳库贡献量较 K0 组提升约 15.19%。本研究结果表明,将海带养殖密度降低至合理密度可以显著提升海带的生长、产量和养殖系统固碳量,这为浅海大型海藻增汇模式构建提供了数据支持。

**关键词** 海带; 养殖密度; 光衰减率; 生长; 有色溶解有机物; 固碳

**中图分类号** S966.9 **文献标识码** A **文章编号** 2095-9869(2026)02-0026-09

海洋碳汇作为全球碳循环的关键环节,在应对气候变化中具有不可替代的生态价值。我国明确提出“双碳”目标后,海洋生态系统的碳汇功能研究被提升至国家战略高度(赵鹏等, 2019; 焦念志等, 2022)。

作为海洋碳汇的重要组成部分,大型海藻的增养殖对于扩增海洋碳汇效应具有重要意义(唐启升等, 2016)。气候变化背景下大型海藻养殖的碳汇功能近年来得到国际上越来越多的关注,挖掘大型海藻养殖的碳汇

\* 山东省重点研发计划(2024CXPT071-3)、国家重点研发计划(2023YFD2400805; 2025YFE0209900)、山东省自然科学基金(ZR2022QD035)和海水养殖生物育种与可持续产出全国重点实验室开放课题(BRESG-JB202515)共同资助。孙昊鸣, Email: arming139@163.com

① 通信作者: 叶乃好, 研究员, Email: yenh@ysfri.ac.cn

收稿日期: 2025-11-13, 收修改稿日期: 2025-12-03

潜力可为碳中和战略的实施提供重要的科技支撑(张继红等, 2021)。规模化大型海藻养殖是近海海域生物地球化学循环的重要驱动者, 具有重要的碳中和与负排放作用(张永雨等, 2017)。海带(*Saccharina japonica*)是我国产量最高的养殖藻类, 其生长过程通过光合作用固定二氧化碳, 收获养殖产品可以从海洋中移出藻体生物碳, 是典型的“可移出碳汇”载体和“碳汇渔业”的重要组成部分(Tang *et al.*, 2011; 唐启升等, 2016; 张永雨等, 2017; 张继红等, 2021)。海带等大型海藻养殖的碳汇途径主要包括三个, 一是养殖收割形成可移出的生物质碳, 二是养殖过程中进行有效的沉积埋藏碳, 三是养殖过程中藻体代谢分泌和藻体远端侵蚀糜烂形成的惰性溶解有机碳(RDOC, refractory dissolved organic carbon)(Guan *et al.*, 2025)。然而, 传统养殖模式中密度过高导致的生态问题(如固碳效率下降、个体生长受限)已引起学界关注(Zhang *et al.*, 2012; 李瑞帆等, 2025), 如何通过密度调控实现海带产量与固碳效应的协同优化成为亟待解决的科学问题。

桑沟湾作为我国典型的半封闭养殖海湾, 是我国重要的海带养殖基地, 其养殖结构调整实践为相关研究提供了理想案例。已有研究表明, 该湾海带已出现超容量养殖现象(Sun *et al.*, 2021), 导致海带生长性能和经济效益降低。有研究表明, 养殖密度通过影响光照强度、水流交换和营养盐分布, 直接作用于海带的光合效率与代谢过程, 桑沟湾海带标准化养殖模式使海带养殖密度降低后, 可使海带投影面积降低 30.82%, 平均日累计光照强度总和提升 1 倍(房景辉等, 2020), 且海带养殖密度过高会显著抑制个体碳积累速率(Sun *et al.*, 2020)。此外, 海带养殖会释放惰性溶解有机物形成碳汇(Li *et al.*, 2018; 吴文广等, 2024), 因此养殖密度也会影响海带的这部分固碳量。

然而, 现有研究多聚焦于生长指标或碳汇量的单一维度(严瑾等, 2024; Guan *et al.*, 2025), 缺乏对“密度-生长-碳汇”耦合关系的系统性分析, 尤其是基于密度调整的大型海藻养殖增汇机制尚未被充分揭示, 即养殖密度调整如何影响大型海藻海带生长特性, 以及这种影响如何反馈于碳固定, 目前仍缺乏定量证据。综上, 本研究以桑沟湾养殖海带为对象, 通过测定不同养殖密度海区的光衰减速率、表层海水 CDOM 吸收光谱特征和海带生长性能, 估算不同养殖密度条件下的总固碳贡献量, 探析不同养殖密度海带生长动态及其固碳量, 旨在回答三个核心问题: (1) 养殖密度如何通过改变光环境而影响海带生长特性? (2) 不同养殖密度条件下海带养殖系统溶解有机物的光谱特

性差异如何? (3) 生物质碳、沉积物有机碳与惰性溶解有机碳的总固碳贡献量是否随养殖密度变化呈现显著差异? 以期为大型海藻增汇养殖模式构建提供实践参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区域与实验布置

于 2023 年 11 月至 2024 年 1 月, 在桑沟湾海带养殖区开展了养殖密度实验。该区域海带养殖采用常规筏架布局, 筏架长度为 100 m, 相邻筏架间距为 4.6 m。养殖绳长度为 2.3 m, 每绳夹苗密度为 30 棵。从 2024 年 1 月中旬在原有养殖密度基础上通过减少筏架上海带养殖绳的数量调整海带养殖密度, 其中, K0 站位为对照组, 保持原有 100 绳/筏架的密度, 海带绳间距约 1 m; K1 站位养殖密度降低至 67 绳/筏架, 绳间距约 1.49 m, 养殖密度为对照区的 2/3; K2 站位养殖密度降低至 50 绳/筏架, 绳间距约 2 m, 养殖密度为对照区的 1/2。每个养殖密度设置 16 个筏架, 不同养殖密度海区间隔距离约 1 000 m, 3 个密度组养殖区面积均为 1 hm<sup>2</sup>。记录实验开始时为降低密度移除的海带总湿重(记为  $W_1$ )和移除的养殖绳数( $X_1$ ), 以及 6 月实验结束时收获的海带总湿重( $W_6$ )和海带养殖绳数( $X_6$ )。

### 1.2 样品采集与测定

分别于海带苗下海后当年 11 月、翌年 1、3、4、5、6 月的中旬测定养殖区现场光照强度, 采集海带、海水和颗粒沉积物等样品, 测定方法如下:

**1.2.1 光照强度** 使用水下光照记录仪(LI-COR, 型号 LI-1400)于 2023 年 11 月、2024 年 3 月和 5 月中旬分别在 3 个不同养殖密度海区进行不同养殖深度(水下 0~3 m)的光照强度垂直剖面数据采集, 每个养殖密度海区采用五点采样法取 5 次平行样。为保障光照数据采集的一致性, 所有垂直剖面采集点位均选择相邻两个筏架中部位置的相邻两根海带养殖绳的中间位置。

**1.2.2 海水水样** 海水样品通过采水器(容积 5L)采集, 分别于 2023 年 11 月, 2024 年 1、3、6 月的中旬在 3 个不同养殖密度海区采用五点取样法进行 5 次表层海水样品采集, 所采集海水样品上岸后, 立刻使用 GF/F 膜过滤后盛装至 30 mL 棕色玻璃瓶, 均用于海水有色溶解有机物(CDOM)的紫外可见光谱扫描和溶解有机碳(DOC)指标的测定, 滤液于 -20 °C 避光保存直至测量前解冻。DOC 采用高温催化氧化法测定,

CDOM 吸收光谱采用岛津 UV-2550 紫外可见分光光度计进行测定,具体测定参照吴文广等(2024)的方法执行。

**1.2.3 海带样品** 于2024年1月中旬在距离海带根部150 cm的海带叶片中心处进行原位打孔,在不同养殖密度海区分别取10棵海带进行打孔取样,之后分别在2024年3、4、5、6月测量打孔部位距离海带根部的长度并记录,用于海带叶片伸长率的计算;同时在每次测量时距离海带根部150 cm的海带叶片中心处再次进行打孔取样,用于海带叶片增厚率的计算(Tala *et al.*, 2005)。所有海带叶片编号后冷冻带回实验室测定打孔叶片的厚度。于2024年1月和6月在不同养殖密度站位各取海带30棵冷冻带回实验室称重,平均湿重分别记为 $M_1$ 和 $M_6$ 。将以上所有海带样品于60℃烘干并称重,参照刘毅等(2020)的方法使用Elementar EL型元素分析仪(德国)测定其碳含量。

### 1.3 数据处理与分析

定义海水表面光照强度与某一海水深度处光照强度的差值与海水表面光照强度的比值为光衰减率:

$$L = 100 \times (S_0 - S_d) / S_0 \quad (1)$$

式中, $L$ 为光衰减率(%); $S_0$ 为海水表面光照强度, $S_d$ 为某一海水深度处光照强度,单位为 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。

本研究选用355 nm处的吸收系数 $a(355)$ 来表示CDOM的相对浓度(赵军杰等,2013),吸收系数通过以下公式计算(Stedmon *et al.*, 2003):

$$a(\lambda) = 2.303 \times A(\lambda) / L \quad (2)$$

式中, $a(\lambda)$ 为波长 $\lambda$ 时的吸收系数(/m); $A(\lambda)$ 为波长 $\lambda$ 时的吸光度, $L$ 为比色皿长度(m)。

比紫外吸光度(SUVA<sub>254</sub>)为254 nm的吸收系数与该样品DOC浓度之比,可示踪海水系统中CDOM的芳香性(Stedmon *et al.*, 2000),SUVA<sub>254</sub>计算公式:

$$\text{SUVA}_{254} = a(254) / C_{\text{DOC}} \quad (3)$$

式中,SUVA<sub>254</sub>为比紫外吸光度[L/(mg·m)], $C_{\text{DOC}}$ 为DOC浓度(mg/L), $a(254)$ 为254 nm的吸收系数(/m)。

海带叶片伸长率计算公式为:

$$E = H_i - H_{i-1} / t \quad (4)$$

式中, $E$ 为海带叶片伸长率(cm/d), $H_i$ 为第 $i$ 次测量打孔位距离海带根部的长度(cm), $H_{i-1}$ 为第 $i-1$ 次打孔位距离海带根部的长度(cm), $t$ 为第 $i$ 次打孔距离第 $i-1$ 次打孔时的海带生长时间(d)。

海带叶片增厚率计算公式为(Tala *et al.*, 2005):

$$T = T_i - T_{i-1} / t \quad (5)$$

式中, $T$ 为海带叶片增厚率(mm/d), $T_i$ 为第 $i$ 次距离海带根部50 cm的海带叶片中心处叶片的厚度(mm); $T_{i-1}$ 为第 $i-1$ 次距离海带根部50 cm的海带叶片中心

处叶片的厚度(mm); $t$ 为打孔距离第 $i-1$ 次打孔时的海带生长时间(d)。

其中,不同养殖密度的海带收获总湿重为1月份养殖密度调整时收获的总湿重与实验结束时收获的总湿重之和( $W_T$ )。实验结束时不同海带养殖密度形成的生物质碳参照张继红等(2005)和唐启升等(2022)的方法计算。不同海带养殖密度形成的惰性溶解有机碳参照Wu等(2025)的方法计算,即海带养殖形成的RDOC约占其养殖收获时生物质固碳量的18.91%;不同海带养殖密度形成的沉积物埋藏碳参照Guan等(2025)的方法计算,即海带养殖形成的RDOC约占其养殖收获时生物质固碳量的5%。

实验数据采用Surfer 8.0、Microsoft Excel 2021和Matlab统计软件进行数据分析及绘图,采用SPSS Statistics 23.0软件对组间差异进行单因素方差分析(one-way ANOVA), $P < 0.05$ 为差异显著。

## 2 结果

### 2.1 不同养殖密度海区的光衰减率

海带养殖密度对海区光衰减率产生了显著影响(图1)。2023年11月各海区在不同深度的光衰减率无显著差异( $P > 0.05$ ),所有站位0.5 m深度的光衰减率范围为29.85%~34.66%,1 m深度的光衰减率均超过了50%,在3 m深度的光衰减率为98.34%~99.12%。2024年3月海带密度调整后,各养殖密度海区0~1 m深度的光衰减率差异显著,其中,K2、K1站位光衰减率显著低于K0站位( $P < 0.05$ ),K0在0.5 m深度的光衰减率分别为K1和K2的1.13倍和1.47倍。2024年4月各养殖密度海区在0~1 m的光衰减率差异显著,其中K2、K1站位光衰减率显著低于K0站位( $P < 0.05$ ),K0在0.5 m深度的光衰减率分别为K1和K2的1.20倍和1.66倍。

### 2.2 不同养殖密度海带叶片伸长率和增厚率

K0、K1和K2的最大海带叶片伸长率均出现在E3阶段(图2),最大值分别为1.21、1.52和1.71 cm/d,最小海带叶片伸长率均出现在E6阶段,最小值分别为0.12、0.17和0.21 cm/d。不同养殖密度海带叶片伸长率均在E3最大,之后呈逐渐下降趋势。养殖密度对海带叶片伸长率和增厚率均产生了显著影响。K1和K2的海带叶片伸长率在E3、E4、E5和E6阶段均显著高于K0( $P < 0.05$ )(图2a);K2的海带叶片伸长率则在E3、E4和E5阶段均显著高于K1,而在E6阶段差异不显著( $P > 0.05$ )。K0、K1和K2的最大海带叶片

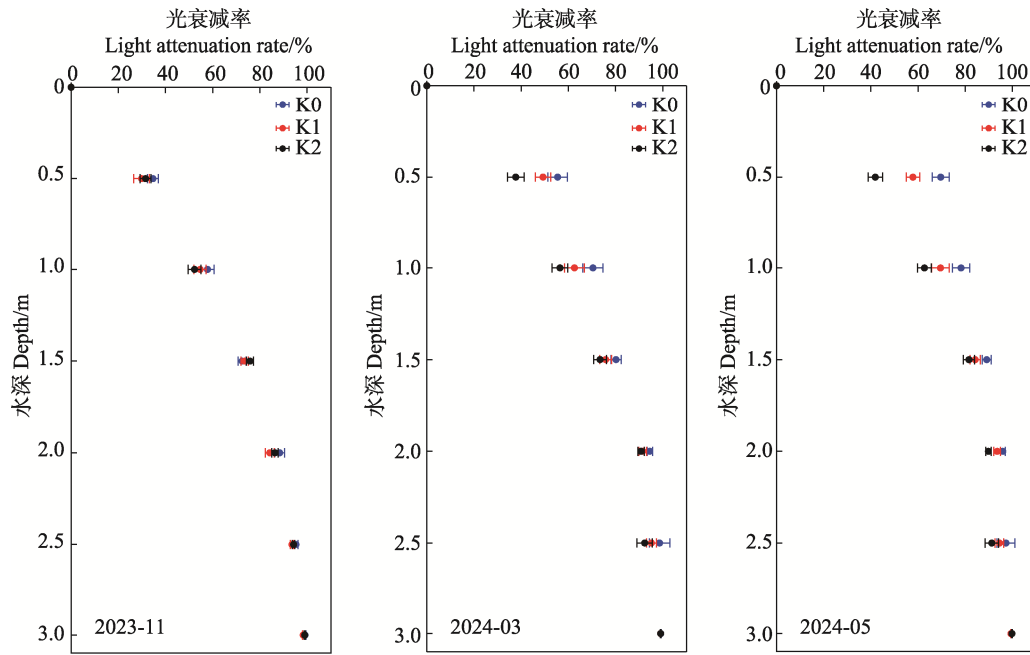


图 1 不同养殖密度海区的光衰减率  
Fig.1 Light attenuation rate at different kelp mariculture densities

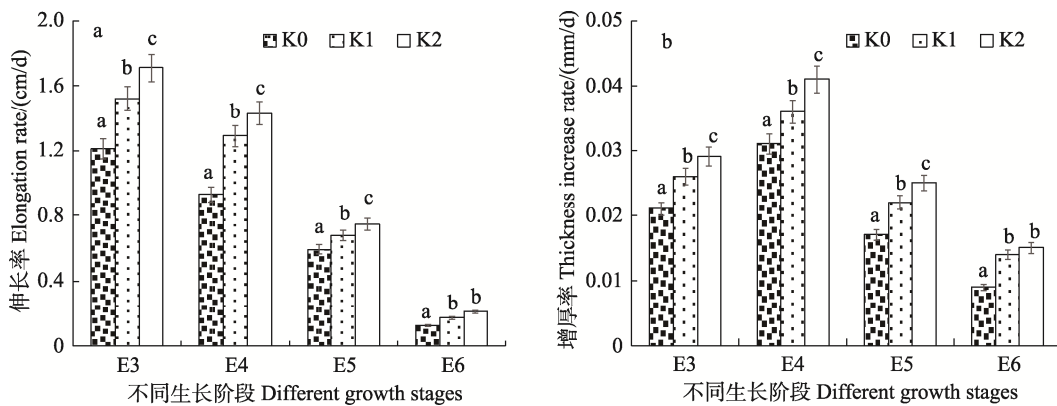


图 2 不同养殖密度海带的叶片伸长率(a)和增厚率(b)  
Fig.2 Blade elongation rate (a) and thickening rate (b) of kelp under different mariculture densities

E3: 1—3 月海带生长阶段; E4: 3—4 月海带生长阶段; E5: 4—5 月海带生长阶段;  
E6: 5—6 月海带生长阶段。相同生长阶段的相应指标不同字母表示差异显著( $P < 0.05$ ), 下同。

E3: Kelp growth stage from January to March; E4: Kelp growth stage from March to April;  
E5: Kelp growth stage from April to May; E6: Kelp growth stage from May to June. Different letters for the same growth stage indicate significant differences in the corresponding indicators ( $P < 0.05$ ), the same below.

增厚率均出现在 E4 阶段(图 2b), 最大值分别为 0.031、0.036 和 0.041 mm/d, 最小海带叶片增厚率均出现在 E6 阶段, 最小值分别为 0.009、0.014 和 0.015 mm/d。不同养殖密度海带叶片增厚率从 E3 阶段到 E4 阶段逐渐增大, 之后呈逐渐下降的趋势。K1 和 K2 的海带叶片增厚率在 E3、E4、E5 和 E6 阶段均显著高于 K0 ( $P < 0.05$ ); K2 的海带叶片增厚率则在 E3、E4 和 E5 阶段均显著高于 K1, 而在 E6 阶段差异不显著( $P > 0.05$ )。

### 2.3 养殖密度调整前后海带的长度和湿重

养殖密度调整前后海带的长度和湿重变化如图 3 所示。养殖密度调整前, K0、K1 和 K2 三个站位的海带长度差异不显著, 范围为 227.55~241.17 cm; 实验结束时, K0、K1 和 K2 三个站位的海带长度范围为 342.01~411.15 cm, K1 和 K2 显著高于 K0, 且 K2 的长度显著高于 K1 ( $P < 0.05$ ) (图 3a)。K1 和 K2 的海

带湿重均显著大于 K0, K1 与 K2 间的差异不显著 ( $P>0.05$ )。表 1 为实验结束时不同养殖密度海带收获

移除的总湿重, 实验结束时 K1 海带总湿重显著高于 K0 和 K2, 比 K0 高约 13.3%。

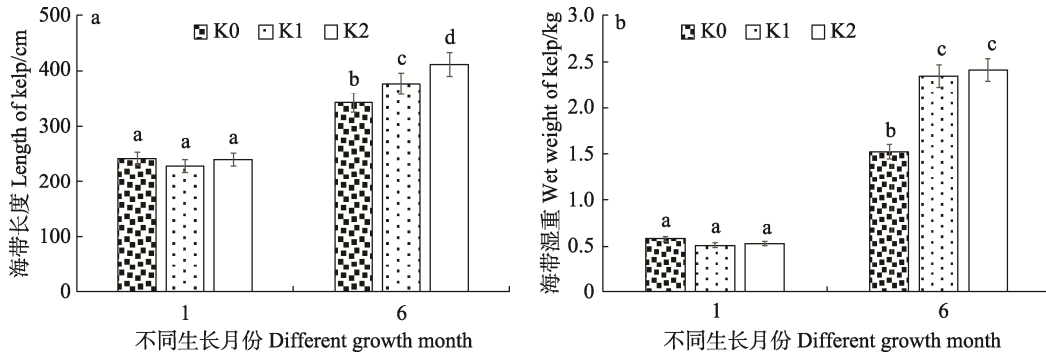


图3 养殖密度调整前后海带的长度(a)和湿重(b)

Fig.3 The length (a) and wet weight (b) of kelp before and after stocking density adjustment

表1 实验结束时不同养殖密度海带收获移除的总湿重

Tab.1 Total wet weight of kelp harvested and removed at different mariculture densities by the end of the experiment

密度组 Density group	$X_1$ /绳	$M_1$ /(kg/ind.)	$W_1$ /t	$X_6$ /绳	$M_6$ /(kg/ind.)	$W_6$ /t	$W_T$ /t
K0	0	0.58±0.05 <sup>a</sup>	0	1 600	1.53±0.17 <sup>a</sup>	73.44±2.72 <sup>b</sup>	73.44±2.72 <sup>b</sup>
K1	536	0.51±0.04 <sup>a</sup>	8.20±0.21	1 064	2.35±0.14 <sup>b</sup>	75.01±1.48 <sup>b</sup>	83.21±1.77 <sup>c</sup>
K2	800	0.53±0.06 <sup>a</sup>	12.72±0.48	800	2.41±0.21 <sup>b</sup>	57.84±1.67 <sup>a</sup>	70.56±2.04 <sup>a</sup>

注: 同一列内的不同字母表示差异显著( $P<0.05$ ), 下同。

Note: Different letters within the same column denote significant differences ( $P<0.05$ ), the same below.

#### 2.4 不同养殖密度海区的 CDOM 光谱指标

养殖密度调整前后海区的  $a(355)$  和  $SUVA_{254}$  均值变化见图 4。不同养殖密度海区的  $a(355)$  随着海带的生长均呈现逐渐增加的趋势, 且均在 5 月和 6 月达到最高值, 整个实验期间  $a(355)$  的变化范围为 0.44~2.73/m; 其中, K0、K1 和 K2 的  $a(355)$  在 11 月和 1 月差异均不

显著( $P>0.05$ ), 而 K0、K1 站位在 3、4、5 和 6 月的  $a(355)$  均显著高于 K2。不同养殖密度海区的  $SUVA_{254}$  也随着海带的生长均呈现逐渐增加的趋势, 且均在 6 月达到最高值, 整个实验期间  $SUVA_{254}$  的变化范围为 0.29~1.46 L/(mg·m); 其中, K0、K1 和 K2 的  $SUVA_{254}$  在 1 月差异均不显著( $P>0.05$ ), 而 K0、K1 在 3 月和 6 月的  $SUVA_{254}$  均显著高于 K2。

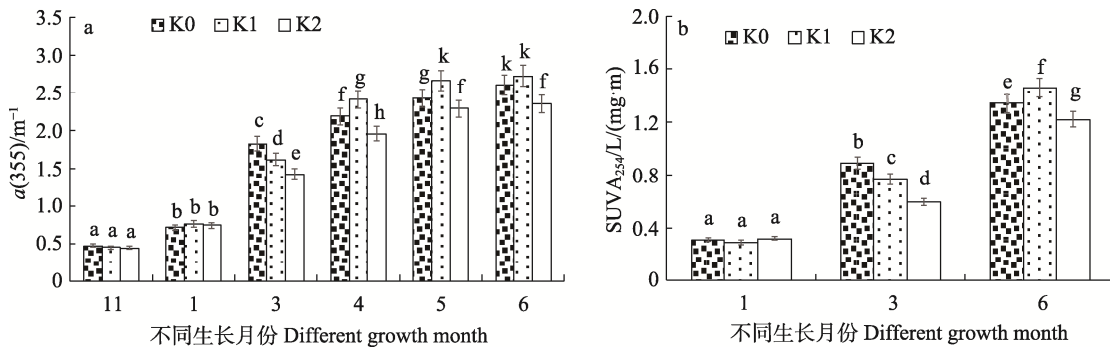


图4 不同海带养殖密度海区的  $a(355)$ (a)和  $SUVA_{254}$  均值(b)的时间序列变化

Fig.4 Variation in mean values of  $a(355)$  (a) and  $SUVA_{254}$  (b) before and after adjustment of kelp density

#### 2.5 不同养殖密度固碳差异

实验结束时不同养殖密度海带的碳库贡献量见表 2。3 个站位海带的干湿比、含碳率差异均不显著

( $P>0.05$ ), K1 组海带养殖生成的生物质碳、惰性溶解有机碳、沉积埋藏碳及总碳库贡献量均显著高于 K0 组和 K2 组, 碳库贡献量比 K0 组高约 15.19%。

表 2 不同养殖密度海带的碳库贡献量

Tab.2 The contribution of kelp from different mariculture densities to the carbon pool at the end of the experiment

养殖密度 Mariculture densities	$W_T/t$	干湿比 Dry-to-wet ratio/%	含碳率 Carbon content /(%, dry basis)	生物质碳 Biocarbon /t C	惰性溶解有机碳 Recalcitrant dissolved organic carbon/t C	沉积物理藏碳 Sedimentary carbon/t C	总碳库贡献量 Contribution to the total carbon stock/t C
K0	73.44±2.72 <sup>b</sup>	20.42±1.06 <sup>a</sup>	30.47±1.33 <sup>a</sup>	4.57±0.11 <sup>a</sup>	0.86±0.02 <sup>a</sup>	0.23±0.01 <sup>a</sup>	5.66±0.15 <sup>a</sup>
K1	83.21±1.77 <sup>c</sup>	20.68±1.37 <sup>a</sup>	30.56±1.49 <sup>a</sup>	5.26±0.23 <sup>b</sup>	0.99±0.05 <sup>b</sup>	0.26±0.02 <sup>b</sup>	6.52±0.31 <sup>b</sup>
K2	70.56±2.04 <sup>a</sup>	20.71±1.15 <sup>a</sup>	30.62±1.54 <sup>a</sup>	4.47±0.21 <sup>a</sup>	0.85±0.04 <sup>a</sup>	0.22±0.01 <sup>a</sup>	5.54±0.27 <sup>a</sup>

### 3 讨论

#### 3.1 养殖密度对海带生长及产量的影响

养殖密度和光照强度是影响海带生长速度和品质的两个最关键的环境因子,它们相互关联,共同作用于海带的生理过程。适宜的光照条件可以促进海藻的生长和二氧化碳的固定(Reed *et al*, 2015)。根据海带孢子体形态特征,养殖阶段可分为海带孢子体快速伸长和加宽的脆嫩期(11月至次年1月)、叶片增厚和物质快速积累的厚成期(2—4月)和产生孢子囊的成熟期(5—7月)3个阶段(Ding *et al*, 2019)。海带在脆嫩期规格较小,此时光照强度并不是其生长的主要限制性因子,因此,本研究选择海带脆嫩期后期(1月)观测养殖密度对不同深度光衰减率的影响。研究结果显示,3个养殖密度海区在0.5 m深度的光衰减率范围为29.85%~34.66%,在1 m深度的光衰减率均超过了50%。这与严瑾等(2024)研究结果一致,即海带养殖区光照强度随着深度的增加而减少,2 m深处的光照强度下降的幅度最大。本研究中不同养殖密度海区0~1 m深度的光衰减率存在显著差异,K0站位0.5 m深度的光衰减率最高,分别为两个低密度站位K1和K2的1.13~1.66倍。海带释放的有机物在微生物碳泵(MCP)驱动下,被转化为CDOM。这类物质能强烈吸收蓝紫光和紫外线,导致水体透光率下降,光合有效辐射减弱(Wu *et al*, 2025)。海带在厚成期生物质快速积累,对于光照的需求较大(吴海一等, 2015)。随着海带藻体长大,相互间遮光加强,从而影响其光合作用效率(房景辉等, 2020),是影响海带生长的重要因素。本研究中低密度组海带的长度和湿重显著高于K0组,更高的光照累积是生长更快的重要原因。

通过改进养殖技术和养殖模式而合理高效地利用养殖海域,可显著提高养殖单产效率(张继红等, 2021)。养殖密度直接决定了每棵海带所能获得的空间、营养和光照等生长资源。叶片长度和厚度随时间的变化是评估海带生长的重要指标(Tala *et al*, 2005)。本研究中,不同密度组的海带最大叶片伸长率均出现

在脆嫩期阶段,最大叶片增厚率均出现在厚成期阶段,与现有研究结果一致(吴海一等, 2015; 毛玉泽等, 2018),K0组海带叶片伸长率和增厚率均显著低于K1和K2组,主要是由于高养殖密度导致海带植株间相互遮荫,中下层海带接收到的光照强度显著降低(房景辉等, 2020),导致光合作用效率下降,有机物积累不足(Paine *et al*, 2021);降低养殖密度后,海带个体能接受更充分的光照,促进了生长和有机物积累(Weigel *et al*, 2021),养殖产量增加,如本研究中K1组的产量相较于K0组提高了约13.30%;但密度过低会浪费养殖水域和设施,单位面积产量和经济效益下降,这是本研究中K2组的产量低于K1组的主要原因。因此,在海带养殖脆嫩期通过合理调整海带养殖密度可明显提升海带养殖产量,本研究为大型海藻高效养殖模式构建提供了数据支持。

#### 3.2 养殖密度调整对海带固碳差异分析

养殖海带是一种高产的大型海藻,通过藻体新陈代谢分泌、远端组织糜烂、叶片破碎等过程产生大量的溶解有机物(Pedersen *et al*, 2020)。而大型海藻在养殖过程中,通过分泌和藻体降解途径释放其光合产物的相当一部分为有色溶解性有机物(CDOM),是大型海藻养殖水域中溶解有机物的主要来源之一。CDOM具有光谱吸收性质,其光谱特征不仅可以表征DOC含量,还可示踪DOM在海水中的迁移转化规律(Stedmon *et al*, 2003),在海洋光学环境中起着重要作用。特定波长(355 nm)下的吸收系数 $a(355)$ 常与CDOM的浓度成正比,常被用于表征水体中DOC的含量变化(Stedmon *et al*, 2000)。本研究结果显示,不同养殖密度海区的 $a(355)$ 随着海带的生长均呈现逐渐增加的趋势,均在5月和6月达到最高值,K0、K1站位的 $a(355)$ 值均显著高于K2站位,表明海带不同生长阶段和养殖密度均能显著影其CDOM释放量,海带养殖区的DOC释放量随着其个体规格和养殖密度的增加而逐渐升高。研究表明,光照强度作为主要因素驱动了养殖海带向海水中释放较多的不稳定的溶解有机物。目前,对不同养殖密度条件下大型

海藻释放的 DOC 的生物可利用特性了解较少。SUVA<sub>254</sub> 是表征水生系统中 DOC 特性的重要指标, DOC 的芳香性随 SUVA<sub>254</sub> 的升高而增强(Li *et al.*, 2018; 吴文广等, 2024)。本研究结果显示, 不同养殖密度海区的 SUVA<sub>254</sub> 随着海带的生长均呈现逐渐增加的趋势, 均在 6 月达到最高值, 且 K0、K1 站在 3 月和 6 月的 SUVA<sub>254</sub> 均显著高于 K2, 表明不同生长阶段和养殖密度均能显著影响海区 CDOM 的生物可利用性, 即随着海带个体规格和养殖密度的增加, 养殖海区的芳香性和腐殖质程度也不断增强, 暗示着海带分泌释放的活性溶解有机碳(LDOC)经微生物碳泵作用逐渐转化为相对惰性的 RDOC 并不断累积, 从而实现 DOC 的长久封存。因此, 在海带养殖脆嫩期通过合理调整海带养殖密度可明显提升养殖海区的固碳潜力。

大型海藻碳汇作为海洋碳汇的重要组成部分, 是实现“双碳目标”和践行海洋负排放的有效途径之一(张永雨等, 2017; 张继红等, 2021)。近年来, 大型碳汇功能研究取得了显著进展, 大型海藻碳汇主要包括养殖过程形成的生物质碳、惰性溶解有机碳和沉积物埋藏碳(李瑞帆等, 2025)。本研究结果表明, 实验结束时 K1 的生物质碳、惰性溶解有机碳、沉积埋藏碳及总碳库贡献量均显著高于 K0 和 K2, 且相对于 K0 碳库贡献量提升约 15.19%, 表明在海带养殖脆嫩期通过合理调整海带养殖密度可明显提升其固碳量。光能作为养殖大型海藻进行光合作用的能量来源, 其光照强度的增加通常会提高光合作用的速率, 增加海藻的固碳能力(Reed *et al.*, 2015), 而在其合适的生长阶段通过合理调整其养殖密度, 将显著提升其固碳能力(Sun *et al.*, 2020), 与本研究结果相符。因此, 基于养殖容量评估结果指导现有海带养殖模式, 形成密度适宜、结构优化、固碳功能高效的养殖生态系统是构建大型海藻养殖增汇模式的关键路径(唐启升等, 2016; 张继红等, 2016)。本研究仅对比分析了不同养殖密度海区的光照强度垂直变化差异, 未来需进一步研究营养盐、海流和微生物等因素对于海带生长动态的影响, 且不同养殖密度海带形成的 RDOC 和沉积埋藏碳均通过文献参考值进行计算, 对于养殖海区 DOC 和 POC 的迁移转化特性尚需通过原位监测数据进一步深入研究, 为准确评估不同养殖密度调整条件下的碳增汇效率提供数据支持。

## 参 考 文 献

房景辉, 蒋增杰, 蔺凡, 等. 桑沟湾海带标准化养殖模式的优

势探析. 渔业科学进展, 2020, 41(5): 134–140 [FANG J H, JIANG Z J, LIN F, *et al.* Analysis on the advantages of standard kelp long line culture in sanggou bay. *Progress in Fishery Sciences*, 2020, 41(5): 134–140]

焦念志, 戴民汉, 翦知潜, 等. 海洋储碳机制及相关生物地球化学过程研究策略. 科学通报, 2022, 67(15): 1600–1606 [JIAO N Z, DAI M H, JIAN I, *et al.* Research strategies for ocean carbon storage mechanisms and effects. *Chinese Science Bulletin*, 2022, 67(15): 1600–1606]

李瑞帆, 钟晨辉, 郑盛华, 等. 大型海藻碳汇: 固碳机理、评估方法与环境因子影响. 渔业研究, 2025: 1–15 (2025-05-07). <https://kns.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?dbcode=CJFD&dbname=CJFD&filename=FJSC20250430001>. [LI R F, ZHONG C H, ZHENG S H, *et al.* Mechanism, assessment methods and environmental factors influence in carbon sink of macroalgae: A review. *Journal of Fisheries Research*, 2025: 1–15 (2025-05-07). <https://kns.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?dbcode=CJFD&dbname=CJFD&filename=FJSC20250430001>.]

刘毅, 刘群, 吴文广, 等. 空白校正对元素分析仪测定海水中颗粒有机碳结果准确性的影响分析. 海洋科学, 2020, 44(12): 78–83 [LIU Y, LIU Q, WU W G, *et al.* Effects of different sampling methods on the accuracy of particulate organic carbon and particulate nitrogen samples in ocean. *Marine Sciences*, 2020, 44(12): 78–83]

毛玉泽, 李加琦, 薛素燕, 等. 海带养殖在桑沟湾多营养层次综合养殖系统中的生态功能. 生态学报, 2018, 38(9): 3230–3237 [MAO Y Z, LI J Q, XUE S Y, *et al.* Ecological functions of the kelp *Saccharina japonica* in integrated multi-trophic aquaculture, Sanggou Bay, China. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(9): 3230–3237]

唐启升, 蒋增杰, 毛玉泽. 渔业碳汇与碳汇渔业定义及其相关问题的辨析. 渔业科学进展, 2022, 43(5): 1–7 [TANG Q S, JIANG Z J, MAO Y Z. Clarification on the definitions and its relevant issues of fisheries carbon sink and carbon sink fisheries. *Progress in Fishery Sciences*, 2022, 43(5): 1–7]

唐启升, 刘慧. 海洋渔业碳汇及其扩增战略. 中国工程科学, 2016, 18(3): 68–73 [TANG Q S, LIU H. Strategy for carbon sink and its amplification in marine fisheries. *Engineering Sciences*, 2016, 18(3): 68–73]

吴海一, 王翔宇, 朱安成. 脆嫩–厚成期海带物质成分变化分析研究. 海洋科学, 2015(8): 35–38 [WU H Y, WANG X Y, ZHU A C. Analysis of component changes of *Saccharina japonica* at mushroom-adult stage. *Marine Sciences*, 2015(8): 35–38]

吴文广, 张继红, 刘毅, 等. 桑沟湾春季有色溶解有机物吸收光谱特性及空间分布特征. 水产学报, 2024, 48(2): 80–93 [WU W G, ZHANG J H, LIU Y, *et al.* Spectral and distribution characteristics of colored dissolved organic matter (CDOM) in Sanggou Bay in spring. *Journal of Fisheries of China*, 2024, 48(2): 80–93]

- 严谨, 房景辉, 王仁杰, 等. 桑沟湾海带单绳式养殖模式的初步研究. 中国水产科学, 2024, 31(10): 1230–1239 [YAN J, FANG J H, WANG R J, *et al.* Preliminary study on the single rope aquaculture mode of *Saccharina japonica* in the Sanggou Bay. Journal of Fishery Sciences of China, 2024, 31(10): 1230–1239]
- 张继红, 方建光, 唐启升. 中国浅海贝藻养殖对海洋碳循环的贡献. 地球科学进展, 2005, 20(3): 359–365 [ZHANG J H, FANG J G, TANG Q S. Contribution of shellfish culture to marine carbon cycle in China shallow sea. Advances in Earth Science, 2005, 20(3): 359–365]
- 张继红, 蔺凡, 方建光. 海水养殖容量评估方法及在养殖管理上的应用. 中国工程科学, 2016, 18(3): 85–89 [ZHANG J H, LIN F, FANG J G. Carrying capacity assessment and its application in mariculture management. Strategic Study of CAE, 2016, 18(3): 85–89]
- 张继红, 刘纪化, 张永雨, 等. 海水养殖践行“海洋负排放”的途径. 中国科学院院刊, 2021, 36(3): 252–258 [ZHANG J H, LIU J H, ZHANG Y Y, *et al.* Strategic approach for mariculture to practice “ocean negative carbon emission”. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2021, 36(3): 252–258]
- 张永雨, 张继红, 梁彦韬, 等. 中国近海养殖环境碳汇形成过程与机制. 中国科学(地球科学), 2017, 47(12): 1414–1424 [ZHANG Y Y, ZHANG J H, LIANG Y T, *et al.* Carbon sequestration processes and mechanisms in coastal mariculture environments in China. Scientia Sinica (Terrae), 2017, 47(12): 1414–1424]
- 赵军杰, 张婧, 杨桂朋. 秋季东、黄海有色溶解有机物 (CDOM) 的光学特性研究. 海洋环境科学, 2013, 32(6): 818–823 [ZHAO J J, ZHANG J, YANG G P. Optical properties of the colored dissolved organic matter in the Yellow Sea and the East China Sea in autumn. Marine Environmental Science, 2013, 32(6): 818–823]
- 赵鹏, 胡学东. 国际蓝碳合作发展与中国的选择. 海洋通报, 2019, 38(6): 613–619 [ZHAO P, HU X D. International blue carbon cooperation and China’s choice. Marine Science Bulletin, 2019, 38(6): 613–619]
- DING H Y, GUO L, LI X J, *et al.* Transcriptome analysis of kelp *Saccharina japonica* unveils its weird transcripts and metabolite shift of main components at different sporophyte developmental stages. Journal of Oceanology and Limnology, 2019, 37(2): 640–650
- GUAN Y J, WU W H, XIE Y A, *et al.* The carbon sink potential of marine algae and shellfish in China. Journal of Ocean University of China, 2025, 24(4): 1139–1146
- LI H M, ZHANG Y Y, LIANG Y T, *et al.* Impacts of maricultural activities on characteristics of dissolved organic carbon and nutrients in a typical raft-culture area of the Yellow Sea, North China. Marine Pollution Bulletin, 2018, 137: 456–464
- PAINE E R, SCHMID M, BOYD P W, *et al.* Rate and fate of dissolved organic carbon release by seaweeds: A missing link in the coastal ocean carbon cycle. Journal of Phycology, 2021, 57(5): 1375–1391
- PEDERSEN M F, FILBEE-DEXTER K, NORDERHAUG K M, *et al.* Detrital carbon production and export in high latitude kelp forests. Oecologia, 2020, 192(1): 227–239
- REED D C, CARLSON C A, HALEWOOD E R, *et al.* Patterns and controls of reef-scale production of dissolved organic carbon by giant kelp *Macrocystis pyrifera*. Limnology and Oceanography, 2015, 60(6): 1996–2008
- STEDMON C A, MARKAGER S, KAAS H. Optical properties and signatures of chromophoric dissolved organic matter (CDOM) in Danish coastal waters. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2000, 51(2): 267–278
- STEDMON C A, MARKAGER S. Behaviour of the optical properties of coloured dissolved organic matter under conservative mixing. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2003, 57(5/6): 973–979
- SUN K, ZHANG J H, LIN F, *et al.* Evaluating the growth potential of a typical bivalve-seaweed integrated mariculture system - a numerical study of Sungo Bay, China. Aquaculture, 2021, 532: 736037
- SUN K, ZHANG J H, LIN F, *et al.* Evaluating the influences of integrated culture on pelagic ecosystem by a numerical approach: A case study of Sungo Bay, China. Ecological Modelling, 2020, 415: 108860
- TALA F, EDDING M. Growth and loss of distal tissue in blades of *Lessonia nigrescens* and *Lessonia trabeculata* (Laminariales). Aquatic Botany, 2005, 82(1): 39–54
- TANG Q, ZHANG J, FANG J. Shellfish and seaweed mariculture increase atmospheric CO<sub>2</sub> absorption by coastal ecosystems. Marine Ecology Progress Series, 2011, 424: 97–104
- WEIGEL B L, PFISTER C A. The dynamics and stoichiometry of dissolved organic carbon release by kelp. Ecology, 2021, 102(2): e03221
- WU W G, ZHANG J H, LIU Y, *et al.* Refractory dissolved organic carbon produced by cultivated kelp *Saccharina japonica* during different stages. Aquaculture, 2025, 596: 741749
- ZHANG J H, FANG J G, WANG W, *et al.* Growth and loss of mariculture kelp *Saccharina japonica* in Sungo Bay, China. Journal of Applied Phycology, 2012, 24(5): 1209–1216

## Analysis of Growth Dynamics and Carbon Sink Effects of *Saccharina japonica* Under Different Mariculture Densities in Sanggou Bay

SUN Haoming<sup>1,2</sup>, XU Dong<sup>2</sup>, ZHANG Ya'nan<sup>2,3</sup>, HUANG Xintong<sup>2,4</sup>,  
SUN Yanmin<sup>2,5</sup>, YANG Fan<sup>2</sup>, WANG Yapeng<sup>2</sup>, YE Naihao<sup>2①</sup>

(1. College of Fisheries and Life Sciences, Dalian Ocean University, Dalian 116023, China; 2. State Key Laboratory of Mariculture Biobreeding and Sustainable Goods, Yellow Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Laboratory for Marine Fisheries Science and Food Production Processes, Qingdao Marine Science and Technology Center, Qingdao 266071, China;

3. College of Bioengineering, Qingdao University of Science and Technology, Qingdao 266042, China;

4. School of Computer Technology, Hainan University, Haikou 571924, China;

5. College of Marine Life Sciences, Ocean University of China, Qingdao 266003, China)

**Abstract** To investigate the growth dynamics and carbon sequestration effects of kelp under different cultivation densities, this study used the traditional cultivation density of 100 ropes per raft (K0) in Sanggou Bay as the control group. During the tender stage of kelp (January), the cultivation density was reduced to 67 ropes per raft (K1) and 50 ropes per raft (K2), respectively. Methods such as on-site instrument monitoring, in-situ perforation sampling, UV-Vis absorption spectroscopy, and organic carbon analysis were employed to measure the light attenuation rate, absorption spectra of colored dissolved organic matter (CDOM) in surface seawater, elongation rate, and thickening rate of kelp blades in different density areas of Sanggou Bay. Differences in kelp growth dynamics under varying densities were analyzed, and carbon sequestration under different cultivation densities were estimated. The results showed that: (1) The light attenuation rates in the 0–1 m depth layer differed significantly among the three cultivation density areas. (2) The highest blade elongation rate in all three density groups occurred during the E3 stage (January–March), while the highest thickening rate appeared during the E4 stage (March–April). By the end of the experiment (June), the wet weight per individual kelp in the K1 and K2 groups was significantly greater than that in K0, and the total wet weight of kelp cultivation in the K1 group was significantly higher than that in the other two groups. (3) The absorption coefficient  $a(355)$  of colored dissolved organic matter (CDOM) at 355 nm in the K0 and K1 cultivation areas was significantly higher than that in K2 from March to June, while the SUVA<sub>254</sub> values at the K0 and K1 stations in March and June were significantly higher than those at K2. By the end of the experiment, the total carbon pool contribution of the K1 group increased by approximately 15.19% compared with K0. The findings indicate that reducing kelp cultivation density to a reasonable level can significantly enhance kelp growth, yield, and the carbon sequestration of the cultivation system. This provides data support and technical references for developing models to enhance carbon sinks through large macroalgae cultivation in shallow seas.

**Key words** *Saccharina japonica*; Mariculture densities; Light attenuation rate; Growth; CDOM; Carbon sink

① Corresponding author: YE Naihao, Email: yenh@ysfri.ac.cn