

# 渤海大型底栖动物多样性及其与环境因子的关系\* Macrofaunal Diversity and Its Relationship with Environmental Factors in the Bohai Sea

刘晓收\*\* , 史书杰, 周 红, 华 尔, 张志南

LIU Xiao-shou, SHI Shu-jie, ZHOU Hong, HUA Er, ZHANG Zhi-nan

(中国海洋大学海洋生命学院, 山东青岛 266003)

(College of Marine Life Sciences, Ocean University of China, Qingdao, Shangdong, 266003, China)

**摘要:**【目的】为了解渤海大型底栖动物多样性现状, 研究其物种多样性和分类多样性的分布格局。【方法】依据2008年8月和2009年6月两航次渤海大型底栖动物调查资料, 对其物种多样性的辛普森优势度指数( $\lambda$ )、香农-威纳多样性指数( $H'$ )、Margalef物种丰富度指数( $d$ )、Pielou's均匀度指数( $J'$ )和分类多样性的分类多样性指数( $\Delta$ )、平均分类差异指数( $\Delta^+$ )、分类差异变异指数( $\Delta^+$ )以及各指数与环境因子的关系进行分析。【结果】两航次共鉴定出大型底栖动物(或分类实体)270种, 隶属于206属, 130科, 39目, 19纲, 12门。各多样性指数平均值 $\lambda$ 为0.05,  $H'$ 为4.80、 $d$ 为7.35、 $J'$ 为0.93、 $\Delta$ 为83.84、 $\Delta^+$ 为87.90、 $\Delta^+$ 为343.88。各多样性指数与环境因子中的粉砂-粘土含量、沉积物中值粒径、有机质含量无显著相关性, 而水深、盐度和温度等水层环境因子则对其影响较为明显。【结论】渤海海域总体动物多样性较高, 其中渤海海域沿岸地区、辽东湾西部、莱州湾西北部等地受扰动和污染严重。将物种多样性和分类多样性结合分析, 可以更好地反映群落多样性结构。水深、盐度和温度等水层环境对渤海大型底栖动物的影响要大于沉积环境的影响。

**关键词:**渤海 大型底栖动物 物种多样性 分类多样性 相关性分析

中图分类号: Q958.1 文献标识码: A 文章编号: 1005-9164(2015)05-0540-09

**Abstract:**【Objective】In order to reveal the current status of macrofaunal diversity and its relationship with environmental factors, spatial patterns of species diversity and taxonomic diversity were studied. 【Methods】Based on the macrofauna samples collected in August 2008 and June 2009 in the Bohai Sea, species diversity indices including Simpson dominance index ( $\lambda$ ), Shannon-Wiener diversity index ( $H'$ ), Margalef species richness index ( $d$ ) and Pielou's evenness index ( $J'$ ), and taxonomic diversity indices including taxonomic diversity index ( $\Delta$ ), average taxonomic distinctness ( $\Delta^+$ ) and variation in taxonomic distinctness ( $\Delta^+$ ) were analyzed. Furthermore, the relationships between these indices diversity and environmental factors were estimated. 【Results】A total of 270 species or taxa were recorded in the Bohai Sea, and they belong to 12 phyla, 19 classes, 39 orders, 130 families and 206 genera. The averages of  $\lambda$ ,  $H'$ ,  $d$ ,  $J'$ ,  $\Delta$ ,  $\Delta^+$  and  $\Delta^+$  were 0.05, 4.80, 7.35, 0.93, 83.84, 87.90 and 343.88, respectively. The macrofaunal diversity indices, like silt-clay percentage, median diameter and organic matter, were not significantly correlated with sediment environmental factors while they were significantly correlated with pelagic environmental factors, such as water depth, salinity, water temperature and so on. 【Conclusion】As a whole, the macrofaunal diversity was high in the Bohai Sea, of which the coastal areas, western Liaodong Bay and north-

收稿日期: 2015-07-06

修回日期: 2015-08-27

作者简介: 刘晓收(1979-), 男, 副教授, 主要从事生物海洋学和底栖生物生态学研究。

\* 山东省优秀中青年科学家科研奖励基金项目(BS2013HZ008), 中国海洋大学中央高校基本科研业务费专项项目(201462008)和科技基础性工作专项项目(2012FY112200)联合资助。

\*\* 通讯作者, E-mail: liuxs@ouc.edu.cn.

western Laizhou Bay were disturbed and under heavy pollution. Combining both species diversity and taxonomic diversity can reflect the macrofaunal diversity comprehensively. Water depth, salinity and water temperature were more important than sediment environmental factors in affecting macrofauna in the Bohai Sea.

**Key words:** Bohai Sea, macrofauna, species diversity, taxonomic diversity, correlation analysis

## 0 引言

**【研究意义】**生物多样性是指在一定时间和一定地区所有生物(动物、植物、微生物)物种及其遗传变异和生态系统的复杂性总称,它对人类具有实际和潜在的食用、药用等价值,成为人类生存发展的物质基础。对其资源保护、持续利用及相关的基础研究,成为国际学术界和其它各界关注的中心议题之一。我国对生物多样性保护问题亦十分重视,1992年即加入《生物多样性公约》,成为最早的缔约国之一,但我国的生物多样性资源保护仍面临着严峻的挑战<sup>[1,2]</sup>。近年来,我国主要河口和海洋生态系统的海洋生物多样性发生了明显改变,处于不稳定状态,因此对我国近海生态系统的生物多样性开展持续的研究必不可少,而通过对底栖生物多样性的研究,不仅能反映一个地区物种的丰富程度,同时对环境变化有着明显的指示作用<sup>[3]</sup>。渤海是一个半封闭的浅海,面积约8万km<sup>2</sup>,平均水深18m,是多种经济鱼类、虾类和贝类的重要产卵、索饵和育肥场。由于受到人类活动和气候变化影响,渤海海洋生态环境和资源发生了重大变化。因此,对渤海海域开展全面的底栖生物多样性研究,为合理保护该海域海洋环境和生态系统健康具有重要意义。**【前人研究进展】**目前最常用的物种多样性指数,往往将群落中的每个物种等同对待,未考虑各个物种之间在进化关系以及分类距离上的不同。Warwick和Clarke将物种之间的分类距离纳入到生物多样性的计算,提出了4个“分类多样性指数”,分别是分类多样性指数(taxonomic diversity,  $\Delta$ )、分类差异指数(taxonomic distinctness,  $\Delta^*$ )、平均分类差异指数(average taxonomic distinctness,  $\Delta^+$ )和分类差异变异指数(variation in taxonomic distinctness,  $\Delta^+$ )<sup>[4~6]</sup>。该类指数提出后在海洋大型底栖动物<sup>[7]</sup>、自由生活海洋线虫<sup>[8]</sup>等方面得到了一定的应用。Warwick等<sup>[4,9]</sup>通过研究北海大型底栖动物以及英国线虫发现,平均分类差异指数和分类差异变异指数及其95%漏斗置信区间对污染具有很好的指示作用。同时由于其具有不同于传统多样性指数的优势,因此在不同地区、不同采样方法以及历史资料对比中也得到了很好的应用<sup>[10]</sup>。我国目前对分类多样性指数在大型底栖动物方面的应用仅见广西科学 2015年10月 第22卷第5期

少量报道,如刘文亮<sup>[11]</sup>研究了长江口大型底栖动物的分类多样性,曲方圆等<sup>[12]</sup>研究了黄海大型底栖动物的分类多样性,而在渤海的研究仅有Zhou等<sup>[13]</sup>利用20世纪80年代和90年代的资料对渤海潮下带大型底栖动物的多样性的报道。**【本研究切入点】**目前,尚未有对渤海海域大型底栖动物进行全面的物种多样性和分类多样性分布格局及其与环境因子关系的报道。**【拟解决的关键问题】**本文在2008年和2009年渤海大型底栖动物种类组成和群落结构研究<sup>[14,15]</sup>的基础上,对渤海大型底栖动物的传统物种多样性指数和分类多样性指数进行了进一步研究,并探讨其与环境因子的关系,以期全面了解渤海大型底栖动物多样性现状,为保护渤海生态资源实现可持续利用及生态系统健康评价提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 样品的采集与处理

2008年8月和2009年6月搭载向阳红9号科学调查船在渤海进行了两航次大型底栖动物定量采泥。第一次站位分布在辽东湾、渤海湾、莱州湾、渤海中部和渤海海峡,包括B01, B03~B12, B14~B16, B18~B23, B25~B27等23个站位(图1)。第二次站位分布在莱州湾,包括L1~L9等9个站位(图1)。

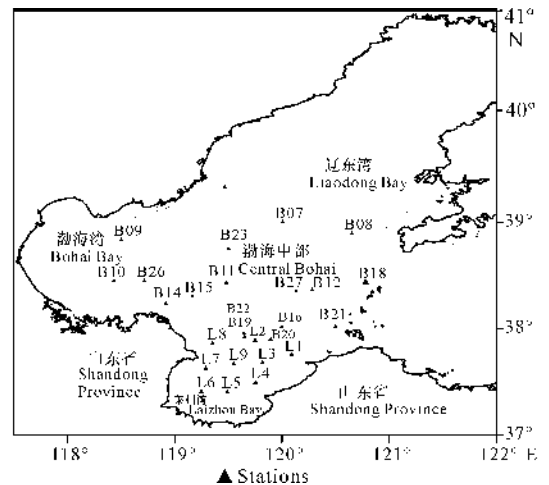


图1 两航次调查站位图

Fig. 1 Map of the macrofauna sampling stations

采用0.1m<sup>2</sup>箱式采泥器采集未受扰动的沉积物样品,并用孔径为0.5mm的网筛现场分选大型底栖动物。每站取3个样品,将生物标本及残渣全部转移至样品瓶,并用5%福尔马林固定。同时取一定量的

表层沉积物,放入-20℃冰柜,冷冻保存以分析其沉积物粒度、有机质、叶绿素等环境因子。有机质含量的测定参照《海洋监测规范》<sup>[16]</sup>,沉积物粒度采用英国 Malvern 公司生产的 Mastersizer 2000 型激光粒度仪测定,叶绿素 a 和脱镁叶绿酸的测定按照《海洋调查规范》<sup>[17]</sup>中的荧光分光光度计法。采用体式显微镜挑拣底栖动物样品并鉴定到种或分类实体,计数并使用 0.0001 g 感量的电子天平进行称重(湿重)。样品的处理、保存、计数和称量等均按《海洋调查规范》<sup>[17]</sup>进行。其中,软体动物带壳称重,寄居蟹去壳称重,管栖多毛类去管称重,群体标本不计算个数。

两航次中现场通过船载 CTD 测得环境因子有水深、表层水温度、表层水盐度、底层水温度、底层水盐度。

### 1.2 数据处理和分析

物种多样性通过物种数(S)、辛普森优势度指数( $\lambda$ )<sup>[18]</sup>、香农-威纳多样性指数( $H'$ )<sup>[19]</sup>、Margalef 物种丰富度( $d$ )<sup>[20]</sup>、Pielou's 均匀度指数( $J'$ )<sup>[21]</sup>来测量。

分类多样性通过分类多样性指数( $\Delta$ )、平均分类差异指数( $\Delta^+$ )和分类差异变异指数( $\Lambda^+$ )来分析。计算分类多样性各指数时,首先根据名录中不同分类等级水平的物种丰富度来设置不同分类等级间加权路径长度的权重,在本研究中分类等级确定为门、纲、目、科、属、种共 6 个水平,各等级水平的多样性权重值见文献<sup>[22]</sup>。

①分类多样性指数  $\Delta$ , 不仅与优势度指数相关,同时又包含了分类等级的信息,表示群落中每对个体在系统发育分类树状图中平均的路径长度。公式为

$$\Delta = [\sum_{i < j} \sum \omega_{ij} x_i x_j] / [n(n-1)/2].$$

式中  $x_i$  为第  $i$  个种的丰度,  $x_j$  为第  $j$  个种的丰度,  $\omega_{ij}$  为连接种  $i$  和  $j$  种的路径长度。为了强调联系两相同物种间的路径权重为零,在公式的分子中包括了无意义的第 2 项。

②平均分类差异指数  $\Delta^+$ , 在计算两个个体之间平均的路径长度时,不考虑物种出现的丰度。公式为

$$\Delta^+ = [\sum_{i < j} \sum \omega_{ij}] / [S(S-1)/2].$$

式中  $\omega_{ij}$  为连接种  $i$  和  $j$  种的路径长度,  $S$  为群落中出现的物种数目。

③分类差异变异指数  $\Lambda^+$ , 表示每对路径长度的变异性,并反映分类树的不均衡性,公式为

$$\Lambda^+ = [\sum_{i < j} \sum (\omega_{ij} - \Delta^+)^2] / [S(S-1)/2].$$

式中  $\omega_{ij}$  为连接种  $i$  和  $j$  种的路径长度,  $S$  为群落

中出现的物种数目。

采用 PRIMER 6.0 软件对分类多样性数据进行分析,同时做出多样性值的 95% 置信区间漏斗图(95% probability funnels),并得到所研究区域多样性的理论期望值。将真实值叠加到漏斗图上,若真实值在 95% 置信区间内,则接受零假设,即所研究区域与该地区期望值无差别;若在 95% 置信区间外,则拒绝零假设。 $\Delta^+$  与  $\Lambda^+$  理论上相关关系很小,两者分别代表了生物多样性不同层面的内容,将  $\Delta^+$  与  $\Lambda^+$  相结合能更全面地反映群落多样性水平,更好地满足对群落进行区分的目的。因此将  $\Delta^+$  和  $\Lambda^+$  的 95% 置信区间漏斗图结合起来,便形成了 95% 置信区间等值线图(95% probability contours)。

各多样性指数与环境因子的相关分析使用 SPSS 19.0 中的 Spearman Correlation Analysis 实现。

## 2 结果与分析

### 2.1 物种多样性

#### 2.1.1 物种数(S)

两航次共记录渤海大型底栖动物 12 门, 19 纲, 39 目, 130 科, 206 属, 270 种(表 1)。其中节肢动物共 84 种, 占总数 31.11%; 环节动物 86 种, 占总数

表 1 渤海大型底栖动物种类组成

门 Phylum	纲 Class	目 Order	科 Family	属 Genus	种 Species
刺胞动物门 Cnidaria	1	1	1	1	1
扁形动物门 Platyhelminthes	1	1	1	1	1
纽形动物门 Nemertinea	1	1	1	1	1
环节动物门 Annelida	1	5	39	69	86
星虫动物门 Sipuncula	1	1	1	1	1
螭虫动物门 Echiura	1	1	1	1	1
软体动物门 Mollusca	3	14	42	66	82
节肢动物门 Arthropoda	2	7	35	55	84
帚虫动物门 Phoronida	1	1	1	1	1
腕足动物门 Brachiopoda	1	1	1	1	1
棘皮动物门 Echinodermata	4	4	5	7	9
脊索动物门 Chordata	2	2	2	2	2
总计 Total	19	39	130	206	270

31.85%；软体动物 82 种，占总数 30.37%；棘皮动物 9 种，占总数 3.33%；其他动物 9 种，占总数 3.33%。

2008 年 8 月渤海 23 个站位的大型底栖动物站均物种数平均值为 48，其中位于辽东湾的 B25 站位物种数最多，为 109 种；位于秦皇岛附近的 B04 站位物种数最少，为 19 种。由图 2a 可知，辽东湾西北部物种丰富，而秦皇岛附近、渤海湾、莱州湾和渤海海峡

物种数较少。

2009 年 6 月渤海莱州湾 9 个站位的大型底栖动物站均物种数平均值为 26，其中位于莱州湾东北部的 L1 站位物种数最多，为 41 种；位于莱州湾西部的 L7 站位物种数最少，为 15 种。由图 2a 可知，莱州湾东部物种丰富，而西部则较少。

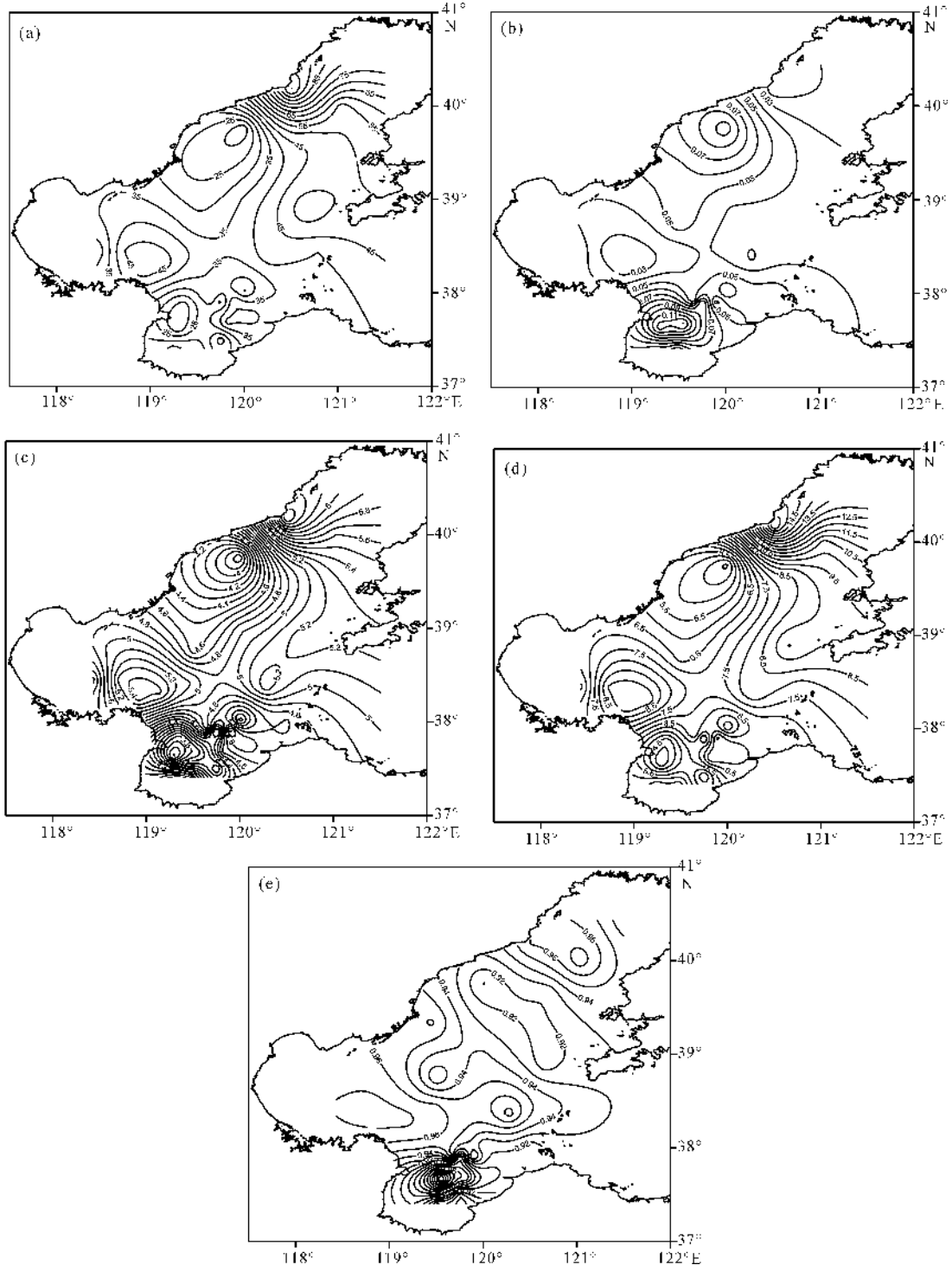


图 2 渤海大型底栖动物  $S$  (a)、 $\lambda$  (b)、 $H'$  (c)、 $d$  (d) 与  $J'$  (e) 等值线图

Fig. 2 Contour maps of macrofauna species number (a), dominance index (b), Shannon-Wiener diversity index (c), species richness index (d) and species evenness index (e) in the Bohai Sea

### 2.1.2 辛普森优势度指数( $\lambda$ )

32个站位的 $\lambda$ 平均值为0.05。最大值为0.13,出现于莱州湾北部;最小值为0.01,出现在辽东湾西部。根据图2b可见, $\lambda$ 高值区为莱州湾西北部和辽东湾西部;低值区位于辽东湾北部和渤海海峡。

### 2.1.3 香农-威纳多样性指数( $H'$ )

32个站位的 $H'$ 平均值为4.80。最大值为6.39,出现于辽东湾西北部;最小值为3.46,出现于莱州湾西北部。根据图2c看出, $H'$ 高值区为辽东湾北部和渤海海峡;低值区位于辽东湾西部秦皇岛附近和莱州湾北部。

### 2.1.4 Margalef物种丰富度指数( $d$ )

32个站位的 $d$ 平均值为7.35。最大值为16,出现于辽东湾西北部;最小值3.49,出现于莱州湾西北部。根据图2d看出, $d$ 高值区位于辽东湾北部和渤海湾东部;低值区位于辽东湾东部近秦皇岛海域和莱州湾西北部近黄河口海域。

### 2.1.5 Pielou's均匀度指数( $J'$ )

32个站位的 $J'$ 平均值为0.93。最大值为0.98,出现于辽东湾北部;最小值0.7911,出现于莱州湾北部。根据图2e看出,整个渤海海域 $J'$ 分布较为均匀,指数偏高区域为渤海中部和辽东湾北部,指数偏低区域为莱州湾北部和辽东湾南部。

## 2.2 分类多样性

### 2.2.1 分类多样性指数 $\Delta$

32个站位的 $\Delta$ 平均值为83.84。最大值为88.60,出现于渤海中部;最小值73.68,出现于莱州湾西北部。根据图3a看出,高值区为渤海中部和辽东湾北部;低值区为莱州湾西北部靠近黄河口附近和辽东湾东部秦皇岛附近。

### 2.2.2 平均分类差异指数 $\Delta^+$

32个站位的 $\Delta^+$ 平均值为87.90。最大值为91.54,出现于东部;最小值82.72,出现于辽东湾西部。根据图3b看出,整个渤海海域的 $\Delta^+$ 分布较为均匀,指数偏高区域为莱州湾北部和渤海海峡;偏低区域为辽东湾西部。

### 2.2.3 分类差异变异指数 $\Delta^+$

32个站位的 $\Delta^+$ 平均值为343.88。最大值为504.1,出现于辽东湾西部;最小值249.2,出现于莱州湾东部。根据图3c看出,高值区位于辽东湾西部葫芦岛市附近和渤海中部;低值区位于渤海海峡,莱州湾东部和渤海湾东部。

由图4a可知,位于莱州湾、渤海中部、辽东湾、渤海湾和渤海海峡的10个站位的平均分类差异指数 $\Delta^+$ 均显著低于95%置信区间的下边界,在海洋污染

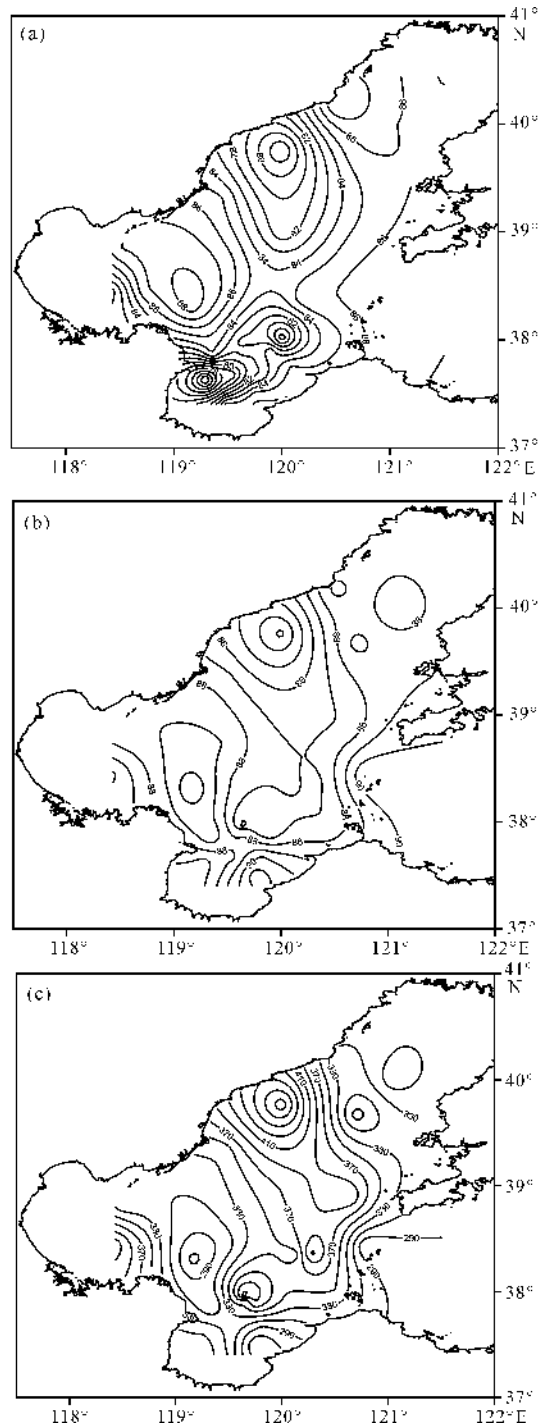


图3 渤海大型底栖动物 $\Delta$ (a)、 $\Delta^+$ (b)和 $\Delta^+$ (c)等值线图

Fig. 3 Contour maps of macrofauna taxonomic diversity  $\Delta$ (a), average taxonomic distinctness  $\Delta^+$ (b) and variation in taxonomic distinctness  $\Delta^+$ (c) in the Bohai Sea

监测中,低于95%置信区间通常意味着环境受到了扰动。说明渤海的平均分类差异指数 $\Delta^+$ 偏低理论平均值,海区环境受到了扰动,莱州湾和渤海中部尤为显著。由图4b可知,位莱州湾、辽东湾、渤海中部和渤海湾的12个站位高于置信区间,说明渤海海区分类差异变异指数 $\Delta^+$ 略高,辽东湾、莱州湾和渤

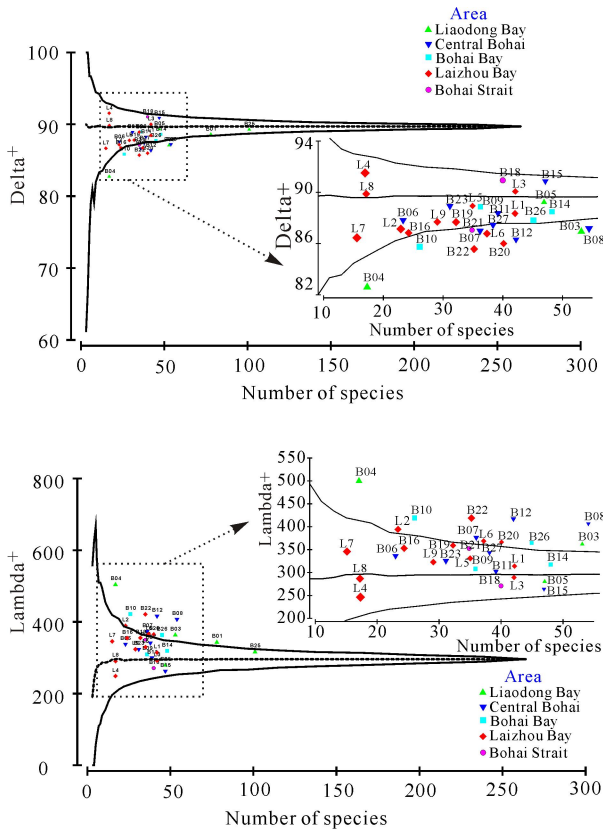


图4 渤海大型底栖动物  $\Delta^+$  (a) 与  $\Lambda^+$  (b) 的 95% 置信区间漏斗图

Fig. 4 95% probability funnels of average taxonomic distinctness (a) and variation in taxonomic distinctness (b) of macrofauna in the Bohai Sea

海中部尤为显著。

### 2.3 动物多样性与环境因子的相关分析

通过渤海大型底栖动物物种多样性与分类多样性的相关性分析(表2)可知,动物多样性各指数与粉砂-粘土含量、沉积物中值粒径和有机质含量无显著相关性。 $d$ 、 $H'$  和水深呈显著正相关; $J'$  和表温、底表

Table 2 Correlation analysis of species diversity and environmental factors of macrobenthos in the Bohai Sea

指数 Index	水深 Water depth	底温 BWT	底盐 BWS	表温 SWT	表盐 SWS	粉砂粘土含量 SiltClay	中值粒径 Md	叶绿素 Chla	脱镁叶绿酸 Pha	有机质 OM
$S$	0.401*	ns	0.421*	ns	0.503**	ns	ns	ns	ns	ns
$d$	0.452**	ns	0.431*	0.373*	0.522**	ns	ns	ns	ns	ns
$J'$	0.396*	0.505**	0.442*	0.597**	0.560**	ns	ns	-0.565**	-0.554**	ns
$H'$	0.478**	ns	0.462*	0.460*	0.558*	ns	ns	ns	ns	ns
$\lambda$	-0.498**	-0.390*	-0.454**	-0.537**	-0.581**	ns	ns	0.370*	0.370*	ns
$\Delta$	0.431*	ns	0.531**	ns	0.467**	ns	ns	ns	ns	ns
$\Delta^+$	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
$\Lambda^+$	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns

注: \* 在  $p < 0.05$  水平上显著, \*\* 在  $p < 0.01$  水平上显著, ns: 无显著相关性。

Note: \* Correlation is significant at the 0.05 level; \*\* Correlation is significant at the 0.01 level; ns: no significant correlation.

温呈显著正相关,与沉积物叶绿素 a 和脱镁叶绿酸呈显著负相关; $S$ 、 $d$ 、 $J'$  和表盐显著正相关; $\lambda$  和水深、表温、表盐、底盐显著负相关; $\Delta$  与水深、底盐和表盐呈显著正相关。

## 3 讨论

### 3.1 渤海大型底栖动物物种多样性的分布格局

本文调查渤海海域  $H'$ 、 $d$  和  $J'$  的空间分布趋势较为一致,总体看来渤海海域多样性较高。 $H'$  低值区主要为辽东湾西南部附近海域和莱州湾西部近黄河口附近。根据渤海表层海流方向,来自辽东湾和渤海湾的沿岸表层流在这里减速汇集,带来了沿岸的陆源营养盐输入,可能导致辽东湾西南部海域多样性较低。黄河作为中国的主要内陆河之一,每年都会从黄土高原带来大量的泥沙,在黄河口附近沉降,这极大的改变了黄河口附近大型底栖动物的生境,这些都有可能引起莱州湾西部多样性较低<sup>[23]</sup>。高值区域主要为辽东湾西北部和渤海海峡。辽东湾西北部由于受陆源污染、航道疏浚等人类活动的影响较小,这与刘录三等<sup>[24]</sup>对辽东湾北部大型底栖动物研究结果一致。渤海海峡离岸较远,受陆源污染和人类活动影响较小,而且该海域较近岸海域水深较深,有更多的初级生产量沉降至海底,较少的扰动和达到海底较高的初级生产量可能导致了较高的生物多样性。 $\lambda$  通常用来反映群落内各种物种的生态地位状况,一般来说, $\lambda$  越低,各物种生态地位越趋于平衡,生物群落越稳定<sup>[25]</sup>。本文调查海域  $\lambda$  高值区位于莱州湾西北部和辽东湾西部靠近秦皇岛海域,这些海域受到陆源污染和人类活动的干扰较大,生物群落较不稳定;低值区位于辽东湾北部和渤海海峡,说明这些海域的生态环境相对稳定受到较少干扰,底栖动物群落组成较稳定。

孙道元和刘银城<sup>[26]</sup>在对1982年渤海底栖动物种类组成研究时认为,渤海的动植物区系贫乏、单调,多样性很低,占优势的物种主要是低盐、广温性暖水种。最南端和最北端有不少物种同时出现,区系成分没有明显的差异,仅在湾口深水区沉积物颗粒组成显著不同的底质区才表现出种类组成方面的某些区别。韩洁等<sup>[27]</sup>的研究与上述结论是一致的,从1999年4月航次的样品的 $H'$ 来看,整个渤海多样性的平面分布未显示明显的差异。根据王海博等<sup>[28]</sup>在环渤海潮间带的研究,物种 $H'$ 以位于渤海口的莱州湾最高,为1.909。据王瑜等<sup>[29]</sup>在渤海湾近岸海域进行的大型底栖动物调查,调查区内的 $H'$ 范围为0~4.18,平均值为2.99。房恩军等<sup>[30]</sup>2005年5月渤海湾近岸海域的 $H'$ 为2,而2005年8月该海域的 $H'$ 为2.35。与以上研究相比,本研究的 $H'$ 较高,分布格局也发生了变化。

### 3.2 渤海大型底栖动物分类多样性的分布格局

本文调查的渤海海域中, $\Delta^+$ 的高值区位于莱州湾东部、渤海海峡和渤海湾东部;低值区位于辽东湾西部秦皇岛附近。这与物种多样性分布趋势基本一致。而 $\Delta^+$ 的高值区位于辽东湾西部;低值区位于渤海海峡,莱州湾东部和渤海湾东部,与 $\Delta^+$ 呈相反分布趋势。

受到污染的海区其分类多样性低于未受到污染的海区<sup>[4,9]</sup>,这是因为底栖动物群落在没有受到扰动时,通常包括多个不同门类,而受到污染和扰动后,首先消失的是个体数较少的门类,如棘皮动物,剩下的种类多为具有耐污性的门类,如环节动物多毛类等。由 $\Delta^+$ 的分布趋势可知辽东湾西部葫芦岛市和秦皇岛市附近受到污染或扰动较为严重;渤海湾东部深海海域和渤海海峡受到干扰或污染较少。根据2006~2012年《中国海洋环境公报》<sup>[31]</sup>,2006年以来,锦州和葫芦岛沿岸90%以上的人海直排口和排污河存在超标排污现象,锦州湾生态系统多年来处于不健康状态,而大规模的围海使其海域面积缩减,湾口变窄,水深淤浅,水交换受阻导致污染物转移能力减弱。秦皇岛海域连续4年发生抑食金球藻赤潮,周边海域海洋漏油事件多发,海水养殖污染物沉降导致沉积物组分改变。

Mouillot等<sup>[32]</sup>在其研究中发现,不同于 $\Delta^+$ , $\Delta^+$ 在污染程度增强时,非但没有下降,反而有升高的趋势,这与本文结果相一致。根据曲方圆等<sup>[12]</sup>对黄海大型底栖动物的研究,随着污染程度增加, $\Delta^+$ 先增大后减小,因此 $\Delta^+$ 的非线性特征使其值的高低不能代表污染程度,这一定程度上限制了它在污染监测上的

应用。

### 3.3 渤海大型底栖动物多样性与环境因子的关系

本研究结果表明,动物多样性与粉砂-粘土含量、沉积物中值粒径、有机质含量无显著相关性。 $H'$ 、 $d$ 和水深之间的正相关性可能是通过到达海底的初级生产量建立起来,Grebmeier等<sup>[33]</sup>认为,深水区有更多食物到达底部从而支撑着更高的生物量,这有利于大型底栖动物生物多样性的增加。而各多样性指数与粉砂-粘土含量、沉积物中值粒径无相关性,说明渤海的沉积物环境的稳定性不是影响底栖动物多样性的关键环境因子。本次研究中 $S$ 、 $d$ 、 $J'$ 、 $H'$ 、 $\lambda$ 、 $\Delta$ 与表盐和底盐都呈显著正相关,以往研究也有相似结论,刘文亮<sup>[11]</sup>对长江口大型底栖动物的研究中发现大型底栖生物的物种数与盐度正相关。周红等<sup>[34]</sup>在莱州湾的研究中发现,大型底栖动物对水层环境变化较为敏感,例如与富营养化有关的水体盐度增加和由黄河径流减少引起的水体盐度增加都会引起大型底栖动物群落结构的改变。大型底栖动物多样性和盐度的正相关性可能是由于其对水层盐度的敏感性。 $J'$ 和叶绿素a、脱镁叶绿酸显著负相关,这与韩洁等<sup>[27]</sup>的结论一致,叶绿素和动物多样性的负相关性可能是由于大型底栖动物的滤食作用。Moodley等<sup>[35]</sup>的研究发现,滤食性动物密度较高的水域,叶绿素随着新鲜碎屑还未到达底质便已经被摄食。从本研究来看,软体动物双壳类是最优势的类群之一,大部分双壳类动物是滤食性的,可能构成了对叶绿素含量的控制<sup>[36]</sup>。

## 4 结论

两航次采样中共记录渤海大型底栖动物270种(或分类实体),隶属于12门,19纲,39目,130科,206属。 $\lambda$ 平均值为0.05,最大值为0.13,出现于莱州湾北部,最小值为0.01,出现在辽东湾西部; $H'$ 平均值为4.80,最大值为6.39,出现于辽东湾西北部,最小值为3.46,出现于莱州湾西北部; $d$ 平均值为7.35,最大值为16,出现于辽东湾西北部,最小值3.49,出现于莱州湾西北部; $J'$ 平均值为0.93,最大值为0.98,出现于辽东湾北部,最小值0.7911,出现于莱州湾北部; $\Delta$ 平均值为83.84;最大值为88.60,出现于渤海中部;最小值73.68,出现于莱州湾西北部; $\Delta^+$ 平均值为87.90,最大值为91.54,出现于东部,最小值82.72,出现于辽东湾西部; $\Delta^+$ 平均值为343.88,最大值为504.1,出现于辽东湾西部,最小值249.2,出现于莱州湾东部。渤海海域总体动物多样性较高。由物种多样性和分类多样性均可看出渤海

海域沿岸地区、辽东湾西部、莱州湾西北部等地动物多样性较低,受陆源污染和人类活动干扰严重。分析 $\Delta^+$ 和 $\Lambda^+$ 95%置信区间发现,渤海海区环境受到了扰动,莱州湾和渤海中部尤为显著。通过分析物种多样性和分类多样性的相关性可知,两种多样性指数代表了多样性的不同层面内容,将两者结合分析,可以更好地反映群落多样性结构。分析大型底栖动物多样性与环境因子的相关性发现,水深、盐度和温度等水层环境对其的影响要大于沉积环境的影响。

#### 参考文献:

[1] 温亚利. 中国生物多样性保护政策的经济分析[D]. 北京:北京林业大学,2003:1-81.  
Wen Y L. Economic Analysis of China Biodiversity Protection Policy [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2003:1-81.

[2] 李新正. 我国海洋底栖生物多样性研究及展望:以黄海为例[J]. 生物多样性,2011,19(6):676-684.  
Li X Z. An overview of studies on marine macrobenthic biodiversity from Chinese waters: Principally from the Yellow Sea[J]. Biodiversity Science, 2011, 19(6): 676-684.

[3] 蔡立哲. 海洋底栖生物生态学和生物多样性研究进展[J]. 厦门大学学报:自然科学版,2006,45(增刊2):83-89.  
Cai L Z. Progress on marine benthic ecology and biodiversity[J]. Journal of Xiamen University: Natural Science, 2006, 45(Suppl. 2): 83-89.

[4] Warwick R M, Clarke K R. New 'biodiversity' measures reveal a decrease in taxonomic distinctness with increasing stress[J]. Marine Ecology Progress Series, 1995, 129:301-305.

[5] Clarke K R, Warwick R M. A taxonomic distinctness index and its statistical properties[J]. Journal of Applied Ecology, 1998, 35:523-531.

[6] Clarke K R, Warwick R M. A further biodiversity index applicable to species lists: Variation in taxonomic distinctness[J]. Marine Ecology Progress Series, 2001, 216:265-278.

[7] Warwick R M, Turk S M. Predicting climate change effects on marine biodiversity: Comparison of recent and fossil molluscan death assemblages[J]. Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom, 2002, 82:847-850.

[8] Gambi C, Vanreusel A. Biodiversity of nematode assemblages from deep-sea sediments of the Atacama Slope and Trench (South Pacific Ocean) [J]. Deep-Sea Research I, 2003, 50:103-117.

[9] Warwick R M. Taxonomic distinctness and environmental assessment[J]. Journal of Applied Ecology, 1998, 35: 532-543.

[10] Raut D, Ganesh T, Murty N V S S, et al. Macrobenthos of Kakinada Bay in the Godavari delta, East coast of India: Comparing decadal changes[J]. Estuarine, Coastal and Shelf, 2005, 62(4): 609-620.

[11] 刘文亮. 长江河口大型底栖动物及其优势种探讨[D]. 上海:华东师范大学,2007:1-84.  
Liu W L. The Benthic Macro-invertebrates and Dominant Groups Identification in the Yangtze Estuary[D]. Shanghai: East China Normal University, 2007:1-84.

[12] 曲方圆,于子山. 分类多样性在大型底栖动物生态学方面的应用:以黄海底栖动物为例[J]. 生物多样性, 2010, 18(2): 155-160.  
Qu F Y, Yu Z S. The application of taxonomic diversity in macrobenthic ecology: Taking Yellow Sea for example[J]. Biodiversity Science, 2010, 18(2): 155-160.

[13] Zhou H, Zhang Z N, Liu X S, et al. Decadal change in sublittoral macrofaunal biodiversity in the Bohai Sea, China[J]. Marine Pollution Bulletin, 2012, 64: 2364-2373.

[14] 刘晓收,范颖,史书杰,等. 渤海大型底栖动物种类组成与群落结构研究[J]. 海洋学报,2014,36(12):53-66.  
Liu X S, Fan Y, Shi S J, et al. Community structure of macrofauna and its relationships with environmental factors in the Bohai Sea, China[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2014, 36(12): 53-66.

[15] 刘晓收,赵瑞,华尔,等. 莱州湾夏季大型底栖动物群落结构特征及其与历史资料的比较[J]. 海洋通报,2014, 33(3):283-292.  
Liu X S, Zhao R, Hua E, et al. Macrofaunal community structure in the Laizhou Bay in summer and the comparison with historical data[J]. Marine Science Bulletin, 2014, 33(3): 283-292.

[16] 国家质量监督检验检疫总局和国家标准委员会. GB/T17378.5-2007海洋监测规范第5部分:沉积物分析[S]//中华人民共和国国家标准. 北京:中国标准出版社,2007:1-95.  
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the PRC and Standardization Administration of China. GB/T17378. 5-2007 The specification for marine monitoring-Part 5: Sediment analysis[S]//National Standard of the PRC. Beijing: China Standard Press, 2007:1-95.

[17] 国家质量监督检验检疫总局和国家标准委员会. GB/T12763.6-2007海洋调查规范第6部分:海洋生物调查[S]//中华人民共和国国家标准. 北京:中国标准出版社,2007:1-159.  
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the PRC and Standardization Administration of China. GB/T12763. 6-2007 Specifications for oceanographic survey-Part 6: Marine biological survey[S]//National Standard of the PRC. Beijing: China Standard Press, 2007:1-159.



- [18] Simpson E H. Measurements of diversity[J]. Nature, 1949,163:688.
- [19] Shannon C E, Weaver W. The Mathematical Theory of Communication [M]. Illinois, University of Illinois, 1963:1-144.
- [20] Margalef R. Perspective in Ecological Theory[M]. Chicago, University of Chicago Press, 1968:1-111.
- [21] Pielou E C. Ecological Diversity[M]. New York: Wiley-Inters, 1975:1-163.
- [22] 史贻荣, 李永振, 卢伟华, 等. 东沙群岛珊瑚礁海域鱼类物种分类多样性研究[J]. 南方水产, 2009, 5(2): 10-16.  
Shi Z R, Li Y Z, Lu W H, et al. Taxonomic diversity of fish species in coral reef area from Dongsha Islands[J]. South China Fisheries Science, 2009, 5(2): 10-16.
- [23] 洪业汤, 朴河春, 姜洪波. 黄河沙量记录与黄土高原侵蚀[J]. 第四纪研究, 1990, 1: 10-20.  
Hong Y T, Pu H C, Jiang H B. Erosion of the loess plateau with special reference to the records of silt discharged by the Huang He (Yellow River)[J]. Quaternary Sciences, 1990, 1: 10-20.
- [24] 刘录三, 孟伟, 李新正, 等. 辽东湾北部海域大型底栖动物研究: 生物多样性与群落结构[J]. 环境科学研究, 2009, 22(2): 155-161.  
Liu L S, Meng W, Li X Z, et al. Studies on macrobenthos in the northern waters of Liaodong Bay: II. Biodiversity and community structure[J]. Research of Environmental Sciences, 2009, 22(2): 155-161.
- [25] Magurran A E. Measuring Biological Diversity[M]. Oxford: Blackwell Science Ltd, 2003: 1-264.
- [26] 孙道元, 刘银城. 渤海底栖动物种类组成和数量分布[J]. 黄渤海海洋, 1991, 9(1): 42-50.  
Sun D Y, Liu Y C. Species composition and quantitative distributions of biomass and density of the macrobenthic infauna in the Bohai Sea[J]. Journal of Oceanography and Huanghai & Bohai Seas, 1991, 9(1): 42-50.
- [27] 韩洁, 张志南, 于子山. 渤海中、南部大型底栖动物物种多样性的研究[J]. 生物多样性, 2003, 11(1): 20-27.  
Han J, Zhang Z N, Yu Z S. Macrobenthic species diversity in southern and central Bohai Sea, China[J]. Biodiversity Science, 2003, 11(1): 20-27.
- [28] 王海博, 蔡文倩, 林岩璇, 等. 环渤海潮间带秋季大型底栖动物生态学研究[J]. 环境科学研究, 2011, 24(12): 1339-1345.  
Wang H B, Cai W Q, Lin K X, et al. Ecological studies on the macrobenthos community in the intertidal zones of Bohai Sea in autumn[J]. Research of Environmental Sciences, 2011, 24(12): 1339-1345.
- [29] 王瑜, 刘录三, 刘存歧, 等. 渤海湾近岸海域春季大型底栖动物群落特征[J]. 环境科学研究, 2010, 23(4): 430-436.  
Wang Y, Liu L S, Liu C Q, et al. Community structure characteristics of macrobenthos in the coastal seawaters of Bohai Bay in spring[J]. Research of Environmental Sciences, 2010, 23(4): 430-436.
- [30] 房恩军, 李军, 马维林, 等. 渤海湾近岸海域大型底栖动物初步研究[J]. 现代渔业信息, 2006, 21(10): 11-15.  
Fang E J, Li J, Ma W L, et al. A primary study on bottom macrofauna in the coastal waters of Bohai Bay[J]. Modern Fisheries Information, 2006, 21(10): 11-15.
- [31] 国家海洋信息中心. 2006年—2012年中国海洋环境质量公报 [EB/OL]. [2015-06-30]. <http://www.coi.gov.cn/gongbao/huanjing/>.  
China Oceanic Information Network. Reports on Chinese Marine Environmental Quality from 2006 to 2012 [EB/OL]. [2015-06-30]. <http://www.coi.gov.cn/gongbao/huanjing/>.
- [32] Mouillot D, Laune J, Tomasini J A, et al. Taxonomic diversity of fish, zoobenthic and macrophyte communities along an eutrophication gradient in Mediterranean coastal lagoons[J]. Hydrobiologia, 2005, 550: 121-130.
- [33] Grebmeier J M, McRoy C P, Feder F M. Pelagic-benthic coupling on the shelf of the Northern Bering and Chukchi Seas. I. Food supply source and benthic biomass[J]. Marine Ecology Progress Series, 1988, 48: 57-67.
- [34] 周红, 华尔, 张志南. 秋季莱州湾及邻近海域大型底栖动物群落结构的研究[J]. 中国海洋大学学报, 2010, 40(8): 80-87.  
Zhou H, Hua E, Zhang Z N. Community structure of macrobenthos in Laizhou Bay and adjacent waters[J]. Periodical of Ocean University of China, 2010, 40(8): 80-87.
- [35] Moodley L, Heip C H R, Middelburg J J. Benthic activity in sediments of the Northwestern Adriatic Sea: Sediment oxygen consumption, macro- and meiofauna dynamics[J]. Journal of Sea Research, 1998, 40: 263-280.
- [36] 韩洁, 张志南, 于子山. 渤海大型底栖动物丰度和生物量的研究[J]. 青岛海洋大学学报, 2001, 31(6): 889-896.  
Han J, Zhang Z N, Yu Z S. Study on the macrobenthic abundance and biomass in Bohai Sea[J]. Journal of Ocean University of Qingdao, 2001, 31(6): 889-896.

(责任编辑: 竺利波)