

规模化浅海养殖水域沉积作用的初步研究

蔡立胜¹, 方建光², 梁兴明²

(1. 中国海洋大学 水产学院, 山东 青岛 266003; 2. 农业部海洋渔业资源可持续利用重点开放实验室, 中国水产科学研究院 黄海水产研究所, 山东 青岛 266071)

摘要:从2001年9月到2002年7月底分5个阶段,使用沉积物捕获器在桑沟湾养殖海区的扇贝区、牡蛎区和海带区进行自然沉积作用的研究。通过对收集的沉积物进行分析,估算该养殖海区的总氮和总磷由海水到海底的通量。估算结果显示,该海区颗粒物质的年平均沉积速率为 $278.8 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$,而每克颗粒物质则携带了 $190.4 \mu\text{g}$ 总氮、 $472.5 \mu\text{g}$ 总磷和 0.103 g 有机物质沉入海底。沉积物的总氮和总磷含量显示了较明显的季节性变化。总氮的峰值出现在5月(春季),最低值出现在12月(冬季)。而总磷含量在12月显著高于5月和7月时段。分析表明,下沉的颗粒物质的氮磷摩尔比为 $0.67 \sim 2$,而底泥的氮磷摩尔比为 $0.025 \sim 2$ 。研究结果为桑沟湾沿岸海域氮磷营养盐的通量建模提供了重要参数,并为养殖水域环境容量的研究提供了依据。

关键词:自然沉积作用;总氮;总磷;氮磷比;贝类养殖区
中图分类号:S931.3 **文献标识码:**A

文章编号:1005-8737-(2003)04-0305-06

有关海洋沉积作用方面的研究在我国起步较晚,主要集中在海洋地质方面。在近岸养殖海域,尤其是扇贝(主要为 *Patinopecten yessoensis* 和 *Chlamys farreri*),牡蛎(主要是 *Crassostrea gigas*)等双壳贝类的筏式养殖区,由于贝类的滤食而使沉积作用加强,海区的自然沉积速率加大。这可能对养殖环境甚至整个沿海的生态环境产生深远的影响^[1-3]。国外有关工作开展得比较早而且广泛,如 D. K. Young 等的研究表明,贝类养殖会使养殖海区的沉积速率增高^[4-9]。目前国内关于贝类生物沉积的研究主要集中在实验室测定和养殖区半现场测定^[10-13],但是对于一个复杂而庞大的生态系统(养殖海湾),非现场的各种研究方法都存在着不可避免的局限性,因此,现场研究养殖水域的沉积作用是非常必要的。

桑沟湾位于山东半岛东端($37^{\circ}01' \sim 37^{\circ}09' \text{N}$, $122^{\circ}24' \sim 122^{\circ}35' \text{E}$),北、西、南面都是陆地,湾口朝

东,为半封闭海湾,面积 $13\,333 \text{ hm}^2$,平均水深 $7 \sim 8 \text{ m}$,最大水深 18 m 。自然环境条件良好,海底平坦,基础生产力较高,水产资源丰富。近年来,滩涂养殖和浅海养殖发展迅速,主要养殖品种是扇贝、牡蛎和海带,获得了较好的经济效益。但是除了该湾周围工农业生产和居民生活所产生的污染在日益加重外,湾内养殖的自身污染也有加重的趋势,为生产的可持续发展埋下了隐患。

本实验以规模化浅海养殖较有代表性的桑沟湾作为研究海洋沉积作用的研究场所,以为近岸海水养殖的可持续发展提供科学依据。

1 材料和方法

1.1 站位设置和实验方法

根据养殖种类不同,在扇贝区、牡蛎区和海带区各设3个站位,见图1。每个站位放 3×3 个沉积物捕获器,如图2,主体部分是壁厚 3 mm 的PVC圆桶,内径为 110 mm ,高度为 500 mm ,3个重复。工作时该器挂在涨潮时仪器底距海底 2 m 的深度,距水面深度 $(10 \pm 2) \text{ m}$,悬挂时间为 $(15 \pm 5) \text{ d}$ 。综合周年共分为5个时段,具体时段参见表1,其中第2时段为补充实验,实际数据不参与周年通量和有关

收稿日期:2003-01-14; 修订日期:2003-03-17.

基金项目:国家重点基础研究发展规划项目(G19990437);国家自然科学基金项目(30271021).

作者简介:蔡立胜(1972-),男,硕士,从事水生生物学研究. E-mail: clsl2003@21cn.com

通讯作者:方建光. E-mail: fangjg@ysfri.ac.cn

相关关系的计算。沉积物进行有机质(POM)、总氮(TN)、总磷(TP)含量和总含量的分析。除了第1时段沉积物的总磷没有测定外,其他时段沉积物各项指标均完全测定。为初步研究桑沟湾养殖海区海底底质沉积物的物理化学性质,在2002年5月从湾内到湾外使用 Microcorer 重力采泥器采集直径 65 mm, 高度为 15~20 cm 的表层底泥, 每 5 cm 分层后做有关分析。

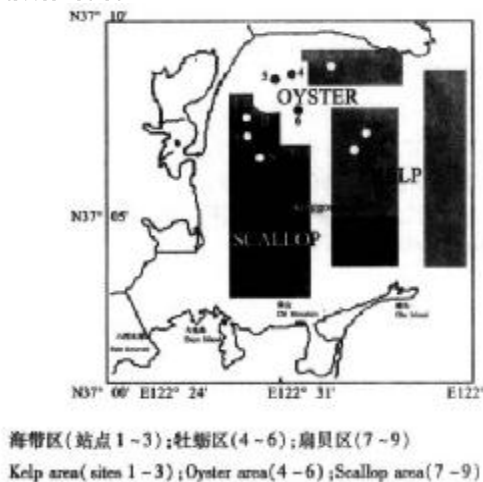


图1 桑沟湾调查站点图

Fig.1 Investigated station



图2 沉积物捕获器

Fig.2 Sediment trap

1.2 沉积物分析方法

沉积物捕获器收集的沉积物取回实验室后虹吸出上覆水,风干后先于恒温 60 °C 下烘干称量,然后洗去盐分,烘干磨细,过 100 目筛,做有机物质(POM)、总氮(TN)和总磷(TP)含量的分析。质量称量采用 Sartorius Research 电子天平。泥样的总氮和总磷采用过硫酸钾高压釜高温消化法,吸光度测定采用 7530 紫外分光光度计。底质沉积物分析除

了分析以上指标外,还分析体积质量、容重、间隙度和含水量^[14-15]。

2 结果与分析

2.1 各养殖海区不同时期的沉积速度

如表1所示,从2001年9月到2002年1月,3种养殖海区所测的沉积速率没有明显的区间差异($t < t_{0.05}$),但是在2002年5月和7月的实验结果显示了极显著的区间差异($t > t_{0.001}$)。

周年沉积速率最高的是在7月,其次是5月,最低的是2001年9月。扇贝区各时段的沉积速率差异较显著,扇贝和牡蛎区7月份显著高于其他时段(图3所示)。用现场测定的数据来估算,该海湾每平方米有 278.8 g/d 的沉积物到达海底,全年有大约 101.76 kg 的颗粒物质从水层中沉至海底,同时携带了大量的颗粒有机质和营养盐。

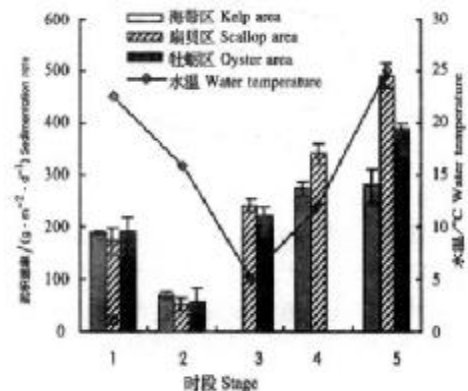


图3 沉积速率的变化

Fig.3 Sedimentation rates in different areas and periods

时段1(Stage1):2001-09-20~2001-10-3;时段2(Stage2):2001-10-05~2001-11-20;时段3(Stage3):2001-12-16~2002-01-02;时段4(Stage4):2002-05-02~2002-05-22;时段5(Stage5):2002-07-10~2002-07-30

2.2 水层沉积物有机质含量的变化

由图4可见,各个时期沉积物的有机质含量在不同区间没有显著性差异($t < t_{0.05}$)。除了第3时段的有机质含量(13.12%,质量分数)显著高于其他各时段($\bar{X} = 8.99\%$)外,其他时段间的变化幅度不大($F < F_{0.05}$),其中在第3时段平均有 36.58 g/(d·m²)的有机物质沉至海底,其他时间段约为 25.06 g/(d·m²),综合周年的数据估算沉积物到达海底的有机物质的量为 27.94 g/(d·m²)。

表1 桑沟湾养殖各海区不同时期的沉积速率

养殖海区 Culture area	时段1 Stage 1 2001.9.20~10.3	时段2 Stage 2 2001.10.5~11.20	时段3 Stage 3 2001.12.16~2002.1.2	时段4 Stage 4 2002.5.2~5.22	时段5 Stage 5 2002.7.10~7.30
扇贝 Scallop	172.2 ± 25.3	52.3 ± 12.9	241 ± 13.2	339.7 ± 20.5	490.0 ± 12.9
牡蛎 Oyster	192.2 ± 23.8	59.1 ± 19.4	223.7 ± 11.4	/	387.7 ± 6.8
海带 Kelp	188.9 ± 4.4	70.6 ± 5.4 *	/	273.0 ± 14.6	279.2 ± 31.1

* - 此阶段的海带已经收割,以下同。

* - The kelp had been harvested in the stage.

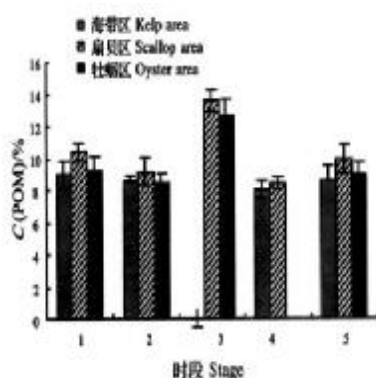


图4 水层沉积物有机质质量分数的变化

Fig. 4 POM content in different areas and periods

时段1(Stage1);2001-09-20~2001-10-3;时段2(Stage2);2001-10-05~2001-11-20;时段3(Stage3);2001-12-16~2002-01-02;时段4(Stage4);2002-05-02~2002-05-22;时段5(Stage5);2002-07-10~2002-07-30

2.3 水层沉积物总氮和总磷含量的变化

如图5所示,沉积物的总氮含量与水温的相关性不紧密($R^2=0.098$),5个时段各区每克泥的总氮平均含量分别为173.7、200.9、104.4、286.7、186.4 μg 。峰值出现在水温迅速增高的5月份,最低值出现在水温最低的12月。除了第1和第2、第1与第3、第2与第3时段有显著差异外($P<0.05$),其他各时段之间差异不明显,第4和第5时段的区间差异显著($t>t_{0.05}$)。综合周年数据估算由颗粒物带走沉至海底的总氮的量为53.09 $\text{mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 。

沉积物中的总磷含量与水温的关系密切($R^2=-0.9442$),由图6可以看出,在水温较低的第3时段,沉积物总磷的含量明显高于水温较高的4、5时段。每克水层沉积物中总磷平均含量在4个时段分别为591.2、565.6、412.2和321.0 μg ,全年平均为472.4 μg ,合15.3 μmol 。综合周年的数据估算约有131.7 $\text{mg}/(\text{d} \cdot \text{m}^2)$ 的总磷随颗粒物沉至海底。

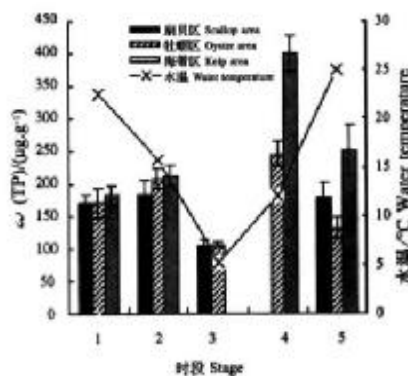


图5 水层沉积物总氮含量的变化

Fig. 5 TN content in different areas and periods

时段1(Stage1);2001-09-20~2001-10-3;时段2(Stage2);2001-10-05~2001-11-20;时段3(Stage3);2001-12-16~2002-01-02;时段4(Stage4);2002-05-02~2002-05-22;时段5(Stage5);2002-07-10~2002-07-30

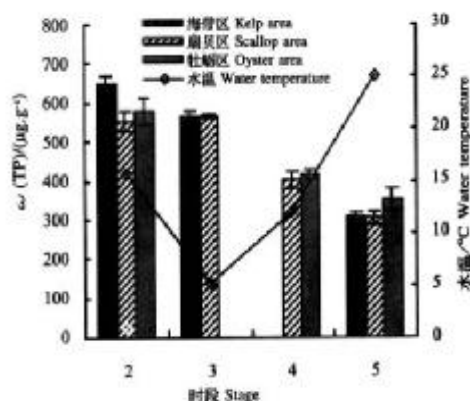


图6 海区水层沉积物的总磷变化

Fig. 6 TP content in different areas and periods

时段1(Stage1);2001-09-20~2001-10-3;时段2(Stage2);2001-10-05~2001-11-20;时段3(Stage3);2001-12-16~2002-01-02;时段4(Stage4);2002-05-02~2002-05-22;时段5(Stage5);2002-07-10~2002-07-30

2.4 底泥物理化学性质的初步分析

如表2所示,在养殖区用重力采泥器采集的底泥含水量平均为30.09%,容积质量平均为1.186 g/mL,体积质量平均为2.37,间隙度平均为49.44,而且各站点每层的差异均不显著($t < t_{0.05}$)。桑沟湾表层底质各层总氮、总磷和有机物的含量没有显著

差异($t < t_{0.05}$)。综合表2的数据表明,桑沟湾表层底质分层不明显。比较底泥和水层沉积物的有机质含量表明,水层沉积物明显高于底泥($t > t_{0.05}$)。统计显示,5月水层沉积物总氮和总磷的含量均极显著高于表层底泥中的含量($t > t_{0.001}$)。

表2 桑沟湾表层底泥的测定数据
Table 2 Data on Sungo Bay sediments

$\bar{X} \pm SD, n = 19$

底质分层/cm Sediment depth	含水量/% Water content	容积质量 Volume weight /(g · mL ⁻¹)	体积质量 Specific gravity	孔隙度 Porosity	$\omega(\text{POM})/\%$	总氮 TN content /($\mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1}$)	总磷 TP content /($\mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1}$)
0-5	31.2 ± 1.6	1.17 ± 0.14	2.43 ± 0.10	0.52 ± 0.06	5.26 ± 1.49	11.0 ± 2.3	12.3 ± 0.53
5-10	28.9 ± 1.1	1.19 ± 0.06	2.36 ± 0.10	0.49 ± 0.02	5.49 ± 1.02	10.8 ± 2.5	12.3 ± 0.46
10-15	30.9 ± 0.6	1.20 ± 0.08	2.32 ± 0.08	0.47 ± 0.03	5.98 ± 0.98	12.0 ± 2.0	11.9 ± 0.40

3 讨论

3.1 研究的成果和意义

在大洋地区,从海水中沉降的颗粒物质与外界输入的可被初级生产力利用的营养素之间有定量关系,即透光层的初级生产力与沉积有机物的输出具有量平衡关系,大洋和沿岸海域的营养元素的通量的估计也以这一平衡作为依据^[16-17]。Kasper系统描述了贻贝养殖区氮循环的模型,并把贻贝的生物沉积作为一个重要的支线^[5]。氮和磷作为海洋里对新生产力最重要的营养元素,不断地进行着循环和转化,而海水中颗粒物质的沉积作用作为一个把海洋与底质藕联起来的关键因素,在进行海洋建模和研究营养盐的迁移和转化等问题中意义尤其重大。本研究正是以此为依据对桑沟湾的氮磷通量作出探讨,实验结果可以应用于海区养殖容量的研究中,并在负反馈的方面对有关模型进行改进。

海带和贝类一直是我国沿海港湾的主要养殖对象。在桑沟湾,海带、扇贝和牡蛎是最主要的养殖品种。Kasper等观察到,贻贝的生物沉积使养殖海域的沉积物结构变得更细,颜色变暗^[5,7-8]。本实验在桑沟湾的养殖海区收集的沉积物也有相似的特征,5月和7月时段是水温上升最迅速的时期,各种海洋生物对水温的迅速上升会发生不同的反应,从受养殖生物影响较大的养殖海区的沉积速率来看,这2个时段各区的沉积速率区间差异极为显著,尤其海带区明显低于扇贝和牡蛎养殖区;而在其他时段,3个区之间的沉积速率差异是不显著的。这至少从

某方面说明了5月和7月各种生物有相对较活跃的代谢和活动。由本实验测定数据估算的每年桑沟湾沉至海底的沉积物的量是101.76 kg/m²,然而桑沟湾多年来底质软泥厚度没有急剧增加,却揭示了该海区沉积物的矿化分解和再悬浮的作用是难以忽视的。本研究中第2时段较低的数据值初步显示了海底积累的颗粒物的量,随着时间的延长会由于溶失矿化而显著减少。Nixon等^[18]在某些沿海海域发现,海底沉积物的再悬浮的量已经大于新沉淀下来的颗粒物。桑沟湾的自然沉积速率大约为烟台四十里湾的10倍,总体较高的沉积速率显示了该湾滤食性贝类对海水颗粒物质的加速沉积作用^[20]。

本实验收集的水层沉积物中有机质含量在第3时段的偏高可能与低温下有机物质的分解矿化作用变缓有关。桑沟湾水层沉积物有机质的含量(8.4%~13.6%)明显低于悬浮颗粒物有机质含量(14.2%~41.3%)^[19],反应了实际沉积物与海水悬浮颗粒物之间有机质含量的差别,海水的悬浮颗粒物中还包含着大量有生命的浮游生物有机体。孙云明^[20]认为,罗源湾冬季的颗粒磷主要受悬浮和陆源输入所控制,而夏季主要受生物活动所控制。桑沟湾养殖海区颗粒磷在第3时段(表示冬季特征)比第4(表示春季特征)和第5时段(表示夏季特征)明显偏高,综合考虑冬季颗粒氮含量的偏低,说明桑沟湾冬季沉积物主要由一些含氮较低和含磷相对较高的颗粒物质控制。颗粒磷与水温密切负相关($R^2 = -0.9442$),显示了颗粒磷的季节性差异。一方面因为水温会影响海水中沉积的颗粒无机物和有机

物的结构组成;另一方面水温也会影响磷在沉积物中的吸附与释放,低温可能有利于磷的富集。沉积物捕获器收集的水层沉积物中氮与磷的摩尔比为0.67~2.0,氮磷摩尔比值相对底泥较为均一(见图7),不但远低于其他开阔性海区如南沙珊瑚礁群岛(6.3~14.9)^[21],也低于烟台四十里湾的沉积物(9.7~10.1)^[13]。在海底采集的底泥中氮磷摩尔比在0.025~2之间,说明了海底底质的相对复杂性。由于桑沟湾颗粒物中氮的相对欠缺,制约了水中可以被浮游植物直接利用的溶解态氮的浓度,这从桑沟湾初级生产力大部分时间和区域都处于氮的限制^[22]之中可以得到佐证。

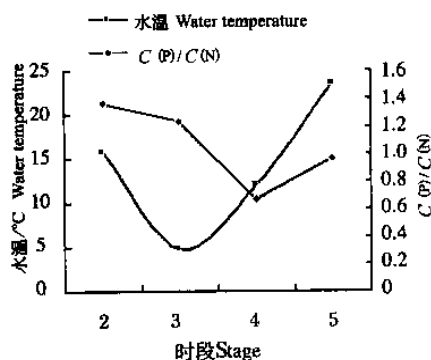


图7 水层沉积物磷氮摩尔比的变化

Fig. 7 P/N ratio in different areas and periods

时段1(Stage1):2001-09-20~2001-10-3;时段2(Stage2):2001-10-05~2001-11-20;时段3(Stage3):2001-12-16~2002-01-02;时段4(Stage4):2002-05-02~2002-05-22;时段5(Stage5):2002-07-10~2002-07-30

底质分析表明,桑沟湾养殖区底质大部分为较粘的软泥,此外还有砂质泥和坚硬的岩石底(近岸区)。沉积物孔隙度是影响沉积物/海水界面营养盐通量的重要因素。本研究结果表明,该区底泥的孔隙度(0.47~0.52)明显小于南沙等海区的底质孔隙度(0.65~0.89)^[21,23]。底泥的有机质含量比水层沉积物中偏低,说明底泥有机质在海底进行了时间更漫长的矿化分解作用,所释放的营养盐通过扩散进入水体,可以提供湾内浮游生物需要量的很大部分。本结果表明,桑沟湾底质大部分站点的氮磷积累情况基本正常,但是有些站点的总氮、总磷和有机质的含量已经超出了国家标准,而且随着养殖业的继续发展,有着进一步恶化的隐患。

3.2 研究结果的误差来源和问题展望

用沉积物捕获器测定海区的通量一直得到广泛的应用,但是由于仪器在现场海水中容易产生涡流和振动,使得测定结果不够精确。由于实验条件的限制,本研究将每个季度15d左右的典型时间段的沉积物沉积速率作为估算全季度沉积速率的基础,海上气候条件的突变和沉积物不同季节的不同矿化速率会使研究结果产生一定误差。

对于沿海岸区,用沉积物捕获器采集的颗粒物来源是很复杂的^[24],在贝类养殖海区,贝类的生物沉积是沉积颗粒物的主体,但其他来源仍无法忽略。因此,对沉积物来源的区分,或者至少区分其生物性和非生物性来源,将是继续研究的要点。海水中颗粒物在开始沉积到被埋藏的整个过程中,一直发生着凝聚和溶失以及有机质的矿化与分解。对其作用与机理的精确研究,不但可以从更深层次上揭示海区沉积物的真实行为,还可以更深刻的了解海洋甚至整个水圈的营养盐循环。

致谢:蒙孝德尚教授对本文的悉心指导、周毅博士对本实验的有益建议,在此谨表谢忱。

参考文献:

- [1] 杨红生,张福绥.浅海筏式养殖系统贝类养殖容量研究进展[J].水产学报,1999,23(1):84-90.
- [2] 杨红生,周毅.滤食性贝类对养殖海区环境影响的研究进展[J].海洋科学,1998,(2):42-44.
- [3] 张志南.水层-底栖耦合生态动力学研究的某些进展[J].青岛海洋大学学报,2000,30(1):115-122.
- [4] Young D K, Rhoads D C. Animal-sediment relations in Cape Cod Bay, Massachusetts[J]. Mar Bio, 1971, 11:242-254.
- [5] Kaspar H F, Gillespie P A, Boyer I C, et al. Effects of mussel aquaculture on the nitrogen cycle and benthic communities in Kenepuru Sounds, New Zealand[J]. Mar Biol, 1985,85:127-136.
- [6] Hall P O J, Holby O, Kollberg S, et al. Chemical fluxes and mass balance in a marine fish cage farm. I. Carbon[J]. Mar Ecol Prog Ser, 1990,61:61-73.
- [7] Jaramillo E, Bertrán C, Bravo A, et al. Mussel biodeposition in an estuary in southern Chile[J]. Mar Ecol Prog Ser, 1992, 82:85-94.
- [8] Hatcher A, Grant J, Schofield B, et al. Effects of suspended mussel culture (*Mytilus* spp.) on sedimentation[J]. Mar Ecol Prog Ser, 1994,115:219-235.
- [9] Gilbert F, Souchy P, Bianchi M, et al. Influence of shellfish farming activities on nitrification, nitrate reduction to ammonium and denitrification at the water-sediment interface of the Thau lagoon, France[J]. Mar Ecol Prog Ser, 1997,37:115-123.
- [10] 匡世煥,方建光,孙慧玲,等.桑沟湾带口扇贝不同季节滤水

- 率和同化率的比较[J]. 海洋与湖沼, 1996, 27(2): 194-199.
- [11] 梁玉波, 杨波, 刘仁沿, 等. 海湾栉口扇贝自身污染的研究[J]. 海洋环境科学, 1998, 17(3): 11-17.
- [12] 方建光, 孙慧玲, 匡世煥, 等. 泥蚶幼虫滤水率和摄食率的研究[J]. 海洋与湖沼, 1999, 30(2): 167-171.
- [13] 周毅, 毛玉泽, 杨红生, 等. 四十里湾栉口扇贝滤水率、摄食率和吸收效率的现场研究[J]. 生态学报, 2002, 22(9): 45-49.
- [14] Ariella Raveh, Yoram Avnimelech. Total nitrogen analysis in water, soil and plant material with persulphate oxidation[J]. Water Research, 1979, 13: 911-912.
- [15] 国家海洋局, 海洋调查规范[M]. 北京: 海洋出版社, 1991.
- [16] Eppley R W, Peterson B J. Particulate organic matter flux and planktonic new production in deep ocean[J]. Nature, 1979, 282: 677-680.
- [17] Olesen T G. Seasonal sedimentation of autochthonous material from the euphotic zone of a coastal system[J]. Estuarine Coastal Shelf Sci, 1995, 41: 475-490.
- [18] Nixon S W. Remineralization and nutrient cycling in coastal marine ecosystems[A]. Estuaries and Nutrients[C]. New Jersey: Humana Press Clifton. 643.
- [19] 匡世煥, 方建光等. 桑沟湾海水中悬浮颗粒物的动态变化[J]. 海洋水产研究, 1996, 17(2): 60-65.
- [20] 孙云明, 宋金明. 中国浅海沉积物在生源要素循环中的功能[J]. 海洋环境科学, 2002, 21(1): 26-33.
- [21] 宋金明. 中国近海沉积物-海水界面化学[M]. 北京: 海洋出版社, 1997.
- [22] 刘慧, 方建光, 董双林, 等. 莱州湾和桑沟湾养殖海区主要营养盐的周年变动及限制因子[J]. 中国水产科学, 2003, 10(3): 227-234.
- [23] 周伟华, 吴云华, 陈绍勇. 南沙群岛海域沉积物间隙水营养盐(氮、磷、硅)的研究[J]. 热带海洋学报, 2001, 20(4): 49-55.
- [24] Claus Lundsgaard, Michael Olesen. The origin of sedimenting detrital matter in a coastal system[J]. Limnol Oceanogr, 1997, 42(5): 1001-1005.

Natural sedimentation in large-scale aquaculture areas of Sungo Bay, north China Sea

CAI Li-sheng¹, FANG Jian-guang², LIANG Xing-ming²

(1. Fisheries College, Ocean University of China, Qingdao 266003, China;

2. Key Laboratory for Sustainable Utilization of Marine Fisheries Resource, Qingdao 266071, China)

Abstract: Sungo Bay is located to the east of Shandong Peninsula where scallop, oyster and kelp have been cultured in large scale for many years. The experiment was conducted in five periods from September 2001 to July 2002. The scallop, oyster and kelp culture areas were chosen as the experiment spots, and in each spot 3 × 3 sediment traps were set to collect the falling particulate matter. The concentrations of TN, TP and POM in the particulate matter both from the traps and the sediments of the experimental areas were measured. The results showed that the yearly average sedimentary rate of particulate matter was 278.8 g/(m²·d) in the areas, and 190.4 μg of TN, 472.5 μg of TP and 0.103 g of POM in per gram of the particulate sediments were carried down to the bottom. There was an obvious seasonal variation in terms of TN and TP contents in the particles that the peak value of the TN content appeared in May, and the bottom value appeared in December, while the value of TP content was higher in cold season (December) than in warm season (May, July). The N/P ratio of the sinking sediments ranged 0.67-2.0, but that in the sediments was in the range of 0.025-2.0. The purpose of this experiment is to provide a field basis for the studies of the nutrient flux and the carrying capacity of shallow sea aquaculture.

Key words: natural sediments; TN; TP; P/N ratio; molluscan culture area

Corresponding author: FANG Jian-guang. E-mail: fangjg@ysfri.ac.cn