

DOI: 10.3724/SP.J.1118.2020.19299

三沙湾大黄鱼网箱养殖衍生有机物的沉降特征

黄伟强^{1,2}, 纪炜炜¹, 付婧¹, 马增岭², 周进¹

1. 中国水产科学研究院东海水产研究所, 上海 200090;

2. 温州大学生命与环境科学学院, 浙江 温州 325035

摘要: 为了解三沙湾大黄鱼(*Larimichthys crocea*)网箱养殖衍生有机物(AOM)的沉降特征, 采用原位实验方法, 收集区域内使用颗粒饲料和冰鲜饵料两种典型饲喂方式下距离网箱 200 m 范围内 AOM 样品, 分析其沉降量、营养物质[颗粒有机物(POM)、颗粒有机碳(POC)、颗粒态氮(PN)、总磷(TP)]沉降通量和扩散特点。研究结果表明, 饲喂颗粒饲料状态下 AOM 沉降量显著高于投喂冰鲜饵料, 两者均值分别为(563.66±119.18) g/(m²·d)和(266.07±139.15) g/(m²·d)。POM、POC、PN 和 TP 沉降通量在两种饲喂方式下的差异与之相似, 饲喂颗粒饲料时各参数均值分别为(27.25±2.43) g/(m²·d)、(6.03±0.58) g/(m²·d)、(0.66±0.06) g/(m²·d)和(0.39±0.04) g/(m²·d); 饲喂冰鲜饵料时各参数均值分别为(13.04±1.62) g/(m²·d)、(3.57±0.45) g/(m²·d)、(0.51±0.06) g/(m²·d)和(0.22±0.04) g/(m²·d)。沿近底层海流主导流向距离养殖网箱 100 m 的空间范围内, AOM 沉降量和营养物质沉降通量均呈现自网箱处递减的变化特征, 下降程度在饲喂冰鲜饵料时尤为显著。AOM 中 POC、PN 和 TP 含量在饲喂冰鲜饵料时较高, 在距离养殖网箱 50 m 范围内呈现递减趋势。综上, 在三沙湾大黄鱼网箱养殖过程中, 投喂颗粒饲料引发的环境污染程度高于冰鲜饵料, 两种情形下的 AOM 沉降影响主要限于距离养殖网箱 50~100 m 的空间范围。三沙湾内饲喂颗粒饲料引发较高营养物质沉降通量源于较大的 AOM 沉降量, 此现象说明养殖过程中可能存在颗粒饲料过度投喂、饵料利用效率较低等问题, 围绕此类问题的针对性研究对于减缓区域内养殖活动的环境影响具有重要意义。

关键词: 三沙湾; 网箱养殖; 养殖衍生有机物; 沉降量; 扩散范围

中图分类号: S931

文献标志码: A

文章编号: 1005-8737-(2020)06-0709-11

海水网箱养殖具有集约化、高效率和高收益等技术优势, 该技术自 20 世纪 70 年代被引入中国以来, 已迅速发展成为国内沿海鱼类主要养殖方式之一。2018 年中国海水鱼类网箱养殖(普通网箱)产量约为 59.46 万吨, 约占海水鱼类养殖总产量的 40%^[1]。网箱养殖系投喂型生产方式, 养殖过程中产生数量可观的养殖衍生有机物(aquaculture-derived organic matter, AOM), 主要包括残饵、养殖生物排泄物和分泌物^[2-3], 此类物质的沉降可引发一系列的生态环境效应。

三沙湾位于福建省东北部, 是中国最为典型

的养殖海湾之一。近年来, 海湾内大黄鱼(*Larimichthys crocea*)网箱养殖生产量约占全国大黄鱼养殖总产量的 70%^[4]。针对三沙湾网箱养殖活动的环境效应已有一定数量研究, 包括环境因子和生物群落的时空分布及养殖活动对其的响应特征等主要内容^[5-13]; 相关结论之间存在差异, 养殖引发负面效应^[5-9]和养殖未有显著影响的结论^[10-13]均有报道。AOM 的沉降是网箱养殖环境效应的主要诱因^[2], 明晰 AOM 的沉降特征对理解上述研究结论及其之间的差异具有重要意义。

在海洋环境中, AOM 包括溶解态和颗粒态两

收稿日期: 2019-10-15; 修订日期: 2019-12-09.

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(41576167); 国家自然科学基金青年科学基金项目(41606139); 中央级公益性科研院所基本科研业务费项目(2013M07, 2019T10).

作者简介: 黄伟强(1993-), 男, 硕士研究生. 主要从事海洋生物多样性和底栖生态学研究. E-mail: 1025924259@qq.com

通信作者: 周进, 博士, 副研究员. 主要从事海洋生态学和海洋底栖动物分类学研究. E-mail: zhouj@ecsf.ac.cn

种赋存形式。溶解态物质在水体中易被稀释并随水流扩散,颗粒态物质则在水体内快速沉降,进而改变底栖生境。本研究在三沙湾内选择典型网箱养殖水域,分析区域基本水文动力特征。以养殖网箱为中心,沿近底层海流主导流向布设沉积物捕获器,研究两种饲喂方式下网箱 AOM 沉降量、扩散范围及营养物质(颗粒有机物 POM、颗粒有机碳 POC、颗粒态氮 PN、总磷 TP)沉降通量,以期了解三沙湾大黄鱼网箱养殖环境效应提供科学依据,为大黄鱼健康养殖模式构建提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区域

三沙湾地理位置在 26°30'N~26°58'N, 119°26'E~120°10'E, 低于 0 m 等深线的水域面积 262 km²。海湾属典型半封闭海湾,湾口直径小于 3 km。网箱养殖是海湾内最为典型的生产方式之一,养殖网箱规格(长×宽×高)多为 3 m×3 m×4 m,养殖品种主要包括大黄鱼、日本真鲈(*Lateolabrax japonicus*)和花尾胡椒鲷(*Plectorhynchus cinctus*)等。大黄鱼养殖在三沙湾内占据绝对数量优势,年产量约为 13.5 万 t^[4]。幼鱼通常在每年 4—5 月和 10—12 月繁育,培养至体长 10 cm 后按照 1500 尾/网箱的密度进行养殖,8~13 个月后长至商品鱼尺寸后出售。三沙湾同时开展仿刺参(*Apostichopus japonicus*)、鲍(*Haliotis discus hannai*)、长牡蛎(*Crassostrea gigas*)、海带(*Laminaria japonica*)和龙须菜(*Gracilaria lemaneiformis*)养殖。

1.2 实验海域和采样站位设置

本研究的原位实验于 2019 年 6 月实施,该时期属典型养殖季节。实验养殖网箱中心地理位置 26°39'13" N、119°50'49" E,此网箱位置相对独立,其东、西两侧约 50 m 范围内为自然水域,向外为海藻养殖区;本次实验阶段海藻养殖区内海带已基本收割完毕,等待种植龙须菜。实验网箱北侧约 30 m 范围内为自然水域,向外为海参养殖吊笼;因三沙湾内海参通常在每年 10—11 月投苗,次年 4—5 月收获,故实验时段内海参网箱养殖设施处于闲置状态。实验网箱南侧约 400 m 范围内为自

然水域,向外存在一定数量的养殖网箱(图 1)。本次实验海域水体较浅,涨、落潮时水深分别约为 10 m 和 8 m。

本次实验区域共有养殖网箱 120 个,年产量约 50 吨,养殖历史 6 年。区域内约 80%网箱用于大黄鱼养殖,其余为日本真鲈和花尾胡椒鲷养殖。实验网箱内大黄鱼为 2018 年秋季苗,至本次实验时鱼苗已在此养殖约 6 个月,实验时养殖个体长度约 10 cm。实验网箱使用饵料包括颗粒饲料和冰鲜饵料,颗粒饲料为商品化海马牌大黄鱼配合饲料,冰鲜饵料主要为日本鲷(*Scomber japonicus*)幼体。颗粒饲料直接投喂,冰鲜饵料研磨至肉糜状饲喂。两种饲料的经济成本相似,实际养殖过程中养殖户对于饲料的选择并无特殊偏好,通常略倾向于冰鲜饵料。实验季节内投饵频率为每日 1 次,区域日投饵量约为 120 kg 颗粒饲料或 1250 kg 冰鲜饵料。

本研究于 2019 年 6 月在实验区域利用 ADCP (EK 800)进行 24 h 海流连续测定。测量数据显示,区域近底层(距离海底约 1.5 m)水体主导流向为 NNE (正北顺时针 22.5°夹角方向)和 SSW (正南顺时针 22.5°夹角方向),在一个完整潮流周期内两者频率分别为 16.96%和 12.52%,两方向上的平均流速分别为 0.22 m/s 和 0.26 m/s。本次实验选择 NNE 流向设置采样断面,断面共布设 6 个沉积物捕获器采样点,分别位于网箱养殖中心(0 m 处)和距养殖网箱边缘 10 m、50 m、100 m、150 m 和 200 m 处(图 1)。

1.3 样品采集与处理

本研究于 2019 年 6 月 1—3 日和 23—25 日分别开展饲喂颗粒饲料和冰鲜饵料两种状态下的 AOM 捕获实验。在各实验阶段,分别在 1~6 号采样站位布放沉积物捕获器 1 枚,捕获器于当日投饵前 3 h 放置,满 24 h 后收取。捕获器布设于距海底垂直距离约 2 m 处,以充分收集 AOM,同时避免海洋沉积物再悬浮对实验的影响。沉积物捕获器配备 4 个丙烯酸圆柱管(内径 74 mm,高 300 mm),详细结构如文献[14]所述。捕获器布放前在圆柱管中注满盐水(盐度 26),以防止沉降有机物分解和管内再悬浮。

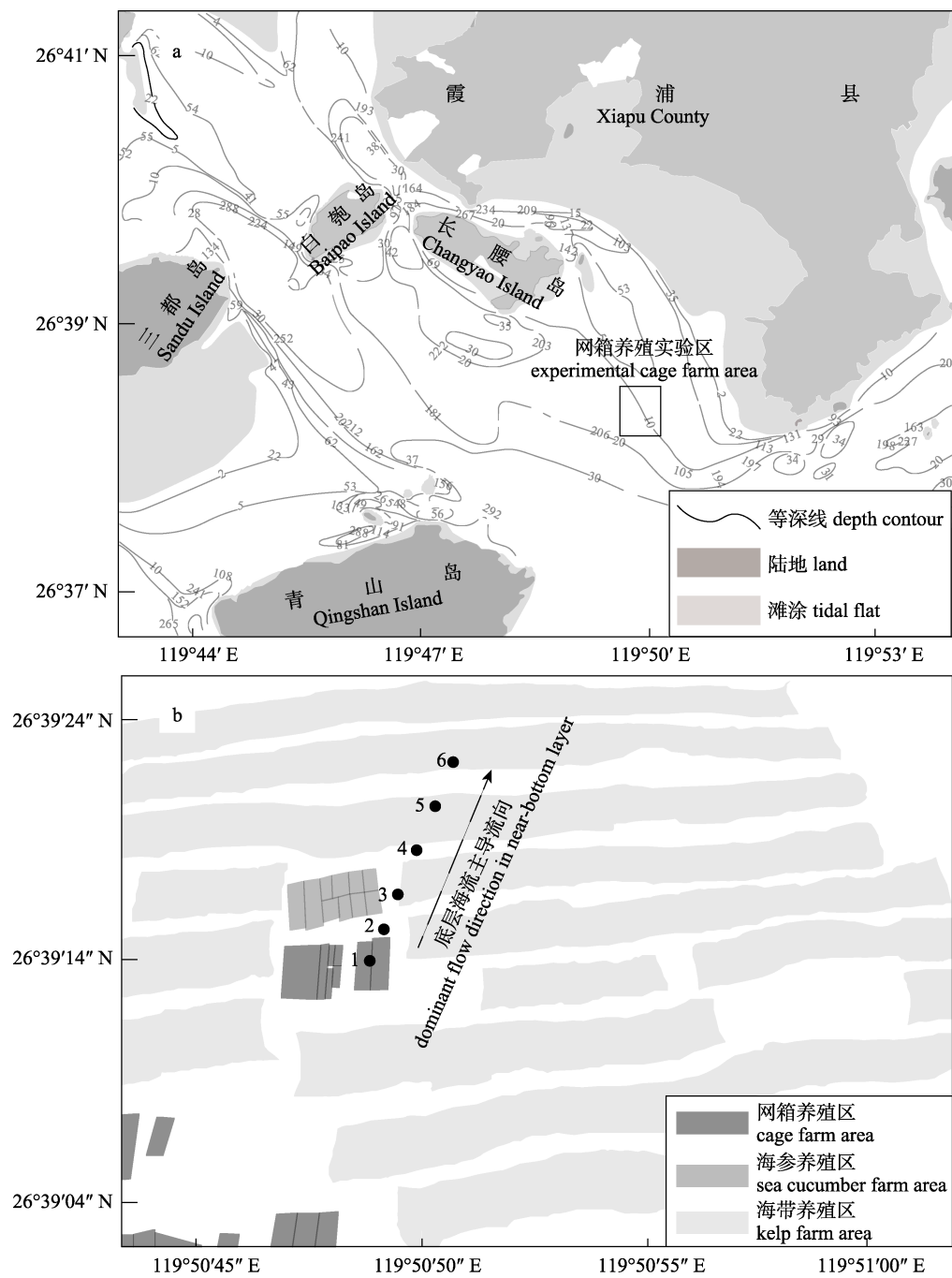


图 1 网箱养殖实验区位置图(a)和采样站位图(b)
Fig. 1 Location of study area (a) and sampling stations (b)

沉积物捕获器收取后, 利用虹吸原理移除圆柱管中的上清液, 管中剩余样品经 0.125 mm 孔径网筛过滤后转移至聚乙烯瓶中冷藏保存。冷藏样品经充分搅拌后定容(V_0), 取适量体积(V_1)使用烘干至恒重的玻璃纤维滤膜(Whatman GF/C, 孔径 0.45 μm , 重量为 W_0)过滤, 利用 0.5 mol/L 甲酸铵溶液去除滤膜样品中的遗留盐分, 分析滤膜样品以

获取 AOM 沉降量以及颗粒有机物(POM)、颗粒有机碳(POC)、颗粒态氮(PN)和总磷(TP)含量等数据。

AOM 中 POM 含量采用灼烧法测定。滤膜样品放置于 65 $^{\circ}\text{C}$ 环境下 48 h, 烘干至恒重(W_1), 恒重样品放置于马弗炉内 450 $^{\circ}\text{C}$ 环境下灼烧 6 h 后称重(W_2)。AOM 沉降量为: $M(\text{g}) = \frac{(W_1 - W_2)V_0}{V_1}$;

POM 沉降量为: $M(g) = \frac{(W_1 - W_2)V_0}{V_1}$ 。

AOM 中 POC 和 TN 含量利用同位素质谱仪(热电 EA Conflo IV+delta V Plus)进行测定。测试前,利用 M2637-A 型微孔滤膜(孔径 0.22 μm)过滤 AOM 混合液,滤膜样品干燥、研磨至粉末状。其中,POC 分析样品辅以酸化处理。样品 TP 含量使用磷钼蓝分光光度法测定。AOM、POM、POC、PN 和 TP 沉降通量采用如下公式计算。

$$F = \frac{M}{T \times S}$$

$$F_e = \frac{M \times f_e}{T \times S}$$

式中, F 为 AOM 沉降量,单位 $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$, M 为 AOM 干重(g), T 为沉降时间(d), S 为沉积物捕获器横截面积(m^2)。 F_e 为 AOM 中特定成分的沉降通量,单位 $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$, f_e 为衍生有机物中特定成分的百分含量。

1.4 数据处理

在分析各实验参数的空间差异时,分别利用 Shapiro-Wilk 和 Levene 方法对数据进行正态分布和齐性检验。结果表明,大多数数据或经对数转化后的数据均不能同时满足正态分布或方差齐性要求,同时考虑本研究中样本数量相对较少,故

采用非参数 Kruskal-Wallis 方法检验实验参数在站位之间的差异。利用 All pairwise 进行后续两两比较。此部分分析利用 R3.5.2 软件完成。

利用 Origin 2018 软件对 AOM 沉降量、营养物质沉降通量,POC、PN 和 TP 含量与距离进行非线性曲线拟合分析。

2 结果与分析

2.1 养殖衍生有机物(AOM)沉降量及其扩散特征

本次实验数据表明,各个站位在饲喂颗粒饲料状态下 AOM 沉降量高于投喂冰鲜饵料(图 2)。饲喂颗粒饲料时,实验区域 AOM 沉降量均值为 $563.66 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$,变化范围为 $434.73 \sim 806.70 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 。饲喂冰鲜饵料时,区域 AOM 沉降量均值为 $266.07 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$,变化范围为 $126.49 \sim 499.57 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 。

在两种典型饲喂方式下,AOM 沉降量在空间距离梯度上呈现较为一致的变化趋势。在距离养殖网箱 100 m 范围内,AOM 沉降量呈现自养殖网箱中心向外递减的趋势,此种下降趋势在 0~50 m 范围内最为显著。例如,在以颗粒饲料为饵料时,养殖网箱中心 AOM 沉降量为 $(558.60 \pm 139.60) \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$,50 m 处降低至 $(471.31 \pm 90.77) \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$,下降幅度约为 16%;100 m 处 AOM 沉降量为 $(434.73 \pm 97.52) \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$,下降幅度约为 22%。在饲喂冰鲜

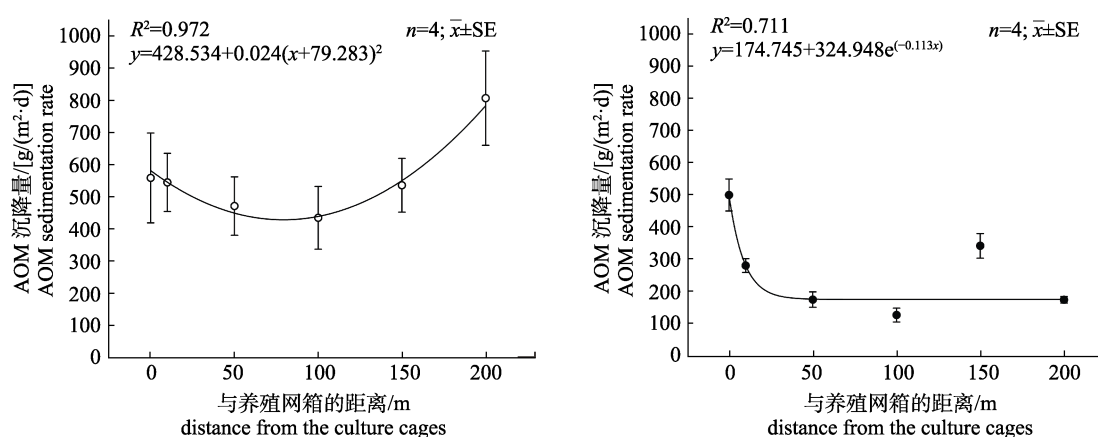


图 2 三沙湾养殖衍生有机物沉降量的空间分布

AOM: 养殖衍生有机物; 饲喂颗粒饲料(空心圆点)和冰鲜饵料(实心圆点)状态下, AOM 沉降量与距离关系拟合方程分别为 $y=y_0+a(x+b)^2$ 和 $y=y_0+ae^{-bx}$, 其中 y 为 AOM 沉降量, x 为距离, y_0 , a 和 b 为常数。

Fig. 2 Spatial variability of Aquaculture-derived Organic Matter (AOM) sedimentation rate in Sansha Bay Under the conditions of feeding pellet feed (hollow dot) and raw fishes (solid dot), the relationship between AOM sedimentation rate and sampling location could be shown as the equations $y=y_0+a(x+b)^2$ and $y=y_0+ae^{-bx}$, where y is the sedimentation rate of AOM, x is the distance, and y_0 , a and b are constants.

饵料时, AOM 沉降量的空间差异极显著($P<0.05$), 养殖网箱中心 AOM 沉降量显著较高, 为 499.57 ± 49.72 $\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$, 50 m 处降低至 174.47 ± 23.91 $\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$, 下降幅度为约 65%; 100 m 处 AOM 沉降量为 126.49 ± 21.58 $\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$, 下降幅度约为 75%。AOM 沉降量与距离的拟合关系如图 2 所示。

2.2 POM、POC、PN 和 TP 沉降通量及其空间差异

本次实验数据表明, 饲喂颗粒饲料时 POM、POC、PN 和 TP 沉降通量高于投喂冰鲜饵料(图 3)。

饲喂颗粒饲料时, 实验区域 POM 沉降通量均值为 (27.25 ± 2.43) $\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$, 变化范围为 20.65~37.63 $\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ 。饲喂冰鲜饵料时, 区域 POM 沉降通量均值为 (13.04 ± 1.62) $\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$, 变化范围为 4.36~23.84 $\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ 。饲喂颗粒饲料时, 区域 POC、PN 和 TP 沉降通量分别为 (6.03 ± 0.58) $\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ 、 (0.66 ± 0.06) $\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ 和 (0.39 ± 0.04) $\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ 。饲喂冰鲜饵料时, 区域 POC、PN 和 TP 沉降通量分别为 (3.57 ± 0.45) $\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ 、 (0.51 ± 0.06) $\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ 和 (0.22 ± 0.04) $\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ 。

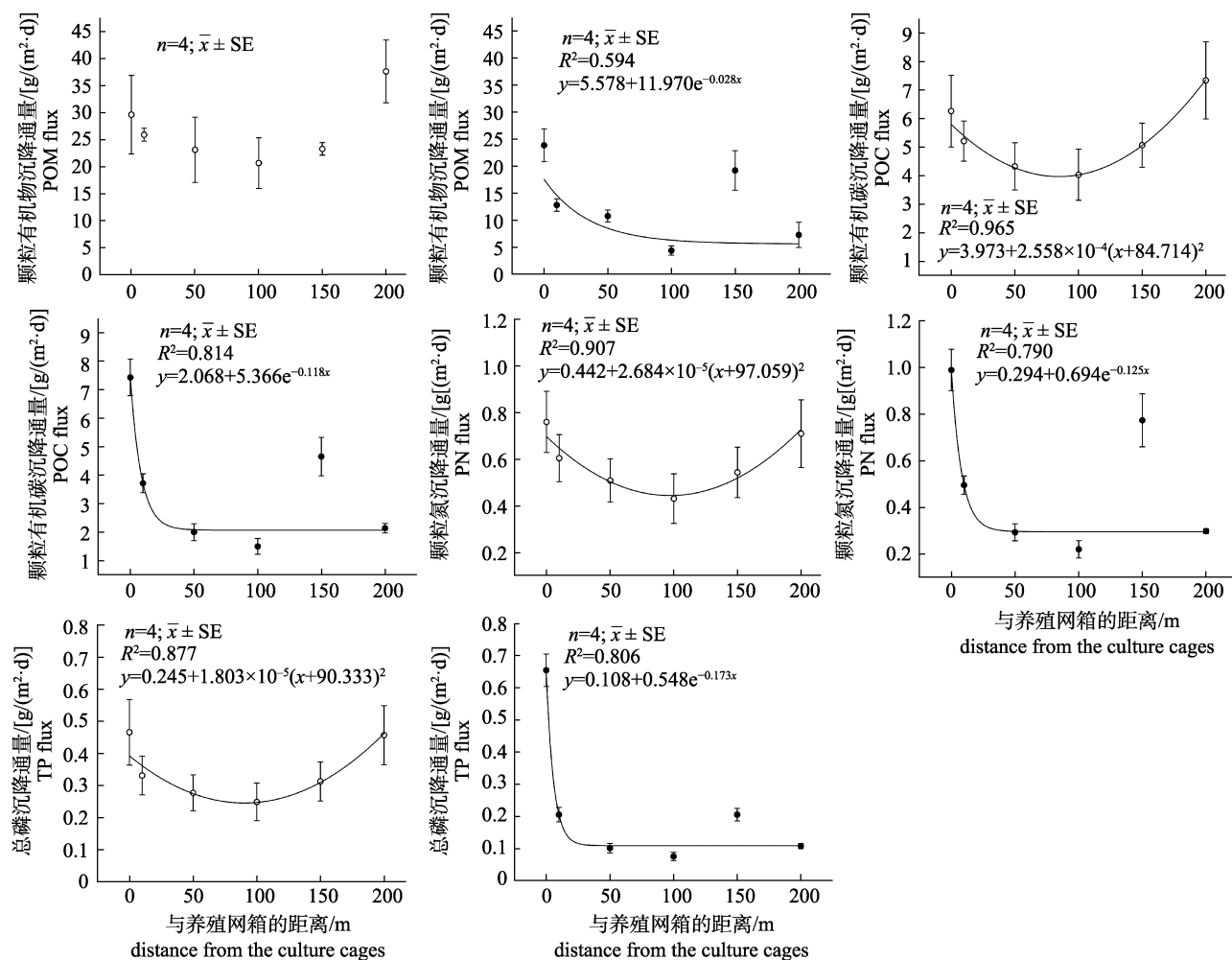


图 3 三沙湾颗粒有机物(POM)、颗粒有机碳(POC)、颗粒态氮(PN)和总磷(TP)沉降通量的空间变化
饲喂颗粒饲料(空心圆点)和冰鲜饵料(实心圆点)状态下沉降通量与距离拟合方程分别为 $y=y_0+a(x+b)^2$
和 $y=y_0+ae^{-bx}$, 其中 y 为 POM、POC、PN 和 TP 沉降通量, x 为与养殖网箱的距离, y_0 、 a 和 b 为常数。

饲喂颗粒饲料状态下 POM 沉降通量与距离关系未能有效拟合。

Fig. 3 Spatial variability of particulate organic matter (POM), particulate organic carbon (POC), particulate nitrogen (PN) and total phosphorus (TP) fluxes in Sansha Bay
Under the condition of feeding pellet feed (hollow dot) and raw fishes (solid dot), the relationship between POC, PN and TP fluxes and spatial extent could be shown as the equations $y=y_0+a(x+b)^2$ and $y=y_0+ae^{-bx}$, respectively, where y represents POC, PN and TP fluxes, x represents the distance from the culture cages, and y_0 , a and b are constants. The relationship between POM flux and sampling location under the circumstance of feeding pellet feed could not be fitted.

在饲喂颗粒饲料和冰鲜饵料两种情形下, POM、POC、PN 和 TP 沉降通量均呈现距离养殖网箱 0~100 m 范围内下降、100~200 m 范围内升高的空间变化趋势。在饲喂颗粒饲料时, 养殖网箱中心 POM、POC、PN 和 TP 沉降通量分别为 $(29.60\pm 7.28) \text{ g}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ 、 $(6.27\pm 1.26) \text{ g}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ 、 $(0.76\pm 0.13) \text{ g}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ 和 $(0.47\pm 0.10) \text{ g}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$, 至 100 m 处沉降通量分别下降至 $(20.65\pm 4.67) \text{ g}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ 、 $(4.04\pm 0.90) \text{ g}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ 、 $(0.43\pm 0.11) \text{ g}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ 和 $(0.25\pm 0.06) \text{ g}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ 。在饲喂冰鲜饵料时, 各参数的空间差异极显著($P<0.01$, 表 1)。养殖网箱中心 POM、POC、PN 和 TP 沉降通量分别为 $(23.84\pm 3.02) \text{ g}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ 、 $(7.43\pm 0.64) \text{ g}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ 、 $(0.99\pm 0.09) \text{ g}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ 和 $(0.66\pm 0.05) \text{ g}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$, 至 100 m 处沉降通量分别下降至 $(4.36\pm 0.87) \text{ g}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ 、 $(1.50\pm 0.28) \text{ g}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ 、 $(0.22\pm 0.04) \text{ g}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ 和 $(0.07\pm 0.01) \text{ g}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ 。POM、POC、PN 和 TP 沉降通量与扩散距离的拟合关系如图 3 所示。

2.3 POC、PN 和 TP 含量的空间差异

在三沙湾内, 饲喂冰鲜饵料时 AOM 中 POC、PN 和 TP 的含量高于投喂颗粒饲料, 此种差异在各个采样站位中均较为一致(图 4)。在饲喂冰鲜饵料状态下, AOM 中 POC、PN 和 TP 含量分别为

表 1 三沙湾营养物质沉降通量空间差异检验的 P 值
Tab. 1 P values for the spatial difference test of particulate organic matter (POM), particulate organic carbon (POC), particulate nitrogen (PN) and total phosphorus (TP) fluxes in Sansha Bay

指标 item	饲喂颗粒饲料 feeding pelleted feed	饲喂冰鲜饵料 feeding raw fishes
颗粒有机物通量 POM flux	0.355	0.002
颗粒有机碳通量 POC flux	0.475	0.001
颗粒态氮通量 PN flux	0.420	0.001
总磷通量 TP flux	0.385	0.001

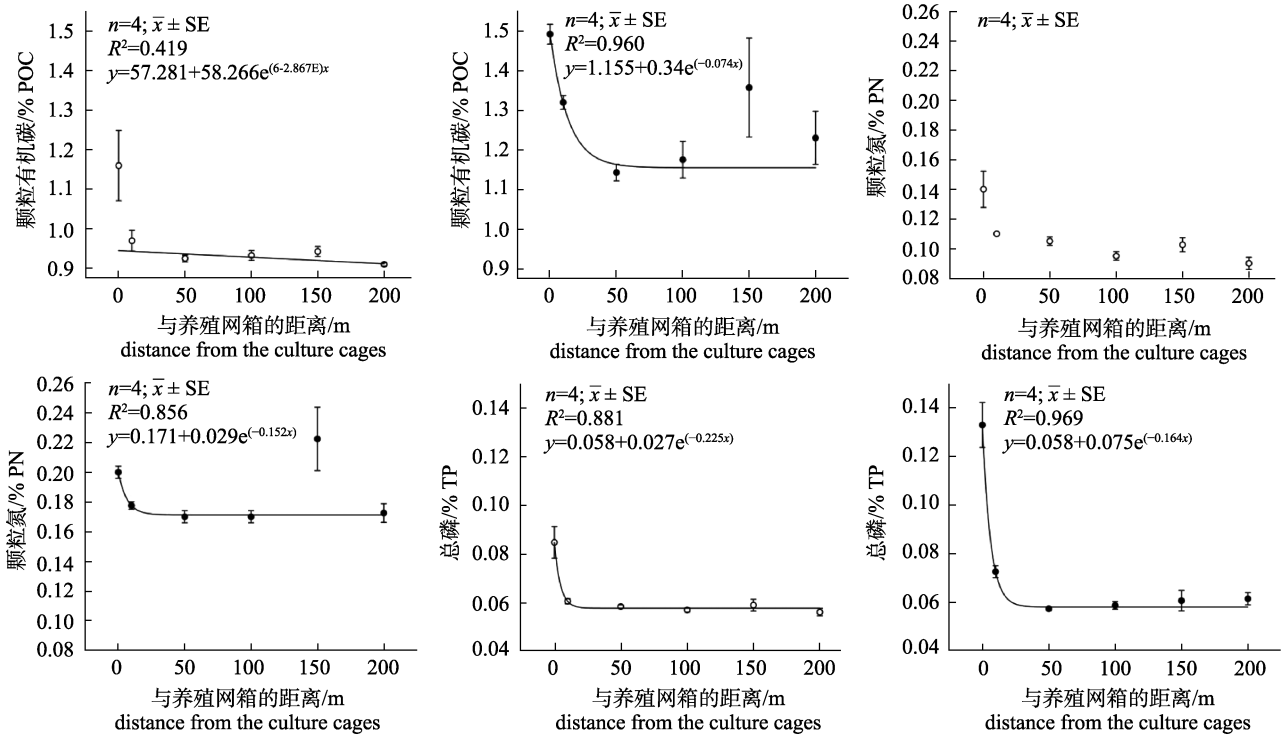


图 4 三沙湾养殖衍生有机物中营养物质颗粒有机碳(POC)、颗粒态氮(PN)和总磷(TP)含量的空间差异
饲喂颗粒饲料(空心圆点)和冰鲜饵料(实心圆点)两种情形下, POC、PN 和 TP 含量与距离关系拟合方程为 $y=y_0+ae^{(-bx)}$, 其中 y 为 POC、PN 或 TP 含量, x 表示与养殖网箱的距离, y_0 , a 和 b 为常数; 饲喂颗粒饲料状态下 PN 含量与距离关系未能有效拟合。

Fig. 4 Spatial variability of particulate organic carbon (POC), particulate nitrogen (PN) and total phosphorus (TP) contents in AOM in Sansha Bay

Under the conditions of feeding pellet feed (open circle) and raw fishes (solid circle), the relationship between POC, PN and TP content in AOM and sampling location could be shown as the equation $y=y_0+ae^{(-bx)}$, where y represents POC, PN and TP contents, x represents the distance from the culture cages, y_0 , a and b are constants. The relationship between PN contents and sampling location under the circumstance of feeding pellet feed could not be fitted.

1.29%、0.19%和 0.07%。在饲喂颗粒饲料状态下,三者含量分别为 0.97%、0.11%和 0.06%。

在饲喂颗粒饲料和冰鲜饵料两种情形下,AOM 中 POC、PN 和 TP 含量均存在较为显著的空间变化(表 2),营养物质含量通常在养殖网箱中心显著较高,50 m 后无显著变化。在饲喂颗粒饲料时,养殖网箱中心 AOM 中 POC、PN 和 TP 含量分别为 1.16%、0.14%和 0.08%,50 m 处各参数含量分别降低为 0.93%、0.11%和 0.06%。在饲喂冰鲜饵料时,养殖网箱中心 AOM 中 POC、PN 和 TP 含量分别为 1.49%、0.20%和 0.13%,50 m 处各参数含量分别降低为 1.14%、0.17%和 0.06%。

表 2 三沙湾养殖衍生有机物中 POC、PN 和 TP 含量空间差异检验的 P 值
Tab. 2 P values for spatial difference test of POC, PN and TP contents in aquaculture-derived organic matters in Sansha Bay

指标 item	饲喂颗粒饲料 feeding pellet feed group	饲喂冰鲜饵料 feeding raw fishes group
颗粒有机碳含量 POC content	0.019	0.018
颗粒态氮含量 PN content	0.004	0.006
总磷含量 TP content	0.017	0.007

2.4 AOM 的 C/N、C/P 和 N/P 变化

在三沙湾内,饲喂颗粒饲料时 AOM 的 C/N、C/P 和 N/P 变化范围分别为 9.57~12.27、35.58~42.44 和 3.46~4.05,饲喂冰鲜饵料时三者变化范围为 7.07~8.09、29.35~57.90 和 3.34~8.21。两种饲喂状态下 AOM 样品 C/N 和 C/P 在空间距离梯度上均呈现自养殖网箱中心向外递增的趋势(表 3)。

3 讨论

3.1 三沙湾网箱养殖 AOM 沉降量及营养物质的沉降通量

本研究的原位实验数据显示,在饲喂颗粒饲料和冰鲜饵料两种状态下,网箱养殖中心沉降量分别为 558.60 g/(m²·d)和 499.57 g/(m²·d) (图 2)。三沙湾网箱养殖中心区域 AOM 的此种沉降水平与国内其他养殖区域已有报道数据较为相似,如

表 3 三沙湾内不同采样站位养殖衍生有机物的 C/N、C/P 和 N/P
Tab. 3 C/N、C/P and N/P of aquaculture-derived organic matters on different sampling sites in Sansha Bay
n=4; $\bar{x}\pm SD$

饲料类型 feed style	站位 station	指标 index		
		C/N	C/P	N/P
颗粒饲料 pellet feed	1	9.57±0.66 ^b	35.58±4.08 ^a	3.72±0.39 ^a
	2	10.24±0.56 ^a	41.56±3.21 ^a	4.05±0.11 ^a
	3	10.18±0.54 ^a	41.09±1.52 ^a	4.04±0.25 ^a
	4	11.21±0.69 ^a	42.44±1.34 ^a	3.79±0.12 ^a
	5	10.98±1.12 ^a	41.64±3.53 ^a	3.80±0.14 ^a
	6	12.27±1.37 ^a	42.15±2.16 ^a	3.46±0.33 ^b
冰鲜饵料 raw fishes	1	8.79±0.11 ^a	29.35±3.42 ^b	3.34±0.38 ^b
	2	8.76±0.23 ^a	47.14±1.95 ^b	5.38±0.33 ^b
	3	7.94±0.59 ^a	51.48±0.52 ^a	6.51±0.51 ^a
	4	7.94±0.98 ^a	51.62±1.74 ^a	6.56±0.65 ^a
	5	7.07±0.51 ^a	57.90±5.64 ^a	8.21±0.90 ^a
	6	8.42±1.04 ^a	51.67±1.87 ^a	6.20±0.69 ^a

注:不同字母上标表示组间存在显著差异(P<0.05).
Note: Different superscript letters indicate significant differences (P<0.05) by a post hoc test (Behrens-Fisher test) with Bonferroni correction.

山东荣成爱伦湾养殖网箱内 AOM 沉降量为 831.55 g/(m²·d)^[15],澎湖列岛马公湾(Magong Bay)养殖网箱内最大 AOM 沉降量为 318 g/(m²·d)^[16]。然而,三沙湾网箱养殖中心区域 AOM 沉降量高于国外相关报道结果,如地中海三处(分别位于西班牙、意大利和希腊沿岸)网箱养殖中心区域内最大 AOM 沉降量仅为 64 g/(m²·d)^[17],加拿大不列颠哥伦比亚省布劳顿半岛(Broughton Archipelago)沿岸网箱养殖中心水域沉降量为 18.48 g/(m²·d)^[18],菲律宾沿岸养殖网箱中心区最大沉降量为 190 g/(m²·d)^[19]。

在自然条件下利用沉积物捕获器收集的样品中,不可避免会存在一定数量非 AOM 物质。特定水文动力条件下较强的再悬浮作用可能是本研究及国内其他文献报道 AOM 沉降量高于国外的原因之一,此种可能性在其他研究中也曾被提及^[16]。为减少非 AOM 物质在收集样品中的比重,本研究将沉积物捕获器布设于海底以上 2 m 处,以减少沉积物再悬浮的影响。网箱养殖引发的 AOM 沉降量与养殖密度和养殖物种等关系也较为密切。

以养殖密度为例,地中海沿岸网箱养殖区的养殖密度通常较小,仅约为数百吨^[17,20]。相对而言,本研究及国内其他相关研究实验区域内的养殖规模较大。不同养殖鱼类物种生物学特性各异,养殖品种的不同也应是 AOM 沉降量差异的原因之一^[17]。地中海沿岸主要养殖鱼类为黄鳍鲷(*Sparus arrata*)和欧洲舌齿鲈(*Dicentrarchus labrax*),大西洋沿岸主要养殖鱼类为大西洋鲑(*Salmo salar*),而中国主要海水养殖鱼类为大黄鱼和花鲈等物种。

在三沙湾养殖网箱中心区域内,饲喂颗粒饲料状态下 POC、PN 和 TP 的沉降通量分别为 $(6.27 \pm 1.26) \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 、 $(0.76 \pm 0.13) \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 和 $(0.47 \pm 0.10) \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 。在饲喂冰鲜饵料时,三者沉降通量分别为 $(7.43 \pm 0.64) \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 、 $(0.99 \pm 0.09) \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 和 $(0.66 \pm 0.51) \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ (图 3)。此种营养物质沉降水平低于山东荣成爱伦湾报道的结果^[15],和地中海沿岸的记录数据相当^[17]。在多数情况下,AOM 沉降量与营养物质沉降通量呈正相关关系,相关程度与养殖使用饲料性质、经济物种的生物学特征等因素相关。目前国内有关 AOM 沉降量与有机物沉降通量关系的研究较少,相关研究的开展对于理解网箱养殖活动的环境效应具有重要意义。

3.2 三沙湾网箱养殖 AOM 的空间扩散特征

三沙湾网箱养殖水域内 AOM 沉降量及营养物质沉降通量在距离养殖网箱 100 m 的空间范围内呈现下降趋势,此种趋势在饲喂冰鲜饵料时最为显著(表 1)。在距网箱 100~200 m 范围内,AOM 沉降量总体呈现一定的升高趋势,部分实验情形下距离网箱最远采样站位(200 m 处)中的沉降水平已超过养殖网箱中心水域。此种沉降特征表明,三沙湾内 AOM 的扩散范围应在 100 m 范围之内。100~200 m 范围之间较高的沉降量可能源于陆源颗粒物的输入。本次实验区域距离陆地较近(约 1.3 km),且两次实验阶段均出现较长时间降雨,雨水冲刷引发较强地表径流可能显著增加陆源颗粒物的入海通量。

三沙湾内 AOM 沉降量、营养物质的沉降通量在距离养殖网箱 50 m 范围内显著降低,此现象表明养殖网箱周围 0~50 m 的范围是网箱养殖影

响最为主要的区域。在自然环境中,颗粒有机物的来源较为多样。在多数情况下,AOM 中有机物含量高于陆源颗粒物。因此,本研究揭示的 POC、PN 和 TP 等营养物质含量在距离养殖网箱 50 m 范围以内显著降低,50 m 以外趋于均质的现象(图 4)也印证了上述结论。综上所述,结合 AOM 沉降量空间扩散特征得出的影响范围为 100 m 的结论,认为三沙湾内 AOM 对于环境影响的边界应位于距离养殖网箱 50~100 m 范围之内。尽管两种饲喂方式下 AOM 的扩散范围相似,但饲喂颗粒饲料状态下 AOM 沉降量在影响范围之内更为均质。

有关网箱养殖 AOM 扩散范围的研究结论存在差异。如地中海地区的西班牙、意大利和希腊沿岸网箱养殖区内的相关研究表明,水域内 AOM 的扩散范围仅为 40 m^[17]。马公湾网箱养殖区内 AOM 的扩散范围可达 500 m^[16]。因本研究区域内水体较浅,水域中 50~100 m 的扩散范围相对较大。此种现象可能由多种因素共同作用而成,例如区域内近底层流速较快,主导流向上最高流速可达 0.22 m/s,此种水文动力条件有利于增加 AOM 的扩散范围。此外,养殖网箱周围可能聚集较多数量的野生鱼类^[17,21],鱼类摄食来自养殖网箱的 AOM,未经充分消化利用的 AOM 以粪便的形式被转移至距网箱更远的距离排放,从而增大 AOM 在养殖水域内的扩散范围^[21]。特定区域内野生鱼类对 AOM 的摄食可维持在较高强度,例如地中海部分养殖区域内此种摄食比例可达 80%^[22]。本次实验阶段(6 月)内鱼类数量和多样性均较为丰富,最高栖息密度可达 $37.16 \times 10^3 \text{ ind}/\text{km}^2$ ^[23]。因此,区域内大量野生鱼类的摄食作用应是本研究揭示的 AOM 扩散范围较广的原因之一。此外,沉积物的再悬浮作用也可进一步增加 AOM 的扩散范围^[20]。

本研究所获 AOM 扩散范围的结论较为初步。首先,在已有相关研究中,用于判断扩散范围的标准各异,通常包括利用沉积物生化指标、生物群落结构特征、AOM 沉降量和天然示踪剂($\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$)等技术方法。已有研究表明,针对同一区域采用不同判定方法得出的结论存在一定差异^[24]。因此,后续研究宜进行不同方法之间的比

较。本研究中沉积物捕获器置于距海底 2 m 的高度收集 AOM 样品, 此种设计可较大程度地避免再悬浮的影响^[25]。因此, 本研究依据 AOM 沉降特征判定的养殖活动影响范围可能略小于实际范围。

3.3 饲喂颗粒饲料与冰鲜饵料状态下 AOM 沉降特征差异的成因

本研究结论表明, 饲喂颗粒饲料时 AOM 沉降量显著高于饲喂冰鲜饵料, 两者均值分别为 563.66 g/(m²·d) 和 266.07 g/(m²·d), 前者约为后者 2 倍(图 2)。营养物质(POM、POC、PN 和 TP)沉降通量在饲喂两种饲料状态之间的差异与之相似(图 3)。然而, 饲喂冰鲜饵料时 AOM 中 POC、PN 和 TP 含量却高于投喂颗粒饲料(图 4)。因此, 饲喂冰鲜饵料时营养物质沉降通量较小的原因在于其 AOM 沉降量较少。

饲喂颗粒饲料时 AOM 沉降量较多的原因较为复杂。此种现象可能与两种饲料的投喂量相关, 目前养殖过程中冰鲜饵料的饲喂量可能较为适中, 而颗粒饲料的投喂量可能已超实际需求, 说明针对颗粒饲料进行限制性饲喂的研究意义较大。网箱养殖 AOM 主要由残饵和养殖生物排泄物组成, 目前大黄鱼饲喂的颗粒饲料多为浮性饲料, 饲喂过程中产生的残饵应较少。部分已有研究也表明, 养殖未利用残饵量相对较少(<1%~2%投喂饲料总量^[17])。因此, 三沙湾内饲喂颗粒饲料状态下网箱养殖 AOM 沉降量较高的原因可能为鱼类摄食饲料后产生较多的排泄物, 表明目前三沙湾大黄鱼颗粒饲料的利用效率有待进一步提升。

3.4 三沙湾养殖衍生有机物沉降的生态效应

本研究结果表明, 三沙湾内网箱养殖 AOM 的沉降量和营养物质沉降通量均保持在较高水平。因此, 长期的网箱养殖可能改变局部区域内主要生源要素的比例, 进而影响水域生态系统中生物对于营养元素的利用以及主要生源要素的生物地球化学行为。例如, AOM 主要由残饵、粪便及鱼类分泌物组成, 通常其中的 P 含量较高而 N 含量较少^[17, 20]。在三沙湾内, 饲喂颗粒饲料和冰鲜饵料时 AOM 样品 N/P 分别为 3.46~4.05 和 7.07~8.09(表 3), 此种比例显著有别于自然水体环境(Redfield 比例为 16)。AOM 中的氮缺乏可能

制约水体中可被浮游植物直接利用的溶解态氮的浓度, 此种生态影响在其他已有相关研究中也曾被提及^[26]。

网箱养殖 AOM 中较大比重的有机碳、有机氮和有机磷均以颗粒态形式释放。以大西洋鲑网箱养殖为例, 三者比例分别为 29%~71%^[27]、59%~66%^[28]和 49%~51%^[29]。因此, 本研究所获 AOM 沉降量和营养物质沉降通量等数据较大程度地代表了来源于养殖网箱颗粒有机物的沉降特征。颗粒态物质在养殖水域快速沉降, 进而改变底栖生境并造成底栖生物群落结构的变化。因此, 本研究的相关结论可作为后续底栖生态环境研究的重要参考。然而, 网箱养殖 AOM 的成分和扩散特点在不同养殖品种和区域之间存在差异^[30]。因此, 后续应针对三沙湾网箱养殖的目标物种大黄鱼进行更为细致的研究, 以更为科学、客观地评估养殖活动的生态环境效应。

4 研究结论及其对三沙湾内网箱养殖生产的意义

大黄鱼是近年来中国养殖产量最大的海水鱼类, 其全国总产量的 70% 来源于三沙湾。本研究首次针对三沙湾内大黄鱼养殖 AOM 沉降特征开展了较为系统的研究, 获得如下主要结论: (1) 三沙湾内大黄鱼网箱养殖 AOM 沉降量与国内其他相关区域大致相当, 饲喂颗粒饲料状态下 AOM 沉降量和营养物质沉降通量较高, 约为使用冰鲜饵料状态下的 2 倍。(2) 网箱养殖 AOM 的影响范围为 50~100 m。(3) 饲喂冰鲜饵料状态下营养物质沉降通量较小的原因在于其 AOM 绝对沉降量较少。

三沙湾内颗粒饲料饲喂状态下营养物质沉降通量较大的原因在于此种饲喂方式下产生较高的 AOM 沉降量, 此现象说明区域养殖过程中可能存在颗粒饲料过度投喂、饵料利用效率较低等问题, 围绕此类问题的针对性研究对于减缓区域内养殖活动的环境影响较具意义。尽管饲喂颗粒饲料和冰鲜饵料两种情形下 AOM 的扩散范围相似, 但饲喂颗粒饲料时 AOM 在影响范围之内更为均质。因此, 饲喂冰鲜饵料状态下的 AOM 沉降问题更易调控。

参考文献:

- [1] The Ministry of Agriculture Fishery and Fishery Administration. China Fishery Statistics Yearbook 2019[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2019. [农业农村部渔业渔政管理局. 2019 中国渔业年鉴[M]. 北京: 中国农业出版社, 2019.]
- [2] Yokoyama H, Abo K, Ishihi Y. Quantifying aquaculture-derived organic matter in the sediment in and around a coastal fish farm using stable carbon and nitrogen isotope ratios[J]. *Aquaculture*, 2006, 254(1-4): 411-425.
- [3] Jiang Z J, Fang J G, Wang G H, et al. Identification of aquaculture-derived organic matter in the sediment associated with coastal fish farming by stable carbon and nitrogen isotopes[J]. *Journal of Environmental Science and Engineering*, 2012, 1(2): 142-149.
- [4] Ningde Municipal Statistical Bureau. Ningde Statistical Yearbook 2018[R]. 2018. [宁德市统计局. 宁德市统计年鉴 2018[R]. 2018.]
- [5] Wu F, Guo W D, Zheng P R, et al. Distribution of phosphorus species in sediments of maricultural waters in Sandu Bay [J]. *Marine Environmental Science*, 2005, 24(4): 24-27. [吴芳, 郭卫东, 郑佩如, 等. 三都澳养殖海域沉积物中 P 的形态分布特征[J]. *海洋环境科学*, 2005, 24(4): 24-27.]
- [6] Zhou J. Impacts of mariculture practices on the temporal distribution of macrobenthos in Sandu Bay, South China[J]. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 2012, 30(3): 388-396.
- [7] Ji W W, Zhou J. Community structure of macrobenthos in response to mariculture practices in Sandu Bay[J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2012, 19(3): 491-499. [纪炜炜, 周进. 三都澳大型底栖动物群落结构及其对水产养殖的响应[J]. *中国水产科学*, 2012, 19(3): 491-499.]
- [8] Wei Z L. Studies on the strategy of bioremediation with macroalgae cultivation in an intensive mariculture Yantian bay, China[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2016. [韦章良. 三沙湾盐田港养殖海域大型海藻生态修复策略研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2016.]
- [9] Shao L, Xing X L, Zhou J, et al. Ecological effects of the caged-fish and kelp cultures in semi-enclosed bay: evidence from diatom assemblages and environmental variables[J]. *Indian Journal of Marine Sciences*, 2018, 47(2): 325-335.
- [10] Tang M. Environmental impacts of mariculture on sedimentary variables and polychaete community structure in Sansha Bay, Fujian Province[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2017. [唐盟. 福建省三沙湾养殖活动对底栖环境及多毛纲动物群落结构的影响[D]. 上海: 上海海洋大学, 2017.]
- [11] Tang M, Zhou J. Impacts of cage farming on polychaete community in Sansha Bay, Fujian Province[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2017, 48(3): 543-552. [唐盟, 周进. 福建三沙湾网箱养殖对多毛纲动物群落结构的影响[J]. *海洋与湖沼*, 2017, 48(3): 543-552.]
- [12] Peng G H, Fu J, Ma Z L, et al. Effects of mariculture activities on benthic environmental based on analysis of three biotic indices in Sansha Bay[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2018, 40(4): 106-118. [彭广海, 付婧, 马增岭, 等. 基于3种生物指数的三沙湾养殖活动底栖环境效应研究[J]. *海洋学报*, 2018, 40(4): 106-118.]
- [13] Wang N, Ji W W, Fu J, et al. Community structure of macrobenthos in summer and its relationship with the mariculture in Sansha Bay[J]. *Marine Fisheries*, 2019, 42(4): 408-420. [王楠, 纪炜炜, 付婧, 等. 三沙湾夏季大型底栖动物群落结构及其和水产养殖的关系[J]. *海洋渔业*, 2019, 41(4): 408-420.]
- [14] Yokoyama H, Takashi T, Ishihi Y, et al. Effects of restricted feeding on growth of red sea bream and sedimentation of aquaculture wastes[J]. *Aquaculture*, 2009, 286(1-2): 80-88.
- [15] Ge C Z, Fang J G. The fluxes of setting particulate matter in inside and outside of the large aquaculture net cages in sea in summer[J]. *China Environmental Science*, 2006, 26(Suppl.): 106-109. [葛长宇, 方建光. 夏季海水养殖区大型网箱内外沉降颗粒物通量[J]. *中国环境科学*, 2006, 26(增刊): 106-109.]
- [16] Huang Y C A, Huang S C, Hsieh H J, et al. Changes in sedimentation, sediment characteristics, and benthic macrofaunal assemblages around marine cage culture under seasonal monsoon scales in a shallow-water bay in Taiwan[J]. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 2012, 422-423: 55-63.
- [17] Holmer M, Marba N, Diaz-Almela E, et al. Sedimentation of organic matter from fish farms in oligotrophic Mediterranean assessed through bulk and stable isotope ($\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$) analyses[J]. *Aquaculture*, 2007, 262(2-4): 268-280.
- [18] Sutherland T F, Martin A J, Levings C D. Characterization of suspended particulate matter surrounding a salmonid net-pen in the Broughton Archipelago, British Columbia[J]. *Journal of Marine Science*, 2001, 58(2): 404-410.
- [19] Villanueva R D, Yap H T, Montañó M N E. Survivorship of coral juveniles in a fish farm environment[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2005, 51(5-7): 580-589.
- [20] Sarà G, Scilipoti D, Mazzola A, et al. Effects of fish farming waste to sedimentary and particulate organic matter in a southern Mediterranean area (Gulf of Castellammare, Sicily): a multiple stable isotope study ($\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$)[J]. *Aquaculture*, 2004, 234(1-4): 199-213.
- [21] Dempster T, Sanchez-Jerez P, Bayle-Sempere J T, et al. Attraction of wild fish to sea-cage farms in the south-western Mediterranean Sea: spatial and short-term temporal variability[J]. *Marine Ecology Progress Series*, 2002, 242(1): 237-252.
- [22] Vita R, Marín A, Madrid J A, et al. Effects of wild fishes on waste exportation from a Mediterranean fish farm[J]. *Marine Ecology Progress Series*, 2004, 277: 253-261.
- [23] Ye J Q. Resource and biological characteristics of large yellow croaker (*Larimichthys crocea*) in Guanjingyang[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2012. [叶金清. 官井洋大黄鱼的资源和生物学特征[D]. 上海: 上海海洋大学, 2012.]
- [24] Sanz-Lázaro C, Belando M D, Marín-Guirao L, et al. Relationship between sedimentation rates and benthic impact on Maërl beds derived from fish farming in the Mediterranean

- [J]. Marine Environmental Research, 2011, 71(1): 22-30.
- [25] Gacia E, Granata T C, Duarte C M. An approach to measurement of particle flux and sediment retention within seagrass (*Posidonia oceanica*) meadows[J]. Aquatic Botany, 1999, 65(1-4): 255-268.
- [26] Zheng Q H. Physical and chemical variations and eutrophication status in important aquaculture waters of Sansha Bay[J]. Journal of Applied Oceanography, 2017, 36(1): 24-30. [郑钦华. 三沙湾重点水产养殖水域理化变化特征及富营养化状况[J]. 应用海洋学学报, 2017, 36(1): 24-30.]
- [27] Hall P O J, Anderson L G, Holby O, et al. Chemical fluxes and mass balances in a marine fish cage farm. I. Carbon[J]. Marine Ecology Progress Series, 1990, 61(1-2): 61-73.
- [28] Holby O, Hall P O J. Chemical fluxes and mass balances in a marine fish cage farm. II. Phosphorus[J]. Marine Ecology Progress Series, 1991, 70(3): 263-272.
- [29] Hall P O J, Holby O, Kollberg S, et al. Chemical fluxes and mass balances in a marine fish cage farm. 4. Nitrogen[J]. Marine Ecology Progress Series, 1992, 89(1): 81-91.
- [30] Cromey C J, Black K D. "Modelling the impacts of finfish aquaculture." Environmental effects of marine finfish aquaculture[M]. Berlin: Springer-Verlag, 2005: 129-155.

Sedimentation characteristics of aquaculture-derived organic matter from a large yellow croaker (*Larimichthys crocea*) cage farm in Sansha Bay

HUANG Weiqiang^{1,2}, JI Weiwei¹, FU Jing¹, MA Zengling², ZHOU Jin¹

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

2. College of Life and Environment, Wenzhou University, Wenzhou 325035, China

Abstract: To clarify the sedimentation characteristics of aquaculture-derived organic matter (AOM) from a large yellow croaker (*Larimichthys crocea*) cage farm in Sansha Bay, AOM samples in a sampling gradient (0–200 m away from the culture cage) were collected with sedimentation traps under two typical feeding conditions (commercial feed and raw fish). These samples were used to analyze sedimentation rate, particle organic matter (POM: particulate organic matter; POC: particulate organic carbon; PN: particulate nitrogen; TP: total phosphorus) fluxes, and their spatial expansion in this study. The sedimentation rate of AOM was $(563.66 \pm 119.18) \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ when commercial pellets were used as feed, which was significantly higher than that when raw fish was used. Particulate organic matter (POM), POC, PN, and TP fluxes were much higher when using commercial feed than raw fish, at $(27.25 \pm 2.43) \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$, $(6.03 \pm 0.58) \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$, $(0.66 \pm 0.06) \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$, and $(0.39 \pm 0.04) \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ in the former experimental condition, and at $(13.04 \pm 1.62) \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$, $(3.57 \pm 0.45) \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$, $(0.51 \pm 0.06) \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$, and $(0.22 \pm 0.04) \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ in the latter situation, respectively. Particle organic matter fluxes and AOM sedimentation rates showed decreasing tendencies from 0–100 m away from the fish cage, with a particularly strong decline in the raw fish treatment. The percentage of particle organic matter in AOM also exhibited spatial variability, declining in the region from the fish cages to 50 m downstream. In summary, the environmental effects of a cage farm in Sansha Bay were much remarked when commercial pellets were used as feed. Environmental impacts derived from using both commercial pellets and raw fish were restricted to an area 50–100 m away from fish cages. The occurrence of conspicuous environmental impacts due to using commercial feeds was associated with a greater AOM sedimentation rate, and thus, studies on restricted feeding and on the efficiency of fish feed are essential to alleviate the negative impacts of aquaculture in the area.

Key words: Sansha Bay; cage farm; aquaculture-derived organic matter; sedimentation rate; spatial extent

Corresponding author: ZHOU Jin. E-mail: zhouj@ecsf.ac.cn