

DOI: 10.19663/j.issn2095-9869.20190625001

http://www.yykxjz.cn/

房景辉, 蒋增杰, 蔺凡, 高亚平, 方建光, 张鹏, 郭智俐, 杜美荣, 孟珊. 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 JH, Jiang ZJ, Lin F, Gao YP, Fang JG, Zhang P, Guo ZL, Du MR, Meng S. Analysis on the advantages of standard kelp long line culture in Sanggou Bay. Progress in Fishery Sciences, 2020, 41(5): 134–140

桑沟湾海带标准化养殖模式的优势探析*

房景辉^{1①} 蒋增杰¹ 蔺凡¹ 高亚平¹ 方建光¹
张鹏² 郭智俐² 杜美荣¹ 孟珊^{1,3}

- (1. 中国水产科学研究院黄海水产研究所 农业农村部海洋渔业可持续发展重点实验室 青岛海洋科学与技术试点国家实验室海洋渔业科学与食物产出过程功能实验室 青岛 266071; 2. 山东大学(威海)海洋学院 威海 264209; 3. 上海海洋大学水产与生命学院 上海 201306)

摘要 针对桑沟湾养殖海区海带(*Laminaria japonica*)的超容量养殖现象,研究了该海区中标准化养殖模式和传统养殖模式的海带生长差异。结果显示,在标准化养殖模式下,海带长、宽、平均厚度、湿重、投影面积和特定生长率均高于传统养殖模式,单棵海带重量显著提高,且海带的碳、氮和蛋白质含量明显高于传统养殖模式,海带品质大大提升。养殖后期,标准化养殖海区养殖海带垂直投影面积之和与对应养殖海区面积之比为 6.33,而传统养殖模式的比值为 9.15;标准化养殖海区海带所处水层下方的光照强度显著高于传统养殖区,海带所处水层的海流流速也高于传统养殖区。研究表明,桑沟湾海带标准化养殖模式使海带养殖密度降低,海带生长速度和品质均得以提高;在标准化养殖模式下,海带重叠较小,接受的光照比传统养殖模式充足;较快的海流使标准化养殖海区营养盐更新速度更快,这两方面可能是导致 2 种养殖模式下海带生长和品质产生差异的原因。

关键词 海带; 标准化养殖; 养殖容量; 生长; 桑沟湾

中图分类号 S917.3 文献标识码 A 文章编号 2095-9869(2020)05-0016-07

桑沟湾位于山东半岛东部,平均水深约 8 m,总面积约为 13333 hm²,是我国著名的水产养殖海湾,也是我国重要的海带(*Laminaria japonica*)养殖海域。自 20 世纪 60 年代末开始,桑沟湾便开始进行海带养殖,随后贻贝、扇贝和牡蛎养殖业发展起来,与海带养殖业一同成为桑沟湾水产养殖的主要养殖产业,但海带养殖仍处于主体地位(方建光等,1996)。多年来,

为满足国内外的市场需求,该海湾筏式养殖面积不断扩大,养殖范围已扩展到湾外 20 m 水深处,同时,养殖密度居高不下。由于海湾半封闭的特点,大面积筏式养殖限制了水流交换,水交换速率下降(何宇晴等,2016),湾内营养盐结构已经发生改变,磷成为海带生长的限制性营养盐(刘慧,2002;李瑞环,2014;徐东会等,2017)。

* 十三五“蓝色粮仓科技创新”国家重点研发计划项目(2019YFD0900803)、国家自然科学基金面上项目(41876185)、国家贝类产业技术体系养殖容量评估与管理岗位(CARS-49)和科技部政府间国际科技创新合作重点专项(2017YFE0118300)共同资助 [This work was supported by National Key R&D Program of China (2019YFD0900803), General Program of National Natural Science Foundation of China (41876185), Capacity Evaluation and Management Post of National Shellfish Industry Technology System (CARS-49), and Key Project of International Science and Technology Innovation Cooperation Among Governments of the Ministry of Science and Technology (2017YFE0118300)].

①通讯作者: 房景辉, 副研究员, E-mail: hui861@163.com

收稿日期: 2019-06-25, 收修改稿日期: 2019-07-13

海洋科学中应用容纳量的概念始于 20 世纪 30 年代, 养殖容量是容纳量概念应用于水产养殖业的一个生态学特例(唐启升, 1996), 为单位水体内在保护环境、节约资源和保证应有效益各方面都符合可持续发展基本要求的最大养殖量(方建光等, 1996; 董双林等, 1998)。20 世纪 90 年代中期, 方建光等(1996)评估了桑沟湾海带养殖容量, 显示湾内海带单位养殖量已经超过理论养殖量。而当前该湾海带的养殖规模已远远超过当时, 超容量养殖现象加剧(史洁, 2009), 导致海带养殖问题频发、劳动力成本高、综合经济效益低、产品质量差, 不利于该湾海带养殖业的可持续发展。

桑沟湾海带的传统养殖模式主要根据养殖从业者的经验确定, 已沿用多年。该模式筏架间距较小, 海带养殖密度较大, 参数设置不能根据桑沟湾环境条件的变化做出改变。针对桑沟湾海带养殖存在的问题, 本课题组构建了海带筏式养殖标准化模式与技术看方案。经过 2015~2016、2016~2017 年的养殖示范, 养殖效果突出, 大大降低了海带养殖的劳动力、物资成本, 产品品质显著提高, 经济效益显著。在桑沟湾超容量养殖海区进行海带养殖, 标准化与传统养殖方式相比效果迥异, 针对这一现象, 课题组在 2017~2018 年再次实施标准化养殖示范, 建立标准化养殖示范区, 以毗邻的传统养殖区为对照, 比较养殖周期内 2 种养殖方式海带的生长情况; 通过测定海带的投影面积、海带所处深度的光照强度、养殖区海流流速等指标, 分析 2 种不同养殖模式条件下海带生长差异的原因, 初步探究超容量养殖条件下的海带生长差异机制, 为海带筏式养殖提供技术支撑和参考资料。

1 材料与方 法

1.1 实验海域与筏架布局

实验海域选择在桑沟湾南侧的东楮岛养殖海域, 标准化养殖区 40 hm², 对照养殖海区 40 hm², 2 个养殖区相距约 50 m。

将筏架间距由传统养殖方式的 4.7 m 增大到 5.3 m; 改变了浮漂颜色并增大了浮漂规格, 将原来的黑色 28 cm 直径的浮漂改为橘红色直径为 30 cm 的浮漂, 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; 标准化养殖模式海带绳间距约 1.15 m, 传统养殖模式海带绳间距约为 0.85 m; 每条长度约 100 m 的筏架, 标准化养殖模式海带绳约 87 绳, 传统养殖模式海带绳数量约 115 绳; 标准化养殖模式海带每绳 32 棵, 传统养殖模式每绳海带 35 棵。通过计算, 标准化养殖模式

海带的密度降低为传统养殖方式的 62.9%。

1.2 实验设计

传统养殖区与标准化养殖区的海带样品, 从挂苗到收获共采集 5 次, 分别为 2017 年 12 月 20 日、2018 年 1 月 19 日、2018 年 3 月 2 日、2018 年 4 月 12 日和 2018 年 4 月 26 日, 分别在传统和标准化海带养殖区内随机选取采样点, 从海带苗绳靠绳一端向内连续采集 8~10 棵。现场测量并记录长、宽、湿重、垂直投影面积等。第 1、2 次取样由于海带较小, 整棵带回实验室冷冻保存、分析; 实验后期, 因为海带较大, 每棵海带从假根部往上分下、中、上 3 段等重取样合计 300~500 g, 带回实验室冷冻保存、分析。

海带养殖后期, 于 2018 年 2 月 10 日~4 月 12 日, 在传统养殖区与标准化养殖区中心位置各悬挂自容式温度照度计(HOBO, UA-002-64, 美国)3 台, 悬挂于海带苗绳靠绳一端下方 70 cm 深处, 设置每 15 min 记录 1 次光照强度, 用于测定透过海带养殖水层的光照强度。海带养殖后期(2018 年 4 月 12 日~5 月 9 日), 在 2 个养殖海区各投放 1 台 ADCP(Nortek, Aquadopp Profiler 1 MHz, 挪威)测定养殖区剖面海流, 测定 1 个潮周期。

1.3 样品分析与测定

1.3.1 海带垂直投影面积测定 本研究建立了海带垂直投影面积计算方法, 将每棵海带样品平铺于 1.5 m×1.5 m 的白板上, 用相机在白板中心上方约 2.5 m 处垂直向下拍照, 使用 Adobe Photoshop CS6 软件进行图片分析, 计算海带的垂直投影面积。

1.3.2 海带含水率与碳、氮含量测定 在 70℃ 条件下, 使用电热鼓风干燥箱将海带样品烘干至恒重, 使用电子天平称量干重。使用研磨机将海带研磨成粉末, 密封保存, 并使用元素分析仪(Elementer Vario EL III)分析其碳、氮含量。

1.4 数据处理与分析

1.4.1 特定生长率 本实验分 5 个阶段计算海带特定生长率(Specific growth rate, SGR, %/d), 2017 年 12 月 20 日~2018 年 1 月 19 日、2018 年 1 月 19 日~3 月 2 日、2018 年 3 月 2 日~4 月 12 日、2018 年 4 月 12 日~26 日和 2017 年 12 月 20 日~2018 年 4 月 26 日的 SGR 分别记为 SGR_A、SGR_B、SGR_C、SGR_D、SGR_T。特定生长率计算如下:

$$SGR(\%/d) = \frac{\ln W_f - \ln W_i}{d} \times 100\% \quad (1)$$

式中, W_f 为阶段海带末重(g), W_i 为阶段海带初重(g), d 为阶段养殖天数。

1.4.2 单位面积内海带垂直投影面积与养殖海区面积比(P)

$$P = \frac{\text{海带垂直投影总面积}}{\text{养殖海区面积}} \quad (2)$$

1.4.3 海带平均厚度 定义海带体积与海带垂直投影面积的比为海带平均厚度:

$$D = \frac{m/\rho}{S} \quad (3)$$

式中, D 为海带厚度(cm), m 为海带湿重(g), 以排水法测定的 ρ 为海带密度(g/cm³), S 为海带垂直投影面积(cm²)。标准化养殖海带厚度与传统养殖海带厚度差异百分比(R)为:

$$R = \frac{D_{\text{标准化}} - D_{\text{传统}}}{D_{\text{传统}}} \times 100\% \quad (4)$$

式中, R 为海带厚度差异百分比(%), $D_{\text{标准化}}$ 为标准化养殖模式下的海带厚度(cm), $D_{\text{传统}}$ 为传统养殖模式下的海带厚度(cm)。

1.4.4 数据统计与分析 使用 Excel 2010 软件对海带垂直投影面积与湿重关系进行曲线拟合, 将 2018 年 2 月 8 日~4 月 11 日标准化养殖区与传统养殖区每天的光照强度进行累计, 分别对 3 个测量点的日累计光照强度取均值做折线图进行比较。使用 SPSS 进行统计分析, 其中, 标准化养殖模式与传统养殖模式海

带长、宽、湿重、投影面积、含水率、碳含量、氮含量、光照强度差异使用独立样本 T 检验进行差异显著性分析; 海带垂直投影面积与湿重关系使用回归分析进行曲线估计。

2 结果

2.1 特定生长率

从整个过程来看, 与传统养殖模式的海带相比, 标准化养殖模式海带的生长指标多数较高(表 1)。至 2018 年 4 月 12 日, 标准化与传统养殖模式下海带的长、宽和湿重均差异显著($P < 0.05$), 至 2018 年 4 月 26 日, 虽然 2 种养殖模式海带生长差异减小, 但标准化养殖海带的各项生长指标仍大于传统养殖模式。

标准化养殖模式下的 SGR_A 和 SGR_C 高于传统养殖模式, 传统养殖模式下的 SGR_B 和 SGR_D 高于标准化养殖模式。从整个养殖周期来看, 标准化养殖模式的 SGR_T 略高于传统养殖模式(表 2)。

2.2 垂直投影面积

2 种养殖模式的海带垂直投影面积变化趋势与生长指标相似, 到 2018 年 4 月 12 日, 标准化与传统养殖模式下的垂直投影面积差异显著($P < 0.05$), 实验结束时, 标准化养殖模式的海带垂直投影面积仍然较大(表 1)。

表 1 标准化与传统养殖模式下海带长、宽、湿重和垂直投影面积(平均值±标准差)

Tab.1 Length, width, wet weight, vertical projection area of kelp under standard and traditional long line culture (Mean±SD)

时间 Date Year-Month-Day	筏式养殖模式 Long line culture mode	长 Length (cm)	宽 Width (cm)	湿重 Wet weight (g)	垂直投影面积 Vertical projection area (cm ²)
2017-12-20	初始值 Initial	43±14	7±2	8±5	115±87
2018-01-09	标准化 Standard	211±20 ^b	35±8 ^b	352±124 ^b	3867±1105 ^b
	传统 Traditional	186±49 ^a	31±6 ^a	282±167 ^a	3134±1809 ^a
2018-03-02	标准化 Standard	264±25 ^a	43±6 ^b	693±157 ^a	6560±1285 ^a
	传统 Traditional	289±50 ^b	41±2 ^a	709±172 ^b	7026±1601 ^b
2018-04-12	标准化 Standard	363±59 ^b	43±6 ^b	1520±339 ^b	12018±2706 ^b
	传统 Traditional	274±60 ^a	38±5 ^a	916±259 ^a	7284±1941 ^a
2018-04-26	标准化 Standard	348±31	44±5	1592±300	12054±2011
	传统 Traditional	313±60	45±6	1388±416	10678±2905

注: 不同字母表示相同时间标准化养殖模式与传统养殖模式的相应指标存在显著性差异($P < 0.05$)。下同

Note: Data with different letters were significantly different between standard and traditional modes at the same time ($P < 0.05$). The same as below

在标准化和传统养殖模式下, 海带垂直投影面积与湿重均呈现显著的线性关系(标准化: $R^2=0.95$, $P < 0.01$; 传统: $R^2=0.95$, $P < 0.01$; 图 1)。由公式(2)可得, 至 2018 年 4 月 26 日, 传统养殖模式下单位养

殖面积内海带垂直投影总面积是养殖海区面积的 9.15 倍, 标准化养殖模式下的海带投影总面积是养殖海区面积的 6.33 倍, 传统养殖模式下的海带垂直投影总面积显著高于标准化养殖模式($P < 0.05$)。

表 2 标准化和传统养殖模式不同生长阶段海带的特定生长率(%/d)

Tab.2 Comparison of specific growth rate (SGR, %/d) of kelp at different stages between standard and traditional long line culture

筏式养殖模式 Long line culture mode	SGR _A	SGR _B	SGR _C	SGR _D	SGR _T
标准化 Standard	12.83	1.61	1.92	0.30	4.22
传统 Traditional	12.10	2.19	0.60	2.97	4.11

注: 表中 SGR_T 为 2017 年 12 月 20 日~2018 年 4 月 26 日期间(整个实验期)的特定生长率。SGR_A 为 2017 年 12 月 20 日~2018 年 1 月 19 日期间的特定生长率, SGR_B 为 2018 年 1 月 19 日~3 月 2 日期间的特定生长率, SGR_C 为 2018 年 3 月 2 日~4 月 12 日期间的特定生长率, SGR_D 为 2018 年 4 月 12 日~26 日期间的特定生长率

Note: SGR_T stands for the specific growth rate (SGR) of 2017.12.20~2018.4.26. SGR_A stands for the SGR of 2017.12.20~2018.1.19. SGR_B stands for the SGR of 2018.1.19~3.2. SGR_C stands for the SGR of 2018.3.2~4.12. SGR_D stands for the SGR of 2018.4.12~26

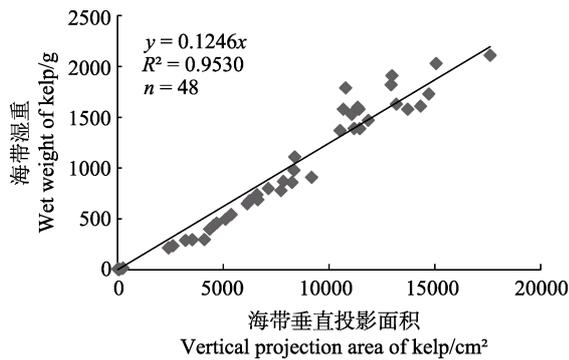


图 1 标准化养殖模式下的海带湿重与垂直投影面积的线性回归关系

Fig.1 Relationship between wet weight and vertical projection area of kelp in standard long line culture

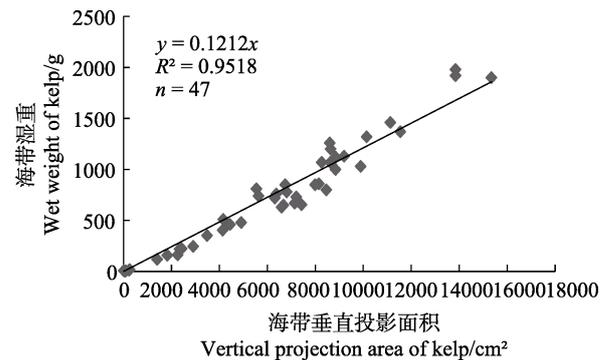


图 2 传统养殖模式下的海带湿重与垂直投影面积的线性回归关系

Fig.2 Relationship between wet weight and vertical projection area of kelp in traditional long line culture

2.3 藻体成分组成

2.3.1 水分 2018 年 1 月 19 日和 3 月 2 日, 标准化养殖模式下的海带含水率分别为 91.9%和 89.1%, 传统养殖模式下分别为 93.3%和 90.4%; 2018 年 4 月 12 日和 4 月 26 日, 标准化养殖模式下的海带含水率分别为 89.6%和 89.6%, 传统养殖模式下分别为 89.3%和 88.5%。养殖前期, 传统养殖模式的海带含水率略高, 而养殖后期, 标准化养殖模式的海带含水率略高, 但不同时期 2 种模式养殖海带的含水率差异均不显著 ($P>0.05$)。

2.3.2 碳、氮和蛋白质含量 从表 3 可以看出, 2018 年 3 月 2 日标准化养殖模式海带氮和蛋白质含量略低于传统养殖模式, 其他采样时间, 标准化养殖模式海带的氮和蛋白质含量均略高于传统养殖模式, 至 4 月 26 日, 标准化养殖模式海带的氮和蛋白质含量比传统养殖模式高 16.1% ($P<0.05$)。

2.4 光照强度

在 2 个养殖海区的 3 个照度计监测的约 12000 个光照强度数据中, 标准化养殖海区有 354 个数据超过 8000 lx, 211 个数据超过 10000 lx, 105 个数据超过

表 3 标准化和传统养殖模式不同生长阶段海带的碳、氮和蛋白质含量(%)(平均值±标准差)

Tab.3 Carbon, nitrogen and protein contents in kelp at different stages under standard and traditional long line culture (%) (Mean±SD)

筏式养殖模式 Long line culture mode	成分 Composition	日期 Date				
		2017-12-20	2018-01-19	2018-03-02	2018-04-12	2018-04-26
标准化 Standard	碳 Carbon	20.73±1.85	22.82±3.55	25.21±1.75	21.67±2.42	23.98±2.76
	氮 Nitrogen	2.21±0.30	2.11±0.33 ^b	1.36±0.18 ^a	1.10±0.17	0.98±0.09 ^b
	蛋白质 Protein	13.80±1.90	13.19±2.08 ^b	8.49±1.09 ^a	6.88±1.04	6.14±0.56 ^b
传统 Traditional	碳 Carbon	20.73±1.85	21.22±2.49	24.67±1.71	21.35±1.99	25.90±2.02
	氮 Nitrogen	2.21±0.30	1.78±0.26 ^a	1.61±0.12 ^b	0.97±0.20	0.85±0.12 ^a
	蛋白质 Protein	13.80±1.90	11.13±1.60 ^a	10.06±0.75 ^b	6.04±1.23	5.29±0.77 ^a

12000 lx, 55 个数据超过 14000 lx, 只有 1 个数据超过 22000 lx; 而在传统养殖海区仅有 5 个数据超过 8000 lx, 1 个数据超过 14000 lx。从图 3 可以看出, 标准化养殖海区日累计光照强度明显大于传统养殖模式。在整个监测时段内, 标准化养殖海区 3 个照度计平均日累计光照强度总和为 4422370 lx, 传统养殖海区 3 个照度计平均日累计光照强度总和仅为 2146402 lx, 相差 1 倍以上。

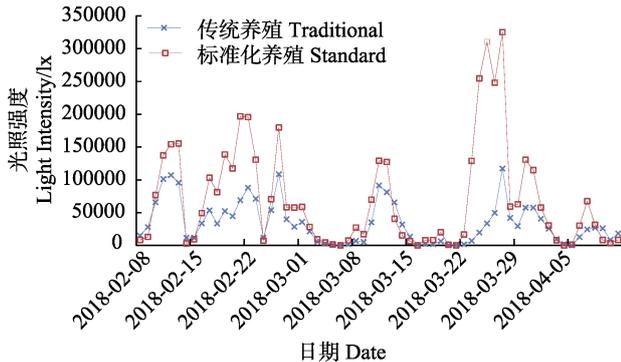


图3 标准化与传统养殖模式日累计光照强度
Fig.3 Sum of light intensity between the standard and traditional long line culture

2.5 海流流速

原计划测定 2 个养殖海区同一潮周期的海流流速, 由于仪器故障所获数据仅能比较大潮期 4 d (4 月 26~29 日) 的海流流速。结果显示, 标准化养殖海区海带所处水层海流平均流速为 13.8 cm/s, 而传统养殖海区为 11.5 cm/s, 标准化养殖海区比传统养殖海区快 20.0% (图 4)。从图 5 可以看出, 传统养殖海区海流流速多处于 0.4 m/s 以内, 而标准化养殖海区海流流速在 0.2~0.6 m/s 范围内, 出现频率明显高于传统养殖海区。

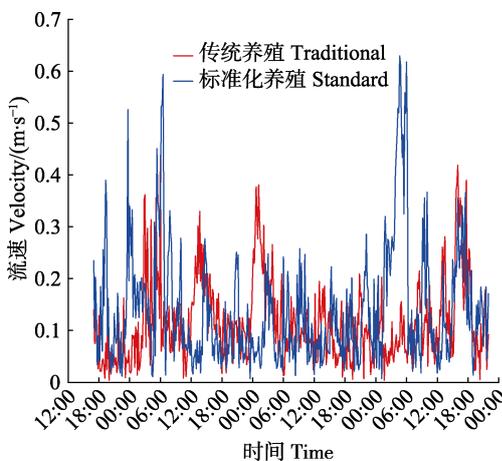


图4 不同养殖模式海带所处水层的海流流速
Fig.4 The currents in the water layer where the kelp located in the long line culture areas

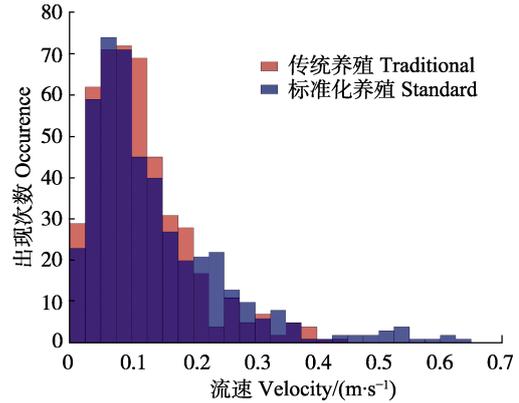


图5 不同养殖模式海带所处水层的海流流速分布
Fig.5 The currents distribution in the water layer where the kelp located in the long line culture areas

3 讨论

3.1 不同养殖模式海带生长差异原因分析

研究表明, 影响海带生长的因素较多, 诸多因素中温度、光照、营养盐、海流流速等与海带的生长关系尤为密切(吴荣军等, 2009)。海带生长最适温度为 10℃~20℃, 温度低于 10℃或高于 20℃时, 海带生长滞缓(张起信, 1994)。桑沟湾湾口温度低于湾内温度, 春季表层平均水温为 14.76℃, 夏季为 24.02℃, 秋季为 17.90℃, 冬季为 5.61℃(刘慧, 2002), 秋、冬和春季是海带生长的主要时期, 除冬季水温偏低外, 其余时段均处于海带的生长期, 且温度的差异不是影响海带产量的决定性因素(李爱杰等, 1986)。为减少温度差异对研究结果的影响, 本研究标准化养殖海区与传统养殖海区相邻约 50 m, 2 个区域海带所处水层的温度无显著差异。因此, 温度不是导致本研究 2 种养殖模式海带产生生长差异的原因。

光照强度可影响海带的生长, 处于厚成期、成熟期、衰老期的海带光照强度控制在 14000~22000 lx 之间最为适宜(张起信, 1994), 特别是在厚成期, 海带对光照的需求较大。但是, 过高的光照强度也会对大型藻类生长产生胁迫作用, 造成生长减缓(张清芳等, 2017; 梁洲瑞等, 2011)。本研究中, 在养殖中后期, 经 2 个多月光照强度监测发现, 海带养殖水层光照强度极少超过 22000 lx, 不存在强光胁迫的问题。而光照强度不足却是传统养殖模式存在的明显问题, 该模式中海带所处水层的光照强度很少超过 8000 lx。经过对海带垂直投影面积测算, 海带垂直投影总面积与筏架面积的比例越大, 说明海带重叠面积越大, 海带相互遮挡阳光越严重。本研究光照强度测量数据显示, 标准化养殖模式下的海带所处水层的光照强度远

远高于传统养殖模式,且从 2 种养殖模式下总投影面积与筏架总面积的比例关系对比中可知,传统养殖与标准化养殖中海带接受光照强度的差异是导致其生长出现显著差异的重要因素。

以 N、P、Si、Fe、Mn 为重要限制元素的营养盐是限制海带生长的重要因素(刘慧, 2002),充足的营养盐等生源要素是保障大型藻类生长的必要条件,在营养盐限制的条件下,其更新速度或者说海流流速可能会对海带生长产生重要影响(张定民等, 1986)。从海流数据可以看出, 2 种养殖模式的养殖海带所处水层海流流速存在明显差异,传统养殖区营养盐更新要比标准化养殖区慢。另外,海流流速决定了海带在水层中所处的位置及方向,较快的流速可以使海带处于较浅水层,并处于平铺状态,能够较好地接受光照。本研究结果与张定民等(1986)的研究结果相似,该研究发现,海流流速 53 cm/s(监测点的最大流速)是海带生长的最佳流速,当流速小于 53 cm/s 时,海带生长速度随着流速减小而降低。本研究中,标准化养殖海区海带所处水层最大海流流速均在 65 cm/s 以内,而传统养殖模式海区海带所处水层最大海流流速均在 45 cm/s 以内。因此,不同养殖模式海带所处水层的海流流速差异也是造成海带生长差别的重要因素。

3.2 标准化海带养殖模式优势分析

本研究通过测量对比筏式养殖海带标准化养殖模式与传统养殖模式生长参数(长、宽、平均厚度、湿重等)发现,标准化养殖模式的海带特定生长率略高于传统养殖模式,实验结束时,标准化养殖海区海带规格显著高于传统养殖模式海区,且从含水率可以看出,实验结束时,标准化养殖模式海带成熟度不如传统养殖模式,前者具有更长的生长期,收获时的规格更大。从碳、氮组成来看,标准化养殖模式下的海带碳、氮元素的含量均高于传统养殖模式,说明标准化养殖模式下的海带蛋白质含量显著提高,海带品质提高。因此,与常规养殖方式相比,标准化养殖区海带的养殖密度降低了 30%以上,单位养殖海区耗费的养殖物资显著降低,同时,降低了劳动力投入和成本;养殖的海带产品品质显著提高,干海带产品价格要比传统养殖模式下的干海带平均价格高,综合以上因素,标准化养殖模式所带来的综合经济效益显著提高。

参 考 文 献

- Dong SL, Li DS, Pan KH. On the carrying capacity of mariculture. *Journal of Ocean University of Qingdao (Natural Science)*, 1998, 28(2): 86-91 [董双林, 李德尚, 潘克厚. 论海水养殖的养殖容量. 青岛海洋大学学报(自然科学版), 1998, 28(2): 86-91]
- Fang JG, Sun HL, Kuang SH, *et al.* Assessing the carrying capacity of Sanggou Bay for culture of kelp *Laminaria japonica*. *Marine Fisheries Research*, 1996, 17(2): 7-17 [方建光, 孙慧玲, 匡世焕, 等. 桑沟湾海带养殖容量的研究. 海洋水产研究, 1996, 17(2): 7-17]
- Fang JG, Sun HL, Kuang SH, *et al.* Mariculture status and optimizing measurements for the culture of scallop *Chlamys farreri* and kelp *Laminaria japonica* in Sanggou Bay. *Marine Fisheries Research*, 1996, 17(2): 95-102 [方建光, 孙慧玲, 匡世焕, 等. 桑沟湾海水养殖现状评估及优化措施. 海洋水产研究, 1996, 17(2): 95-102]
- He YQ, Huang DJ, Zeng DY, *et al.* Effect of suspended kelp culture on vertical structure of tidal current in Sanggou Bay, China. *Journal of Marine Science*, 2016, 34(4): 20-27 [何宇晴, 黄大吉, 曾定勇, 等. 桑沟湾筏式海带养殖对潮流垂直结构的影响. 海洋学研究, 2016, 34(4): 20-27]
- Li AJ, Sun ST. Studies on the seasonal variations in some chemical components and the catalase activity of *Laminaria japonica* aresch. *Journal of Fisheries of China*, 1986(4): 128-133 [李爱杰, 孙守田. 海带若干化学成分及过氧化氢酶活力的季节变化的研究. 水产学报, 1986(4): 128-133]
- Li RH. Nutrient dynamics under the impact of eco-aquaculture - A case study in Sanggou Bay. Master's Thesis of Ocean University of China, 2014 [李瑞环. 生态养殖活动下营养盐动力学研究—以桑沟湾为例. 中国海洋大学硕士研究生学位论文, 2014]
- Liang ZR, Wang FJ, Sun XT, *et al.* Effects of light intensity, temperature and salinity on newborn branches of *Sargassum thunbergii* evaluated with chlorophyll fluorescence assay. *Marine Sciences*, 2011, 35(12): 21-27 [梁洲瑞, 王飞久, 孙修涛, 等. 利用叶绿素荧光技术揭示光照、温度和盐度对鼠尾藻嫩芽的影响. 海洋科学, 2011, 35(12): 21-27]
- Liu H. Studies on limiting nutrients of Laizhou Bay and Sanggou Bay. Master's Thesis of Ocean University of China, 2002 [刘慧. 莱州湾和桑沟湾限制性营养盐的研究. 中国海洋大学硕士研究生学位论文, 2002]
- Shi J. Numerical study on the influences of physical processes on the aquaculture carrying capacity in a semi-enclosed bay. Master's Thesis of Ocean University of China, 2009 [史洁. 物理过程对半封闭海湾养殖容量影响的数值研究. 中国海洋大学硕士研究生学位论文, 2009]
- Tang QS. On the carrying capacity and its study. *Marine Fisheries Research*, 1996, 17(2): 1-6 [唐启升. 关于容纳量及其研究. 海洋水产研究, 1996, 17(2): 1-6]
- Wu RJ, Zhang XL, Zhu MY, *et al.* A model for the growth of haidai (*Laminaria japonica*) in aquaculture. *China Fisheries, Marine Science Bulletin*, 2009, 28(2): 34-40 [吴荣军, 张学雷, 朱明远, 等. 养殖海带的生长模型研究. 海洋通报, 2009, 28(2): 34-40]
- Xu DH, Chen BJ, Jiang T, *et al.* Temporal and spatial variation

- characteristics of water nutrients and eutrophication evaluation in aquaculture water areas of Sanggou Bay. *Progress in Fishery Sciences*, 2017, 38(3): 1–11 [徐东会, 陈碧鹃, 江涛, 等. 桑沟湾养殖海域营养盐时空分布特征及富营养化评价. *渔业科学进展*, 2017, 38(3): 1–11]
- Zhang DM, Miao GR, Yang QM. Research on the relationship between the coastal current and *Laminaria japonica* raising. An experiment of comparison between the current speed and *Laminaria japonica* growth. *Journal of Shandong College of Oceanology*, 1986, 16(4): 180–186 [张定民, 缪国荣, 杨清明. 沿岸流与海带养殖关系的研究 II、流速对海带生长的影响. *山东海洋学院学报*, 1986, 16(4): 180–186]
- Zhang QF, Feng YQ, Wen JY, *et al.* The effects of light intensity and nitrogen on the physiology of the red macroalgae *Gracilaria lemaneiformis*. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2017, 24(5): 1065–1071 [张清芳, 冯颖琪, 温金燕, 等. 光照强度和氮营养盐浓度对龙须菜生理代谢的影响. *中国水产科学*, 2017, 24(5): 1065–1071]
- Zhang QX. The relationship between growth and light of kelp *Laminaria japonica*. *China Fisheries*, 1994(6): 34–35 [张起信. 海带生长与光照的关系. *中国水产*, 1994(6): 34–35]

(编辑 冯小花)

Analysis on the Advantages of Standard Kelp Long Line Culture in Sanggou Bay

FANG Jinghui¹①, JIANG Zengjie¹, LIN Fan¹, GAO Yaping¹, FANG Jianguang¹, ZHANG Peng², GUO Zhili², DU Meirong¹, MENG Shan^{1,3}

(1. Yellow Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences; Key Laboratory of Sustainable Development of Marine Fisheries, Ministry of Agriculture and Rural Affairs; Laboratory for Marine Fisheries Science and Food Production Processes, Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology (Qingdao), Qingdao 266071; 2. Marine College, Shandong University (Weihai), Weihai 264209; 3. College of Fisheries and Life Science, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306)

Abstract In the 1990s, kelp (*Laminaria japonica*) aquaculture was over capacity in Sanggou Bay; however, the area used for kelp aquaculture has almost doubled since then. Consequently, the levels and proportion of nutrients has changed since the end of last century. In order to address this problem, we previously established standard long line culture to reduce kelp density. After two years, profit had increased significantly; however, the reasons why kelp growth improved in the standard long line culture area compared to the traditional area remained unknown. This study was carried out to elucidate the advantages of standard kelp long line culture in Sanggou Bay. There were two 40 hm² experimental areas: a standard kelp long line culture area and a traditional long line culture area. The distance between the two areas was approximately 50 m. The growth and composition of kelp, light density, and current in both areas were measured throughout the experiment. The length, width, average thickness, wet weight, projected area, and specific growth rate of kelp were higher in the standard long line culture area than in the traditional long line culture area, with kelp weight significantly higher in the standard area. The carbon, nitrogen, and protein content of the kelp in the standard long line culture area was significantly higher than that in the traditional culture area, and the quality of the kelp product was greatly improved. During the later stages of cultivation, the ratio of the sum of the projection area of cultured kelp in the standard culture area to the corresponding cultured sea area was 6.33, while that of the traditional area was 9.15. The light density of the water layer beneath the kelp in the standard area was significantly higher than that in the traditional area, and the current speed was also higher in the standard area than in the traditional culture area. Our results showed that kelp overlap decreased in the standard area and that total light density was higher in the standard area than in the traditional area. Moreover, the increased current in the standard area carried more nutrients to the kelp. These may be the factors resulting in differences between the two methods of kelp culture.

Key words *Laminaria japonica*; Standard aquaculture; Carrying capacity; Growth; Sanggou Bay

① Corresponding author: FANG Jinghui, E-mail: hui861@163.com