

DOI: 10.12264/JFSC2024-0163

## 桑沟湾海带单绳式养殖模式的初步研究

严瑾<sup>1,2</sup>, 房景辉<sup>1,2</sup>, 王仁杰<sup>3</sup>, 汪文俊<sup>2</sup>

1. 上海海洋大学水产与生命学院, 上海 201306;
2. 中国水产科学研究院黄海水产研究所, 海水养殖生物育种与可持续产出全国重点实验室, 山东 青岛 266071;
3. 荣成市海洋经济发展中心, 山东 威海 264300

**摘要:** 以荣成桑沟湾海带养殖为场景, 通过研究海带单绳式养殖模式生产性能及其影响因素, 初步探讨了该模式的可行性。实验在养殖海区比较 2 种不同单绳式海带养殖模式, 将海带苗绳的吊挂间距设置为 1 m (A1) 和 2 m (A2); 以传统养殖方式(B)作为对照组。通过分析不同模式下海带个体的生长指标差异及光照、水深与海带生长之间的关系等, 探讨在单绳式养殖模式下利于海带生长的吊挂方式及其影响因素。从整个养殖周期来看, 对照组海带的特定生长率略高于 A1 和 A2 处理组; 2 种单绳式模式处于水层上部的海带生长较好, 其中 A2 处理组上层海带的平均湿重是 1005.35 g, 而对照组是 1254.09 g, 约为 A2 处理组的 1.25 倍。实验期间, A、B 两海区的温度均处在海带生长适宜范围内。A 区海带所处水层的光照强度大部分高于 B 区, 单绳式模式的下层海带受光不足, 导致其生长受影响。虽然单绳式养殖海带的产量不及对照组, 但该模式适合机械化采收作业, 有望降低劳动力成本, 在一定程度上弥补产量降低对海带养殖经济效益的影响。初步推断, 在单绳式养殖模式下海带适宜生长水深范围为 0.8~1.5 m, 另可通过适当增加吊挂间距, 结合提高海带水层的方法, 优化其养殖模式, 构建单绳式宜机化海带养殖模式, 为研发海带养殖机械提供模式基础。

**关键词:** 海带; 养殖模式; 单绳平挂; 宜机化; 生长

中图分类号: S968

文献标志码: A

文章编号: 1005-8737-(2024)10-1230-10

海带(*Saccharina japonica*)是东亚国家养殖产量最大的经济褐藻, 我国海带养殖产量约占全球的 90%, 居世界首位<sup>[1]</sup>。海带不仅营养丰富, 而且富含褐藻胶等工业产品原料, 具有很高的经济价值。目前, 我国海带主要采用筏式养殖, 在养殖过程中耗费大量人力物力进行人工夹苗和采收, 生产过程受天气和海况影响较大, 从业者海上作业也存在一定的安全风险<sup>[2]</sup>。这种海带养殖模式已经沿用几十年, 进步缓慢; 另外, 养殖人工操作成本不断提高, 已占到养殖成本的 60%以上<sup>[3-4]</sup>, 劳动力和成本是限制海带养殖产业可持续发展的瓶颈, 亟须开展海带养殖机械化生产。国外发达国家的海带养殖业已经实现机械化采收, 韩国等使

用海带收割船“Kelsol”通过传送带切割收获野生海带<sup>[5]</sup>, 挪威通过在采收船上放置折叠臂起重机用于吊装海带绳和养殖的海带<sup>[6]</sup>, 提升了采收效率, 但这类采收船主要适用于较宽阔的养殖海域。我国海带养殖面积大, 国际上的养殖生产模式不适合在中国应用。目前, 国内已有海带机械化夹苗、采收和加工等装备的报道<sup>[7-9]</sup>, 高大晓等<sup>[10]</sup>发明一种包括双体船的新型海带收割装置, 能够进行半自动收割, 但这些离实现规模化养殖、机械化采收的需求仍有差距。

山东荣成是我国北方海带养殖主产地, 其海带产量占全国的 40%以上<sup>[11]</sup>。前期, 本课题组在荣成桑沟湾东楮岛养殖海域建立了海带标准化养

收稿日期: 2024-06-23; 修订日期: 2024-07-18.

基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFD2400800); 国家藻类产业技术体系项目(CARS-50); 泰山学者工程项目(tsqn202312279).

作者简介: 严瑾(2001-), 女, 硕士研究生, 研究方向为水产养殖生态学. E-mail: yan2530335203@163.com

通信作者: 房景辉, 研究员, 研究方向为水产养殖生态学. E-mail: hui861@163.com

殖模式<sup>[12-13]</sup>, 通过降低养殖密度、运用新型养殖设施等手段, 实现了海带养殖效益和产品品质提升, 但宜机化养殖模式的开发尚未得到有效解决和推广。本研究在桑沟湾海带养殖区建立单绳式海带养殖实验区, 以相邻的海带传统养殖区作为对照, 综合与海带生长相关的水温、光照、水深、悬挂方式等因素, 研究单绳式海带养殖模式的生产性能, 探究单绳式海带养殖的适宜悬挂方式, 为单绳式海带养殖技术优化提供参考, 为海带产业可持续发展打下基础。

## 1 材料与方 法

### 1.1 实验海域与筏架布局

实验海域选择在荣成桑沟湾的东楮岛海带养殖海域, 设置一个单绳式养殖实验区(记为 A), 在与实验区毗邻的传统养殖(平养筏式)区设置对照

区(记为 B)。

本实验筏架设置方向与所在海区海流方向垂直, 参照标准化养殖模式<sup>[12]</sup>同样改变了浮漂颜色且增大了浮漂规格, 减少了每条筏架放置的浮漂数量; 使用“八字扣”固定海带苗绳, 方便海带苗投放和收获; 单绳式养殖模式海带苗绳直接吊挂于同一根筏架绳, 苗绳吊挂间距分别为 1 m 和 2 m, 分别记为 A1 和 A2。

本实验的筏架长约 100 m (浮绳可用长度)。夹苗后, 在苗绳的连接处系上长约 0.65 m 的吊绳, 再将吊绳与浮绳连接(图 1)。在每段苗绳的中间系一个重约 300 g 的水泥坠, 防止养殖初期海带苗绳随海流漂浮, 同时降低海带苗缠绕在浮绳上的可能性。每 2.5 m 长苗绳上夹苗约 30 棵。吊挂苗绳时, A1 处理组的苗绳长度为 2.5 m; A2 处理组的苗绳长度为 5.0 m。

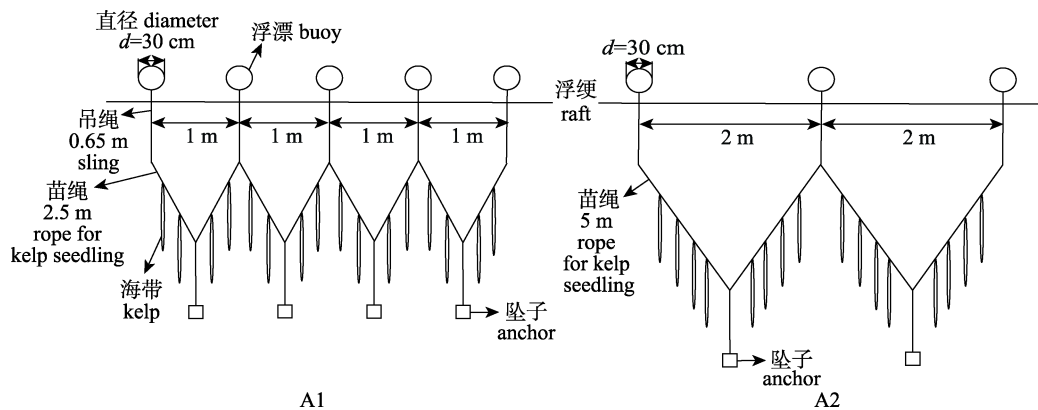


图 1 单绳式养殖模式海带吊挂示意图

Fig. 1 Two single rope aquaculture modes showing kelp hanging diagram

### 1.2 样品采集与指标测定

整个养殖实验期间, 从挂苗至收获共采集 5 次样品, 分别为 2022 年 12 月 8 日、2023 年 1 月 8 日、2023 年 2 月 22 日、2023 年 3 月 27 日和 2023 年 4 月 26 日, 分别在传统养殖区和单绳式养殖区内随机选取采样点, 从海带苗绳一端向另一端随机采集 8~10 棵, 用海水清洗干净, 带回实验室测量并记录长、宽、湿重等生长指标。为了和实际生产数据比较, 笔者将 12 月 8 日定为海带生长的初始时间(第 1 天)。养殖中后期, 笔者发现在单绳式养殖模式下不同水层的海带个体出现生长差异, 为了探讨研究该模式下海带的适宜生长水深范围,

最后一次取样时, 收获所有的海带, 随机选取 A1 和 A2 的各三绳海带, 根据海带苗绳在海域中的吊挂形态根据水深将其从上到下分为 3 段, 即上(S)、中(M)、下(D) 3 段, 分别称量各段每棵海带的重量, 即得不同水层相对应海带的湿重, 分析不同养殖水层范围内海带的生长差异。

于 2023 年 2 月 22 日—4 月 26 日, 在单绳式养殖区的绳中间及两端的位置悬挂自容式温度照度计(HOBO, MX2202, 美国) 3 台, 同时, 在传统养殖区的绳中间及两端也悬挂 3 台, 将照度计悬挂于绳下方约 0.8 m 深处(单绳式养殖模式苗绳上第一棵海带苗所处位置的水深), 以防海带

遮挡,使照度计平行于绳面向海面,设置每 1 h 记录 1 次光照强度和温度,用于测定海带养殖水层的光照强度和海水温度。此外,每次取样时使用水下照度计(ZDS-10W-2D)分别从海水表面到海底测量不同深度(0.5 m 为一个梯度)对应的光照强度并做好记录。

### 1.3 数据处理与分析

**1.3.1 特定生长率** 海带特定生长率(specific growth rate, SGR, %/d)参考房景辉等<sup>[12]</sup>的方法进行计算。本实验分 5 个阶段,2022 年 12 月 8 日—2023 年 1 月 8 日、2023 年 1 月 8 日—2023 年 2 月 22 日、2023 年 2 月 22 日—2023 年 3 月 27 日、2023 年 3 月 27 日—2023 年 4 月 26 日和 2022 年 12 月 8 日—2023 年 4 月 26 日的 SGR 分别记为 SGR<sub>A</sub>、SGR<sub>B</sub>、SGR<sub>C</sub>、SGR<sub>D</sub>、SGR<sub>T</sub>。

**1.3.2 数据统计与分析** 使用 Excel 2010 软件将 2023 年 2 月 22 日—4 月 26 日单绳式养殖区与传统养殖区每天的光照强度和温度进行统计,使用点线图对这两个区所记录的每天的光照强度进行分析,每天的温度取均数做点线图进行分析。使用 SPSS 进行统计分析,单绳式养殖模式与传统养殖模式海带长、宽和湿重差异使用单因素方差分析进行差异显著性分析。使用 OriginPro2021 软件,对 SGR 做折线图进行分析;对 A1 和 A2 不同水深与海带湿重关系使用线性回归分析进行拟合;对不同水深与光照强度关系进行曲线拟合。

## 2 结果与分析

### 2.1 养殖海区的海水条件

**2.1.1 海水温度** 从图 2 可以看出,同一时期 A 区的海水温度略高于 B 区。养殖周期内,两个实验海区的海水温度变化幅度分别为 9.39 °C 和 9.61 °C。整个实验期间两个实验养殖海区的海水温度均在 15 °C 以下,处于海带生长适宜温度范围内。

**2.1.2 海水光照强度** 养殖中后期,实验海域的日光照强度如图 3 所示。海带生长后期,A 区光照强度大多高于 B 区。整个生长周期海带的光照强度控制在 14000~22000 lx 之间最为适宜。经测算各养殖海区所挂 HOBO 监测的所有数据,单绳式

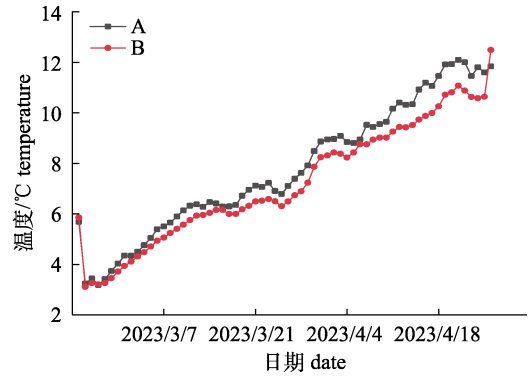


图 2 单绳式与传统养殖模式日平均海水温度  
图中大写字母 A、B 分别代表单绳式养殖区和传统对照区。

Fig. 2 Daily average temperature of the sea water in the single rope and traditional aquaculture mode area  
The capital letters A and B in the figure represent the single rope culture area and the traditional control area, respectively.

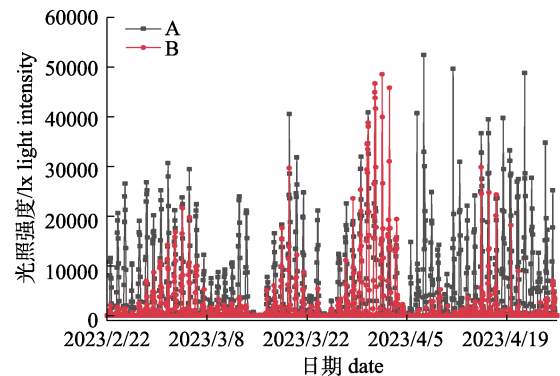


图 3 单绳式与传统养殖模式海域日光照强度  
图中大写字母 A、B 分别代表单绳式养殖区和传统对照区。

Fig. 3 Light intensity of single rope and traditional aquaculture mode sea area  
The capital letters A and B in the figure represent the single rope culture area and the traditional control area, respectively.

养殖海区的最适光照占比约为其全部监测数据的 6.4%,而传统养殖海区的最适光照占比约为其全部监测数据的 2.2%。

### 2.2 苗绳吊挂形态

不同养殖模式的苗绳吊挂形态参数如表 1 所示。海带单绳式 2 种养殖模式 A1 和 A2 的海带苗绳中间形成的夹角约为 47.16°。传统养殖模式海带苗绳为平挂形式,其夹角可忽略不计。A1 海带所处水深范围是 0.80~1.95 m, A2 海带所处水深范围是 0.80~3.09 m; 对照组的海带所处水深范围约是 1.20~1.50 m。单绳式海带所处水深范围跨度比对照组大。

表 1 单绳式与传统养殖模式海带苗绳吊挂数据

Tab. 1 Data for kelp seeding rope of single rope and traditional aquaculture mode

筏式养殖模式 longline aquaculture mode	夹角/(°) angle	水深范围/m depth
A1	47.16	0.80–1.95
A2	47.16	0.80–3.09
B	弧形 arc	1.20–1.50

注: A1: 单绳式养殖模式, 海带吊挂间距为 1 m; A2: 单绳式养殖模式, 海带吊挂间距为 2 m; B: 传统养殖模式。

Note: A1: single rope aquaculture mode, kelp hanging spacing of 1 m; A2: single rope aquaculture mode, kelp hanging spacing of 2 m; B: traditional aquaculture mode.

### 2.3 海带生长情况

从整个过程来看, 与传统养殖区相比, 单绳式养殖区海带的生长指标(长、宽、湿重)均较低(表 2)。至 2023 年 4 月 26 日, 单绳式养殖模式下海带的各项生长指标均显著低于对照区( $P<0.05$ ), 其中 A2 组显著高于 A1 组。

表 2 单绳式与传统养殖模式下海带长、宽、湿重对照表

Tab. 2 Comparisons of length, width and wet weight cultured under single rope and traditional aquaculture mode

时间 date	筏式养殖模式 longline aquaculture mode	长/cm length	宽/cm width	湿重/g wet weight
2022-12-08	初始值 initial value	52±20	4±2	9±9
	A1	81±22 <sup>b</sup>	13±4	40±24 <sup>b</sup>
2023-01-08	A2	90±23 <sup>a</sup>	14±3	43±22 <sup>b</sup>
	B	74±16 <sup>c</sup>	15±4	56±31 <sup>a</sup>
	A1	192±24 <sup>b</sup>	28±6 <sup>b</sup>	226±88 <sup>b</sup>
2023-02-22	A2	168±26 <sup>c</sup>	29±6 <sup>b</sup>	216±75 <sup>b</sup>
	B	202±38 <sup>a</sup>	37±10 <sup>a</sup>	359±183 <sup>a</sup>
	A1	189±50 <sup>c</sup>	40±8	590±284 <sup>b</sup>
2023-03-27	A2	206±38 <sup>b</sup>	37±9	540±256 <sup>c</sup>
	B	219±46 <sup>a</sup>	44±6	682±282 <sup>a</sup>
	A1	189±45 <sup>c</sup>	31±7 <sup>c</sup>	596±149 <sup>c</sup>
2023-04-26	A2	212±42 <sup>b</sup>	33±8 <sup>b</sup>	732±447 <sup>b</sup>
	B	286±27 <sup>a</sup>	48±8 <sup>a</sup>	1254±219 <sup>a</sup>

注: 不同字母表示相同时间不同处理组的相应指标存在显著性差异( $P<0.05$ )。A1: 单绳式养殖模式, 海带吊挂间距为 1 m; A2: 单绳式养殖模式, 海带吊挂间距为 2 m; B: 传统养殖模式。

Note: Different letters indicate that there are significant differences in the corresponding indicators of different treatment groups at the same time ( $P<0.05$ ). A1: single rope aquaculture mode, kelp hanging spacing of 1 m; A2: single rope aquaculture mode, kelp hanging spacing of 2 m; B: Traditional aquaculture mode.

养殖海带不同阶段的特定生长率如表 3 所示。单绳式养殖模式下的  $SGR_C$  高于传统养殖模式, 传统养殖模式下的  $SGR_A$ 、 $SGR_B$  和  $SGR_D$  均高于单绳式养殖模式。3 个实验组的海带从 12 月到翌年 2 月海带生长速度较快, 3—4 月较慢。从整个养殖周期来看, 传统养殖模式的  $SGR_T$  略高于单绳式养殖模式。

表 3 单绳式和传统养殖模式不同生长阶段海带的特定生长率

Tab. 3 Specific growth rate of kelp in different growth stages of single rope and traditional aquaculture mode

筏式养殖模式 longline aquaculture mode	$SGR_A$	$SGR_B$	$SGR_C$	$SGR_D$	$SGR_T$
A1	4.92	3.94	2.75	0.04	3.26
A2	5.21	3.65	2.61	1.01	3.42
B	6.04	4.23	1.84	2.02	3.85

注: 表中  $SGR_T$  为整个实验期的特定生长率;  $SGR_A$ 、 $SGR_B$ 、 $SGR_C$ 、 $SGR_D$  为各取样阶段的特定生长率。

Note: In the table,  $SGR_T$  is the specific growth rate for the entire experimental period;  $SGR_A$ ,  $SGR_B$ ,  $SGR_C$ , and  $SGR_D$  are the specific growth rates for each sampling stage.

### 2.4 不同水层的海带湿重

将 A1 和 A2 养殖模式下海带的生长水深各均分为 3 层, 经测量计算, A1 的上(S)、中(M)、下(D)分别为 0.80~1.18 m、1.18~1.57 m 和 1.57~1.95 m, A2 分别为 0.80~1.56 m、1.56~2.33 m 和 2.33~3.09 m。随水深的增加, 海带湿重逐渐降低。A1 和 A2 同一水层的海带湿重差异显著( $P<0.05$ ), A1 和 A2 的 S、M 两层相对应苗绳上的海带湿重均显著高于 D 水层, 这说明上、中两水层的海带长势较好(图 4)。

### 2.5 光照强度、海水水深和海带湿重之间的关系

**2.5.1 海水深度与海区光照强度的线性关系** 在单绳式养殖和传统养殖模式下, 不同水深和光照强度均呈现显著的幂函数关系(A:  $R^2=0.99$ ,  $P<0.01$ ; B:  $R^2=0.99$ ,  $P<0.01$ ; 图 5)。从图中可以看出, 海区光照强度随着海水深度的增加而减少, 且在表层到 2 m 海水深度间, 光照强度下降的幅度最大。随着实验的进行, 光照强度逐渐增强。

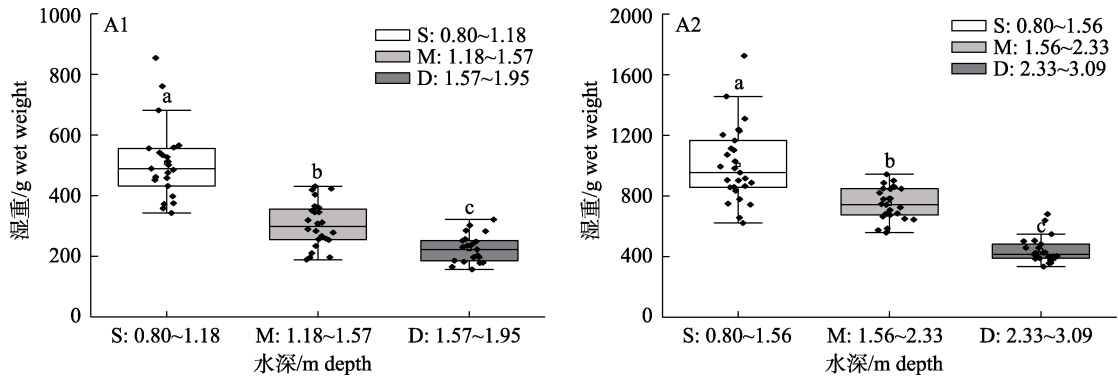


图 4 两种养殖模式下不同水层的海带湿重  
小写字母代表同一实验组在不同水层有显著性差异( $P < 0.05$ ).

Fig. 4 Wet weight of kelp harvested in different water layers in the two aquaculture modes  
The lowercase letters represent that wet weight in the same experimental group was significantly different ( $P < 0.05$ ) in different water layers.

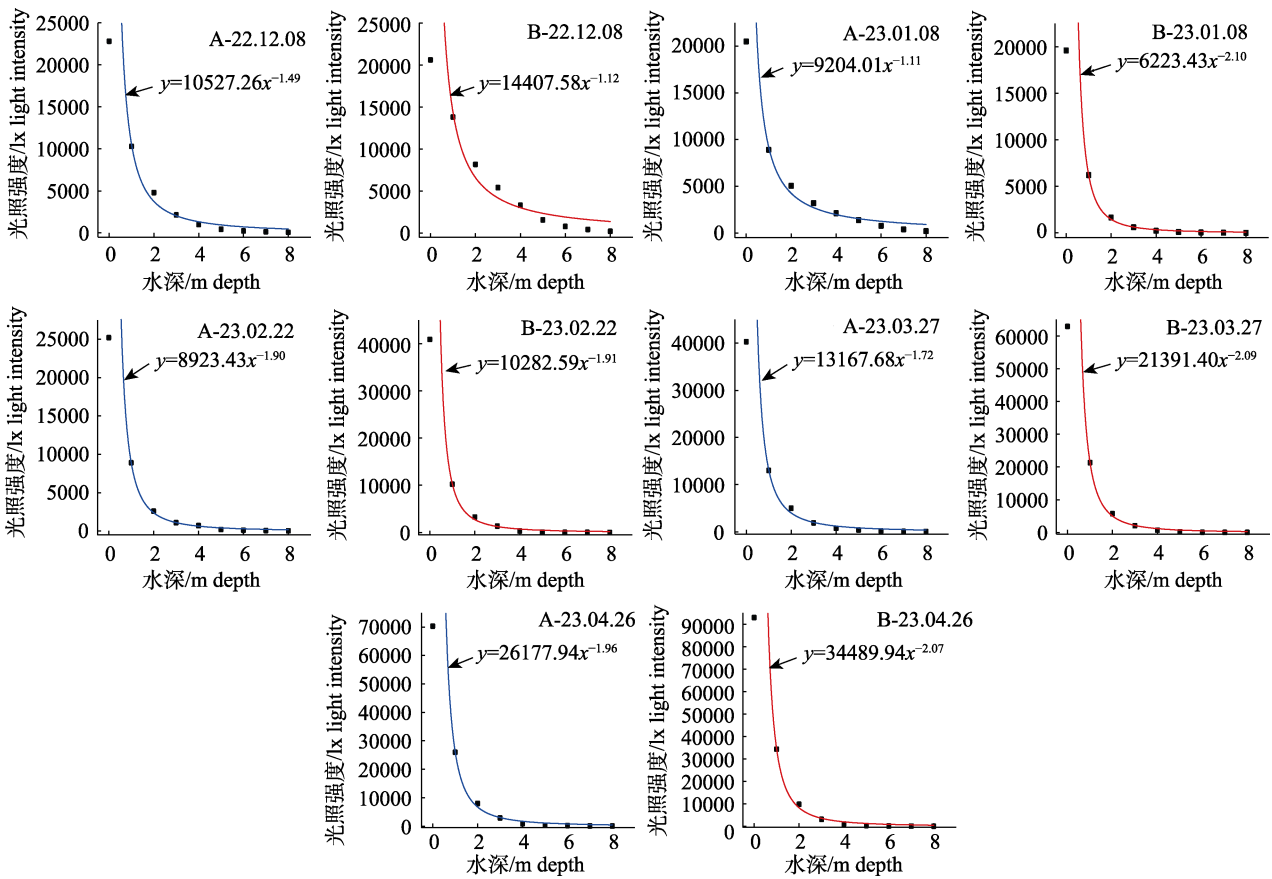


图 5 两种养殖模式下海水深度与海区光照强度的线性关系

图中大写字母 A、B 为单绳式养殖区和传统对照区, 图中 A-、B- 后的数字代表数据采集时间。

Fig. 5 The linear relationship between seawater depth and light intensity in the two aquaculture modes  
A and B in the figure represent the single rope aquaculture area and the traditional control area. The number behind the capital letters A- and B- in the diagram represents the time of data acquisition.

2.5.2 单绳式养殖模式下海水深度与海带湿重的关系  
A1 和 A2 两种养殖模式下海水水深与海带

湿重均呈显著的线性关系, 并显著负相关(图 6)。  
随着水深的增加, 海带的湿重均呈降低的趋势。

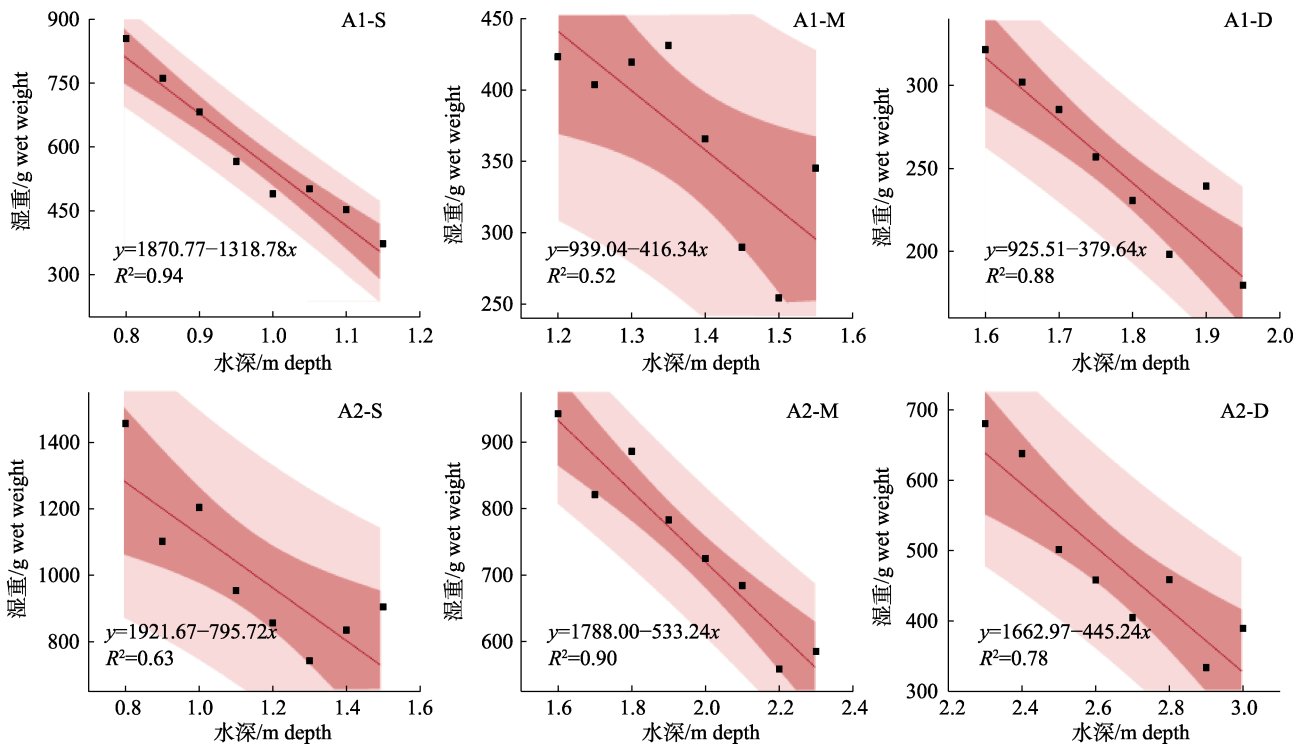


图 6 两种养殖模式下不同水深与海带湿重的线性关系  
 Fig. 6 The linear relationship between different water depth and wet weight of kelp in the two aquaculture modes

### 3 讨论

#### 3.1 两种养殖模式海带生长差异原因分析

海带属冷水性褐藻，其适宜生长温度为-1~20℃，其中在温度为5~10℃时，海带生长处于最佳状态<sup>[14-15]</sup>。当温度不在适宜温度范围内时，海带生长会出现滞缓现象<sup>[16-18]</sup>。在整个实验期间内，A、B两个实验海区的温度范围分别为2.74~15.66℃、2.87~13.04℃，均处在海带的适宜生长温度范围内，不会发生海带生长滞缓的现象。两个实验海区的水温在3月初至4月中旬为5~10℃，处于海带生长的最适温度范围内，此时海带生长进入厚成期，长度生长减慢，叶片增厚<sup>[19]</sup>。海带的主要养殖期为冬季、春季至夏初，冬季水温偏低，海带生长较为缓慢<sup>[20]</sup>，本研究中1~2月海带生长较其他月份缓慢，其余时段海带均呈现较好的生长趋势。另外，两个养殖海域温度变化非常接近，从所监测的温度数据来看，两个实验海区海带所处水层的温度比较接近，且海带在日平均海水温度持续稳定在15℃时就已全部收获，所

以温度的略微差异不会对两种养殖模式下海带个体生长差异产生影响。

养殖实验后期，发现单绳式养殖模式下处于不同水层的海带生长开始出现个体差异，接近水面的海带生长较好，这说明水深可以影响海带的生长，与任伟等<sup>[21]</sup>研究一致。传统养殖模式的海带绳处于平挂状态，所有海带所处水深范围为1.20~1.50 m，差别较小，海带个体生长差异也较小。而单绳式养殖模式水深范围跨度较大，其中，A1为0.80~1.95 m，A2为0.80~3.09 m，明显比传统模式的水深范围大。这就导致传统养殖模式下海带比单绳式养殖模式的湿重高，且海带品质较好。因此，水深影响了单绳式模式下处于较深处的海带生长，导致其重量较轻。那么单绳式养殖模式下是否存在一个适宜海带生长的水深范围值得探究。通过对收获时单绳式养殖模式下不同水深的海带湿重进行分析，该养殖模式下海带湿重与水深呈负相关。该模式下在0.8~1.5 m的水层范围内，海带的生长呈现较好的趋势，且A2的养殖效果优于A1。因此，在单绳式5 m苗绳吊挂间距

为 2 m 的养殖模式下,海带的适宜水深生长范围为 0.8~1.5 m。

水越深光照强度越弱,在本研究的整个养殖过程中当实验海域水深在 2 m 以下时,光照强度均小于 10000 lx,大多数时间都低于 5000 lx,这不适于海带生长。随深度的增加,海带个体初级生产力降低,甚至出现生长滞缓;并且,随着海带藻体生长,相互之间遮光加强,也影响其光合作用<sup>[22]</sup>。海带所处水深不同对海带生长造成的差异,归根结底是光照的差异<sup>[23-24]</sup>。本实验研究结果显示,两种养殖模式下,不同水深和光照强度均呈现显著的幂函数负相关关系,在水面表层 2 m 水深间,光照强度的变化幅度最大,对海带的生长影响巨大,尤其是单绳式养殖。在光照强度范围为 14000~22000 lx 的条件下海带生长正常,且不易发病。在适宜范围内,光照强度的增加可以加快海带的光合作用,从而促进海带生长,光照过强或过低都不利于海带生长,光照可直接影响海带的品质<sup>[25]</sup>,本研究也发现处在适宜光照的水层中的海带品质更好。虽然单绳式养殖海区所监测的数据中最适光强占比略高于传统养殖海区,但从养殖中后期的数据发现,单绳式养殖模式的光照强度有较多数据超过 22000 lx,光照强度较高,大幅超过海带生长所需光照,这在一定程度上抑制海带的生长,导致该模式收获时的海带湿重低于传统养殖模式。因此,水深导致的光照强度变化是 2 种养殖模式下海带产生生长差异的重要原因之一。

### 3.2 单绳式养殖模式的可行性分析

本研究中,单绳式养殖模式两种间距(A1 和 A2)所设置的每台筏架上均夹苗 3000 棵左右,其中 A1 每台筏架的平均产量约为 690 kg,而 A2 每台筏架的平均产量约为 900 kg,是 A1 的 1.3 倍;传统养殖模式下每台筏架海带的平均产量约为 1420 kg,约为 A2 的 1.5 倍,传统养殖模式的海带养殖效果优于单绳式养殖模式。但单绳式养殖区单棵海带的最大湿重可达 1729.07 g,与传统养殖的单棵海带最大湿重基本一致。由于传统养殖模式海带受光相对均匀且适宜,水深范围跨度小<sup>[21]</sup>,

所以海带生长较均匀,整个养殖实验期间,B 区海带的特定生长率基本都比 A1、A2 区高;养殖后期水温升高,部分海带出现烂梢现象,加上 A1、A2 水深跨度大也影响了海带生长,这就使传统养殖区的海带平均产量比单绳式养殖区高。

通过分析单绳式养殖模式下不同水深与海带湿重的关系,发现了一个相对对海带生长起促进作用的吊挂间距即 2 m,但仍有优化空间以提升海带产量的可能性。当前海带养殖人工成本占总成本的比例高达 60%~70%<sup>[3]</sup>,致使养殖成本大幅上升。尽管 A2 养殖模式海带产量约是传统养殖的 60%,不及传统养殖,但是该产量仍然有提高空间,同时能够给海带养殖业实现机械化提供模式支撑,以期实现机械化生产,降低劳动成本,从而弥补产量降低对效益的影响,保持总利润不变。此外,传统养殖模式是平养法,更易在适宜的流速下使海带处于漂浮状态,海带的受光面积增加,海带受光更均匀<sup>[25-26]</sup>。所以,无论是采用单绳式养殖模式还是传统养殖模式,都要综合考量养殖海域以及筏架设置、海带吊挂深度的光照情况,保证海带生长所需的光照。那么,未来可以继续探究优化单绳式养殖模式下更适宜的海带养殖吊挂间距,即适当增加该模式的养殖间距,减小该模式下苗绳上的海带生长水层范围,使所有海带所接收的光照相对均匀,提升海带的品质。目前国内已研发出许多采收装置<sup>[27-28]</sup>,在此基础上我们继续探究优化单绳式养殖模式等宜机化模式是推动海带养殖模式创新的重要方向,从而为实现规模化养殖、机械化生产作业奠定技术和模式基础。

**致谢:** 感谢荣成褚岛水产有限公司提供实验场所和海带苗种。

### 参考文献:

- [1] Fishery and Fishery Administration Bureau, Ministry of Agriculture of the People's Republic of China. China Fishery Statistical Yearbook[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2020. [农业农村部渔业渔政管理局, 全国水产技术推广总站, 中国水产学会编制. 中国渔业统计年鉴-2020[M]. 北京: 中国农业出版社, 2020.]
- [2] Zhan D M, Liu S P. Strategic Thinking on the development

- of kelp enhancement industry in Shandong Province [J]. Shandong Fisheries, 2017, 34(5): 45-47. [詹冬梅, 刘升平. 山东省海带增养殖产业发展战略思考[J]. 齐鲁渔业, 2017, 34(5): 45-47.]
- [3] Cao W Y. Spatial-temporal variation and suitability evaluation of kelp culture in Rongcheng[D]. Yantai: Ludong University, 2019. [曹万云. 荣成海带养殖时空变化与适宜性评价研究[D]. 烟台: 鲁东大学, 2019.]
- [4] Liu X H, Ge S S, Xin M L, et al. Investigation and analysis of reason of diseased kelp (*Saccharina japonica*) in Rongcheng, Shandong Province[J]. Chinese Journal of Fisheries, 2023, 36(6): 30-39, 60. [刘晓慧, 盖珊珊, 辛美丽, 等. 山东荣成海带病害原因的初步调查及分析[J]. 水产学杂志, 2023, 36(6): 30-39, 60.]
- [5] Mcpeak, Ronald H. Kelp harvester Kelsol [EB/OL]. (1986-0801) [2017-10-08]. <http://www.alexandria.ucsb.edu/lib/ark:/48907/f3g160g1>.
- [6] Vea J, Ask E. Creating a sustainable commercial harvest of *Laminaria hyperborea*, in Norway[J]. Journal of Applied Phycology, 2011, 23(3): 489-494.
- [7] Chen J H. Study on mechanization of kelp planting and seedling clamping machine[D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2016. [陈建辉. 海带种植机械化与夹苗机研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2016.]
- [8] Chen T. Design and optimization of semi-automatic kelp harvester[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2015. [陈通. 半自动化海带收割机设计与优化[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2015.]
- [9] WANG Y R. Research on the principle of kelp knotting and the design of kelp knotting robot system[J]. Fishery Modernization, 2017, 44(2): 14-19. [王宇锐. 海带打结原理研究及海带打结机器人系统设计[J]. 渔业现代化, 2017, 44(2): 14-19.]
- [10] Gao D X, Chang Z Y, Chen T, et al. A new type of kelp harvesting device: CN104756667B[P]. 2019-04-09. [高大晓, 常宗瑜, 陈通, 等. 一种新型的海带收割装置: CN104756667B[P]. 2019-04-09.]
- [11] Liu F L, Liang Z R, Zhang P Y, et al. Preliminary discussion on the development of *Saccharina japonica* offshore aquaculture in China[J]. Progress in Fishery Sciences, 2019, 40(1): 161-166. [刘福利, 梁洲瑞, 张朋艳, 等. 中国海带养殖向离岸深水区发展的初步探讨[J]. 渔业科学进展, 2019, 40(1): 161-166.]
- [12] Fang J H, Jiang Z J, Lin F, et al. Analysis on the advantages of standard kelp long line culture in sanggou bay[J]. Progress in Fishery Sciences, 2020, 41(5): 134-140. [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[J]. 渔业科学进展, 2020, 41(5): 134-140.]
- [13] Fang J H, He W, Mao Y Z, et al. A comparison of nutrients in kelp cultured in standardized and traditional long-line modes in sanggou bay[J]. Progress in Fishery Sciences, 2021, 42(2): 170-175. [房景辉, 何为, 毛玉泽, 等. 桑沟湾标准化与传统养殖模式海带的营养成分比较[J]. 渔业科学进展, 2021, 42(2): 170-175.]
- [14] Hargrave M S, Nylund G M, Enge S, et al. Co-cultivation with blue mussels increases yield and biomass quality of kelp[J]. Aquaculture, 2022, 550: 737832.
- [15] Cai B Y, Zhu C B, Liu H, et al. Model simulated growth of kelp *Saccharina japonica* in sanggou bay[J]. Progress in Fishery Sciences, 2019, 40(3): 31-41. [蔡碧莹, 朱长波, 刘慧, 等. 桑沟湾养殖海带生长的模型预测[J]. 渔业科学进展, 2019, 40(3): 31-41.]
- [16] Zhu M Y, Wu R J, Li R X, et al. The impacts of temperature on growth and photosynthesis of *Laminaria japonica* juvenile sporophytes[J]. Acta Ecologica Sinica, 2004, 24(1): 22-27. [朱明远, 吴荣军, 李瑞香, 等. 温度对海带幼孢子体生长和光合作用的影响[J]. 生态学报, 2004, 24(1): 22-27.]
- [17] Yan L D. Effects of clamping density on the growth of *Saccharina japonica* in raft culture: A case study in Ailian Bay[D]. Yantai: Yantai University, 2021. [闫令东. 筏式养殖夹苗密度对海带生长的影响——以荣成爱莲湾海带养殖为例[D]. 烟台: 烟台大学, 2021.]
- [18] Sun B B, Han L J, Pan Y L, et al. Effects of temperature stress on growth of kelp sporophyte[J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2018(20): 177-178, 183. [孙蓓蓓, 韩龙江, 潘玉龙, 等. 温度胁迫对海带孢子体生长的影响[J]. 现代农业科技, 2018(20): 177-178, 183.]
- [19] Wu H Y, Wang X Y, Zhu A C. Analysis of component changes of *Saccharina japonica* at mushroom-adult stage[J]. Marine Sciences, 2015, 39(8): 35-38. [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[J]. 海洋科学, 2015, 39(8): 35-38.]
- [20] Wang Y C, Fan R F, Nie H T, et al. Analysis on tidal current characteristics during different kelp growing seasons in sanggou bay, China[J]. Advances in Marine Science, 2021, 39(4): 508-518. [王一聪, 凡仁福, 聂红涛, 等. 不同海带生长季的桑沟湾潮流特征变化分析[J]. 海洋科学进展, 2021, 39(4): 508-518.]



- [21] Ren W, Yuan Z T, Liu S P. The correlation analysis of individual productivity and clip seedlings position of *Laminaria japonica* on raft culture[J]. Marine Sciences, 2012, 36(9): 122-127. [任伟, 袁著涛, 刘升平. 浮筏式养殖中海带个体生产力与夹苗位置之间的相关性分析[J]. 海洋科学, 2012, 36(9): 122-127.]
- [22] Wu R J, Zhu M Y, Li R X, et al. Nitrogen requirement of growth and photosynthesis in the juvenile sporophyte of *Laminaria japonica*[J]. Marine Science Bulletin, 2006, 25(5): 36-42. [吴荣军, 朱明远, 李瑞香, 等. 海带(*Laminaria japonica*)幼孢子体生长和光合作用的N需求[J]. 海洋通报, 2006, 25(5): 36-42.]
- [23] Aguilera J, Francisco J, Gordillo L, et al. Light quality effect on photosynthesis and efficiency of carbon assimilation in the red *Alga porphyra leucosticta*[J]. Journal of Plant Physiology, 2000, 157(1): 86-92.
- [24] Niu J F, Feng Z Z, Sun Z J, et al. Effects of strong light stress on photosynthesis and physiology of *Saccharina japonica* seedlings[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2023, 54(1): 160-172. [牛建峰, 冯泽中, 孙振杰, 等. 不同强度光强胁迫对海带(*Saccharina japonica*)幼苗光合生理的影响[J]. 海洋与湖沼, 2023, 54(1): 160-172.]
- [25] Cheng X P, Zhang S Y, Lin J, et al. Response of photosynthetic activity to different temperature and light intensities in *Saccharina japonica* sporophyte[J]. Journal of Fisheries of China, 2020, 44(2): 234-244. [程晓鹏, 章守宇, 林军, 等. 海带孢子体光合活性对不同温度和光照的响应[J]. 水产学报, 2020, 44(2): 234-244.]
- [26] Duan D L, Miao G R, Wang X L. Aquacultural Biology of *Saccharina japonica*[M]. Beijing: Science Press, 2015. [段德麟, 缪国荣, 王秀良, 等. 海带养殖生物学[M]. 北京: 科学出版社, 2015.]
- [27] Chang Z Y, Zhang Y, Zheng Z Q, et al. Development status of the raft-cultivation harvesting devices for kelp[J]. Fishery Modernization, 2018, 45(1): 40-48. [常宗瑜, 张扬, 郑中强, 等. 筏式养殖海带收获装置的发展现状[J]. 渔业现代化, 2018, 45(1): 40-48.]
- [28] Jiang T, Hong Y, Lu L F, et al. Design and experiment of a new mode of mechanized harvesting of raft cultured kelp[J]. Aquacultural Engineering, 2022, 99: 102289.

## Preliminary study on the single rope aquaculture mode of *Saccharina japonica* in the Sanggou Bay

YAN Jin<sup>1,2</sup>, FANG Jinghui<sup>1,2</sup>, WANG Renjie<sup>3</sup>, WANG Wenjun<sup>2</sup>

1. College of Fisheries and Life Science, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;
2. National Key Laboratory of Marine Aquaculture Breeding and Sustainable Production, Yellow Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Qingdao 266071, China;
3. Rongcheng Marine Economic Development Center, Weihai 264300, China

**Abstract:** Kelp (*Saccharina japonica*) is one of the main seaweed aquaculture species in China and is crucial for environmental carbon sequestration and the development of the marine economy. However, longline aquaculture technology of kelp has been used for many years and there are many problems in the kelp aquaculture industry. Owing to the lack of mechanization modes, such as high labor costs and low profits, the mechanization of production operations is difficult. Rongcheng, in Shandong Province, is a prominent kelp aquaculture area. In the present study, longline aquaculture of kelp was the experimental object in the Sanggou Bay, Rongcheng, and a preliminary study on the mechanization of kelp aquaculture was conducted. There were two different single-rope aquaculture modes with kelp-seeding rope hanging spaces of 1 m and 2 m (A1 and A2) in the Sanggou Bay; the traditional aquaculture mode (zone B) was used as the control. By analyzing the differences in kelp growth under different aquaculture modes and the relationship between light intensity, water depth, and kelp growth in the single-rope aquaculture mode, we explored the optimal hanging space for kelp growth under this mode, which will provide important references for the mechanization and sustainability of kelp aquaculture. The results showed that the specific growth rate of kelp in the traditional aquaculture mode was higher than that in the single-rope aquaculture mode during the aquaculture period. The kelp in the upper layers of A1 and A2 grew well, with an average wet weight of 1005.35 g in the upper layer of A2, whereas the average wet weight of kelp in the traditional mode was 1254.09 g which was approximately 1.25 times of A2. The experiment lasted until the kelp was harvested. The temperature in the kelp aquaculture area was within the suitable range for the growth of kelp. Light intensity in zone A was mostly higher than that in zone B, which effected the growth of kelp to a certain extent, resulting in a lower wet weight of the kelp harvested in zone A compared to the traditional aquaculture mode. By analyzing the relationship between light intensity and water depth and the experimental results, it was found that insufficient light intensity in the lower layers of A1 and A2 led to poor growth of kelp, compared with those in the upper and middle layers. In this study, the average yield of A1 raft frame was about 690 kg whereas that of A2 raft frame was about 900 kg, which was 1.3 times that of A1; the average yield per raft under the traditional aquaculture mode was about 1420 kg, which was about 1.5 times that of A2. However, the maximum wet weight of a single kelp in the single rope aquaculture area could reach 1729.07 g, which is consistent with the maximum wet weight of a single kelp in traditional aquaculture. Although the yield of kelp in the single-rope aquaculture mode was not as high as that in the traditional aquaculture mode, the labor cost of the longline aquaculture mode was significantly reduced, which could compensate for the reduced yield. It is necessary to maintain a balance between kelp growth and improvement of comprehensive efficiency in aquaculture production. Therefore, by appropriately increasing the hanging spacing and reducing the water layer of the range, thereby allowing all kelp to receive uniform light intensity, the quality of kelp can be improved, technical support for kelp aquaculture can be provided, and the foundation for the realization of mechanized production operations for kelp aquaculture can be laid.

**Key words:** *Saccharina japonica*; aquaculture mode; single hanging rope; mechanization; growth

**Corresponding author:** FANG Jinghui. E-mail: hui861@163.com