DOI: 10.5846/stxb201302260306

张安国,袁秀堂,侯文久,陈卫新,赵凯,巴福阳,张作振.文蛤的生物沉积和呼吸排泄过程及其在双台子河口水层-底栖系统中的耦合作用.生态学报,2014,34(22):6573-6582.

Zhang A G, Yuan X T, Hou W J, Chen W X, Zhao K, Ba F Y, Zhang Z Z.Influence of biodeposition, respiration, and excretion of the buried clam *Meretrix meretrix* on the pelagic-benthic coupling in Shuangtaizi Estuary. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(22):6573-6582.

文蛤的生物沉积和呼吸排泄过程及其在双台子 河口水层-底栖系统中的耦合作用

张安国^{1,2,3},袁秀堂^{1,*},侯文久²,陈卫新⁴,赵 凯⁴,巴福阳⁴,张作振⁴

(1. 国家海洋环境监测中心,大连 116023;2. 辽宁医学院畜牧兽医学院水产养殖教研室,锦州 121001;3. 宁波大学海洋学院,宁波 315211;4. 辽宁省盘山县海洋与渔业局,盘锦 124010)

摘要:为揭示河口埋栖性双壳贝类优势种类在水层——底栖系统中的生态耦合作用,利用生物沉积物捕集器和封闭式代谢瓶, 于双台子河口现场研究了文蛤主要生理生态过程如生物沉积速率、耗氧率、排氨率和排磷率的季节变化。结果表明,文蛤的生 物沉积速率、耗氧率、排氨率及排磷率均具有明显的季节变化:夏季最高,冬季最低。二龄及三龄文蛤个体的生物沉积速率周 年变化分别为0.02—0.30 g⁻¹个⁻¹ d⁻¹、0.06—0.60 g⁻¹个⁻¹ d⁻¹;耗氧率变化分别为0.45—16.64 mg⁻¹个⁻¹ d⁻¹、1.03—30.51 mg⁻¹个⁻¹ d⁻¹;排氨率季节变化分别为0.001—0.14 mg⁻¹个⁻¹ d⁻¹、0.002—0.28 mg⁻¹个⁻¹ d⁻¹;排磷率季节变化分别为0.002—0.069 mg⁻¹个⁻¹ d⁻¹、0.003—0.16 mg⁻¹个⁻¹ d⁻¹。文蛤的生物沉积速率及呼吸排泄速率均受龄期制约:在同一季节,文蛤的单位个体生物沉积速 率及呼吸和排泄速率均表现为二龄<三龄。方差分析显示,季节、龄期及两者交互作用对文蛤生物沉积速率、耗氧率、排氨率及 排磷率均有显著影响。基于不同季节双台子河口文蛤生物量(0.67 个/m²、2.4 g/m²),估算出文蛤种群每年向该河口排放大约 5321.90 t 生物沉积物(干重)、1.43 t NH⁴₄-N 和 0.93 t PO³⁻₄-P,并且消耗大约 221.59 t O₂。研究结果表明,文蛤通过生物沉积及呼 吸排泄作用,大大加强了双台子河口沉积物-水界面的物质交换通量,在双台子河口水层-底栖系统耦合作用中扮演着重要生态 角色。

关键词:文蛤;生物沉积;呼吸;排泄;水层-底栖耦合;双台子河口

Influence of biodeposition, respiration, and excretion of the buried clam *Meretrix meretrix* on the pelagic-benthic coupling in Shuangtaizi Estuary

ZHANG Anguo^{1,2,3}, YUAN Xiutang^{1,*}, HOU Wenjiu², CHEN Weixin⁴, ZHAO Kai⁴, BA Fuyang⁴, ZHANG Zuozhen⁴

1 National Marine Environmental Monitoring Center, State Oceanic Administration (SOA), Dalian 116023, China

2 College of Animal Husbandry and Veterinary, Liaoning Medical University, Jinzhou 121001, China

3 School of Marine Science, Ningbo University, Ningbo 315211, China

4 Panshan Marine Fisheries Bureau, Panjin 124010, China

Abstract: In order to evaluate the effect of the dominant buried clam on pelagic-benthic coupling in an estuary ecosystem, the field experiments on biodeposition, respiration and excretion of *Meretrix meretrix* were conducted from July 2010 to April 2011 in the Shuangtaizi Estuary, Bohai Sea of P. R. China. Different sizes of clams, namely 2-yr old clams ((36.36 ± 0.23) mm, SH) and 3-yr old clams ((46.60 ± 0.23) mm, SH) were collected respectively. The results showed that there

基金项目:海洋公益性行业科研专项经费项目(201305043,200805069);国家海洋局近岸海域生态环境重点实验室开放基金(201311);锦州市 科学技术计划项目(13A1E14)

收稿日期:2013-02-26; 网络出版日期:2014-03-14

* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: xtyuan@nmemc.gov.cn

http://www.ecologica.cn

were significant seasonal changes on biodeposition, oxygen consumption and excretion rates of the hard clams among four seasons, with the maximum rates in summer and minimum rates in winter. The seasonal variation of biodeposition rates for 2 and 3-year-old *M. meretrix* were $0.02-0.30 \text{ g}^{-1} \text{ ind}^{-1} \text{ d}^{-1}$ and $0.06-0.60 \text{ g}^{-1} \text{ ind}^{-1} \text{ d}^{-1}$, respectively, among seasons. The hard clams consumed considerable amount of oxygen, ranging from $0.45-16.64 \text{ mg}^{-1} \text{ ind}^{-1} \text{ and } 1.03-30.51 \text{ mg}^{-1} \text{ ind}^{-1}$ d⁻¹ for 2 and 3-year-old species, respectively. Ammonium excretion rates respectively ranged from $0.001-0.14 \text{ mg}^{-1} \text{ ind}^{-1}$ d⁻¹ and $0.002-0.28 \text{ mg}^{-1} \text{ ind}^{-1}$ dr⁻¹ for 2 and 3-year-old clams. The hard clam *M. meretrix* released $0.002-0.069 \text{ mg}^{-1}$ ind⁻¹ d⁻¹ and $0.003-0.16 \text{ mg}^{-1} \text{ ind}^{-1} \text{ d}^{-1} \text{ PO}_4^3$ -P in the 2 and 3-year-old clams. All the physiological rates of the tested clams at the same season showed a similar tendency of 2-year-old < 3-year-old among the four seasons. One-way ANOVA showed that there were significant effects of seasonality, clam age and their interactions on biodeposition, respiration and excretion rates of the clam. A density of 0. 67 ind/m² of and a biomass of 2.4 g/m² were previously observed in spring, summer and autumn in twelve sampling sites of the Shuangtaizi Estuary. Based on the above data, it is estimated that the hard clams may produce 1.43 tons of NH₄⁺-N, 0.93 tons of PO₄³⁻-P and discharge as much as 5321.90 tons of deposit to the estuary waterbody, and consume 221.59 tons of O₂ annually. Our study indicates that *M. meretrix* populations greatly enhanced material exchange fluxes across the water-sediment interface through its biodeposition, respiration and excretion process, and plays an important role in pelagic-benthic coupling in Shuangtaizi Estuary.

Key Words: Meretrix meretrix; biodeposition; respiration; excretion; pelagic-benthic coupling; Shuangtaizi Estuary

双壳贝类是近海生态系统的重要结构组分,并 在系统的能量流动和物质循环中扮演重要角色。在 河口和半封闭海湾等易富营养化的海域,其分布丰 度较高。大多数双壳贝类(如扇贝、贻贝、牡蛎和蛤 类等)具有较强的滤水能力,能过滤大量的细小颗粒 有机物,包括浮游藻类、微生物、中型浮游动物以及 来源于贝类及其它动物的粪粒碎屑^[1-2]。双壳贝类 通过滤水、摄食等生理活动,摄取海水中的有机颗 粒,加速其沉降速率,同时减少浮游生物量。双壳贝 类还可通过排泄作用将大量的营养盐排入水体中, 对浮游植物生长具有重要意义;特别是无机形态的 $N(NH_4^+-N)$ 和 P(PO_4^{3-}-P)的再循环,成为维持海洋初 级生产力的重要营养盐来源[3-5]。双壳贝类的生物 沉积速率、耗氧率、排氨率和排磷率等生理生态学参 数通常随着海水环境的季节性差异而变化[6]。这些 参数既能反应双壳贝类的生理特征,也能反映双壳 贝类对环境的响应。

河口为咸淡水交汇混合区,河水携带大量泥沙 入海,在入海口形成大面积浅滩;同时,河水携带大 量营养盐及有机质入海,河口水域营养充足,因而, 河口滩涂生境埋栖性贝类资源丰富^[7]。双台子河口 位于辽东湾顶部,滩涂面积达 6.7 万 hm²,占整个辽 东湾滩涂面积的 56%,是我国北方滩涂埋栖性贝类 的主要栖息地之一,在环渤海经济圈中具有举足轻 重的地位。

文蛤(Meretrix meretrix),又名短文蛤(Meretrix petechialis, Lamarck, 1818)^[8],属软体动物门 (Mollusca),双壳纲(Bivalvia)。文蛤被誉为"天下第 一鲜",深受国内外消费者欢迎,是出口创汇的重要 水产品之一。文蛤属于广温、广盐性滩涂埋栖性双 壳贝类,地理分布较广,在日本、朝鲜和中国沿海分 布较多^[9]。文蛤在我国南北沿海均有分布,尤以河 口滩涂生境丰度较高,如辽宁双台子河口和辽河口、 山东黄河口、江苏长江口、广西北海湾等地,其中在 辽宁双台子河口潮间带及潮下带滩涂中尤为丰富, 为该河口滩涂生境主要优势种之一^[10]。

目前,关于文蛤生理生态方面的研究报道较少, 且这些研究大多是在实验室条件下开展的^[11-16],尚 未见文蛤生物沉积及呼吸排泄等主要生理生态过程 的现场研究。本文采用生物沉积物捕集器和封闭式 代谢瓶法在双台子河口周年现场研究了二龄和三龄 文蛤的生物沉积速率、耗氧率、排氨率和排磷率等主 要生理生态过程的季节变化。实验利用生物沉积物 捕集器及呼吸瓶现场研究贝类生理生态学的优点在 于:1)能较好反映自然海区颗粒物丰度和水流等环 境条件;2)实验中测定生物沉积速率及呼吸排泄速 率时中为埋栖性贝类文蛤提供原栖息地细沙作为埋 栖物,更符合其在自然条件下的生理特性;3)具有完 整的较长时间尺度性,因而受贝类偶然摄食行为的 变化影响小^[17]。上述实验方法优点使我们能更精 确掌握文蛤主要生理生态过程的季节变化规律和特 点,有助于准确评价双台子河口埋栖性双壳贝类优 势种在河口水层-底栖系统中耦合作用中所扮演的 生态角色。

1 研究海域与研究方法

1.1 研究海域及实验地点

研究区域位于我国渤海北部双台子河口的盘山 海域(图1)。该实验海域的滩涂底质以泥沙质及泥 质为主,海水中有机颗粒物丰富,是文蛤生长繁殖的 主要场所。实验地点位于双台子河口滩涂高潮线附近面积6hm²、水深1.5—2.0m的池塘中。该池塘通 过潮水沟渠与河口海域相通,并根据当地潮汐规律 定时纳入新鲜的海水,保证池塘中海水水质条件与 自然海区水质条件基本一致。

1.2 实验文蛤的选择与处理

分别于 2010 年 7 月(夏季)、10 月(秋季)、12 月 (冬季)及 2011 年 4 月(春季)进行实验。每次实验 前从河口滩涂中挖取文蛤,挑选体质健康的个体带 回实验场地暂养 24 h,供生物沉积和呼吸排泄实验 所用。



Fig.1 Experimental sites in Shuangtaizi Estuary

1.3 实验池塘环境因子和海水颗粒物的测定

实验期间(5—7d)每间隔 1—2 d 用多参数水质 仪(YSI6600V₂)测定实验池塘的水温、盐度及叶绿素 a(Chl a)含量;同时取实验池塘水样过滤,以测定水 体的总悬浮颗粒物(TPM)、颗粒有机质(POM)、颗 粒有机碳(POC)、颗粒有机氮(PON)和颗粒有机磷 (POP),实验用事先于450℃下灼烧过6h并称量的 GF/F滤膜(直径47 mm)两张分别过滤250—500 mL水样,用蒸馏水脱盐并将滤膜在65℃条件下干 燥24h后,称量以测定TPM;其中一张以传统的灰 化(450℃,6h)前、后的质量差法测定POM;另外一 张用 Elementar Vario Macro CHN 型元素分析仪测定 POC 和 PON,分析前将滤膜放在干燥器中用浓盐酸 烟雾去除碳酸盐^[18]。另外两张以改进的灰化法^[19] 分别测定滤膜上的总磷(TP)和无机磷(IP)含量,从 而求得 POP。取每次水样测定数据的平均值作为实验点该季节上述各指标的背景值。

1.4 文蛤生物沉积速率的现场测定

为充分考虑埋栖性贝类的生态习性,准确测定 实验文蛤的生物沉积速率,本实验采用埋栖性贝类 生物沉积物捕集器(图 2)收集文蛤的生物沉积物。 该捕集器由内直径为 19 cm 的 PVC 圆柱筒制成,分 为 A、B 两部分,高度分别为 30 和 40 cm; A 部分内 部均匀分散地垂直装有 4 个 PVC 圆管(深 5 cm,底 部密封),圆管顶部距 A 外壁顶部 5 cm。使用时,首 先将 A 与 B 连在一起,圆管内放满细砂(细砂提前 用淡水淘洗,烘干后经 60 目筛网滤掉更细的颗粒后 经 450 ℃灼烧 6 h、再冲洗和烘干)。实验时将文蛤 垂直插入圆管的细砂中,文蛤的进出水管一端朝上, 每个圆管放 1 个实验文蛤。文蛤产生的生物沉积物 将落于 PVC 圆桶 B 的底部。实验共使用 9 个捕集 器,其中 3 个放置二龄文蛤,3 个放置三龄文蛤,另外 3 个不放文蛤作为对照。将生物沉积物捕集器固定 于铁架上,将铁架捆绑结实后,轻置于实验池塘底 部。5 d 后将捕集器取出,带回实验室,取出文蛤个 体,检查和记录死亡情况,之后测量其壳高(H, mm),取出其软体组织于 65 ℃条件下干燥 24—36 h 后,测量其软体干重(DM,g)。实验所用贝类为壳高 (36.36 ± 0.23) mm、湿重(23.41 ± 0.47)g、软体干重 (0.58 ± 0.02)g 的二龄文蛤,和壳高(46.60 ± 0.70) mm、湿重(45.85 ± 1.80)g、软体干重(1.45 ± 0.11)g 的三龄文蛤个体。



图 2 生物沉积物捕集器示意图 Fig.2 Sketch map of sediment trap

待捕集器静置 3—5 h 后,用虹吸法吸除上清海 水,将 A、B 两部分的沉积物用毛刷搅拌均匀后用 60 目筛绢网过滤。将所得沉积物收集至烧杯中。用蒸 馏水脱盐、烘干(65 %,72—96 h)、称量,干燥保存待 测。沉积物中有机物(OM)百分含量通过传统的灰 化(450 %,6 h)前后的质量差法测定;沉积物中有机 碳(OC)和有机氮(ON)百分含量用 Elementar Vario Macro CHN 型元素分析仪测定,分析前需对磨成粉 末状的沉积物样品进行预处理:用 1 mol/L 的 HCl 浸泡 18 h,并在 65 %下烘干 24 h^[20]。沉积物中有机 磷(OP)百分含量通过改进的灰分法^[19]分别测定沉 积物中总磷(TP)和无机磷(IP)的含量求得。

生物沉积速率通过方程 $R_{\rm b} = (D_{\rm t}-D_{\rm c})/T/N$ 计算。式中, $R_{\rm b}(g^{-1}\uparrow^{-1}d^{-1})$ 为生物沉积速率; $D_{\rm t}(g)$ 和 $D_{\rm c}(g)$ 分别为实验组和对照组所收集的沉积物干重; T 为时间(d);N 为实验用文蛤个数。

1.5 呼吸排泄速率的现场测定
 呼吸排泄实验用规格约为 6.4 L 带胶塞玻璃瓶

作为代谢瓶在实验池塘现场进行。实验前用定容法 准确测量出每个代谢瓶的体积,代谢瓶内均装有5 cm 厚的颗粒均匀的细砂(细砂处理方法同 1.4)。实 验时先用虹吸法加满实验池塘的海水,然后每个代 谢瓶中放置文蛤 2-6个(具体个数根据每次实验水 温调整)。共设9个代谢瓶,其中3个放置二龄文 蛤,3个放置三龄文蛤,另3个不放文蛤作为对照。 待代谢瓶中文蛤下潜并伸出进出水管后(30—60 min),盖上瓶塞密封并计时。将代谢瓶置于网袋中 放入实验池塘中,代谢瓶浸入海水中1.5 m 左右,以 保持实验温度与现场海水温度一致。24 h 后,从海 水中取出代谢瓶并轻轻打开瓶塞,待搅拌棒将瓶中 海水轻轻搅匀后(不搅起气泡),用 YSI6600V2多参 数水质仪测定代谢瓶中的溶氧含量,虹吸法吸取代 谢瓶中水样以测定 NH₄⁺-N 和 PO₄³⁻-P 含量。虹吸水 样后取出文蛤。将虹吸的水样过滤后加入氯仿放入 冰箱中冷冻保存待测定。样品中 NH4-N 和 PO4-P 含量分别采用次溴酸盐氧化法和磷钼蓝分光光度法 测定。

耗氧率

 $R_0 = \left[\left(C_{10} - C_{11} \right) \times V_r \right] / \left[N \times (t_1 - t_0) \right]$

式中, C_{10} 、 C_{11} (mg/L)分别指实验开始和结束时 代谢瓶中溶解氧的浓度; V_i 是代谢瓶中海水的体积 (代谢瓶体积去除细砂和实验文蛤的体积);N 是代 谢瓶内实验文蛤的个数; t_0 和 t_1 分别是实验开始和结 束的时间。

排氨率(或排磷率)

 $R_{N}(ext{id} R_{P}) = [(C_{11}-C_{10}) \times V_{r}]/[N \times (t_{1}-t_{0})]$ 式中, $C_{10} \times C_{11}(ext{ing/L}) 分别指开始和结束时代谢瓶中$ NH⁴₄-N(ext{id} PO³⁻₄-P) 的浓度; V_{r} 是代谢瓶中海水的体 积(代谢瓶体积去除细砂和实验文蛤的体积);N 是 代谢瓶内实验文蛤的个数; t_{0} 和 t_{1} 分别是实验开始和 结束的时间。

1.6 双台子河口文蛤丰度和生物量的调查

分别于 2011 年 7 月(夏季)、10 月(秋季)、2012 年 5 月(春季)于大潮期对双台子河口滩涂文蛤资源 量进行了调查分析。现场调查布设 3 个断面,每个 断面以低潮为基点向岸边辐射,均匀布设 4 个站位 (图 1),每个站位随机选取 3 个取样点,每个取样点 面积为 10 m²,取样点深度约为 20 cm。将每个取样 点内文蛤全部取出,统计每个取样点内文蛤个体数。 依据文蛤贝壳表面的生长轮和透光观察到的明暗带 来推算其龄期^[21]。将调查得到的所有文蛤测量壳 高,然后称湿重(WM,g)后取出其软体组织,于65℃ 条件下干燥36—48 h 后测量其软体干重(DM,g)。 根据以上参数计算文蛤单位面积密度(个/m²)和单 位个体软体干重(g/个),从而估算双台子河口滩涂 生境文蛤丰度和生物量。

1.7 数据标准化和统计分析

为消除文蛤的规格差异对实验参数($R_{\rm b}$ 、 $R_{\rm o}$ 、 $R_{\rm N}$ 、 $R_{\rm P}$)的影响,将所得数据进行标准化处理。所用 公式^[22]

$$Y_{\rm s} = (W_{\rm s}/W_{\rm e})^{\rm b} \times Y$$

式中, Y_s 是标准化后个体的速率; W_s 代表标准化后个体软体干重(二龄文蛤为 0.60 g;三龄文蛤为 1.45 g); W_e 为实验文蛤的软体干重; Y_e 为现场实验获得的单位个体文蛤生物沉积速率、耗氧率、排氨率和排磷率;b为文蛤的上述速率与软体干重回归方程 $R_x = a \times W_e^b$ 的幂值。

应用 SPSS13.0 软件包对实验数据进行单因素 方差分析(one-way ANOVA),并结合 Duncan 法进行 多重比较,并以 P = 0.05 作为差异显著的标准。

2 结果与分析

2.1 实验池塘环境因子季节变化特征

如表 1 所示,实验池塘海水温度季节变化显著 (P < 0.05)。春季水温为 12.0 °C,夏季达到最高值 (28.2 °C),随后逐渐降低,秋季达到 16.8 °C,冬季降 至-0.2 °C。海水盐度变化较小,范围为 19—23 psu; 海水中叶绿素 a(Chl a)含量在冬季达到最低,夏季 达到最高,变化范围为 5.0—20.0 µg/L;海水中总悬 浮物浓度(TPM)和颗粒有机质(POM)含量均较高, 分别为 31.9—55.6 mg/L、8.6—15.0 mg/L;总悬浮物 中颗粒有机碳(POC)和颗粒有机氮(PON)含量均在 夏季达到最高,变化范围分别为 0.93—3.13 mg/L、 0.24—0.66 mg/L;颗粒有机磷(POP)含量变化较 大,为 29.59—203.01 µg/L。

表1 实验池塘环境因子及海水颗粒物季节变化

	Table 1 Season	hai variations of e	invironmentai	factors and wa	er particulate i	natter in the ex	permientar pone	1
季节	温度/℃	盐度	Chl a∕	TPM/	POM/	POC/	PON/	POP/
Season	Temperature	Salinity (psu)	(µg/L)	(mg/L)	(mg⁄) L	(mg/L)	(mg/L)	(µg/L)
春季 Spring	12.0	20	12.4	55.5	12.4	0.93	0.57	203.0
夏季 Summer	28.2	20	20.0	55.6	15.0	3.13	0.66	73.0
秋季 Autumn	16.8	19	5.4	31.9	8.6	1.32	0.31	29.6
冬季 Winter	-0.2	23	5.0	44.1	10.2	1.04	0.24	118.7

Chl a: 叶绿素 a, Chlorophyll a; TPM: 总悬浮颗粒物, Total particulate matter; POM: 颗粒有机质, Particulate organic matter; POC: 颗粒有机 碳, Particulate organic carbon; PON: 颗粒有机氮, Particulate organic nitrogen; POP: 颗粒有机磷, Particulate organic phosphorus



图 3 文蛤生物沉积速率季节变化

Fig.3 Seasonal variations in the biodeposition rates of *Meretrix meretrix*(mean±SE)

图中数值为平均值±标准误,样本量为3;同实验季节不同字母 表示差异显著

2.2 文蛤的生物沉积速率季节变化

文蛤的生物沉积速率季节变化表现为夏季最高,春季次之,秋季再次,冬季最低(图3)。同一季节,文蛤的单位个体生物沉积速率表现为二龄<三龄。二龄与三龄文蛤的生物沉积速率周年变化分别为0.02—0.30 g⁻¹个⁻¹ d⁻¹(年均值为0.19 g⁻¹个⁻¹ d⁻¹)、0.06—0.60 g⁻¹个⁻¹ d⁻¹(年均值为0.36 g⁻¹个⁻¹ d⁻¹)。Duncan 氏多重比较表明,二龄文蛤个体在春季与夏季的生物沉积速率差异不显著(P>0.05),但显著高于秋季及冬季(P<0.05)。冬季文蛤生物沉积速率显著低于秋季(P<0.05)。三龄文蛤个体在春季、夏季、秋季及冬季间的生物沉积速率显著高于其它3个季节(P<0.05),冬季时的生物沉积速率显著低

于春季及秋季(P<0.05)。方差分析显示,季节、规格 及两者交互作用对文蛤生物沉积速率均有显著影响 (P<0.05)。相关性分析显示,文蛤的生物沉积速率 与温度、POM及Chla均呈明显的正相关关系(r=0. 831,P<0.05;r=0.597,P<0.05;r=0.730,P<0.05), 与盐度呈负相关关系(r=-0.707,P<0.05),与TPM 相关性不显著(r=0.420,P>0.05)。

2.3 文蛤的耗氧率季节变化

文蛤的耗氧率季节变化见图 4。结果表明,二龄 与三龄文蛤的耗氧率均在夏季达到最高,冬季最低。 二龄、三龄文蛤的耗氧率分别为 0.45—16.64 mg⁻¹ 个⁻¹ d⁻¹(年均值为 7.50 mg⁻¹ 个⁻¹ d⁻¹)、1.03—30.51 mg⁻¹ 个⁻¹ d⁻¹(年均值为 14.99 mg⁻¹ 个⁻¹ d⁻¹)。在同一 季节,文蛤的单位个体耗氧率总体表现为二龄<三 龄。双因素方差分析显示,季节、规格及两者交互作 用对文蛤耗氧率影响显著(F = 102.68, P < 0.05; F =72.66,P < 0.05; F = 9.44, P < 0.05)。Duncan 氏多重比 较表明,二龄与三龄文蛤个体在夏季的耗氧率均显 著高于其他三个季节(P < 0.05);冬季时的耗氧率均 显著低于春季及秋季(P < 0.05);春季与秋季之间的 耗氧率均差异不显著(P > 0.05)。



图 4 文蛤耗氧率季节变化



图中数值为平均值±标准误,样本量为3;同实验季节不同字母 表示差异显著

2.4 文蛤的排氨率季节变化

文蛤的排氨率季节变化如图 5 所示,二龄与三 龄文蛤的排氨率均在夏季达到最高,冬季最低。在 同一季节,文蛤的单位个体排氨率表现为二龄<三 龄。二龄、三龄文蛤的排氨率分别为 0.001—0.14 $mg^{-1} \uparrow^{-1} d^{-1}$ (年均值为 0.047 $mg^{-1} \uparrow^{-1} d^{-1}$)、0.002— 0.28 $mg^{-1} \uparrow^{-1} d^{-1}$ (年均值为 0.099 $mg^{-1} \uparrow^{-1} d^{-1}$)。双 因素方差分析显示,季节、规格及两者交互作用对文 蛤排氨率影响显著(F=576.65,P<0.05;F=193.91, P<0.05;F=65.32,P<0.05)。单因素方差分析表明, 二龄文蛤个体在春季与秋季的排氨率之间差异不显 著(P>0.05),三龄文蛤个体在不同季节之间的排氨 率均有显著的差异(P<0.05)。两种龄期文蛤个体在 夏季的排氨率均显著高于其它3个季节(P<0.05), 冬季时的排氨率均显著小于春季及秋季(P<0.05)。





Fig.5 Seasonal variations in the ammonium excretion rates of *Meretrix meretrix*(mean±SE)

图中数值为平均值±标准误,样本量为3;同实验阶段不同字母 表示差异显著

2.5 文蛤的排磷率季节变化

文蛤的排磷率季节变化见图 6。结果表明,二龄 与三龄文蛤的排磷率均在夏季最高,春季次之,秋季 再次,冬季最低。在同一季节,就单位个体而言,文 蛤的排磷率变化表现为二龄<三龄。二龄、三龄文蛤 的排磷率分别为 0.002—0.069 mg⁻¹个⁻¹ d⁻¹(年均值 为 0.029 mg⁻¹个⁻¹ d⁻¹)、0.003—0.16 mg⁻¹个⁻¹ d⁻¹(年



图 6 文蛤排磷率季节变化

Fig.6 Seasonal variations in the phosphate excretion rates of *Meretrix meretrix*(mean±SE)

图中数值为平均值±标准误,样本量为3;同实验阶段不同字母 表示差异显著 均值为 0.066 mg⁻¹个⁻¹ d⁻¹)。双因素方差分析显示, 季节、规格及两者交互作用对文蛤排磷率有显著影 响(F = 176.61, P < 0.05; F = 100.60, P < 0.05; F = 29.49, P < 0.05)。Duncan 氏多重比较表明,二龄与 三龄文蛤在秋季与冬季时的排磷率均差异不显著 (P > 0.05),但均显著低于其它两个季节(P < 0.05)。 两种规格文蛤个体在夏季的排磷率均显著高于春季 (P < 0.05)。

2.6 双台子河口文蛤资源量调查结果

22 期

双台子河口滩涂春季、夏季及秋季文蛤分布密 度分别为0.65、0.78、0.59个/m²,年均值为0.67个/ m²。单位个体的软体干重分别为2.24、6.60、1.96g/ 个,年均值为3.6g/个(表2)。对该河口文蛤种群结 构的分析结果表明,二龄和三龄个体在整个种群中 占比例较大,其中二龄个体50%左右,三龄个体接近 30%;而一龄个体和四龄个体均低(图7)。

表 2 双台子河口滩涂春季、夏季及秋季时文蛤的分布密度及软体 干重

Table 2Density and soft tissue dry mass of Meretrix meretrix in theShuangtaizi Estuary in spring, summer and autumn

季节 Season	分布密度 Density/ (个/m ²)	软体干重 Dry mass of soft tissue/(g/个)
春季 Spring	0.65	2.24
夏季 Summer	0.78	6.60
秋季 Autumn	0.59	1.96





3 讨论

3.1 文蛤生物沉积速率季节变化及其影响因素 贝类的生物沉积在沿岸自然海区生态系统的物

质循环中起着重要作用。尽管关于双壳贝类生物沉 积速率的现场研究已有诸多报道,如栉孔扇贝 (Chlamys farreri)^[22-23]、虾夷扇贝(Patinopecten yessoensis)^[24]、海扇贝(Placopecten magellanicus)^[25]、 菲律宾蛤仔(Ruditapes philippinarum)^[26-27]、太平洋 牡蛎(Crassostrea gigas)^[28-29]、斑马纹贻贝(Dreissena polymorpha)^[30]、厚壳贻贝(Mytilus crassitesta)^[31]等, 但目前为止尚未见文蛤生物沉积速率现场研究的报 道。本研究表明,双台子河口文蛤生物沉积速率呈 现出明显的季节变化,这可能是由水温、海水中颗粒 物浓度以及实验贝类的龄期等因素造成的。

6579

温度是影响贝类生物沉积速率的重要环境因子 之一[24,28,30]。双壳贝类处于适宜的温度范围内,其 滤水活动增强,必然导致其生物沉积速率的增加;超 出适温范围,其生物沉积速率会降低。适合文蛤生 长的水温为 5.5—32 ℃,最适水温 15—27 ℃^[9,21]。 本实验观察到,春季和秋季时,实验池塘水温分别为 12 ℃和 17 ℃, 文蛤处于比较适宜的环境中, 生理代 谢处于较高的水平,其摄食率不断升高,其生物沉积 速率也处于较高值。夏季时,海水温度达到一年中 最高值(均值为 28.2 ℃), 文蛤的摄食活动依然旺 盛,从而导致其生物沉积速率在夏季达到最大值。 这也表明夏季时水温28.2℃尚未达到文蛤的最高耐 受温度,这与其他学者的研究结果基本一致[11,13]。 冬季时,由于实验池塘水温降至-0.2℃,海水温度超 出了文蛤的适温范围,低温制约了文蛤的滤水及摄 食能力,文蛤活动显著减弱,其生物沉积速率也大大 降低。

除温度影响生物沉积速率变化外,贝类个体的 不同龄期也会导致生物沉积速率的变化。本研究发 现,文蛤的生物沉积速率变化与实验贝类龄期有关: 就单位个体而言,在同一季节,文蛤生物沉积速率表 现为三龄>二龄,类似现象也出现在其它双壳贝类 中,如栉孔扇贝^[22]、虾夷扇贝^[24]、太平洋牡蛎^[29]、厚 壳贻贝^[31]等。许多研究表明,饵料的数量和质量会 显著影响双壳贝类的生物沉积速率^[23,28],双壳贝类 能够在水体中颗粒物浓度较高或质量较差时调整其 滤食率,从而改变其生物沉积速率^[32]。文蛤生物沉 积速率与海水中颗粒有机质(POM)呈明显的正相关 关系也证实了贝类生物沉积率的季节变化与海水中 饵料浓度有关。 综上,双台子河口海水中饵料的浓度及实验贝 类龄期直接影响文蛤的生物沉积作用,而温度则通 过影响海水环境中浮游植物的生长繁殖间接制约文 蛤的生物沉积速率。

3.2 文蛤呼吸排泄速率季节变化及其影响因素

呼吸与排泄是贝类新陈代谢的基本生理活动, 它既反映了贝类的生理状态,也反映了环境条件对 贝类生理活动的影响。本研究中双台子河口文蛤耗 氧率的季节变化为 0.45—30.51 mg⁻¹个⁻¹ d⁻¹。由于 国内外关于埋栖性双壳贝类耗氧率的现场研究报道 较少,王晓宇等^[5]现场研究了胶州湾菲律宾蛤仔呼 吸排泄作用的季节变化,结果表明菲律宾蛤仔耗氧 率的季节变化为 0.02—0.56 mg⁻¹个⁻¹ h⁻¹,即 0.50— 13.49 mg⁻¹个⁻¹ d⁻¹。

排氨率及排磷率是反映海洋贝类新陈代谢水平 的重要指标。关于埋栖性双壳贝类排氨率及排磷率 的现场研究报道较少,仅见于庄河海域和胶州湾海 域菲律宾蛤仔排氨率及排磷率的现场研究^[5,27]。现 场研究结果显示,庄河海域菲律宾蛤仔排氨率及排 磷率变化分别为 $0.02-0.26 \text{ mg}^{-1} \text{ h}^{-1}$, $0.01-0.39 \text{ mg}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ d}^{-1}$; 胶州湾菲律宾蛤仔排氨率变化为 $0.08-1.69 \mu \text{mol/ind/h}$,即 $0.03-0.73 \text{ mg}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ d}^{-1}$, 排磷率变化为 $0.02-0.25 \mu \text{mol/ind/h}$,即 $0.03-0.57 \text{ mg}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ d}^{-1}$ 。本研究中双台子河口文蛤排氨率及排 磷率周年变化分别为 $0.001-0.28 \text{ mg}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ d}^{-1}$ 、 $0.002-0.16 \text{ mg}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ d}^{-1}$ 。由于物种差异、实验贝类 个体大小有异及实验海区环境条件的不同,难以比 较二者耗氧率、排氨率及排磷率大小。

本研究结果表明,文蛤呼吸排泄速率的季节变 化显著(P<0.05),表现为夏季最高,冬季最低,类似 的季节变化规律也出现在菲律宾蛤仔^[5,27]、*Spisula subtruncata*^[33]等埋栖性双壳贝类中。文蛤呼吸排泄 速率呈现明显的季节变化趋势,这是因为文蛤的生 长具有季节节律性,4—10月是其主要生长期,此时 海区水温逐渐升高,夏季达到最高,海水中 TPM 和 Chl a 含量也达到最高值,表明文蛤的食物可获得性 增强,致使文蛤的生长速率和生理代谢速率加快。 本研究还发现,在同一季节,就单位个体而言,文蛤 的耗氧率、排氨率及排磷率均表现为二龄<三龄。与 文蛤 相 似,菲律宾 蛤 仔^[27]、硬壳 蛤 (Mercenaria mercenaria)^[34]等埋栖性双壳贝类也表现出类似的规 律。这可能是由于不同龄期贝类的生理代谢速率有 所差异,且随着年龄增长而增加,从而表现出三龄个 体的呼吸排泄速率大于二龄个体。

3.3 文蛤在双台子河口水层-底栖系统中的耦合 作用

在滤食性贝类占明显优势的海区,滤食性贝类 能够通过滤食和生物沉积作用来减少水层中的悬浮 颗粒物,并且对水层中浮游植物生物量有明显的下 行控制效应[22]:通过滤食和生物沉积作用将水层中 大量颗粒物输入沉积层,促进底栖生物群落的发展; 通过排泄作用,将颗粒态氮磷转变为溶解态营养盐, 释放回水体中。如烟台四十里湾养殖海区所有贝类 年生物沉积量累计达 5.92×104 t^[22];大连长山群岛 海域筏式养殖虾夷扇贝每年排放 1.42×10⁶ t 生物沉 积物,向水体释放 1.5×10³ t NH⁺₄-N、1.07×10³ t PO³⁻₄-P^[24]。青岛胶州湾底播增殖菲律宾蛤仔每年排放 4.38×10⁶t 生物沉积物^[35],排泄出 3137 t 氨氮和 902 t 无机磷,因排泄而再循环的 N(NH₄⁺-N)和 P(PO₄⁺-P)分别能满足浮游植物生长所需要的 N、P 的 34% 和 70%^[5]。可见,双壳贝类在沿岸海域生态系统的 物质和营养循环以及能量流动中扮演着重要角色。

据调查,双台子河口二龄与三龄文蛤个体的分 布密度约为 0.67 个/m²,双台子河口滩涂面积约为 8.06×10⁷ m^{2[10]},可估算出双台子河口滩涂约有 5.40 ×10⁷个文蛤个体,其中二龄和三龄个体约占 80%。 本研究中双台子河口文蛤生物沉积速率、耗氧率、排 氨率及排磷率年均值分别为 0.27、11.24、0.07、0.05 mg⁻¹个⁻¹ d⁻¹。基于以上数据,本文估算出双台子河 口文蛤每年向海域排放大约 5321.90 t 生物沉积物、 1.43 t NH₄⁴-N、0.93 t PO₄³⁻-P,并且消耗 221.59 t O₂。

总之,文蛤通过滤食和生物沉积作用增加悬浮 颗粒物从水柱到底部环境的通量;通过生物沉积物 及其矿化作用对滩涂底质物理化学环境构成造成冲 击;通过 N、P 排泄作用加速营养盐的循环,从而影响 水层中的物理化学环境。文蛤的生物沉积及呼吸排 泄等主要生理生态过程在整个河口水层-底栖系统 耦合作用中扮演着重要生态角色。

References :

[1] Davenport J, Smith R J J W, Packer M. Mussels *Mytilus edulis*: significant consumers and destroyers of mesozooplankton. Marine Ecology Progress Series, 2000, 198: 131-137. Mazzola A, Sara G. The effect of fish farming organic waste on food availability for bivalve molluscs (Gaeta Gulf, Central Tyrrhenian, MED): stable carbon isotopic analysis. Aquaculture, 2001, 192(2-4): 361-379.

22 期

- [3] Cockcroft A C. Nitrogen excretion by the surf zone bivalves Danax Serra and D. sordulus. Marine Ecology Progress Series, 1990, 60: 57-65.
- [4] Zhou Y, Yang H S, Zhang F S. Nitrogen and phosphorus excretions by marine bivalves and the ecological effects. Journal of Fishery Sciences of China, 2003, 10(2): 165-168.
- [5] Wang X Y, Zhou Y, Yang H S. In situ study of respiration and excretion of the manila clam Ruditapes philippinarum in the Jiaozhou Bay. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2011, 42(5): 722-727.
- [6] Smaal A C, Vonck A P M A. Seasonal variation in C, N and P budgets and tissue composition of the mussel *Mytilus edulis*. Marine Ecology Progress Series, 1997, 153: 167-179.
- [7] Compilation Committee of China's Bay Records. China's Bay Records, the Fourteenth Fascicules (Important Estuary). Beijing: Ocean Press, 1998: 432-480.
- [8] Zhang S P, Wang H X, Xu F S. Taxonomic study on Meretrix (Bivalvia, veneridae) from China seas. Acta Zootaxonomica Sinica, 2012, 37(3): 473-479.
- [9] Wang R C, Wang Z P, Zhang J Z. Marine Shellfish Aquaculture. Qingdao: Qingdao Ocean University Press, 1993: 322-324.
- [10] Chen Y, Jiang J Y, Li S L, Li K W, Wang Z S, Liu X F, Geng Z F, Song Y G. The biological resources survey of mudflat clams and other major creatures in Panjin Geligang and Xiaohe. Hebei Fisheries, 2012, (1): 46-49.
- [11] Tang B J, Liu B Z, Yang H S, Xiang J H. Oxygen consumption and ammonia-N excretion of *Meretrix meretrix* in different temperature and salinity. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 2005, 23(4): 469-474.
- [12] Fan J X. Studies on Metabolism of Meretrix meretrix Linnaeus[D]. Ningbo: Ningbo University, 2010.
- [13] Fan J X, Lin Z H, Xiao G Q, Chai X L, Zhao Y Q, Lu R M, Zhang J M. Effects of starvation on oxygen consumption and ammonia excretion rates of three different sizes *Meretrix meretrix* Linnaeus. Marine Sciences, 2009, 33(10): 73-76.
- [14] Feng J B, Wang M Z, Chen H C, Chen X L, Sun J M, Li J L. Effects of temperature and body size on oxygen consumption rate of *Meretrix meretrix*. Journal of Shanghai Fisheries University, 2004, 13(2): 126-129.
- [15] Zhuang S H, Wang Z Q. Influence of size, habitat and food concentration on the feeding ecology of the bivalve, *Meretrix meretrix* Linnaeus. Aquaculture, 2004, 241(1-4): 689-699.
- [16] Zhuang S H, Liu X M. The influence of fresh weight and water temperature on metabolic rates and the energy budget of *Meretrix meretrix* Linnaeus. Marine Biology, 2006, 150(2): 245-252.

- [17] Zhou Y, Yang H S. Biodeposition method used in bivalval physioecological studies. Chinese Journal of Ecology, 2002, 21(6): 74-76.
- [18] Grasshoff K, Ehrhardt M, Kremling K. Methods of Seawater Analysis. Weiheim: Verlag Chemie, 1983.
- [19] Zhou Y, Zhang F S, Yang H S, Zhang S M, Ma X N. Comparison of effectiveness of different ashing auxiliaries for determination of phosphorus in natural waters, aquatic organism and sediment by ignition method. Water Research, 2003, 37 (16): 3875-3882.
- [20] Yu W Q, Zhong S J. Freeze-drying pretreatment improves organic carbon determinations of marine sediments. Acta Scientiae Circumstantiae, 2007, 27(5): 861-867.
- [21] He C B, Chen H D. Study on the growth and ecological characteristics of *Meretrix meretrix* cultivated on tidal flat. Journal of Fisheries Science, 1997, 16(5): 17-20.
- [22] Zhou Y, Yang H S, Zhang T, Liu S L, Zhang S M, Liu Q, Xiang J H, Zhang F S. Influence of filtering and biodeposition by the cultured scallop *Chlamys farreri* on benthic-pelagic coupling in a eutrophic bay in China. Marine Ecology Progress Series, 2006, 317: 127-141.
- [23] Zhou Y, Yang H S, Zhang T, Qin P B, Xu X L, Zhang F S. Density-dependent effects on seston dynamics and rates of filtering and biodeposition of the suspension-cultured scallop *Chlamys farreri* in a eutrophic bay (northern China): an experimental study in semi-in situ flow-through systems. Journal of Marine System, 2006, 59(1-2): 143-158.
- [24] Yuan X T, Zhang M J, Liang Y B, Liu D, Guan D M. Self-pollutant loading from a suspension aquaculture system of Japanese scallop (*Patinopecten yessoensis*) in the Changhai sea area Northern Yellow Sea of China. Aquaculture, 2010, 304(1-4): 79-87.
- [25] Cranford P J, Armsworthy S L, Mikkelsen O A, Milligan T G. Food acquisition responses of the suspension-feeding bivalve *Placopecten magellanicus* to the flocculation and settlement of a phytoplankton bloom. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, 2005, 326(2): 128-143.
- [26] Han J, Zhang Z N, Yu Z S, Widdows J. Differences in the benthic-pelagic particle flux (biodeposition and sediment erosion) at intertidal sites with and without clam (*Ruditapes philippinarum*) cultivation in eastern China. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, 2001, 261(2): 245-261.
- [27] Yuan X T, Zhang S L, Liu S X, Liang B, Liang Y B, Zhang G F. Self-pollution in *Ruditapes philippinarum* bottom-cultured area of Zhuanghe coast. Chinese Journal of Applied Ecology, 2011, 22 (3): 785-792.
- [28] Mitchell I M. In situ biodeposition rates of pacific oysters (Crassostrea gigas) on a marine farm in Southern Tasmania (Australia). Aquaculture, 2006, 257(1-4): 194-203.

- [29] Wang J, Jiang Z H, Chen R S. Study on biodeposition by oyster *Crassostrea gigas*. Journal of Fisheries of China, 2005, 29(3): 344-349.
- [30] Lauringson V, Mälton E, Kotta J, Kangur K, Orav-Kotta H, Kotta I. Environmental factors influencing the biodeposition of the suspension feeding bivalve *Dreissena polymorpha* (Pallas): comparison of brackish and freshwater populations. Estuarine Coastal and Shelf Science, 2007, 75(4): 459-467.
- [31] Wang J, Jiang Z H, Chen R S. Assimilation efficiency and biodeposition of mussel *Mytilus crassitesta*. Journal of Fishery Sciences of China, 2005, 12(2): 150-155.
- [32] Hawkins A J S, Bayne B L, Bougrier S, Heral M, Iglesias J I P, Navarro E, Smith R F M, Urrutia M B. Some general relationships in comparing the feeding physiology of suspension feeding bivalve molluscs. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, 1998, 219(1-2): 87-103.
- [33] Rueda J L, Smaal A C. Variation of the physiological energetics of the bivalve Spisula subtruncata (dacosta, 1778) within an annual cycle. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, 2004, 301(2): 141-157.
- [34] Wen H X, Zhang T, Yang H S, Liu B Z, Zhou Y, Mao Y Z, Zhang F S. Effect of temperature on respiration and excretion of hard clam *Mercenaria mercenaria* (Linnaeus, 1758). Oceanologia et Limnologia Sinica, 2004, 35(6): 549-554.
- [35] Zhou X. An *in situ* Study on Effect of the Bottom-Cultured Clam *Ruditapes philippinarum* on Ecological Environment in Jiaozhou Bay, China [D]. Qingdao: Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, 2006.

参考文献:

- [4] 周毅,杨红生,张福绥.海水双壳贝类的 N、P 排泄及其生态 效应.中国水产科学,2003,10(2):165-168.
- [5] 王晓宇,周毅,杨红生.胶州湾菲律宾蛤仔(Ruditapes philippinarum)呼吸排泄作用的现场研究.海洋与湖沼,2011, 42(5):722-727.

- [7] 中国海湾志编纂委员会.中国海湾志,第十四分册(重要河口).北京:海洋出版社,1998:432-480.
- [8] 张素萍, 王鸿霞, 徐凤山. 中国近海文蛤属(双壳纲, 帘蛤科)
 的系统分类学研究. 动物分类学报, 2012, 37(3): 473-479.
- [9] 王如才,王昭萍,张建中.海水贝类养殖学.青岛:青岛海洋 大学出版社,1993:322-324.
- [10] 陈远,姜靖宇,李石磊,李可闻,王志松,刘项峰,耿志孚, 宋永刚.盘锦蛤蜊岗、小河滩涂文蛤及其相关资源调查报告. 河北渔业,2012,(1):46-49.
- [12] 范建勋. 文蛤能量代谢的研究 [D]. 宁波: 宁波大学, 2010.
- [13] 范建勋,林志华,肖国强,柴雪良,赵一强,陆荣茂,张炯明. 饥饿对3种不同规格文蛤耗氧率和排氨率的影响.海洋科学, 2009,33(10):73-76.
- [14] 冯建斌,王美珍,陈汉春,陈贤龙,孙建苗,李家乐.温度和 规格对文蛤耗氧率的影响.上海水产大学学报,2004,13
 (2):126-129.
- [17] 周毅,杨红生.应用于贝类生理生态学研究的生物沉积法.生态学杂志,2002,21(6):74-76.
- [20] 于雯泉,钟少军.海洋沉积物有机碳分析方法中干燥预处理 过程人为误差的发现及意义.环境科学学报,2007,27(5): 861-867.
- [21] 赫崇波,陈洪大. 滩涂养殖文蛤生长和生态习性的初步研究. 水产科学,1997,16(5):17-20.
- [27] 袁秀堂,张升利,刘述锡,梁斌,梁玉波,张国范.庄河海域 菲律宾蛤仔底播增殖区自身污染.应用生态学报,2011,22
 (3):785-792.
- [29] 王俊,姜祖辉,陈瑞盛.太平洋牡蛎生物沉积作用的研究.水 产学报,2005,29(3):344-349.
- [31] 王俊,姜祖辉,陈瑞盛.厚壳贻贝的同化率及其生物沉积作用.中国水产科学,2005,12(2):150-155.
- [34] 文海翔, 张涛, 杨红生, 刘保忠, 周毅, 毛玉泽, 张福绥. 温 度对硬壳蛤 Mercenaria mercenaria (Linnaeus, 1758)呼吸排泄 的影响. 海洋与湖沼, 2004, 35(6): 549-554.
- [35] 周兴. 菲律宾蛤仔(Ruditapes philippinarum)对胶州湾生态环境 影响的现场研究 [D]. 青岛:中国科学院海洋研究所, 2006.