

2005—2009 年胶州湾大型底栖动物生态学研究*

王金宝 李新正 王洪法 张宝琳

(中国科学院海洋研究所 青岛 266071)

提要 根据 2005 年 2 月—2009 年 11 月对胶州湾 14 个站共 20 个航次大型底栖动物的调查资料, 分析了大型底栖动物种类组成、生物多样性、栖息密度、生物量和次级生产力的现状和变化。各航次共采集到大型底栖动物 442 种, 其中多毛类 189 种, 甲壳动物 112 种, 软体动物 81 种, 棘皮动物 22 种, 其它类群 38 种。2005—2009 年种数的年度、季节性差异较小。生物多样性指数各季节变化不大, 空间分布上湾内的中北部高于中南部。总栖息密度表现为冬、春季大于夏、秋季。相对于 1998—1999 和 2000—2004 年, 栖息密度有下降趋势, 总生物量有所增加, 说明较大型的生物增加。2005—2009 年胶州湾平均次级生产力有明显季节变化, 春季最高, 秋、夏季次之, 冬季最小。

关键词 大型底栖动物, 胶州湾, 生态学, 生物多样性, 次级生产力

中图分类号 Q958.1

胶州湾是一个与黄海相通的半封闭型天然海湾(甄毓等, 2010), 位于 35.38—36.18°N, 120.04—120.23°E, 属于暖温带季风型气候, 四季气候变化比较明显。胶州湾海域是我国最早开始海洋科学调查的重点区域之一。近 30 年来, 特别是作为中国生态系统研究网络(CERN)成员及其定位站之一的胶州湾海洋生态系统国家野外研究站开展工作以来, 海洋大型底栖动物调查已积累了大量资料。根据这些资料, 已有大量的研究工作发表(刘瑞玉, 1992; 董金海等, 1995; 孙道元等, 1995, 1996; 李新正等, 2001, 2002, 2004, 2005a, b, 2006, 2007a; 李宝泉等, 2005, 2006a, b; 王金宝等, 2006a, b; 王洪法等, 2006; 张宝琳等, 2007a, b)。但近 5 年来却少有全湾的系统的底栖生物调查成果发表。

大型底栖动物是海洋生态系统的重要组成部分, 通过对大型底栖动物长期、连续的观测研究, 可以了解其对海洋生态系统物质和能量流动的贡献和作用, 分析研究在气候变化和人类活动影响下其群落结构的变化。胶州湾大型底栖动物数量丰富、种类繁多、群落结构复杂, 同时研究较多、资料丰富。本文根据

2005—2009 年的调查资料, 对胶州湾大型底栖动物的物种多样性、栖息密度、生物量和次级生产力的季节变化和年度变化进行分析, 研究胶州湾大型底栖动物的生态学现状, 以为该海域的生态系统研究和青岛市“环湾保护、拥湾发展”战略提供基础资料。

1 材料与方法

1.1 取样时间

2005—2009 年, 每年 2 月(冬季)、5 月(春季)、8 月(夏季)、11 月(秋季)各进行一个航次取样。

1.2 站位

在胶州湾内外设置大型底栖生物取样站 14 个(图 1), 各航次因海湾大桥施工等原因, 取样站数量不完全一致, 但各航次取样站数量均在 10 个或 10 个以上。

1.3 取样方法

调查船是中国科学院海洋研究所“创新号”; 采泥工具为取样面积 0.1m²大洋 50 型采泥器; 每航次每站成功取样 2 次作为一个泥样; 泥样经 0.5mm 孔径过滤筛冲洗掉泥沙, 保留底栖生物样品, 以 75%酒精固

* 中国科学院知识创新工程重要方向项目群项目资助, KZCX2-YW-Q07-01 号; 国家自然科学基金项目资助, 41176133 号。
王金宝, 博士, 助理研究员, E-mail: wjb@qdio.ac.cn

通讯作者: 李新正, 研究员, E-mail: lixzh@qdio.ac.cn

收稿日期: 2011-01-21, 收修改稿日期: 2011-06-26

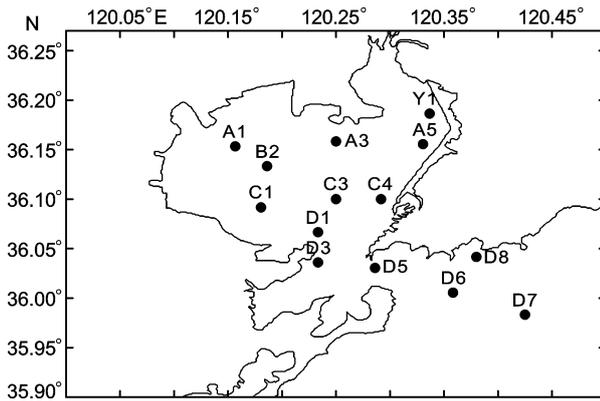


图 1 胶州湾取样站位示意图

Fig.1 The sampling stations in the Jiaozhou Bay

定, 作为该航次该站的样品, 带回实验室鉴定分析。

1.4 种类鉴定和数据处理

带回实验室的样品经粗分至生物大类后再由各门类分类学专家进一步鉴定至种。每航次每站每种的样品各作为 1 号标本, 每号样品进行个体计数, 并用千分之一克精度电子天平称重, 重量作为该号样品的湿重。

统计各季度航次和年度的种数、栖息密度和生物量。由于胶州湾菲律宾蛤仔(*Ruditapes philippinarum*)人工养殖业发达, 对胶州湾大型底栖动物的生物量、栖息密度影响较大(韩庆喜等, 2004), 个别站影响很大, 因此其栖息密度和生物量与总栖息密度和生物量分开统计。

各项多样性指数的计算公式为:

物种多样性指数(H')采用 Shannon-Wiener 计算公式(Shannon *et al.*, 1949):

$$H' = - \sum_{i=1}^S P_i \log_2 P_i$$

物种丰富度指数(D)采用 Margalef(1968)的计算公式:

$$D = (S-1)/\log_2 N$$

物种均匀度指数(J)采用 Pielou(1975)的计算公式:

$$J = H'/\log_2 S$$

式中, N 为样品中所有种类的总个体数目, S 为样品中的种类总数, P_i 为第 i 种的个体数与样品中的总个体数的比值(n_i/N)。

次级生产力计算: 以湿重的 1/5 作为干重(DW), 干重的 9/10 作为去灰干重(AFDW)(Crips, 1984)。Li 等(2005a)对 Brey(1990)的经验公式进行了转换, 获得次级生产力的计算公式为:

$$P = A^{0.27} \times B^{0.737} / 10^{0.4}$$

其中, P 为每站大型底栖动物次级生产力[单位: $g(\text{AFDW})/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$], A 为每站大型底栖动物年平均栖息密度(单位: ind/m^2), B 为每站大型底栖动物年平均去灰干重生物量[单位: $g(\text{AFDW})/\text{m}^2$]。

2 结果

2.1 种类组成

2005—2009 年 20 个航次中共采集到大型底栖动物 442 种, 其中环节动物多毛类 189 种, 占总种数的 42.76%, 甲壳动物 112 种, 占 25.34%, 软体动物 81 种, 占 18.33%, 棘皮动物 22 种, 占 4.98%, 其它类群 38 种, 占 8.6%。

以年度统计(表 1), 各年度大型底栖动物以 2007 年出现种数最高, 达 206 种, 2005 年最少, 仅为 159 种。多毛类以 2007 年出现最多, 为 100 种, 2009 年最少, 仅为 66 种; 软体动物以 2009 年种数最高, 39 种, 甲壳动物以 2006 年最高, 56 种, 棘皮动物也以 2006 年最高, 11 种。

表 1 胶州湾 2005—2009 年大型底栖动物不同类群的出现种数

Tab.1 Species numbers of macrobenthic groups in 2005—2009 from Jiaozhou Bay

年份	多毛类	软体动物	甲壳动物	棘皮动物	其它	总种数
2005	70	27	37	8	17	159
2006	75	37	56	11	15	194
2007	100	29	53	8	16	206
2008	85	24	44	6	13	172
2009	66	39	38	6	12	161

以季节(航次)统计(表 2), 多毛类各季节(航次)出现种数在 29—58 间, 年平均 40.1 种, 其中冬季 5 年平均值为 43.4 种, 春季为 38.6, 夏季为 38.4, 秋季为 40.0; 软体动物种数在 8—25 间, 年平均 13.6 种, 其中冬季 5 年平均值为 14.2 种, 春季为 17.0, 夏季为 13.6, 秋季为 9.4; 甲壳动物种数在 13—30 间, 年平均 21.6 种, 其中冬季 5 年平均值为 21.6 种, 春季为 22.4, 夏季为 23.4, 秋季为 19.0。棘皮动物和其它类群种数较少。

2.2 栖息密度

胶州湾大型底栖动物各主要类群在 2005—2009 年各年度的平均栖息密度见表 3。由于菲律宾蛤仔在湾内大面积人工养殖, 故其栖息密度未计算在内。由表 3 可见, 大型底栖动物总平均栖息密度以 2005 年最高, 达 $355.37 \text{ ind}/\text{m}^2$ 。多毛类的平均栖息密度以

表 2 胶州湾 2005—2009 年各季节大型底栖动物不同类群的出现种数
Tab.2 Species numbers of macrobenthic groups in 2005—2009 in the Jiaozhou Bay

季节	年份	多毛纲动物	软体动物	甲壳动物	棘皮动物	其它	总种数
春季	2005	39	11	24	4	9	87
	2006	39	23	27	5	7	101
	2007	45	17	26	5	8	101
	2008	39	9	20	2	7	77
	2009	31	25	15	3	7	81
	平均	38.6	17.0	22.4	3.8	7.6	89.4
夏季	2005	41	14	26	4	10	95
	2006	45	18	28	7	8	106
	2007	37	13	28	1	8	87
	2008	32	10	21	1	6	70
	2009	37	13	14	4	5	73
	平均	38.4	13.6	23.4	3.4	7.4	86.2
秋季	2005	43	8	15	3	4	73
	2006	41	10	21	5	7	84
	2007	49	11	26	5	6	97
	2008	38	10	15	3	5	71
	2009	29	8	18	3	6	64
	平均	40.0	9.4	19.0	3.8	5.6	77.8
冬季	2005	37	14	21	2	9	83
	2006	40	12	30	4	5	91
	2007	58	16	21	4	7	106
	2008	48	16	23	4	6	97
	2009	34	13	13	1	5	66
	平均	43.4	14.2	21.6	3.0	6.4	88.6

表 3 胶州湾大型底栖动物各主要类群在 2005—2009 年的平均栖息密度(ind/m²)
Tab.3 Mean abundances of main macrobenthic groups in the Jiaozhou Bay during 2005—2009 (ind/m²)

年份	多毛类	软体动物	甲壳动物	棘皮动物	其它类群	总平均栖息密度
2005	151.40	30.18	78.25	4.72	90.82	355.37
2006	179.89	29.59	82.05	5.68	48.23	345.45
2007	155.26	24.62	44.68	4.16	31.60	260.33
2008	123.72	18.04	27.99	3.06	33.08	205.89
2009	132.24	25.90	22.04	7.53	49.64	237.35

2006 年最高, 达 179.89ind/m², 软体动物以 2005 年最高, 为 30.18ind/m², 甲壳动物以 2006 年最高, 82.05ind/m², 棘皮动物的平均栖息密度较小, 各年度差别不大。

胶州湾大型底栖动物各主要类群在 2005—2009 年各季度(航次)的平均栖息密度见表 4。从季节上看, 春季各站多毛类的平均栖息密度以 2008 年最高, 达 227.00ind/m², 软体动物以 2006 年最高, 甲壳动物则以 2007 年最高。夏季各站多毛类的平均栖息密度以

2005 年的栖息密度最高, 为 172.50ind/m², 2009 年最少, 仅为 69.55ind/m², 软体动物各年度相差不大, 甲壳动物以 2005 年最高, 2009 年最少。秋季各站多毛类的平均栖息密度以 2007 年最高, 为 197.50ind/m², 软体动物与其它季节比较相对较低, 甲壳动物以 2007 年为最高, 达 49.58ind/m²。冬季各站多毛类的平均栖息密度以 2006 年最高, 达 309.55ind/m², 软体动物以 2008 年最高, 达 65.42ind/m², 甲壳动物以 2006 年最高, 为 210.00ind/m²。

表 4 胶州湾大型底栖动物各主要类群在 2005—2009 年各季度的平均栖息密度(ind/m²)
Tab.4 Seasonal mean abundances of main macrobenthic groups in the Jiaozhou Bay during 2005—2009 (ind/m²)

季度	年份	多毛类	软体动物	甲壳动物	棘皮动物	其它类群
春季	2005	142.50	40.71	55.00	6.79	117.50
	2006	176.43	54.29	50.36	3.57	49.29
	2007	131.07	47.86	58.21	3.21	72.86
	2008	227.00	21.50	33.00	2.50	9.00
	2009	100.42	47.50	27.92	14.17	9.17
夏季	2005	172.50	33.93	70.71	2.86	134.64
	2006	139.29	37.86	43.57	8.57	78.57
	2007	144.62	23.85	32.69	1.54	6.54
	2008	70.45	32.73	34.09	3.64	5.45
	2009	69.55	37.27	11.82	5.00	46.82
秋季	2005	157.14	11.07	45.36	5.00	20.00
	2006	94.29	7.14	24.29	7.86	61.43
	2007	197.50	7.50	49.58	3.33	19.17
	2008	99.09	13.64	13.64	3.18	79.55
	2009	165.83	7.92	17.50	9.58	106.67
冬季	2005	133.46	35.00	141.92	4.23	91.15
	2006	309.55	19.10	210.00	2.73	3.64
	2007	147.86	19.29	38.21	8.57	27.86
	2008	98.33	65.42	31.25	2.92	38.33
	2009	193.18	10.91	30.91	1.36	35.91

2.3 平均生物量

胶州湾大型底栖动物各主要类群在 2005—2009 年各年度的平均生物量见表 5。由于菲律宾蛤仔在湾内大面积人工养殖, 故其生物量未计算在内。由表 5 可见, 大型底栖动物总平均生物量最高的年份为 2008 年, 为 41.18g/m²。多毛类平均生物量在 2006 年最高, 为 5.68g/m²; 软体动物在 2008 年最高, 达 14.47g/m², 最少的 2005 年仅为 1.68g/m²; 甲壳动物各年度相对比较平均, 最高的为 2005 年, 棘皮动物最高的为 2008 年。

胶州湾大型底栖动物各主要类群在 2005—2009 年各季度(航次)的平均生物量见表 6。从季节上看, 春季各站多毛类的平均生物量以 2007 年最高, 为

4.03g/m², 软体动物在 2009 年最高, 达 22.65g/m², 最低的 2008 年仅为 0.82g/m², 甲壳动物最高的 2005 年为 10.41g/m², 最低 2009 年仅为 1.46g/m², 棘皮动物最高的 2008 年为 15.32g/m², 最低的是 2007 年的 0.37g/m²; 夏季各站多毛类的平均生物量以 2006 年最高, 达 10.96g/m², 软体动物以 2006 年最高, 甲壳动物在 2005 最高, 棘皮动物相差较大, 最高的 2008 年生物量为 20.78g/m²; 秋季各站多毛类的平均生物量以 2007 年最高, 4.39g/m², 软体动物 2008 年最高, 达 55.62g/m², 最低的 2009 年仅为 0.84g/m², 甲壳动物 2007 年最高, 棘皮动物 2006 年最高, 达 15.96g/m², 最低 2009 年仅为 0.14g/m²; 冬季各站多毛类的平均生物量以 2006 年最高, 达 7.3g/m², 软体动物以 2007

表 5 胶州湾大型底栖动物各主要类群在 2005—2009 年的平均生物量(g/m²)
Tab.5 Mean biomasses of main macrobenthic groups in the Jiaozhou Bay during 2005—2009 (g/m²)

年份	多毛类	软体动物	甲壳动物	棘皮动物	其它类群	总平均生物量
2005	3.05	1.68	4.37	6.86	15.30	31.26
2006	5.68	8.18	2.57	8.61	7.06	32.10
2007	3.02	3.46	3.64	6.36	11.69	28.17
2008	1.96	14.47	2.68	10.45	11.62	41.18
2009	1.62	8.91	1.08	3.96	9.20	24.77

年最高,为 1.97g/m²,甲壳动物以 2008 年最高,为 5.69g/m²,棘皮动物差别较大,最高的 2007 年达 10.75g/m²,2009 冬季航次未采集到棘皮动物。

2.4 群落生物多样性

经计算获得各站位在 2005—2009 年不同季节的大型底栖动物群落平均物种多样性指数、均匀度指数和丰富度指数(表 7)。不同站位在 2005—2009 年的平

均物种多样性指数、均匀度指数和丰富度指数分别见图 2A、图 2B、图 2C。由图 2 可见,不同站位的平均物种多样性指数差别较大,最高的是湾口外的 D6 站,为 3.64,最低的是湾外靠近青岛市市区岸边的 D8 站,仅为 0.67;物种丰富度指数较高的是 D6 和湾内中部的 C3 站,较低的有 D8 站和湾内靠近黄岛岸边的 D1 站;物种均匀度指数与丰富度指数的分布相似。

表 6 胶州湾大型底栖动物各主要类群在 2005—2009 年各季度的平均生物量(g/m²)
Tab.6 Seasonal mean biomasses of main macrobenthic groups in the Jiaozhou Bay during 2005—2009 (g/m²)

季度	年份	多毛类	软体动物	甲壳动物	棘皮动物	其它类群
春季	2005	3.27	1.571	10.41	8.28	33.45
	2006	2.92	20.41	2.26	9.70	3.10
	2007	4.03	4.21	2.58	0.37	11.73
	2008	2.47	0.82	1.53	15.32	13.86
	2009	2.64	22.65	1.46	11.08	7.15
夏季	2005	3.77	3.02	2.61	7.41	17.30
	2006	10.96	11.69	1.17	8.51	14.09
	2007	1.73	1.25	2.44	3.60	10.84
	2008	1.06	0.58	2.02	20.78	9.46
	2009	0.65	11.77	0.88	4.62	6.62
秋季	2005	1.67	1.42	3.10	6.50	2.21
	2006	1.55	0.32	2.27	15.96	4.49
	2007	4.39	6.40	5.46	10.73	5.52
	2008	1.52	55.62	1.46	5.58	14.95
	2009	1.57	0.84	0.97	0.14	18.67
冬季	2005	3.50	0.72	1.38	5.27	8.22
	2006	7.30	0.30	4.59	0.25	6.55
	2007	1.93	1.97	4.10	10.75	18.67
	2008	2.81	0.86	5.69	0.13	8.23
	2009	1.64	0.37	1.03	0.00	4.34

表 7 胶州湾不同站位在 2005—2009 年不同季节的大型底栖生物群落平均物种多样性指数(H')、种类丰度(D)和均匀度指数(J)

Tab.7 The seasonal mean indices of Shannon-Wiener (H'), Species Richness (D) and Pielou evenness (J) of macrobenthos in sampling stations from Jiaozhou Bay in 2005—2009

指数	季节	A1	A3	A5	B2	C1	C3	C4	D1	D3	D5	D6	D7	D8	Y1
H'	春	2.83	2.71	3.61	3.03	3.24	3.66	3.27	1.94	3.39	2.45	3.64	3.19	0.46	2.62
	夏	2.57	3.09	3.07	2.72	3.36	3.52	3.55	1.43	3.66	1.51	3.61	3.35	0.13	2.52
	秋	3.22	2.97	3.21	2.39	3.24	3.61	3.52	2.25	3.14	2.44	3.48	3.16	0.86	2.63
	冬	2.15	3.22	3.04	2.17	3.40	3.15	2.91	3.02	2.95	2.88	3.87	1.78	1.04	3.46
D	春	2.46	2.35	2.99	2.76	3.19	3.38	3.46	1.04	3.04	1.79	3.22	2.57	0.54	2.61
	夏	1.65	2.98	2.24	2.40	2.72	3.42	3.60	0.67	3.33	0.69	3.12	2.76	0.28	1.97
	秋	2.35	2.78	2.33	2.38	2.09	3.23	3.01	1.65	2.62	1.34	2.78	2.29	0.84	2.28
	冬	2.36	2.93	2.78	2.85	2.62	2.92	2.33	2.38	2.41	2.02	3.68	1.05	1.00	2.46
J	春	0.73	0.69	0.90	0.75	0.74	0.87	0.75	0.88	0.80	0.84	0.89	0.93	0.26	0.64
	夏	0.83	0.74	0.91	0.71	0.87	0.80	0.80	0.81	0.87	0.93	0.89	0.89	0.10	0.72
	秋	0.92	0.74	0.88	0.64	0.82	0.85	0.87	0.83	0.80	0.93	0.89	0.91	0.42	0.65
	冬	0.51	0.78	0.74	0.48	0.91	0.77	0.86	0.94	0.78	0.91	0.90	0.76	0.33	0.87

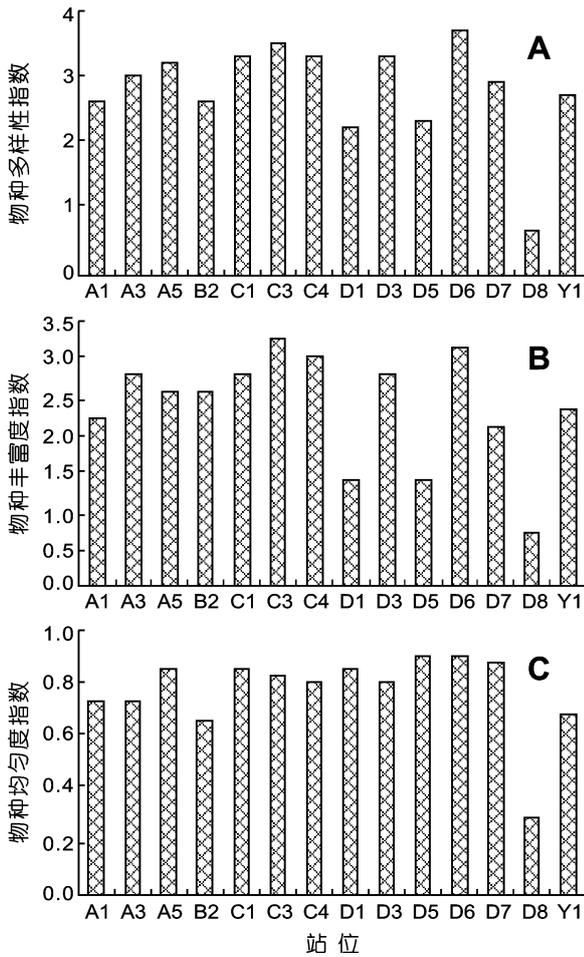


图 2 胶州湾 2005—2009 年大型底栖动物各取样站平均物种多样性指数、物种丰富度指数、物种均匀度指数

Fig.2 Mean Shannon-Wiener index, species richness index, and Pielou's evenness index of macrobenthos in the sampling stations of the Jiaozhou Bay during 2005—2009

A. 平均物种多样性指数, B. 平均物种丰富度指数, C. 平均物种均匀度指数

2.5 次级生产力

经计算, 获得 2005—2009 年各年度胶州湾大型底栖动物的次级生产力数据(表 8)。由于菲律宾蛤仔

对于胶州湾大型底栖动物的次级生产力贡献巨大, 因此, 在计算次级生产力时将包括菲律宾蛤仔和不包括菲律宾蛤仔的大型底栖动物生产力分开计算。由表 8 可见, 在不计算菲律宾蛤仔的情况下, 2005—2009 年胶州湾大型底栖动物次级生产力变化不大, 以 2008 年最高, 为 7.49g(AFDW)/(m²·a), 而 2009 年最低, 仅为 5.25g(AFDW)/(m²·a)。如将菲律宾蛤仔包括在内, 则变化较大, 以 2007 年最高, 为 33.98g(AFDW)/(m²·a), 而 2008 年最低, 仅为 13.82g(AFDW)/(m²·a)。包括菲律宾蛤仔的次级生产力是同年度(未包括菲律宾蛤仔)的 1.9—5.8 倍。

图 3 显示了胶州湾大型底栖动物在 2005—2009 年各季节的平均次级生产力情况(未包括菲律宾蛤仔)。由图 3 可见, 冬季次级生产力明显小于其它季节, 春季最高, 秋、夏季次之。

3 讨论

3.1 物种数量

对比 2005—2009 年 5 年间胶州湾大型底栖动物的种数变化发现, 2005 和 2009 年种数较少, 而 2006 和 2007 年种数较多, 没有呈现一定的规律性, 种数差别应属于正常的年际波动。

胶州湾大型底栖动物调查每年按 4 个季度航次进行。从 2005—2009 年各季节的平均总种数看, 秋季明显少于其它三个季节。从主要类群上看, 软体动物和甲壳动物在秋季的出现种数明显少于其它季节, 从而使总种数在秋季偏少。多毛类、棘皮动物和其它类群各季节种数变化不大。可见湾内大型底栖动物群落中软体动物和甲壳动物更易受季节变化的影响。

胶州湾大型底栖动物种类和物种多样性的研究已有较好的基础(李新正等, 2001; 李宝泉等, 2006a)。2005—2009 年的种类组成与 1998—2001 年对比(于

表 8 2005—2009 年胶州湾大型底栖动物次级生产力

Tab.8 Secondary production of macrobenthos in the Jiaozhou Bay during 2005—2009

年份	未包括菲律宾蛤仔			包括菲律宾蛤仔		
	平均去灰干重生物量[g(AFDW)/m ²]	平均栖息密度(ind/m ²)	次级生产力[g(AFDW)/(m ² ·a)]	平均去灰干重生物量[g(AFDW)/m ²]	平均栖息密度(ind/m ²)	次级生产力[g(AFDW)/(m ² ·a)]
2005	5.63	355.37	6.95	33.32	469.32	27.77
2006	5.78	345.45	7.03	43.39	449.60	33.34
2007	5.07	260.33	5.91	47.49	376.93	33.98
2008	7.41	205.89	7.34	17.04	221.18	13.82
2009	4.46	237.35	5.25	30.09	375.73	24.26
平均	5.67	280.88	6.50	34.27	378.55	26.63

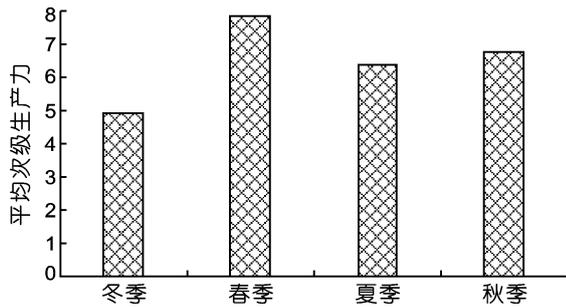


图3 2005—2009年不同季节胶州湾大型底栖动物平均次级生产力(未包括菲律宾蛤仔)

Fig.3 Mean seasonal secondary production of macrobenthos from Jiaozhou Bay in 2005—2009 (Excluding *R. philippinarum*)

注: 纵坐标单位为 g(AFDW)/(m²·a)

海燕等, 2006), 总种数增加了 120 种, 其中多毛类增加了 56 种, 甲壳动物增加了 20 种, 软体动物增加了 22 种, 棘皮动物增加了 8 种, 其它类群增加了 14 种。相对于孙道元等(1996)报道的 200 种, 种数更是大幅增加。增加的原因除了本次调查资料涉及的时间跨度(5年)比上述两次报道更长外, 胶州湾从 1998 年开始禁止各种形式的底拖网作业和 2001 年开始实行的夏季休渔给胶州湾底栖生物环境的修复和改善提供了重要条件, 湾内大型底栖动物的生存环境从 1980 年以来的逐步恶化到 20 世纪 90 年代末的急剧恶化转为从 2001 年开始的逐步改善, 大型底栖动物获得了休养生息的机会, 种数逐步恢复并略有增加。另外, 随着分类学研究的逐步深入(An *et al.*, 2005; 李新正等, 2007b; 张宝琳等, 2007b; Zhou *et al.*, 2007, 2008, 2009; 韩庆喜等, 2010), 更多的不确定种得到了确切的认识和准确鉴定, 也是种数增加的原因之一。与以往工作相比, 各主要类群在总种数中所占比例没有发生大的变化, 基本保持稳定, 多毛类略有增加, 甲壳动物略减少, 其它类群的比例变动不大。

3.2 平均栖息密度

胶州湾大型底栖动物群落中动物 2005—2009 年的总平均栖息密度呈现季节性变化, 其中冬季最高, 为 340.22ind/m², 春季为 300.36ind/m², 夏季为 249.71ind/m², 秋季最低, 为 245.45ind/m², 总体表现为冬、春季大于夏、秋季。这可能是夏、秋季捕食动物比较活跃, 从而控制了个体较小的生物的种群数量。

各主要类群的平均栖息密度也呈现季节性变化。多毛类的平均栖息密度以冬季最高 176.48ind/m², 春季次之 155.48ind/m², 秋季再次之 142.77ind/m², 夏季最低 119.28ind/m²; 相较于 1998—2002 年胶州湾多毛类的平均栖息密度(王金宝等, 2006a), 冬季有所升高,

但春、秋、夏季均低于 1998—2002 年同时期的平均栖息密度, 全年的总平均栖息密度也较 1998—2002 年低, 多毛类的栖息密度有降低的趋势。软体动物春季最高达 42.37ind/m², 秋季只有 9.45ind/m², 季节变化十分明显。甲壳动物最高冬季为 90.46ind/m², 其它三个季节相差不大。棘皮动物栖息密度较小, 各季节差别较小; 其它类群动物栖息密度季节差别也较小。

胶州湾 1998—1999 年平均栖息密度为 381.73 ind/m², 2000—2004 年的平均栖息密度为 304.6ind/m² (李新正等, 2005a), 而 2005—2009 年的平均栖息密度在不计菲律宾蛤仔的情况下为 280.88ind/m², 包括了菲律宾蛤仔则为 378.55ind/m²。总体上湾内大型底栖动物栖息密度基本稳定。值得注意的是, 菲律宾蛤仔对湾内大型底栖动物平均栖息密度的贡献达到大约 1/4, 特别是在湾西北部至北部, 由于人工养殖的原因, 使其成为大型底栖生物群落的绝对优势种, 对于其它种类的分布、栖息密度造成重要影响。养殖区内人工播种的菲律宾蛤仔对底栖动物其它类群群落结构也产生重要影响, 如多毛类密度增加, 而生物量反而变小(田胜艳等, 2010)。胶州湾内菲律宾蛤仔养殖始于上世纪末, 以前的文献大多没有对人工养殖的菲律宾蛤仔对群落物种组成、栖息密度和生物量等影响予以明确说明, 因此在比较最近几十年来胶州湾底栖动物的年度变化时, 应予以区分, 使不同年份的比较不受影响。关于人工养殖菲律宾蛤仔对于胶州湾大型底栖生物群落的结构生产力变化有必要深入研究。

3.3 平均生物量

与平均栖息密度类似, 2005—2009 年胶州湾大型底栖动物的总平均生物量呈现季节性变化, 但不同的是生物量以春季最高, 为 39.45g/m², 秋季为 34.66 g/m², 夏季为 31.76g/m², 冬季最低, 为 20.12g/m²。5 年总平均生物量为 27.06g/m², 高于 1998—1999 年的 22.22g/m² 和 2000—2004 年的 16.30g/m²(李新正等, 2005a)。主要原因应是胶州湾 1998 年开始的禁止底拖网作业和 2001 年开始的夏季休渔, 使底栖生物有了更为稳定的栖息环境, 个体的生长期较长, 有机会长得更大, 增加体重所致。

各主要类群的平均生物量也呈现季节性变化。多毛类夏季的平均生物量最高, 为 3.63g/m², 其次为冬季的 3.44g/m² 和春季的 3.07g/m², 最低的为秋季, 2.14g/m²。相对于 1998—2002 年的各季节平均栖息密度: 冬季 4.0g/m², 春季 4.0g/m², 夏季 4.8g/m², 秋季 5.0g/m² (王金宝等, 2006a), 各季节生物量均有明显

降低。软体动物则秋季生物量最高, 达到 $12.92\text{g}/\text{m}^2$, 明显超出其它季节, 这是因为在 2008 年秋季在湾西部的 C1 站采到了个体较大的长蛸(*Octopus variabilis*), 春季为 $9.93\text{g}/\text{m}^2$, 夏季为 $5.66\text{g}/\text{m}^2$, 冬季仅为 $0.84\text{g}/\text{m}^2$ 。甲壳动物的平均生物量以春季和冬季较高, 分别为 $3.65\text{g}/\text{m}^2$ 和 $3.36\text{g}/\text{m}^2$, 夏季最低, 为 $1.92\text{g}/\text{m}^2$ 。棘皮动物虽然栖息密度不高, 但对总平均生物量的贡献大于软体动物、多毛类环节动物和甲壳动物, 其在春、夏、秋季的变化不大, 但冬季明显低于其它季节。其它类群包括鱼类、纽虫等, 一般个体较大, 虽然栖息密度低, 但对生物量贡献较大, 季节平均生物量春、夏季稍高于秋、冬季。

3.4 群落生物多样性

胶州湾大型底栖动物群落的物种多样性的空间分布差异较大, 位于胶州湾中北部的站位, 物种多样性较高。这是因为该海域主要是软泥底质, 更适合多毛类等种类较多的类群的繁衍, 而湾外和湾口底质多为砂石, 如湾外靠近青岛市区岸边 D8 站等底质为细沙, 适合文昌鱼等生活, 其它生物相对较少, 其多样性指数多较低, 除 2005 年冬季该站的物种多样性指数为 3.48 外, 其它各航次一般不超过 1, 该站的物种多样性明显较低。位于胶州湾湾口的 D5 站, 由于水深较大, 底质为岩石底, 物种多样性也很低。与 1998—2001 年的物种多样性比较(李新正等, 2001), 除 D8 站外, 其它各站的物种多样性变化较小, 均值有所降低。本次调查物种多样性指数最大为 3.87, 比 1998—2001 间的物种多样性指数最大值 4.08 小。

除空间分布差异外, 胶州湾大型底栖动物的群落多样性也存在季节变化, 春季和秋季的物种多样性指数较高, 夏季和冬季较低。物种均匀度和丰富度指数各季节相似, 没有表现出明显变化。李新正等(2001)认为 1998—2001 年胶州湾大型底栖动物的物种多样性指数在夏季和冬季较高, 春季和秋季较低。说明经过 10 年之后, 胶州湾大型底栖动物的群落多样性发生了一定变化。

3.5 次级生产力

在不计菲律宾蛤仔的情况下, 2005—2009 年胶州湾大型底栖动物的年平均次级生产力大大低于同年度包括菲律宾蛤仔的次级生产力值, 年度变化较明显, 以 2008 年最高, 为 $7.49\text{g}(\text{AFDW})/(\text{m}^2\cdot\text{a})$, 2009 年最低, 仅为 $5.25\text{g}(\text{AFDW})/(\text{m}^2\cdot\text{a})$, 5 年平均值为 $6.50\text{g}(\text{AFDW})/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ 。包括菲律宾蛤仔的年平均次级生产力各年度也差别明显, 与不计菲律宾蛤仔不同的是 2008

年的次级生产力水平最低, 为 $13.82\text{g}(\text{AFDW})/(\text{m}^2\cdot\text{a})$, 2007 年最高, 为 $33.98\text{g}(\text{AFDW})/(\text{m}^2\cdot\text{a})$, 5 年平均值为 $26.63\text{g}(\text{AFDW})/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ 。本次调查的次级生产力年均值高于 1998—1999 年的 $18.65\text{g}(\text{AFDW})/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ 和 2000—2004 年的 $13.41\text{g}(\text{AFDW})/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ (李新正等, 2005a)。

李新正等(2005a)报告的胶州湾次级生产力包括了菲律宾蛤仔, 反映了养殖区菲律宾蛤仔范围和数量的变化。由于菲律宾蛤仔养殖区主要分布在胶州湾北部和西北部, 受菲律宾蛤仔的影响较大的站位是李新正等(2005a)的 1—4 号站和本研究的 A1、A3、A5、B2、C1 等站。排除这些站位后, 1998—1999 年度, 5—10 号站等不受菲律宾蛤仔养殖影响或受影响较小的站的次级生产力范围在 $1.65—9.55\text{g}(\text{AFDW})/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ 间, 均值为 $5.59\text{g}(\text{AFDW})/(\text{m}^2\cdot\text{a})$, 2000—2004 年 5—10 号站的次级生产力范围在 $3.11—8.11\text{g}(\text{AFDW})/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ 间, 均值为 $4.83\text{g}(\text{AFDW})/(\text{m}^2\cdot\text{a})$, 与 2005—2009 年不计菲律宾蛤仔的年均次级生产力的均值为 $6.50\text{g}(\text{AFDW})/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ 差别较小, 可以认为本文报道的胶州湾受人类养殖活动影响较小的主要水体的次级生产力较 10 年前变化不大。胶州湾北部水深较浅, 靠近河口, 营养物质较丰富, 次级生产力较海湾的南部区域高, 而且深受菲律宾蛤仔养殖和海岸人类活动的影响, 波动较大, 而中南部和湾外底栖生物环境相对稳定。

环境因子对物种多样性、栖息密度、生物量及次级生产力的影响十分显著。通过相关性分析(田胜艳等, 2010), 底质类型如砂、泥、砾石和岩石底质等, 有机质含量等与底栖动物的群落结构呈较大的相关性。

2005—2009 年不计菲律宾蛤仔的年均次级生产力与渤海的次级生产力 $6.49\text{g}(\text{AFDW})/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ (于子山等, 2001)十分近似, 说明在不受人类养殖活动影响下, 两海域大型底栖动物的次级生产力相近, 而高于南黄海的 $4.98\text{g}(\text{AFDW})/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ (Li *et al.*, 2005b)以及东海的 $1.62\text{g}(\text{AFDW})/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ 的调查结果(Li *et al.*, 2005c)。说明半封闭海湾接收陆源营养物质和为底栖生物提供更稳定安全的生存环境以及水深较浅等方面对于大型底栖生物的次级生产力较外海具有明显优势。

2005—2009 年胶州湾包括菲律宾蛤仔的大型底栖动物次级生产力是同年度不计菲律宾蛤仔的 1.88—5.77 倍, 说明菲律宾蛤仔对胶州湾大型底栖动物次级生产力的影响巨大。养殖区菲律宾蛤仔是该海域主要的次级生产力贡献者, 并影响了各年度的次级生产力的变化, 如 2008 年不包括菲律宾蛤仔的生产力最

高,而包括了蛤仔的生产力变为最低,说明了人类活动对自然环境的影响巨大,同样也说明海洋底栖生物可以为人类提供巨大的资源,有较大的开发潜力。

胶州湾大型底栖动物次级生产力也具有季节变化。在不计包括菲律宾蛤仔的情况下,冬季次级生产力明显低于其它季节,春季最高,秋、夏季次之。这与胶州湾所处海域季节分明,冬季水温低,生产力下降有关,而春季是各类群动物的繁殖季节,生产力上升。次级生产力比丰度和生物量更明显地反映了大型底栖动物的季节变化。

致谢 孙松研究员对本研究的鼓励和支持;孙晓霞研究员、李超伦研究员对本文提出宝贵意见,本课题组李宝泉博士、周进博士、韩庆喜博士、董超博士,以及马林、董栋、蔡文倩、寇琦、王晓晨等参与或部分参与了本研究的野外出海和实验室工作,中国科学院海洋生物标本馆王少青高工等和胶州湾海洋生态系统国家野外研究站张光涛研究员等为研究样品的分析和野外出海提供了大量帮助,本研究也得到胶州湾站长期观测支持,谨致谢忱。

参 考 文 献

- 于子山,张志南,韩洁,2001.渤海大型底栖动物次级生产力的初步研究.青岛海洋大学学报,31(6):867—871
- 于海燕,李新正,李宝泉等,2006.胶州湾大型底栖动物生物多样性现状.生态学报,26(2):416—422
- 王金宝,李新正,王洪法等,2006a.胶州湾多毛类环节动物数量分布与环境因子的关系.应用与环境生物学报,12(6):798—803
- 王金宝,李新正,王洪法,2006b.胶州湾多毛类环节动物优势种的生态特点.动物学报,52(1):63—69
- 王洪法,李宝泉,张宝琳等,2006.胶州湾红石崖潮间带大型底栖动物群落生态学研究.海洋科学,30(9):52—57
- 田胜艳,张文亮,于子山等,2010.胶州湾大型底栖动物的丰度、生物量和生产量研究.海洋科学,34(6):81—87
- 刘瑞玉主编,1992.胶州湾生态学和生物资源学.北京:科学出版社,1—460
- 孙道元,张宝琳,吴耀泉,1995.胶州湾底栖生物的数量研究.见:董金海,焦念志编.胶州湾生态学研究.北京:科学出版社,159—165
- 孙道元,张宝琳,吴耀泉,1996.胶州湾底栖生物动态研究.海洋科学集刊,37:103—11
- 李宝泉,李新正,于海燕等,2005.胶州湾底栖软体动物与环境因子的关系.海洋与湖沼,36(3):193—198
- 李宝泉,李新正,王洪法等,2006a.胶州湾大型底栖软体动物物种多样性研究.生物多样性,14(2):136—144
- 李宝泉,张宝琳,刘丹运等,2006b.胶州湾女姑口潮间带大型底栖动物群落生态学研究.海洋科学,30(10):15—19
- 李新正,于海燕,王永强等,2001.胶州湾大型底栖动物的物种多样性现状.生物多样性,9(1):80—84
- 李新正,于海燕,王永强等,2002.胶州湾大型底栖动物数量动态的研究.海洋科学集刊,44:66—73
- 李新正,王洪法,于海燕等,2004.胶州湾棘皮动物的数量变化及与环境因子的关系.应用与环境生物学报,10(5):618—622
- 李新正,王洪法,张宝琳,2005a.胶州湾大型底栖动物次级生产力初探.海洋与湖沼,36(6):527—533
- 李新正,王洪法,王金宝等,2005b.不同孔径底筛对胶州湾大型底栖动物取样结果的影响.海洋科学,29(12):68—74
- 李新正,李宝泉,王洪法等,2006.胶州湾潮间带大型底栖动物的群落生态.动物学报,52(3):612—618
- 李新正,张宝琳,李宝泉等,2007a.青岛文昌鱼体征变化及影响因素探究.海洋科学,31(1):55—59
- 李新正,刘瑞玉,梁象秋等,2007b.中国动物志无脊椎动物第四十四卷甲壳动物亚门十足目长臂虾总科.北京:科学出版社,381页,157图
- 张宝琳,王洪法,李宝泉等,2007a.胶州湾青岛潮间带大型底栖动物生态学调查.海洋科学,31(1):60—64
- 张宝琳,王洪法,张文勇等,2007b.胶州湾肠鳃类种类与分布.海洋科学,31(2):65—67,97
- 董金海,焦念志主编,1995.胶州湾生态学.北京:科学出版社,1—205
- 韩庆喜,李新正,2010.黄、渤海褐虾科(甲壳动物亚门,软甲纲,十足目)记述.动物分类学报,35(1):227—239,图1—60
- 韩庆喜,高雯芳,李宝泉等,2004.胶州湾菲律宾蛤仔生物量与资源评估.动物学杂志,39(5):60—62
- 甄毓,于志刚,蔡青松等,2010.运用双特异分子探针技术对胶州湾三种硅藻的检测.海洋与湖沼,41(1):24—31
- An J, Li X, 2005. First record of the family Spengelidae (Hemichordata: Enteropneusta) from Chinese waters, with description of a new species. Journal of Natural History, 39(22): 1995—2004, figs.1—19
- Brey T, 1990. Estimating productivity of macrobenthic invertebrates from biomass and mean individual weight. Meeresforschung, 32(4): 329—343
- Crips D J, 1984. Energy flow measurements. In: Holme N A, McIntyre A D ed. Methods for the study of marine benthos. Oxford: Blackwell Scientific Publications, 284—372
- Li X, Zhang B, Wang H, 2005a. Study on the Secondary Production of Macrobenthos from the Anchovy Spawning Ground in the Southern Yellow Sea. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 11(3): 324—327
- Li X, Yu Z, Wang J *et al*, 2005b. Study on the Secondary Production of Macrobenthos from Southern Yellow Sea. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 11(6): 702—705
- Li X, Wang J, Wang H *et al*, 2005c. Secondary Production of Macrobenthos from the East China Sea. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 11(4): 459—462

- Margalef R, 1968. Perspective In Ecological Theory. Univ Chicago Press, 1—111
- Pielou E C, 1975. Ecological Diversity. Wiley-Inters (New York), 1—163
- Shannon C E, Wiener W, 1949. The Mathematical Theory of Communication. Univ of Illinois Press (Urbanna), 1—117
- Zhou J, Li X, 2007. A report of the family Paraonidae (Annelida, Polychaeta) from China seas. Acta Zootaxonomica Sinica, 32(2): 275—282, figs.1—30
- Zhou J, Ji W, Li X, 2009. A new species of Scolelepis (Polychaeta: Spionidae) from sandy beaches in China, with a review of Chinese Scolelepis species. Zootaxa, 2236: 37—49
- Zhou J, Yokoyama H, Li X, 2008. New records of Paraprionospio (Annelida: Spionidae) from Chinese waters, with the description of a new species. Proceedings of Biological Society of Washington, 121(3): 308—320

ECOLOGICAL STUDY ON THE MACROBENTHOS IN THE JIAOZHOU BAY IN 2005—2009

WANG Jin-Bao, LI Xin-Zheng, WANG Hong-Fa, ZHANG Bao-Lin
(Institute of Oceanology, Chinese Academy of Science, Qingdao, 266071)

Abstract Based on data collected during 20 cruises from 14 sampling stations in the Jiaozhou Bay between February 2005 and November 2009, species composition, abundance, biomass, biodiversity, and secondary production of macrobenthos from the bay were studied. The results showed: 1) 442 species of macrobenthos were found and identified, in which 189 were polychaete species, 112 were crustaceans, 81 were mollusks, 22 were echinoderms, and 38 were species of other groups; the numbers of species in 2005 and 2009 were greater than those in 2006, 2007 and 2008, seasonal differences in the numbers of species during 2005—2009 were small, and annual and seasonal changes were in normal ranges; 2) seasonal differences of macrobenthic biodiversity indices were small; the indices were higher in the northern (inner) area than those in the southern part (close to the mouth of the bay) and outside of the bay; 3) mean abundance of macrobenthos in the Bay was higher in winter and spring than those in summer and fall; the mean abundance in 2005—2009 was lower than those in 1998—2004, macrobenthic abundance in the bay decreased over time; 4) the mean macrobenthic biomasses in the bay during 2005—2009 being higher than that during 1998—2004 implies that the species with large body size were increased during 2005—2009 those that during 1998—2004; 5) secondary productions of macrobenthos in 2005—2009 was at similar level as those in 1998—2004, however, the culture of Philippine clam (*Ruditapes philippinarum*) was more important to the contribution of secondary production of macrobenthos in the bay than before; the mean secondary productions had distinct seasonal differences, i.e., highest in spring, lowest in winter.

Key words Macrobenthos, Jiaozhou Bay, Ecology, Biodiversity, Secondary production