

DOI: 10.19663/j.issn2095-9869.20211122001

http://www.yykxjz.cn/

宋炜, 陈志和, 谢正丽, 刘永利, 王磊, 王鲁民. 深远海大型围栏养殖大黄鱼海域沉积物质量分析与评价. 渔业科学进展, 2022, 43(6): 47-55

SONG W, CHEN Z H, XIE Z L, LIU Y L, WANG L, WANG L M. Analysis and evaluation of sediment quality in a *Larimichthys crocea* farm cultured with a deep-sea large-scale fence. Progress in Fishery Sciences, 2022, 43(6): 47-55

深远海大型围栏养殖大黄鱼海域 沉积物质量分析与评价*

宋 炜^{1,2,3} 陈志和^{1,2} 谢正丽⁴ 刘永利¹ 王 磊¹ 王鲁民^{1①}

(1. 中国水产科学研究院东海水产研究所 上海 200090; 2. 南昌大学生命科学学院
江西 南昌 330031; 3. 青岛海洋科学与技术试点国家实验室 山东 青岛 266237;
4. 中国水产科学研究院渔业机械仪器研究所 上海 200092)

摘要 为评价深远海大型围栏养殖大黄鱼(*Larimichthys crocea*)海域的沉积物质量状况, 通过对大黄鱼不同养殖期围栏养殖区、围栏外围区、网箱外围区和对照区的4次调查, 分析评价了调查海域沉积物中的Cu、Zn、有机碳、硫化物等指标的区域分布、含量变化及污染水平, 并采用内梅罗指数对调查海域沉积物进行了质量综合评价。结果显示, 4次调查大黄鱼围栏养殖区沉积物Cu的含量范围为15~33 mg/kg, Zn的含量范围为80~137 mg/kg, 有机碳的含量范围为0.14%~1.90%, 硫化物的含量范围为0.3~128.0 mg/kg。围栏中心区沉积物有机碳、硫化物的含量比其他区域高, 但均符合《海洋沉积物质量》(GB18668-2002)中的一类标准。不同调查区域沉积物Cu、Zn和有机碳的含量差异不显著($P>0.05$), 围栏中心养殖区沉积物硫化物含量显著高于对照区($P<0.05$)。内梅罗综合评价结果表明, 调查区域沉积物质量均为清洁或较清洁状态, 沉积物质量符合海水养殖标准。沉积物Cu、Zn和硫化物未表现出明显的累积趋势, 沉积物有机碳在本调查时间内有轻微累积的趋势, 建议通过加强大黄鱼配合饲料的研发与应用, 以缓解目前冰鲜鱼饵料大规模投入的状况, 降低饵料系数, 从而在一定水平上减轻有机质累积对沉积环境的污染。

关键词 深远海; 围栏; 大黄鱼; 沉积物质量

中图分类号 S967.9 **文献标识码** A **文章编号** 2095-9869(2022)06-0047-09

深远海养殖是纾解近岸水域生态环境压力、拓展我国海水养殖新空间、优化海洋渔业产业布局、推进水产养殖绿色高质量发展的重要途径(麦康森等,

2016; 徐皓, 2016)。近年来, 以远离大陆岸线的岛礁水域为先期发展海域、以装备先行为深远海养殖发展特征, 我国的深远海养殖已有初步发展(徐皓等, 2020;

*科技部国家重点研发计划——蓝色粮仓科技创新专项(2019YFD0900904)、山东省支持青岛海洋科学与技术试点国家实验室重大科技专项(2018SDKJ0303-4)、国家海水鱼产业技术体系(CARS-47)和中国水产科学研究院基本科研业务费(2020TD76)共同资助 [This work was supported by National Key Research and Development Program of China (2019YFD0900904), Shandong Major Science and Technology Innovation Projects (2018SDKJ0303-4), the Earmarked Fund for CARS-47, and Central Public-Interest Scientific Institution Basal Research Fund, CAFS (2020TD76)]. 宋 炜, E-mail: swift83@sina.com

①通信作者: 王鲁民, 研究员, E-mail: lmwang@ecsf.ac.cn

收稿日期: 2021-11-22, 收修改稿日期: 2022-02-17

石建高等, 2021)。养殖装备逐步由深远海岛礁海域的深水网箱养殖向大型工程化设施发展。结合我国海域、海况条件和养殖品种、市场需求, 自主创新的深远海大型工程化围栏设施养殖大黄鱼模式取得成功(王磊等, 2017; 李星云等, 2019)。该养殖设施位于开放或半开放海域, 抗风浪能力强, 水体交换通畅、养殖面积大、鱼类活动空间广, 可为大黄鱼原生态牧养模式搭建优良条件, 故养殖的大黄鱼体型匀称、体色金黄, 商品鱼品质更近生态, 口感接近野生(周文博等, 2018; 宋炜等, 2019; 邹国华等, 2021)。

有关深远海大型围栏养殖对生态环境影响仅有针对养殖区内外的水环境因子和生物因素的影响研究(李磊等, 2019; 周龙龙等, 2018)。为评估深远海大型围栏养殖大黄鱼对周边海域的影响, 本研究根据深远海大型围栏大黄鱼养殖周期, 对围栏养殖区及周边海域的关键特征沉积环境因子进行监测, 并对沉积物质量现状进行综合评价, 以期初步了解深远海大型围栏养殖中污染物现状, 为深远海大型围栏养殖区的合理规划、病害防治以及海水养殖的可持续发展提供数据支撑。

1 材料与方法

1.1 样品采集与分析

由于所评估的深远海大型围栏养殖设施使用的网衣由上部的超高强聚乙烯网衣与下部的 Cu、Zn

合金编织网组成, 且投喂的饲料为冰鲜小杂鱼和颗粒配合饲料, 因此, 重点选择沉积物中的 Cu、Zn、有机碳和硫化物作为沉积物监测指标。

调查的深远海大型围栏养殖区域位于浙江省大陈岛海域, 面积约为 $5 \times 10^4 \text{ m}^2$, 养殖对象为大黄鱼, 投放尾数约为 70 万尾。在大型围栏养殖区及周边海域共设置 10 个调查站位(图 1), 2 号站位位于围栏养殖区中央, 代表养殖围栏中心区, 7~10 号站位分别处于养殖围栏柱桩外周, 代表养殖围栏外围区, 3、4 号站位处于深水网箱养殖区附近, 代表网箱外围区, 1 号站位设置在距围栏养殖区约 500 m 处, 5、6 号站位设置在离深水网箱养殖区约 350~700 m 处, 1、5、6 号站位标记为对照区。根据大黄鱼养殖周期(4—12 月), 选择 2017 年 6、8、10 月以及 2018 年 5 月在养殖投饵高峰期用抓斗式采泥器采集表层沉积物。样品的采集和分析均严格按照《海洋监测规范》(GB/T 17378-2007、GB/T 12763-2007)中规定的方法进行(胡琴等, 2017; 刘丽娟等, 2021)。

1.2 数据处理

1.2.1 评价方法 利用内梅罗指数(Nemerow, 1974)对调查海域沉积物进行质量综合评价, 其计算公式如下:

$$P = \sqrt{\frac{P_{\max}^2 + P_{\text{avg}}^2}{2}} \quad (1)$$



图 1 监测站位示意图

Fig.1 Location of sampling stations

式中, P 为内梅罗指数, P_{\max} 、 P_{avg} 分别为单因子污染指数(P_i)的最大值与平均值。其中, 单因子污染指数 P_i 的计算公式为:

$$P_i = \frac{C_i}{S_i} \quad (2)$$

式中, C_i 为第 i 种污染物的实测含量, S_i 为实测第 i 种污染物的评价标准。考虑到本调查海域为养殖海域, 因此, 参照《海洋沉积物质量》(GB18668-2002)中的一类标准(第一类沉积物质量适用于海洋渔业水域、海洋自然保护区、珍惜与濒危生物自然保护区、海水养殖区、海水浴场、人体直接接触沉积物的海上运动或娱乐区、与人类食用直接有关的工业用水区)。内梅罗指数等级划分标准: 清洁 I ($P \leq 0.6$), 较清洁 II ($0.6 < P \leq 1.0$), 轻度污染 III ($1 < P \leq 2.6$), 中度污染 IV ($2.6 < P \leq 5.0$), 重度污染 V ($P > 5.0$)。

1.2.2 数据处理与分析 数据用 Excel 2019 处理, 用平均值±标准差($\bar{X} \pm SD$)表示。应用 MATLAB 分别对数据进行双因素方差分析(two-way ANOVA), 检验在 $P=0.05$ 水平条件下, 围栏中心区、围栏外围区、网

箱外围区和对照区沉积物监测指标的时空分布是否存在显著性差异。

2 结果与分析

2.1 调查海域沉积物监测指标的含量

本调查研究沉积物 Cu、Zn、有机碳和硫化物在各采样点与不同时间的含量见表 1。4 次调查沉积物质量均符合《海洋沉积物质量》(GB18668-2002)中的一类标准。其中, Cu 的含量范围为 15~33 mg/kg, Zn 的含量范围为 80~137 mg/kg, 有机碳的含量范围为 0.14%~1.90%, 硫化物的含量范围为 0.3~128.0 mg/kg。

2.2 各项指标的时空分布分析

围栏中心区、围栏外围区、网箱外围区和对照区的不同区域和采样时间双因素方差检验结果分别见表 2 和表 3。不同区域间比较发现, 只有沉积物硫化物含量存在显著性差异($P < 0.05$), 而沉积物 Cu、Zn 和有机碳含量不存在显著差异。所有区域的 4 种沉积物含量在不同采样时间存在显著性差异($P < 0.05$)。

表 1 沉积物中 Cu、Zn、有机碳和硫化物的含量
Tab.1 Contents of Cu, Zn, organic carbon and sulfide in the sediments

沉积物监测指标 Sediment monitoring index	采样时间 Sampling time	站位 Station									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Cu/(mg/kg)	2017-06	23	28	29	25	28	27	28	29	27	28
	2017-08	28	29	33	30	28	26	28	29	33	30
	2017-10	21	20	16	15	16	17	17	18	20	18
	2018-05	23	22	29	28	29	26	27	32	33	22
	平均值 Average	24	25	27	25	25	24	25	27	28	25
Zn/(mg/kg)	2017-06	111	137	135	126	93	94	136	133	121	119
	2017-08	91	101	95	91	92	81	84	80	82	80
	2017-10	124	119	95	106	94	93	93	105	112	108
	2018-05	92	104	103	118	110	90	103	115	116	110
	平均值 Average	105	115	107	110	97	90	104	108	108	104
有机碳 Organic carbon /%	2017-06	0.55	0.93	0.63	0.44	0.35	0.31	0.14	0.80	0.90	0.51
	2017-08	0.62	0.84	0.54	0.67	0.58	0.56	0.70	0.53	0.63	0.64
	2017-10	0.99	1.75	0.95	0.90	0.87	0.81	0.94	0.92	1.74	0.99
	2018-05	0.51	0.93	1.44	1.49	1.88	1.65	1.55	1.79	1.90	0.54
	平均值 Average	0.67	1.11	0.89	0.88	0.92	0.83	0.83	1.01	1.29	0.67
硫化物 Sulfide/(mg/kg)	2017-06	11.3	128.0	57.0	48.0	10.5	10.8	14.8	88.1	105.0	90.0
	2017-08	11.4	22.6	20.3	12.2	14.4	2.9	9.7	10.8	2.6	4.0
	2017-10	0.5	66.2	10.2	6.8	7.8	0.9	0.8	0.8	1.8	1.0
	2018-05	11.2	71.1	0.4	0.3	4.0	0.8	0.5	0.5	0.4	83.0
	平均值 Average	8.6	72.0	22.0	16.8	9.2	3.9	6.5	25.1	27.5	44.5

表2 平均后双因素方差检验 P 值Tab.2 P value of two-way variance test after average

沉积物监测指标 Sediment monitoring index	区域 Area	采样时间 Sampling time
Cu/(mg/kg)	0.736 0	0.000 1
Zn/(mg/kg)	0.067 8	0.000 3
有机碳 Organic carbon /%	0.406 0	0.011 5
硫化物 Sulfide/(mg/kg)	0.004 0	0.006 2

2.2.1 Cu 4次调查不同区域沉积物Cu含量的变化范围与平均值见表4。不同区域沉积物Cu的含量差异不显著($P>0.05$),其中,围栏外围区与网箱外围区沉积物Cu的含量年平均值较大,分别为(26.19±5.36)

和(25.63±7.01) mg/kg,围栏中心区和对照区分别为(24.75±4.43)和(24.83±4.75) mg/kg。

2017年10月Cu的含量显著低于其他3次调查($P<0.05$),平均值为(17.80±1.99) mg/kg。2017年6月和8月Cu含量的平均值分别为(27.20±1.87)和(29.40±2.22) mg/kg,二者不存在统计学差异;2018年5月Cu含量的平均值为(27.10±3.90) mg/kg。

2.2.2 Zn 4次调查不同区域沉积物Zn含量的变化范围与平均值见表5。不同区域沉积物Zn的含量差异不显著($P>0.05$),其中,围栏中心区年平均值最大,为(115.25±16.5) mg/kg,围栏外围区为(106.06±18.97) mg/kg,网箱外围区为(108.63±16.25) mg/kg,对照区为(100.33±10.64) mg/kg。

表3 不同采样时间4种沉积物两两对比检验 P 值Tab.3 The comparison of P value of four sediments at different sampling times

采样时间 1 Sampling time 1	采样时间 2 Sampling time 2	Cu	Zn	有机碳 Organic carbon	硫化物 Sulfide
2017-06	2017-08	0.366 3	0.000 2	0.999 2	0.007 8
2017-06	2017-10	0.000 6	0.010 0	0.059 5	0.014 6
2017-06	2018-05	0.880 7	0.005 8	0.032 0	0.023 8
2017-08	2017-10	0.000 1	0.036 1	0.072 2	0.969 8
2017-08	2018-05	0.134 4	0.065 3	0.038 8	0.864 2
2017-10	2018-05	0.001 5	0.978 0	0.974 9	0.986 4

表4 沉积物Cu的时空变化/[mg/kg, 范围(平均值±标准差)]

Tab.4 Temporal variation of the content of Cu in the sediments/[mg/kg, Range (X±SD)]

采样时间 Sampling time	围栏中心区 Fenced central area	围栏外围区 Peripheral area of the fence	网箱外围区 Peripheral area of the cage	对照区 Control area
2017-06	28	27~29 (28.00±0.82)	25~29 (27.00±2.83)	23~29 (26.33±3.06)
2017-08	29	28~33 (30.00±2.16)	30~33 (31.50±2.12)	26~33 (29.00±3.61)
2017-10	20	17~20 (18.25±1.26)	15~16 (15.50±0.71)	16~21 (18.00±2.65)
2018-05	22	22~33 (28.50±5.07)	28~29 (28.50±0.71)	23~29 (26.00±3.00)
平均值 Average	24.75±4.43	26.19±5.36	25.63±7.01	24.83±4.75

2017年8月Zn的含量平均值为(87.70±7.30) mg/kg,显著低于2017年6月、10月和2018年5月的调查数据($P<0.05$),2017年6月、10月和2018年5月分别为(120.50±16.53)、(104.90±11.18)和(106.10±9.61) mg/kg。

2.2.3 有机碳 4次调查不同区域沉积物有机碳含量的变化范围与平均值见表6。不同区域沉积物有机碳的含量差异不显著($P>0.05$),其中,围栏中心区年平均值最大[(1.11±0.43)%],对照区最小[(0.80±0.33)%];围栏外围区为(0.95±0.42)%,网箱外围区为(0.88±0.42)%。

2017年6月、8月、10月和2018年5月有机碳的含量平均值分别为(0.56±0.26)%、(0.63±0.09)%、

(1.09±0.35)%和(1.37±0.52)%。2018年5月有机碳的含量显著高于2017年6月和8月。

2.2.4 硫化物 4次调查不同区域沉积物硫化物含量的变化范围与平均值见表7。围栏中心区年平均值最大,为(71.98±43.25) mg/kg;围栏外围区与网箱外围区,年平均值分别为(25.86±33.48)和(19.40±23.00) mg/kg;对照区最小,年平均值为(11.48±10.54) mg/kg。

2017年6月硫化物的含量显著高于其他3次调查,平均值为(56.35±44.28) mg/kg,2017年8、10月和2018年5月的平均值分别为(11.09±6.84)、(9.68±20.18)和(17.22±31.84) mg/kg,且这3次调查的硫化物的含量不存在统计学差异。

表 5 沉积物 Zn 的时空变化/[mg/kg, 范围(平均值±标准差)]
Tab.5 Temporal variation of the content of Zn in the sediments/[mg/kg, Range (X±SD)]

采样时间 Sampling time	围栏中心区 Fenced central area	围栏外围区 Peripheral area of the fence	网箱外围区 Peripheral area of the cage	对照区 Control area
2017-06	137	119~136 (127.25±8.50)	126~135 (130.50±6.36)	94~135 (113.33±20.60)
2017-08	101	80~84 (81.50±1.92)	91~95 (93.00±2.83)	81~95 (89.00±7.21)
2017-10	119	93~112 (104.50±8.19)	95~106 (100.50±7.78)	93~124 (104.00±17.35)
2018-05	104	103~116 (111.00±5.94)	103~118 (110.50±10.61)	90~103 (95.00±7.00)
平均值 Average	115.25±16.50	106.06±18.97	108.63±16.25	100.33±10.64

表 6 沉积物有机碳的时空变化/[%, 范围(平均值±标准差)]
Tab.6 Temporal variation of the content of organic carbon in the sediments/[%, Range(X±SD)]

采样时间 Sampling time	围栏中心区 Fenced central area	围栏外围区 Peripheral area of the fence	网箱外围区 Peripheral area of the cage	对照区 Control area
2017-06	0.93	0.14~0.90 (0.58±0.34)	0.44~0.63 (0.54±0.13)	0.31~0.63 (0.50±0.17)
2017-08	0.84	0.53~0.70 (0.63±0.07)	0.54~0.67 (0.61±0.10)	0.54~0.62 (0.57±0.04)
2017-10	1.75	0.92~1.74 (1.15±0.40)	0.90~0.95 (0.93±0.04)	0.81~0.99 (0.92±0.10)
2018-05	0.93	0.54~1.90 (1.45±0.62)	1.44~1.49 (1.46±0.04)	0.51~1.65 (1.20±0.61)
平均 Average	1.11±0.43	0.95±0.42	0.88±0.42	0.80±0.33

表 7 沉积物硫化物的时空变化/[mg/kg, 范围(平均值±标准差)]
Tab.7 Temporal variation of the content of sulfide in the sediments/[mg/kg, Range(X±SD)]

采样时间 Sampling time	围栏中心区 Fenced central area	围栏外围区 Peripheral area of the fence	网箱外围区 Peripheral area of the cage	对照区 Control area
2017-06	128.0	14.8~105.0 (74.48±40.50)	48.0~57.0 (52.5±6.36)	10.8~57.0 (26.37±26.53)
2017-08	22.6	2.6~10.8 (6.78±4.08)	12.2~20.3 (16.25±5.73)	2.9~20.3 (11.53±8.70)
2017-10	66.2	0.8~1.8 (1.10±0.48)	6.8~10.2 (8.50±2.40)	0.5~10.2 (3.87±5.49)
2018-05	71.1	0.4~83.0 (21.10±41.27)	0.3~0.4 (0.35±0.07)	0.4~11.2 (4.13±6.12)
平均值 Average	71.98±43.25	25.86±33.48	19.4±23.00	11.48±10.54

表 8 不同区域沉积物硫化物两两对比检验 P 值
Tab.8 The comparison of P value of sulfide from different areas

区域 1 Area 1	区域 2 Area 2	P 值 P value
对照区 Control area	围栏中心区 Fenced central area	0.004 8
对照区 Control area	围栏外围区 Peripheral area of the fence	0.683 2
对照区 Control area	网箱外围区 Cage peripheral area	0.922 8
围栏中心区 Fence central area	围栏外围区 Peripheral area of the fence	0.024 0
围栏中心区 Fence central area	网箱外围区 Peripheral area of the cage	0.011 4
围栏外围区 Fence peripheral area	网箱外围区 Peripheral area of the cage	0.955 5

不同区域沉积物硫化物多重比较分析检验结果见表 8。对照区和围栏中心区, 围栏中心区与围栏外围区及网箱外围区沉积物硫化物的含量存在显著差异($P<0.05$), 而围栏外围区和网箱外围区沉积物硫化

物含量与对照区不存在统计学差异, 围栏外围区和网箱外围区之间沉积物硫化物含量也不存在统计学差异。

2.3 沉积物中 Cu、Zn、有机碳和硫化物的污染评价

使用内梅罗综合指数法对沉积物质量综合评价的结果见表 9。2017 年 6 月调查站位的内梅罗指数值范围为 0.52~0.71, 平均值为 0.56±0.06, 1、5、6、10 号站位的沉积物质量为 I 类(清洁), 其他采样站位为 II 类(较清洁); 2017 年 8 月调查站位的内梅罗指数值范围为 0.57~0.67, 平均值为 0.59±0.05, 1、2、5~8 号站位的沉积物质量为 I 类(清洁), 其他采样站位为 II 类(较清洁); 2017 年 10 月调查站位的内梅罗指数值范围为 0.44~0.64, 平均值为 0.55±0.08, 1、3~8、10 号站位的沉积物质量为 I 类(清洁), 其他的采样站位为 II 类(较清洁); 2018 年 5 月调查站位的内梅罗指数值范围为 0.47~0.67, 平均值为 0.51±0.07, 1~4、6、7、10 号站位的沉积物质量为 I 类(清洁), 其他的采样站位为 II 类(较清洁)。

表9 内梅罗指数综合评价法沉积物评价结果

Tab.9 Evaluation results of sediment quality by using the Nemerow pollution index

站位 Stations	2017-06		2017-08		2017-10		2018-05	
	<i>P</i> 值 <i>P</i> value	污染等级 Pollution degree	<i>P</i> 值 <i>P</i> value	污染等级 Pollution degree	<i>P</i> 值 <i>P</i> value	污染等级 Pollution degree	<i>P</i> 值 <i>P</i> value	污染等级 Pollution degree
1	0.52	I	0.57	I	0.58	I	0.47	I
2	0.71	II	0.59	I	0.64	II	0.52	I
3	0.65	II	0.67	II	0.45	I	0.59	I
4	0.60	II	0.61	II	0.50	I	0.57	I
5	0.57	I	0.57	I	0.44	I	0.66	II
6	0.55	I	0.53	I	0.44	I	0.58	I
7	0.64	II	0.57	I	0.44	I	0.55	I
8	0.66	II	0.59	I	0.49	I	0.65	II
9	0.62	II	0.67	II	0.62	II	0.67	II
10	0.59	I	0.61	II	0.51	I	0.55	I

3 分析与讨论

大陈岛海域远离大陆岸线约 52 km, 有机质受陆源污染较小, 故沉积物有机质的输入主要来自人工投喂的颗粒饲料、鱼糜、杂鱼等饵料带来的外源性污染物和养殖鱼类的内源性排泄物。本研究结果显示, 2017 年 6 月、8 月、10 月和 2018 年 5 月有机碳的含量平均值分别为(0.56±0.26)%、(0.63±0.09)%、(1.09±0.35)%和(1.37±0.52)%, 4 次调查结果逐次升高, 说明围栏养殖大黄鱼过程中产生的残饵与鱼粪含有丰富的有机碳, 并且易积聚于围栏养殖区底部, 造成围栏养殖区沉积物有机碳的富集。一些学者对网箱养殖对海洋沉积物有机碳影响的距离进行了分析, 如蒋增杰等(2012)研究认为, 南沙港网箱养殖对海洋沉积物有机碳可影响到 400 m 的范围。Pawar 等(2001)研究分析了日本濑户内海网箱养殖的沉积物有机碳富集范围在离网箱养殖区 165 m 范围内。Shakouri (2003)研究对冰岛东部网箱养殖区外 5 m、95 m 和 600 m 处的沉积物有机碳含量进行了调查分析, 发现网箱养殖对离网箱养殖区 5 m 沉积物有机碳含量影响最大, 离网箱养殖区 95 m 和 600 m 处的差异不大。本研究发现, 围栏养殖对海洋沉积物有机碳含量影响的范围更广一些, 对照区 6 号站位(离围栏养殖区约 700 m)沉积物有机碳含量也有累积的趋势, 可能是在大陈岛海域风能、潮流、波浪等强能因素下, 一部分残饵及鱼粪被冲到较远的地方, 同时沉积在底部的有机质在这些因素的影响下, 也更容易悬浮在海水中, 并向远处漂移。总体而言, 调查期间围栏养殖区及附近海域沉积物有机碳含量均符合《海洋沉积物质量》(GB18668-2002)

中的一类标准。

养殖区底部由于残饵粪便的累积而产生丰富的有机质, 有机质降解在消耗大量溶解氧的同时使氧化还原电位降低, 硫酸盐还原菌是厌氧菌, 在缺氧条件下硫酸盐还原菌能将硫酸盐还原生成硫离子, 生成硫化物; 微生物的剧烈运动还导致 H₂S 气体产生, 并释放到水体中, 危害养殖鱼类(李晓敏等, 2005)。本调查研究中, 围栏中心区硫化物含量远高于其他 3 个区域, 这是因为深远海大型围栏一般由固定桩柱系统和网衣系统等结构组成, 网衣系缚于桩柱上, 并与海底嵌合。养殖围栏中心区域更容易沉积残饵鱼粪, 其中的有机质降解会消耗更多的 O₂, 更易形成缺氧环境, 使硫酸盐还原菌活性更强, 导致更多硫化物的生成。本研究还表明, 2017 年 6 月和 8 月航次调查沉积物硫化物的含量比 2017 年 10 月和 2018 年 5 月调查航次更高, 这是因为夏季水温相对来说较高, 硫酸盐还原菌在高温期生长繁殖更快, 会加快硫化物的生成(杨建设等, 2006)。黄洪辉等(2007)对半封闭海湾大鹏澳海水鱼类网箱养殖区及其邻近海域沉积物硫化物含量进行了调查分析, 发现养殖区沉积物硫化物含量平均值高达 562 mg/kg, 养殖区外 500~800 m 区域沉积物硫化物含量也达到 238 mg/kg, 而本研究所调查的围栏中心区、围栏外围区、网箱外围区和对照区沉积物硫化物含量相对要小得多, 这是因为传统网箱大多位于封闭或半封闭的海域, 养殖时间长、网箱数量多、养殖密度大、水流交换差, 致使底部溶氧较低, 形成了适合硫酸盐还原菌生长繁殖的环境, 导致硫化物的大量生长, 而本调查海域位于开放海域, 且养殖密度低, 良好的水流交换可带来丰富的溶氧, 一定程度上可有效抑制硫化物还原菌的活性, 减缓硫化物的

生长速度。总体而言,调查期间围栏养殖区及附近海域沉积物硫化物含量均符合《海洋沉积物质量》(GB18668-2002)中的一类标准。

本研究对调查期间沉积物质量进行内梅罗指数综合分析可以看出,调查期间所有采样站位沉积物质量均为清洁(I类)或较清洁(II类)状态,在调查时间各个站位沉积物质量保持了稳定良好的水平。一方面该海域养殖布局较为科学合理,不存在养殖密度过高的问题,同时该海域良好的水流交换可以使残饵粪便等部分污染物稀释扩散;另一方面,一般在每年12月左右,该海域深水网箱及围栏养殖大黄鱼都会起捕完毕、上市销售,次年的5月左右再重新投放大黄鱼鱼种,该海域在非养殖期内有数月的休养生息时间。虽然沉积物质量符合《海洋沉积物质量》(GB18668-2002)中的一类标准,但调查期间沉积物有机碳仍有一定的累积,因此,要加大饲料研发和宣传力度,逐步改变使用冰鲜鱼饵料养殖大黄鱼的传统观念和习惯,推进大黄鱼绿色健康养殖。

4 结论

4次调查大黄鱼围栏养殖区沉积物Cu的含量范围为15~33 mg/kg, Zn的含量范围为80~137 mg/kg, 有机碳的含量范围为0.14%~1.90%, 硫化物的含量范围为0.3~128.0 mg/kg。围栏中心区沉积物有机碳、硫化物的含量比其他区域高,但均符合《海洋沉积物质量》(GB18668-2002)中的一类标准。

调查期间,沉积物质量均为清洁(I类)或较清洁(II类)状态,目前监测的几项指标综合评价结果未达到污染水平,沉积物质量符合海水养殖标准。

在本调查时间内,沉积物Cu、Zn和硫化物未表现出明显的累积趋势,沉积物有机碳有轻微累积的趋势,建议通过加强大黄鱼配合饲料的研发与应用,以缓解目前冰鲜鱼饵料大规模投入的状况,降低饵料系数,从而在一定程度上减轻有机质累积对沉积环境的污染。

参 考 文 献

- HU Q, LI Q, HUANG B G, *et al.* Pollution status and the annual variations of heavy metals in the surface sediments in the adjacent sea water of the Yellow River estuary. *Progress in Fishery Sciences*, 2017, 38(2): 16–23 [胡琴, 李强, 黄必桂, 等. 黄河口附近海域表层沉积物重金属污染状况及年际变化分析. *渔业科学进展*, 2017, 38(2): 16–23]
- HUANG H H, LIN Q, GAN J L, *et al.* Impact of cage fish farming on sediment environment in Dapengao Cove. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(1): 75–80 [黄洪辉, 林钦, 甘居利, 等. 大鹏澳海水鱼类网箱养殖对沉积环境的影响. *农业环境科学学报*, 2007, 26(1): 75–80]
- JIANG Z J, FANG J G, MAO Y Z, *et al.* Identification of aquaculture-derived organic matter in the sediment associated with coastal farming. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2012, 19(2): 348–354 [蒋增杰, 方建光, 毛玉泽, 等. 海水鱼类网箱养殖水域沉积物有机质的来源甄别. *中国水产科学*, 2012, 19(2): 348–354]
- LI L, PING X Y, WANG L M, *et al.* Assessment of sea water quality in *Larimichthys crocea* farm cultured with copper alloy fence. *Marine Fisheries*, 2019, 41(1): 100–106 [李磊, 平仙隐, 王鲁民, 等. 铜合金围栏养殖大黄鱼海域水质综合评价与分析. *海洋渔业*, 2019, 41(1): 100–106]
- LI M Y, MIAO L, YU C, *et al.* Effects of different forms and management of large bottom-seated enclosure for culturing large yellow croaker (*Larimichthys crocea*). *Journal of Ningbo University (NSEE)*, 2019, 32(6): 30–34 [李祥云, 苗亮, 俞淳, 等. 大黄鱼大型座底式围栏养殖的不同形式和管理的效果. *宁波大学学报(理工版)*, 2019, 32(6): 30–34]
- LI X M, QU K M, SUN Y, *et al.* The pollution of sulfide and its remediation in sediment environment of marine aquaculture. *Marine Fisheries Research*, 2005, 26(6): 88–93 [李晓敏, 曲克明, 孙耀, 等. 海水养殖沉积环境硫化物污染及修复. *海洋水产研究*, 2005, 26(6): 88–93]
- LIU L J, JIANG X Y, GAO J Q, *et al.* Comprehensive evaluation of the Xiaoshi Island *Apostichopus japonicus* national aquatic germplasm reserve. *Progress in Fishery Sciences*, 2021, 42(5): 8–15 [刘丽娟, 姜向阳, 高继庆, 等. 小石岛刺参国家级水产种质资源保护区综合评价. *渔业科学进展*, 2021, 42(5): 8–15]
- MAI K S, XU H, XUE C H, *et al.* Study on strategies for developing offshore as the new spaces for mariculture in China. *Strategic Study of CAE*, 2016, 18(3): 90–95 [麦康森, 徐皓, 薛长湖, 等. 开拓我国深远海养殖新空间的战略研究. *中国工程科学*, 2016, 18(3): 90–95]
- NEMEROW N L C. Scientific stream pollution analysis. Washington D. C.: Scripta Book Company, 1974
- PAWAR V, MATSUDA O, YAMAMOTO T, *et al.* Spatial and temporal variations of sediment quality in and around fish cage farms: A case study of aquaculture in the Seto Inland Sea, Japan. *Fisheries Science*, 2001, 67(4): 619–627
- SHAKOURI M. Impact of cage culture on sediment chemistry. A case study in Mjoiifjordur. United Nations University Fisheries Training Programme, 2003
- SHI J G, YU W W, LU B C, *et al.* Development status and prospect of Chinese deep-sea cage. *Journal of Fisheries of China*, 2021, 45(6): 992–1005 [石建高, 余雯雯, 卢本才, 等. 中国深远海网箱的发展现状与展望. *水产学报*, 2021, 45(6): 992–1005]

- SONG W, YIN L M, CHEN X Z, *et al.* On behavioral characteristics of *Larimichthys crocea* by ultrasound pinger system of fence farming in shallow sea. *Marine Fisheries*, 2019, 41(4): 494–502 [宋伟, 殷雷明, 陈雪忠, 等. 基于超声波标志法的浅海围栏养殖大黄鱼行为研究. *海洋渔业*, 2019, 41(4): 494–502]
- WANG L, WANG L M, HUANG T, *et al.* Current situation and analysis of copper alloy fence aquaculture facilities with pillar pile. *Fishery Information & Strategy*, 2017, 32(3): 197–203 [王磊, 王鲁民, 黄艇, 等. 柱桩式铜合金围栏网养殖设施的发展现状与分析. *渔业信息与战略*, 2017, 32(3): 197–203]
- XU H, CHEN J Y, FANG H, *et al.* Chinese marine fishery transformation and strategic emerging industry of deep ocean fishery. *Fishery Modernization*, 2020, 47(3): 1–9 [徐皓, 陈家勇, 方辉, 等. 中国海洋渔业转型与深蓝渔业战略性新兴产业. *渔业现代化*, 2020, 47(3): 1–9]
- XU H. Development strategy for aquaculture facility and deepwater aquaculture platform. *Strategic Study of CAE*, 2016, 18(3): 37–42 [徐皓. 水产养殖设施与深水养殖平台工程发展战略. *中国工程科学*, 2016, 18(3): 37–42]
- YANG J S, HUANG Y T, WU C S, *et al.* The influence of temperature and pH on the activity of SRB. *Journal of Maoming College*, 2006, 16(4): 1–3 [杨建设, 黄玉堂, 吴楚施, 等. 温度和 pH 对硫酸盐还原菌活性的影响. *茂名学院学报*, 2006, 16(4): 1–3]
- ZHOU L L, PING X Y, LI L, *et al.* On characteristics and environmental effects of phytoplankton community structure in the coast of *Pseudosciaena crocea* copper seine net cage culture. *Marine Fisheries*, 2018, 40(4): 413–423 [周龙, 平仙隐, 李磊, 等. 铜围网大黄鱼养殖海域浮游植物群落结构特征及其环境效应研究. *海洋渔业*, 2018, 40(4): 413–423]
- ZHOU W B, SHI J G, YU W W, *et al.* Current situation and development trend of marine seine culture in China. *Fishery Information & Strategy*, 2018, 33(4): 259–266 [周文博, 石建高, 余雯雯, 等. 中国海水围网养殖的现状与发展趋势探析. *渔业信息与战略*, 2018, 33(4): 259–266]
- ZOU G H, SONG W, XIE Z L. Deep-sea large-scale fence culture technology of *Larimichthys crocea*. *China fisheries*, 2021(6): 57–60 [邹国华, 宋伟, 谢正丽. 大黄鱼深远海大型围栏养殖技术. *中国水产*, 2021(6): 57–60]

(编辑 马璀璨)

Analysis and Evaluation of Sediment Quality in a *Larimichthys crocea* Farm Cultured with a Deep-Sea Large-Scale Fence

SONG Wei^{1,2,3}, CHEN Zhihe^{1,2}, XIE Zhengli⁴, LIU Yongli¹, WANG Lei¹, WANG Lumin^{1①}

(1. East China Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Shanghai 200090, China;

2. School of Life Sciences, Nanchang University, Nanchang, Jiangxi 330031, China;

3. Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology (Qingdao), Qingdao, Shandong 266237, China;

4. Fishery Machinery and Instrument Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Shanghai 200092, China)

Abstract Far-reaching mariculture is an important way to relieve the pressure on the ecological environment of coastal waters, expand new space for mariculture in China, optimize the layout of the marine fishery industry, and promote the green and high-quality development of aquaculture. In recent years, moving the islands and reefs far away from the continental coastline as the early development sea area and the equipment-first behavior as the development characteristics of deep-sea aquaculture, China's far-reaching mariculture has been preliminarily developed. Combined with China's sea areas, sea conditions, breeding varieties, and market demand, the independent and innovative large-scale engineering fence facility breeding model of *Pseudosciaena crocea* has been successful. In order to evaluate the sediment status in the sea area of the large-scale fenced large yellow croaker (*Larimichthys crocea*) in the deep-sea, the regional distribution, content change, and pollution level of Cu, Zn, organic carbon, sulfide and other indicators in the sediments of the surveyed

① Corresponding author: WANG Lumin, E-mail: lmwang@ecsf.ac.cn

sea area were analyzed. These parameters were evaluated through four investigations in the fenced culture area, peripheral area of the fence, peripheral area of the cage, and control area of *L. crocea*, in different culture periods, and the Nemerow index was used to comprehensively evaluate the quality of sediments in the surveyed sea area. The results showed that the Cu content in the sediments varied from 15~33 mg/kg; the Zn content varied from 80~137 mg/kg; the organic carbon content varied from 0.14%~1.90%; and the sulfide content varied from 0.3~128.0 mg/kg. The contents of organic carbon and sulfide in the sediments in the fenced culture area were higher than those in other areas, however, they all met the first class of marine sediment quality standards (GB18668-2002). There was no significant difference in the contents of Cu, Zn, and organic carbon in the sediments of the different investigation areas ($P>0.05$), and the content of sulfide in the sediments of the breeding area in the fence center was significantly higher than that in the control area ($P<0.05$). In this study, the Nemerow index comprehensive analysis revealed that the sediment quality of all sampling stations during the survey was of clean (class I) or relatively clean (class II) status, and the sediment quality of each station maintained a stable and good level during the survey time. On one hand, high breeding density is not an issue in the sea area, and the breeding layout is more scientific and reasonable, but good water exchange in the sea area can dilute and diffuse some pollutants, such as residual bait and feces; on the other hand, the deep-water network in the sea area generally occurs around December every year. Therefore, the large yellow croaker cultured in boxes and fences could be caught and sold. The large yellow croaker species can be re-invested around May of the next year. Thus, the sea area has several months for renewal of its resources in the non-breeding period. No obvious accumulation trend of Cu, Zn, and sulfide in the sediments was observed, but a slight accumulation trend of organic carbon in the sediments was observed during the study period. The research and development, and application of formula feed for the large yellow croaker should be enhanced to alleviate the current large-scale investment of frozen fish bait and reduce the bait coefficient, thus reducing the pollution of organic matter accumulation in the sedimentary environment to a certain extent. According to the breeding cycle of large-scale fenced *L. crocea* in the far-reaching sea, this study monitors the key characteristics and sedimentary environmental factors in the fenced breeding area and the surrounding sea areas. It comprehensively evaluates the current situation of sediment quality in order to have a basic understanding of the current situation of pollutants in large-scale fenced breeding. The results provide a basis for rational planning of the large-scale fenced breeding areas in the far-reaching sea and provide data support for disease control and sustainable development of mariculture.

Key words Deep-sea; Fence; *Larimichthys crocea*; Sediment quality