

DOI: 10.11758/yykxjz.20170107001

http://www.yykxjz.cn/

李敏, 张继红, 吴文广, 刘毅, 王巍, 蔺凡, 马莎, 杨艳云. 獐子岛邻近海域悬浮颗粒物的时空分布特性. 渔业科学进展, 2018, 39(1): 54-63

Li M, Zhang JH, Wu WG, Liu Y, Wang W, Lin F, Ma S, Yang YY. The spatial-temporal distribution of the suspended particulate matter in the water adjacent to the Zhangzidao Island. Progress in Fishery Sciences, 2018, 39(1): 54-63

獐子岛邻近海域悬浮颗粒物的时空分布特性*

李敏^{1,3} 张继红^{2,3}① 吴文广³ 刘毅³
王巍³ 蔺凡³ 马莎^{1,3} 杨艳云³

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

摘要 根据2015年秋季(10月)和2016年冬季(1月)、春季(4月)、夏季(7月)4个航次的调查研究,分析了獐子岛养殖海域表、底层水体中总悬浮颗粒物(TPM)、颗粒有机物(POM)和颗粒有机物比例(PCOM, %)的时空分布特征,结合POM与叶绿素a(Chl-a)及环境因子的相关性分析,探讨了悬浮颗粒物的影响因素及其与虾夷扇贝(*Patinopecten yessoensis*)底播养殖之间的潜在联系。结果显示,獐子岛海域TPM和POM的浓度变化范围分别为16.76~97.54、2.20~17.20 mg/L,年平均浓度分别为(31.65±9.58)、(6.97±2.08) mg/L。PCOM值的变化范围为8.69%~37.09%,平均值为(22.25±4.18)%。TPM浓度的季节变化趋势为秋季>春季>夏季>冬季,最大值出现在秋季表层。而POM和PCOM的最高值出现在夏季,冬季的值最低。POM与TPM的平面分布趋势相似,大部分海域的平面分布比较均匀;春、夏季POM的分布呈现中部略高、四周略低的特点,秋、冬季与之相反;夏季底层显著高于表层($P<0.01$),其他季节表、底层无显著差异($P>0.05$)。4个季节中,獐子岛海域的POM与Chl-a的含量呈极显著正相关关系($P<0.01$);其中,春季底层和夏季表层的POM与Chl-a均存在极显著正相关关系($P<0.01$)。另外,只有夏季表层POM与盐度之间存在显著负相关关系($P<0.05$),说明夏季陆源输入对该海域的悬浮颗粒有机物有显著影响。

关键词 獐子岛; 总悬浮颗粒物; 颗粒有机物; 时空分布特征

中图分类号 S917 **文献标识码** A **文章编号** 2095-9869(2018)01-0054-10

悬浮颗粒物包括浮游植物、浮游动物及其碎屑、微生物、无机颗粒等,是海水的重要组成成分,是各种营养盐的重要载体(逢勇等, 2008)。悬浮颗粒物不仅是海洋环境质量的评价指标,而且颗粒有机物(POM)也是滤食性贝类的主要食物来源,是海洋食物

链的物质基础(刘占飞等, 2000)。海水中悬浮颗粒物的数量和质量直接影响滤食性生物的滤食和生理反应,是制约滤食性生物的重要因素(匡世焕等, 1996),因此,了解悬浮颗粒物的时空分布特性对于滤食性贝类养殖活动具有重要的指导作用。

* 中国水产科学研究院基本科研业务费(2014A01YY01)、国家“十二五”支撑计划(2011BAD13B06)和国家自然科学基金项目(41276172)共同资助[This work was supported by the Fundamental Research Funds for the Chinese Academy of Fishery Sciences(2014A01YY01), National Science and Technology Pillar Program during the 12th Five-year Plan Period (2011BAD13B06), and National Natural Science Foundation of China (41276172)]. 李敏, E-mail: 1464365904@qq.com

① 通讯作者: 张继红, 研究员, E-mail: zhangjh@ysfri.ac.cn

收稿日期: 2017-01-07, 收修改稿日期: 2017-02-10

獐子岛邻近海域是我国虾夷扇贝 (*Patinopecten yessoensis*) 的主产区(段丽琴等, 2015), 以往对该海域的调查多集中于浮游植物、营养盐、颗粒有机碳等研究(蒋增杰等, 2015; 张继红等, 2009; 刘毅等, 2016), 关于獐子岛邻近海域悬浮颗粒物的数量、质量及其与虾夷扇贝养殖关系的研究报道较少(李洪波等, 2001)。本研究根据獐子岛邻近海域 4 个季节的调查研究, 分析了该海域总悬浮颗粒物(TPM)和颗粒有机物(POM)的时空分布特性, 结合 POM 与叶绿素 a (Chl-*a*)及环境因子的相关性分析, 探讨了悬浮颗粒物的影响因素及其与虾夷扇贝底播养殖之间的潜在联系, 掌握了该海域滤食性生物的饵料质量及动态变化规律, 为北方海域虾夷扇贝的养殖容纳量评估及其底播养殖布局提供依据。

1 材料与方法

1.1 站位设置

2015 年 10 月和 2016 年 1、4、7 月共进行了 4 个航次的水文要素和悬浮颗粒物的综合调查, 调查海区位于辽东半岛东侧的黄海北部海域, 范围介于 38.8°~39.4°N、122.6°~123.3°E 之间。该海域的平均水深在 30 m 以上, 底播增殖是主要的养殖方式, 养殖种类有虾夷扇贝、皱纹盘鲍(*Haliotis discus hanai*)、紫海胆(*Anthocardia crassispina*)等。调查共布设 30 个站位(图 1), 由于海况条件限制, 2016 年 1 月只调查了 18 个站位。

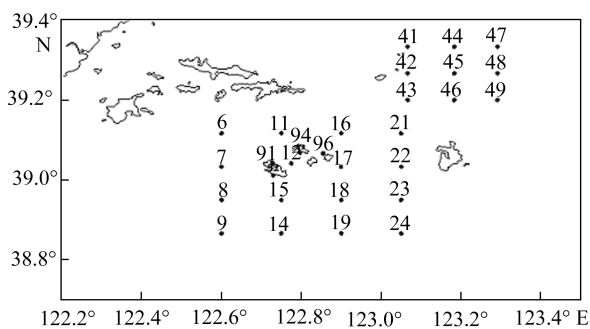


图 1 獐子岛邻近海域调查站位

Fig.1 Investigation stations in the Zhangzidao Island and the adjacent area

1.2 采样与分析

样品的采集与保存严格按照中华人民共和国质量监督检验检疫总局等(2007)规定的《海洋调查规范》(GB/T12763-2007)要求进行。用 Niskin 采水器在各调查站位取表层(水面下 1.0 m)、底层(离底 1.0 m)水样, 冷藏保存, 带回实验室分析; 采用 YSI-6600 多参数

水质分析仪(美国)对温度、盐度、溶氧、pH 等水环境参数进行现场测定。

悬浮颗粒物的测定采用重量法, 取 1000 ml 水样, 使用经过 450℃ 灼烧 4 h 后称重并做好标记(W_0)的空白 GF/C 玻璃纤维滤膜(直径为 47 mm)进行抽滤。首先, 将过滤后的滤膜在 60℃ 烘干 48 h 至恒重后称重(W_{60}), 再经过 450℃ 灼烧 4 h 后称重(W_{450})。TPM= $W_{60}-W_0$, POM= $W_{60}-W_{450}$ 。称重用电子天平, 精确到 0.00001 g。Chl-*a* 的测定采用萃取荧光法, 准确量取 1000 ml 水样经孔径为 0.45 μm 的醋酸纤维滤膜过滤, 90% 丙酮萃取后, 用叶绿素荧光仪(Turner Designs 998-7210, 美国)测定。

1.3 悬浮颗粒物的数量和质量浓度评估

调查海区悬浮颗粒物的数量浓度用 TPM 和 POM (mg/L) 的含量表示, 质量浓度根据 POM 含量(mg/L)占 TPM 含量(mg/L)的百分比[PCOM(%)=POM/TPM×100]和 Chl-*a* 含量(μg/L)占 POM 含量(mg/L)的比重 SES_Q(μg/g)进行评估。

1.4 数据分析

实验数据采用 Microsoft Excel 2007 和 SPSS Statistics 21.0 软件进行统计分析。单因子方差分析(One-way, ANOVA)检验组间差异, Pearson 相关分析检验 POM、TPM 与 Chl-*a* 及环境因子回归关系显著性, $P<0.05$ 为差异显著, $P<0.01$ 为差异极显著。等值线图采用 Suffer 8.0 软件绘制。

2 结果

2.1 獐子岛邻近海域的水环境参数

獐子岛邻近海域的水环境参数见表 1。从表 1 可以看出, 调查期间, 水温的变化范围为 4.33~23.19℃, 春季和夏季底层水温显著低于表层($P<0.01$), 秋、冬季节水温的垂直分布比较均匀; 盐度的变化范围为 30.55~32.44, 夏季表层的盐度明显低于其他季节; pH 的变化范围为 8.02~8.62, 表、底层的最大值均出现在夏季, 最小值出现在秋季。

2.2 TPM、POM、Chl-*a* 的季节变化

獐子岛邻近海域表、底层 TPM 平均浓度的季节性变化见图 2。从图 2 可以看出, 4 次调查中, TPM 的范围为 16.76~97.54 mg/L, 平均浓度为(31.65±9.58) mg/L, TPM 平均值的季节变化趋势为秋季>春季>夏季>冬季。LSD 多重比较结果显示, 冬季 TPM 显著低于春、秋季($P<0.05$), 其他季节之间差异不显著($P>0.05$)。调查海区表、底层 TPM 的平均值分别为

表1 獐子岛邻近海域环境参数的季节性变化

Tab.1 Seasonal variation of the parameters in the Zhangzidao Island and the adjacent area

月份 Month	水温 Temperature (°C)		盐度 Salinity		pH	
	表层 Surface	底层 Bottom	表层 Surface	底层 Bottom	表层 Surface	底层 Bottom
1月 Jan.	4.40±0.66	4.33±0.96	32.44±0.15	32.39±0.08	8.36±0.83	8.34±0.86
4月 Feb.	5.53±0.78	4.85±0.40	31.76±0.36	31.82±0.22	8.14±0.29	8.16±0.29
7月 Jul.	23.19±1.21	15.32±2.98	30.55±1.29	32.07±0.29	8.41±0.12	8.62±0.10
10月 Oct.	17.43±0.57	17.43±0.73	32.04±0.29	31.92±0.13	8.02±0.15	8.04±0.15

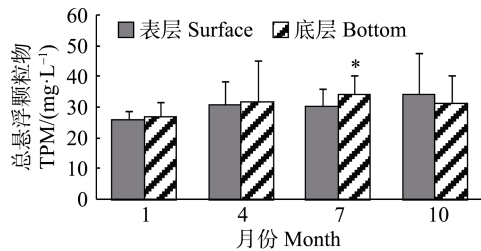


图2 獐子岛邻近海域表、底层 TPM 平均浓度的季节变化

Fig.2 Seasonal variation of average TPM in the surface and bottom seawater in the Zhangzidao Island and the adjacent area

*为底层与表层差异显著($P < 0.05$), 下同

* Represents significant difference, the same as below

(28.46±2.53)、(31.70±3.31) mg/L。除夏季底层 TPM 的浓度显著高于表层外($P < 0.01$), 其他季节表、底层的 TPM 浓度无显著性差异($P > 0.05$)。

獐子岛邻近海域表、底层 POM 平均浓度的季节性变化见图3。从图3可以看出, 4个季节调查中, POM 的范围为2.20~17.20 mg/L, 平均浓度为(6.97±2.08) mg/L。其中, 夏季 POM 的平均值最高[(8.14±1.49) mg/L], 冬季最低[(4.35±0.87) mg/L]。POM 与 TPM 浓度的季节变化趋势相似, 冬季表、底层的 POM 平均浓度显著低于春、夏、秋季($P < 0.01$), 仅夏季表、底层 POM 的平均浓度之间存在极显著性差异($P < 0.01$), 底层 [(8.63±1.40) mg/L]明显高于表层[(7.65±1.43) mg/L], 其他季节表、底层差异性不显著($P > 0.05$)。

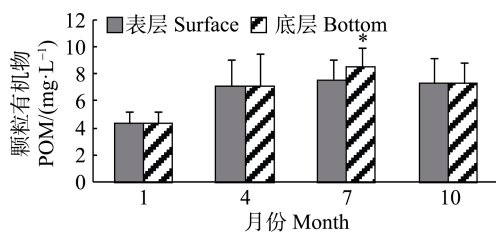


图3 獐子岛邻近海域表、底层 POM 平均浓度的季节变化

Fig.3 Seasonal variation of average POM in the surface and bottom seawater in the Zhangzidao Island and the adjacent area

獐子岛邻近海域表、底层平均 Chl-a 浓度的季节性变化见图4。从图4可以看出, 4个季节调查中,

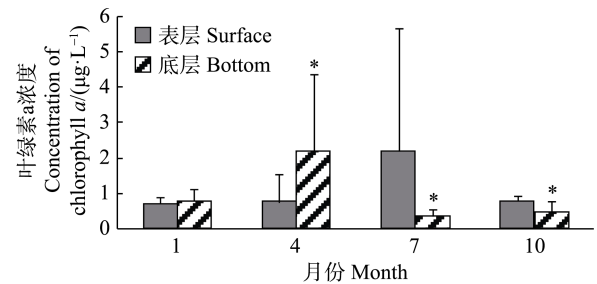


图4 獐子岛邻近海域平均叶绿素 a 浓度的季节变化

Fig.4 Seasonal variation of average Chlorophyll a in the Zhangzidao Island and the adjacent area

Chl-a 的浓度范围为0.03~12.96 µg/L, 平均浓度为(1.05±1.71) µg/L。Chl-a 浓度季节变化明显, 春季的总平均浓度最高, 为(1.46±1.79) µg/L, 秋季最低, 为(0.61±0.29) µg/L。表层平均浓度的最高值出现在夏季, 为(2.18±3.49) µg/L, 最低值出现在春季, 为(0.75±0.80) µg/L; 底层平均浓度的最高值出现在春季, 为(2.18±2.20) µg/L, 最低值出现在夏季, 为(0.33±0.21) µg/L。春季表层 Chl-a 浓度显著低于底层($P < 0.05$), 夏、秋季表层 Chl-a 浓度均显著高于底层($P < 0.05$)。冬季表、底层 Chl-a 浓度无显著性差异($P > 0.05$)。

獐子岛调查海区4个季节表、底层 PCOM 平均值见图5。从图5可以看出, PCOM 变化范围为8.69%~37.09%, 平均值为(22.25±4.18)%。季节变化趋势为夏季>秋季>春季>冬季。除秋季底层 PCOM 的平均值高于表层外, 其他季节底层均低于表层。春季

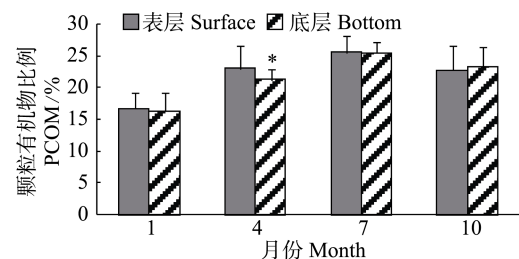


图5 獐子岛邻近海域表、底层 PCOM 平均值的季节变化

Fig.5 Seasonal variation of average PCOM in the surface and bottom seawater in the Zhangzidao Island and the adjacent area

表、底层之间差异极显著($P < 0.01$), 其他季节表、底层之间均无显著性差异($P > 0.05$)。

獐子岛邻近海域 4 个季节悬浮颗粒物的 SES_Q 平均值见图 6。从图 6 分析表明, 獐子岛邻近海域 4 个季节的 SES_Q 平均值为 $(0.15 \pm 0.20) \mu\text{g}/\text{mg}$, 春季 SES_Q 平均值最高, 为 $(0.20 \pm 0.23) \mu\text{g}/\text{mg}$, 秋季最低, 为 $(0.09 \pm 0.05) \mu\text{g}/\text{mg}$ 。除冬季表、底层之间 SES_Q 无显著性差异($P > 0.05$)外, 其他季节表、底层之间差异极显著($P < 0.01$); 表层 SES_Q 的最大值出现在夏季, 底层最大值出现在春季。

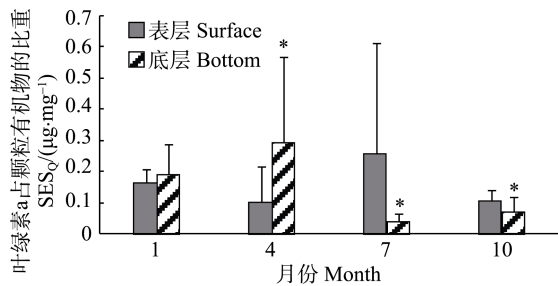


图 6 獐子岛邻近海域表、底层 SES_Q 平均值的季节变化
Fig.6 Seasonal variation of average SES_Q in the surface and bottom seawater in the Zhangzidao Island and the adjacent area

2.3 悬浮颗粒物的时空分布特征

2.3.1 TPM 獐子岛邻近海域 TPM 浓度的平面分布情况见图 7。从图 7a 和图 7e 可以看出, 冬季 TPM 的平面分布总体上较为均匀, 表层 TPM 的高值区在小耗子岛(17 号站)(图 1)附近海域; 底层 TPM 分别在獐子岛的东部及东南部海域出现 2 个高值区。从图 7b 和图 7f 可以看出, 春季表层 TPM 的高值区出现在东南部外海区, 17 号站附近浓度较高, 东北部海域浓度略低; 底层 TPM 的高值区出现在南部外海区, 浓度达 $97.54 \text{ mg}/\text{L}$, 乌蟒岛东北部区域等值线稀疏, 浓度变化小。从图 7c 和图 7g 可以看出, 夏季表、底层 TPM 的分布趋势相似, 中部海域浓度略低; 獐子岛南部外海区出现高值区, 浓度达 $49 \text{ mg}/\text{L}$, 41~48 号站(图 1)浓度偏高。从图 7d 和图 7h 可以看出, 秋季表层 TPM 呈现东北高、西南低的趋势; 底层 TPM 的高值区在獐子岛附近海域, 等值线较密集, 其他区域浓度变化很小。

2.3.2 POM 獐子岛邻近海域 POM 浓度的平面分布情况见图 8。从图 8a 和图 8e 可以看出, 冬季 POM 与 TPM 的分布趋势相似, 表层 POM 浓度的高值区出现在 17 号站附近(图 1), 底层 POM 在獐子岛东南海域出现高值区, 由此向周围递减。从图 8b 和图 8f 可

以看出, 春季表层 POM 的高值区出现在 17 号站, 达到 $13.60 \text{ mg}/\text{L}$, 低值区在 22 号站附近(图 1), 为 $2.2 \text{ mg}/\text{L}$ 左右; 底层靠近外海的南部区域 POM 浓度较高, 其他区域浓度较低且分布较为均匀。从图 8c 和图 8g 可以看出, 夏季 POM 分布的总体趋势是中部海域浓度略低, 逐渐向四周增大。表层 POM 的高值区在西南部、东南部以及乌蟒岛东北部; 底层 POM 在獐子岛附近及南部海域的等值线较密集, 浓度变化较大。14 号站附近有高值区(图 1), 浓度达 $12.68 \text{ mg}/\text{L}$ 。从图 8d 和图 8h 可以看出, 秋季 POM 与 TPM 的平面分布趋势相一致。表层 POM 的高值区出现在 16 号站附近(图 1), 达到 $12.30 \text{ mg}/\text{L}$; 底层 POM 的高值区集中在獐子岛等岛屿附近, 呈现出中部浓度略高, 四周浓度略低的趋势。

2.4 悬浮颗粒物的质量状况

獐子岛邻近海域各季节表、底层的 PCOM 平面分布状况见图 9。从图 9 总体来看, 除秋季外, 大部分海域的水平分布比较均匀。从垂直分布看, 表层 PCOM 略高于底层。从图 9a、图 9e 可以看出, 冬季表、底层 PCOM 的分布趋势相似, 从东南部向西北部递减, 中南部海域浓度变化较小。春季表层 PCOM 的高值区在 13 号站附近(图 1), 东南部海域值略低; 底层分布趋势与表层相反, 岛屿附近及东南部海域的 PCOM 值略高。从图 9c、图 9g 可以看出, 夏季表层 PCOM 的高值区在西南部外海区, 其他海域分布比较均匀; 底层 PCOM 大部分海域分布比较均匀, 獐子岛附近海域的等值线较密集, 水平差异较大。从图 9d、图 9h 可以看出, 秋季表层 PCOM 在 13 号站附近出现高值区, 并由此向周围递减, 东北部海域 PCOM 值略低; 底层是中部 PCOM 值略低, 四周略高, 岛屿附近海域的水平分布差异较大。

2.5 POM 与 Chl-a 的关系

对獐子岛邻近海域各季节表、底层的 POM 与 Chl-a 之间的线性回归分析表明, 只有春季底层和夏季表层的 POM 与 Chl-a 间存在极显著的正相关关系($P < 0.01$)(图 10 和图 11)。线性趋势表示 POM 浓度与 Chl-a 之间密切对等, 春季底层和夏季表层 POM 的浓度均随着 Chl-a 浓度的升高而升高。

3 讨论

3.1 悬浮颗粒物浓度的时空分布特征

与相同海域的历史数据及其他海域的数据相比,

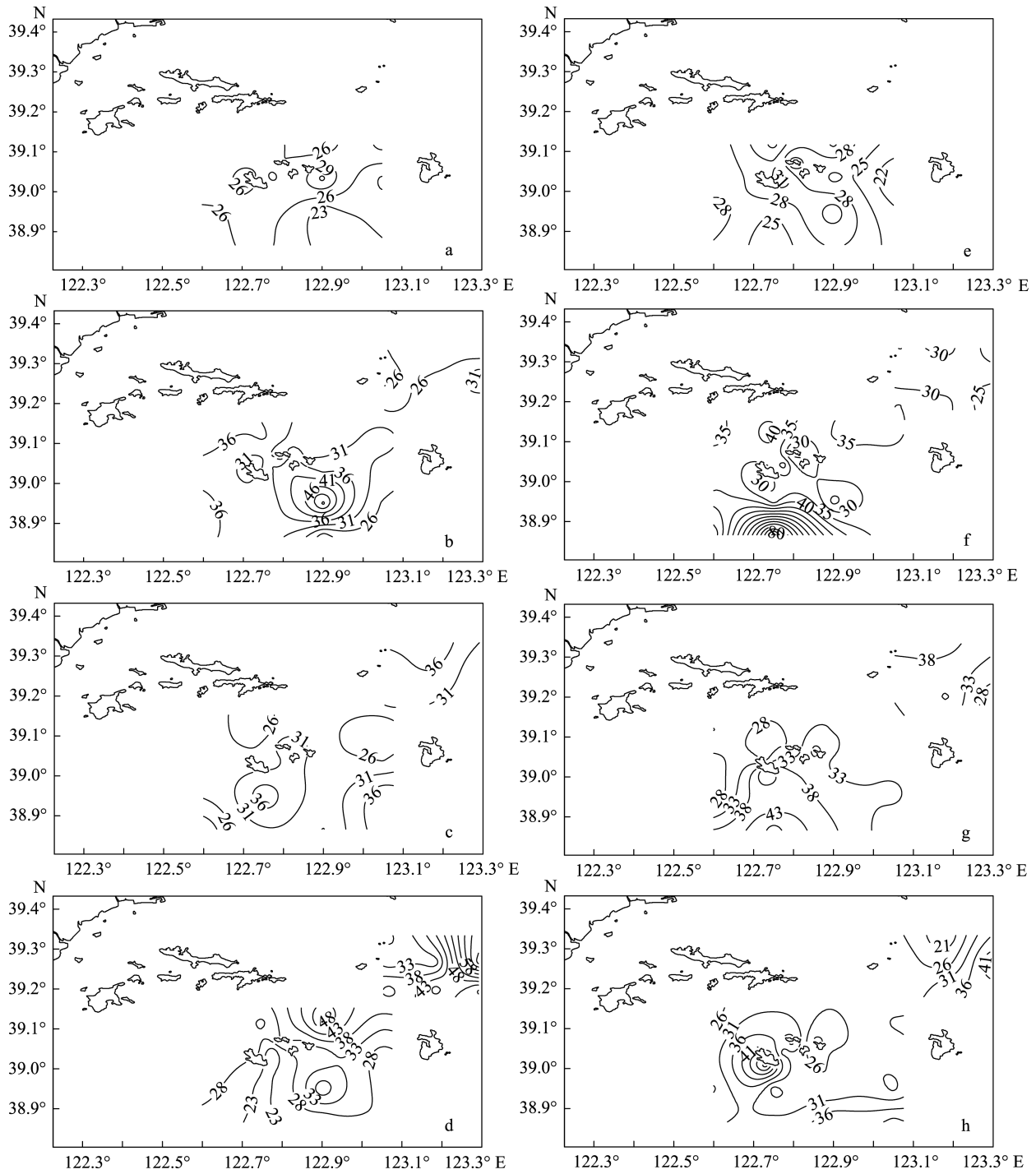


图 7 獐子岛邻近海域四季表层、底层 TPM 浓度的平面分布特征

Fig.7 Seasonal and spatial distribution of TPM in the surface and bottom seawater in the Zhangzidao Island and the adjacent area

表层: a: 冬季; b: 春季; c: 夏季; d: 秋季; 底层: e: 冬季; f: 春季; g: 夏季; h: 秋季
Surface: a: Winter; b: Spring; c: Summer; d: Autumn; Bottom: e: Winter; f: Spring; g: Summer; h: Autumn

獐子岛邻近海域 TPM 和 POM 的浓度较高,虽然与已有报道的 TPM 的季节变化趋势一致,都是秋季>春季>夏季>冬季,但本研究的 TPM 浓度为 (31.65 ± 9.58) mg/L,显著高于历史数据 3.17~4.71 mg/L (李洪波等, 2010)。

同时,与其他养殖海湾相比,獐子岛邻近海域 TPM 和 POM 的平均浓度均高于莱州湾(梁兴明等, 2001)和桑沟湾(匡世焕等, 1996)。

本研究发现,高浓度 TPM 主要出现在春、夏季

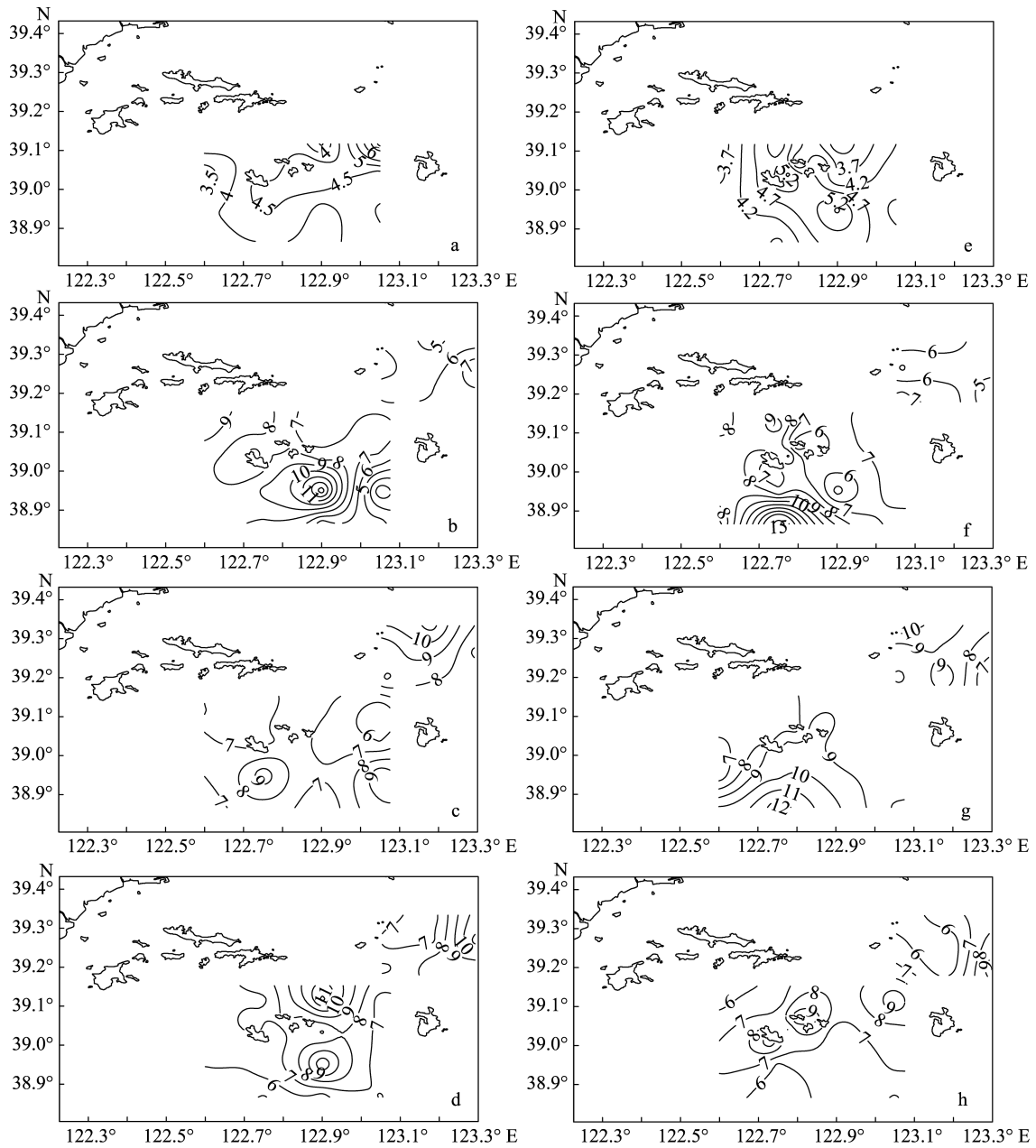


图 8 獐子岛邻近海域四季表层、底层 POM 浓度的平面分布特征

Fig.8 Seasonal and spatial distribution of POM in the surface and bottom seawater in the Zhangzidao Island and the adjacent area

表层: a: 冬季; b: 春季; c: 夏季; d: 秋季; 底层: e: 冬季; f: 春季; g: 夏季; h: 秋季
Surface: a: Winter; b: Spring; c: Summer; d: Autumn; Bottom: e: Winter; f: Spring; g: Summer; h: Autumn

的 14、17 及 43 号站及秋季的 47 号站附近海域, 最高浓度可达 97.54 mg/L, 出现在位于獐子岛南部外海区的 14 号站底层, 可能是由外海水带来的外源性悬浮颗粒物增加了 TPM 的浓度。根据室内模拟实验的结果, 在 90.72 mg/L 浓度下, 虽然虾夷扇贝的死亡率不高, 仅为 10%, 但是滤水率和摄食率均降低(待发表数据)。马明辉等(2004)研究发现, 高浓度的 TPM

会对虾夷扇贝的生长产生负面影响。因此, 在该区域进行虾夷扇贝底播增殖时应该予以重视。

从 TPM 和 POM 浓度的垂直分布来看, 只有夏季底层的 TPM 和 POM 浓度显著高于表层。由于獐子岛调查海域位于黄渤海交汇处, 水域开阔, 从大、小潮汛的结果看, 流速的最小值为 23.61 cm/s, 最高值为 90.04 cm/s, 平均值为 48.83 cm/s, 水体交换能力良好

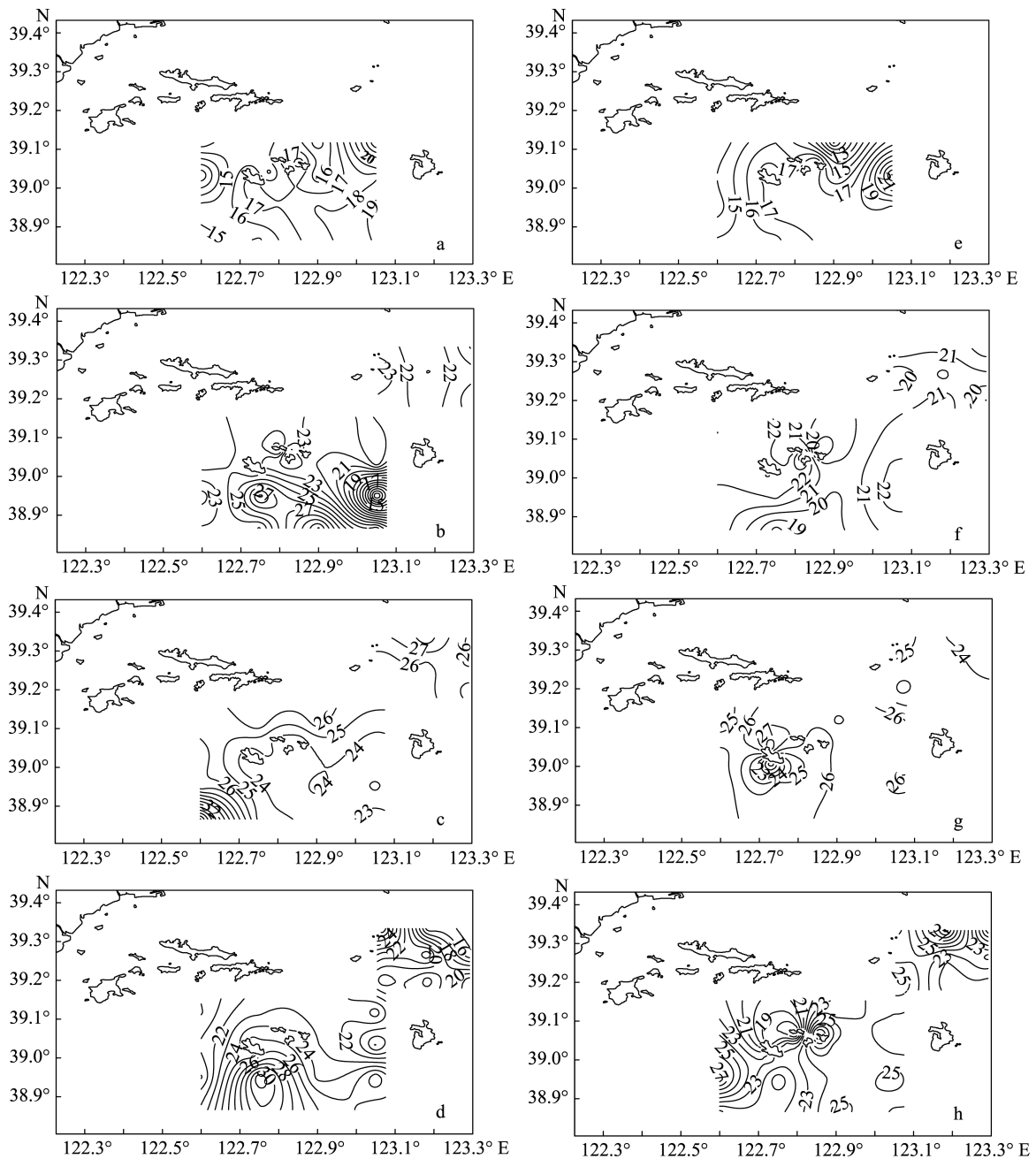


图9 獐子岛邻近海域四季表层、底层 PCOM%的平面分布特征

Fig.9 Seasonal and spatial distribution of PCOM% in the surface and bottom seawater in the Zhangzidao Island and the adjacent area

表层: a: 冬季; b: 春季; c: 夏季; d: 秋季; 底层: e: 冬季; f: 春季; g: 夏季; h: 秋季
Surface: a: Winter; b: Spring; c: Summer; d: Autumn; Bottom: e: Winter; f: Spring; g: Summer; h: Autumn

(张继红等, 2008)。再加上海区内养殖筏架设施较少, 不会对海流造成阻碍作用。因此, 该海区 TPM 和 POM 的垂直分布整体上比较均匀。夏季由于风力作用的减弱以及强烈的日照辐射, 在獐子岛南部海域会出现比较明显的温跃层, 随深度的增加, 潮流的速度也随之降低, 水体的垂直混合能力进一步下降, 底层沉积物的再悬浮作用随之减弱, 表层有机碎屑及其他外源颗

粒物质更容易在重力的作用下向底层沉降(韦钦胜等, 2013), 辅以水体交换所带来的外源输入, 使得底层悬浮颗粒物的含量显著高于表层。

浮游植物是海水中悬浮颗粒物的重要物质组分, 海水中的Chl-*a*可以代表浮游植物的现存数量(李绪禄等, 2013), 分析海水中Chl-*a*与POM的相关关系可了解有生命的浮游植物对POM的贡献(赵明辉等, 2014)。

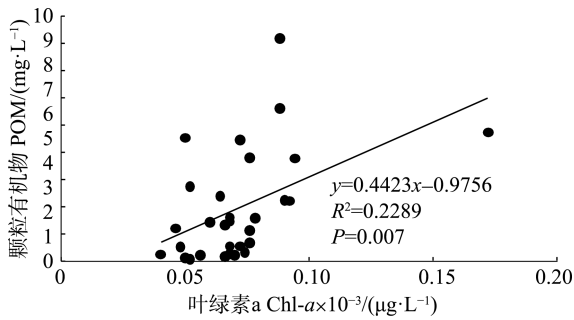


图 10 獐子岛邻近海域春季底层 POM 与 Chl-a 的关系
Fig.10 Scatter plotting of POM versus Chl-a in the bottom seawater in the Zhangzidao Island and the adjacent area in spring

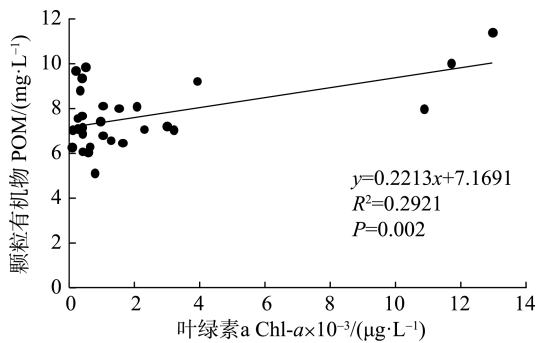


图 11 獐子岛邻近海域夏季表层 POM 与 Chl-a 的关系
Fig.11 Scatter plotting of POM versus Chl-a in the bottom seawater in the Zhangzidao Island and adjacent area in summer

在北黄海海域,通常夏季随着水温升高,光照强度增大,再加上陆源输入的营养盐补充增多,刺激表层浮游植物大量生长繁殖,这就使得夏季表层水中POM的含量随着叶绿素浓度的增加而增高。然而,由于夏季层化现象增强,表、底层混合不均,使得表、底层的叶绿素浓度存在显著差异。但是,研究发现,夏季底层的POM浓度与表层没有显著性差异,底层POM的来源有待进一步研究。另外,调查结果显示,只有夏季表层POM与盐度之间存在显著的负相关关系($r=-0.423$, $P<0.05$) (图12),且夏季表层盐度呈现由南向北递减的趋势,低值区主要出现在41、42、43、44、45号站位,可以推测夏季陆地径流冲淡水对该海域表层POM有一定程度的补充。

3.2 悬浮颗粒物与虾夷扇贝养殖之间的关系

悬浮颗粒物的数量和质量会制约滤食性动物的生长(Bayne *et al.*, 1992)。虾夷扇贝作为獐子岛海域主要的底播增殖品种之一,其滤食性行为 and 生理反应与海水中悬浮颗粒物的质量状况密不可分。Bayne 等(1987)研究发现,除 POM 外,饵料质量 PCOM 能够促进饵料的吸收效率,对双壳贝类的生长具有显著影

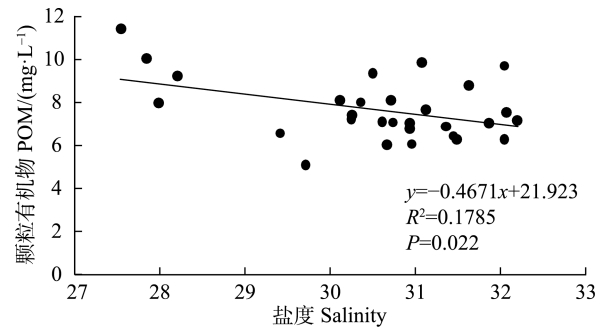


图 12 獐子岛邻近海域夏季表层 POM 与盐度的关系
Fig.12 Scatter plotting of POM versus salinity in the bottom seawater in the Zhangzidao Island and the adjacent area in summer

响。本研究中,PCOM 值在夏季最高,冬季最低,春、秋季没有显著性差异($P>0.05$),PCOM 平均值在 22.25%左右(图 7)。秋季 PCOM 值仅低于夏季,且底层高于表层,加上秋季水温适宜,适合底播虾夷扇贝的摄食生长。扇贝等滤食性动物对叶绿素含量较高的悬浮颗粒物摄食选择性较大(Shumway *et al.*, 1985),因此,Chl-a 含量占 POM 含量的比重 SES_Q 成为评价悬浮颗粒物质量的指标,根据 SES_Q 值的大小分为 3 个等级:低等质量($<0.1 \times 10^{-3}$),中等质量($0.1 \sim 1.0 \times 10^{-3}$),高等质量($>1.0 \times 10^{-3}$) (Macdonal *et al.*, 1994)。獐子岛养殖海域悬浮颗粒物的质量(SES_Q)除秋季处于低等质量水平外,其他季节均处于中等质量水平,春季达到最高值,年平均值为 0.15×10^{-3} ,处于中等质量水平。该结果与李洪波等(2010年)的调查结果一致。

悬浮颗粒物的数量和质量是多种因素共同作用的结果,需要进行长期监测和数值模型的研究,以了解獐子岛及邻近海域悬浮颗粒物浓度的时空变化特性和规律,为虾夷扇贝的底播增殖提供理论指导。

参 考 文 献

- Bayne BL, Hawkins AJS, Navarro E. Feeding and digestion by the mussel *Mytilus edulis* L. (Bivalvia: Mollusca) in mixtures of silt and algal cells at low concentration. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 1987, 111(1): 1-22
- Bayne BL, Hawkins AJS. Ecological and physiological aspects of herbivory in benthic suspension-feeding molluscs. *Systematics Association Special*. Clarendon Press (Oxford), 1992, 46: 265-288
- Duan LQ, Song JM, Yuan HM, *et al.* Estimation of nutrient level and fishery yield of *Patinopecten yessoensis* in mariculture area near the Zhangzidao Island of the north Yellow Sea. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(4): 1004-1013 [段丽琴, 宋金明, 袁华茂, 等. 北黄海獐子岛养殖海域营养水平与虾

- 夷扇贝增殖渔获量评估. 生态学报, 2015, 35(4): 1004–1013]
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Specifications for oceanographic survey-Part 9: Guidelines for marine ecological survey (GB/T 12763.9-2007). Beijing: Standards Press of China. 2007[中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 海洋调查规范-第9部分: 海洋生态调查指南 (GB/T 12763.9-2007). 北京: 中国标准出版社, 2007]
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Specifications for oceanographic survey-Part 6: Marine biological survey (GB/T12763.6-2007). Beijing: Standards Press of China. 2007[中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 海洋调查规范-第6部分: 海洋生物调查(GB/T 12763.6-2007). 北京: 中国标准出版社, 2007]
- Jiang ZJ, Du MR, Jiang X, *et al.* Size-fraction of phytoplankton and photosynthetic carbon flow pathway in the coastal area of Zhangzidao Island. Progress in Fishery Sciences, 2015, 36(4): 36–43 [蒋增杰, 杜美荣, 姜绪, 等. 獐子岛海域浮游植物的粒径结构及碳流途径. 渔业科学进展, 2015, 36(4): 36–43]
- Kuang SH, Fang JG, Sun HL, *et al.* Seston dynamics in Sanggou Bay. Marine Fisheries Research, 1996, 17(2): 60–67[匡世焕, 方建光, 孙慧玲, 等. 桑沟湾海水中悬浮颗粒物的动态变化. 海洋水产研究, 1996, 17(2): 60–67]
- Li HB, Liang YB, Yuan XT, *et al.* Distribution of organic matter in Changhai waters, Liaoning. Marine Environmental Science, 2010, 29(6): 853–858 [李洪波, 梁玉波, 袁秀堂, 等. 辽宁长海海域有机物含量分布概况. 海洋环境科学, 2010, 29(6): 853–858]
- Li XL, Zhang JX, Zhou YP, *et al.* Temporal and spatial distributions of dissolved organic nitrogen in the Mirs Bay from 2000 to 2010. China Environmental Science, 2013, 33(10): 1799–1807[李绪录, 张军晓, 周毅频, 等. 2000–2010年大鹏湾溶解有机氮的时空分布. 中国环境科学, 2013, 33(10): 1799–1807]
- Liang XM, Fang JG, Cui Y, *et al.* Seston dynamics in bay scallop (*Argopecten irradianslamarck*) mariculture areas of Laizhou Bay. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2001, 32(6): 636–639 [梁兴明, 方建光, 崔毅, 等. 莱州湾海湾扇贝养殖区海水中悬浮颗粒物的动态变化. 海洋与湖沼, 2001, 32(6): 636–639]
- Liu Y, Zhang JH, Du MR, *et al.* Spatial-temporal distribution of particulate organic carbon and particulate nitrogen in the mariculture areas of Zhangzhi Island. Marine Sciences, 2016, 40(5): 9–18[刘毅, 张继红, 杜美荣, 等. 獐子岛养殖海域颗粒有机碳、颗粒氮的时空分布特征. 海洋科学, 2016, 40(5): 9–18]
- Liu ZF, Peng XY, Xu L, *et al.* Particulate organic carbon (POC) in Taiwan Strait during two cruises in summer 1997 and winter 1998. Journal of Oceanography in Taiwan Strait, 2000, 19(1): 95–101[刘占飞, 彭兴跃, 徐立, 等. 台湾海峡1997年夏季和1998年冬季两航次颗粒有机碳研究. 台湾海峡, 2000, 19(1): 95–101]
- Ma MH, Gong Q, Liu SX, *et al.* Study on the lethal effects of suspended solids on Japanese scallop *Patinopecten yessoensis*. Marine Environmental Science, 2004, 23(3): 46–48[马明辉, 宫强, 刘述锡, 等. 悬浮物对虾夷扇贝致死效应的研究. 海洋环境科学, 2004, 23(3): 46–48]
- Macdonal BA, Ward JE. Variation in food quality and particle selectivity in the sea scallop *Placopecten magellanicus* (Mollusca: Bivalvia). Marine Ecology Progress, 1994, 108(3): 251–264
- Pang Y, Yan RR, Li YP, *et al.* Contribution of combined action of exogenous source and internal load on water nutrient in Taihu Lake. Journal of Hydraulic Engineering, 2008, 39(9): 1051–1059[逢勇, 颜润润, 李一平, 等. 内外源共同作用对太湖营养盐贡献量研究. 水利学报, 2008, 39(9): 1051–1059]
- Shumway SE, Cucci TL, Newell CR. Particle selection ingestion and absorption in filter feeding bivalves. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, 1985, 91(1–2): 77–92
- Wei QS, Wang HW, Ge RF, *et al.* Vertical distribution of suspended matter and implications in the southern Yellow Sea. Advances in Earth Science, 2013, 28(3): 374–390[韦钦胜, 王辉武, 葛人峰, 等. 南黄海悬浮体的垂直分布特性及其指示意义. 地球科学进展, 2013, 28(3): 374–390]
- Zhang JH, Fang JG, Jiang ZJ, *et al.* Seasonal variation of primary production and spatial-temporal distribution of chlorophyll a in mariculture area of Zhangzidao Island. Marine Fisheries Research, 2008, 29(4): 22–28[张继红, 方建光, 蒋增杰, 等. 獐子岛养殖水域叶绿素含量时空分布特征及初级生产力季节变化. 海洋水产研究, 2008, 29(4): 22–28]
- Zhang JH, Wang W, Jiang ZJ, *et al.* Distribution features of nitrogen and phosphorus in Zhangzi Island maricultural area. Progress in Fishery Sciences, 2009, 30(6): 89–95[张继红, 王巍, 蒋增杰, 等. 獐子岛养殖海域氮、磷的分布特征. 渔业科学进展, 2009, 30(6): 89–95]
- Zhao MH, Li XL. Temporal and spatial distributions and sources of particulate organic matter in the Shenzhen Bay and adjacent coastal waters from 2000 to 2011. China Environmental Science, 2014, 34(11): 2905–2911[赵明辉, 李绪录. 2000–2011年深圳湾及邻近水域颗粒有机物的来源和时空分布. 中国环境科学, 2014, 34(11): 2905–2911]

The Spatial-Temporal Distribution of the Suspended Particulate Matter in the Water Adjacent to the Zhangzidao Island

LI Min^{1,3}, ZHANG Jihong^{2,3①}, WU Wenguang³, LIU Yi³,
WANG Wei³, LIN Fan³, MA Sha^{1,3}, YANG Yanyun³

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

Abstract Water samples at different depth were collected during 4 cruises nearby the Zhangzidao Island in October 2015 and January, April and July 2016. The spatial-temporal distribution of total particulate matter (TPM), particulate organic matter (POM) and organic content (defined as PCOM, %) in the surface and bottom layers were analyzed. With the results of the regression analysis of POM with Chlorophyll a (Chl-*a*) and other environmental factors, the potential interaction between the scallop culture and the suspended particulate matter was analyzed, and the major influencing factors of the latter were also discussed. The results were described as follows. Concentration ranges of TPM and POM nearby the Zhangzidao Island were (16.760~97.54) mg/L and (2.20~17.20) mg/L respectively, and their annual averages were (31.65±9.58) and (6.97±2.08) mg/L. The PCOM ranged from 8.69% to 37.09%, with an average of (22.25±4.18)%. The TPM concentration showed a seasonal trend as autumn>spring>summer>winter. The highest TPM concentration was found in the surface layer in autumn. However, the highest and lowest POM concentrations and the organic contents appeared in summer and winter respectively. The concentrations of POM and TPM had a similar pattern of horizontal distribution in most areas. Higher POM concentration was found in the central area compared to the surroundings in spring and summer, and the opposite pattern was found in autumn and winter. The concentrations of POM and TPM in the bottom water were significantly higher ($P<0.01$) than in the surface water in summer, but there was no difference in the other seasons ($P>0.05$). In all 4 seasons, there was significantly positive correlation ($P<0.01$) between POM and Chl-*a* nearby the Zhangzidao Island. In addition, there was also positive correlation ($P<0.01$) between POM and Chl-*a* in the bottom layer in spring and the surface layer in summer. A negative correlation was found between POM and salinity only in the surface water in summer, which indicated that the land sources might affect the concentration of POM in summer.

Key words Zhangzidao Island; Total particulate matter; Particulate organic matter; Spatial-temporal distribution

① Corresponding author: ZHANG Jihong, E-mail: zhangjh@ysfri.ac.cn