#### DOI: 10.5846/stxb201405221061

刘清河,刘晓收,许嫚,黄德铭,原子皓,张志南.夏季南黄海冷水团及其周边海域小型底栖动物类群组成与分布.生态学报,2015,35(24): - . Liu Q H, Liu X S, Xu M, Huang D M, Yuan Z H, Zhang Z N.Meiofaunal assemblage and distribution in the southern Yellow Sea Cold Water Mass and its adjacent waters in summer.Acta Ecologica Sinica,2015,35(24): - .

# 夏季南黄海冷水团及其周边海域小型底栖动物类群组 成与分布

# 刘清河,刘晓收\*,许 嫚,黄德铭,原子皓,张志南

中国海洋大学海洋生命学院,青岛 266003

摘要:对 2011 年 6 月南黄海冷水团及其周边海域 23 个站位的小型底栖动物类群组成、丰度、生物量和空间分布及其与环境因 子的关系进行了研究。结果表明,调查海域共鉴定出小型底栖动物 20 个类群,平均丰度为(1194 ±873) ind./10 cm<sup>2</sup>,平均生物 量为(881 ±669) µgdwt./10 cm<sup>2</sup>,其中自由生活海洋线虫是绝对优势类群,占小型底栖动物总丰度的 89.7%,其次为底栖桡足类 (5.5%)、甲壳类幼体(1.8%)、多毛类(1.2%);对生物量的贡献上依次为海洋线虫(49.0%)、多毛类(22.9%)、桡足类(13.9%)、 介形类(7.8%)、涡虫(2.0%)。在垂直分布上,79.1%的小型底栖动物分布在沉积物 0—2 cm 的表层,16.4%分布在 2—5 cm 的 次表层,4.5%的小型底栖动物分布在 5—8 cm 的下层。与环境因子的相关性分析表明,小型底栖动物的总丰度和总生物量与 沉积物叶绿素 a 含量显著正相关;小型底栖动物的生物量和沉积物中部分重金属(Pb、Cu、Fe、Ni、Co)含量呈显著负相关,但与 Cd 含量呈极显著正相关。BIOENV 分析结果表明,沉积物含水量、有机质含量和分选系数组合最能解释小型底栖动物类群组 成分布差异。根据小型底栖动物的类群组成可将研究海域划分为三个区域,包括:冷水团中央区域,冷水团边缘区和近岸区,其 中冷水团边缘区丰度和生物量最高,冷水团区域次之,近岸区最低;整个冷水团海域小型底栖动物丰度和生物量分别是非冷水 团海域的 2.3 倍和 2.1 倍。

关键词:小型底栖动物;自由生活海洋线虫;丰度;生物量;南黄海冷水团

# Meiofaunal assemblage and distribution in the southern Yellow Sea Cold Water Mass and its adjacent waters in summer

LIU Qinghe, LIU Xiaoshou<sup>\*</sup>, XU Man, HUANG Deming, YUAN Zihao, ZHANG Zhinan College of Marine Life Sciences, Ocean University of China, Qingdao 266003, China

Abstract: Meiofauna are referred to metazoans, including some protozoans, that can pass through sieves between mesh size of 1 mm (or 0.5 mm) and 0.042 mm (or 0.031 mm). Meiofauna are one of the most important components of the benthic ecosystem and serve as a key link in the benthic food web. They are ubiquitous in nature, with short generation time, small body size and high metabolic rates. Thus their metabolic activity has a direct effect on the rate of matter and nutrient recycling within the benthic ecosystem. Although there are many studies on meiofauna in Chinese seas, such as the Bohai Sea, Yellow Sea and East China Sea, there are only a few reports about meiofauna related to the southern Yellow Sea Cold Water Mass. In this paper, metazoan meiofaunal assemblage, abundance, biomass and spatial distribution in relation to benthic environmental variables at 23 stations in the southern Yellow Sea Cold Water Mass and its adjacent waters in summer 2011 were investigated. The results showed that a total of 20 taxa of meiofauna were identified. The average

基金项目:中国海洋大学中央高校基本科研业务费专项项目(201462008);国家自然科学基金项目(41006081);山东省优秀中青年科学家科研 奖励基金项目(BS2013HZ008)

收稿日期:2014-05-22; 网络出版日期:2015---

\* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: liuxs@ouc.edu.cn

abundance and biomass of meiofauna were  $1194\pm873$  ind./10 cm<sup>2</sup> and  $881\pm669 \mu gdwt./10$  cm<sup>2</sup>, respectively. Free-living marine nematodes were the most dominant meiofaunal group, comprising 89.7% of total abundance and 49.0% of total biomass, followed by benthic copepods (5.5%), crustacean nauplii (1.8%) and polychaetes (1.2%) in terms of abundance, and polychaetes (22.9%), benthic copepods (13.9%), ostracods (7.8%) and tubellarians (2.0%) in terms of biomass. For vertical distribution, 79.1% meiofauna were found in the surface 0—2 cm depth of the sediment, 16.4% in 2—5 cm depth and 4.5% in 5—8 cm depth. The abundance and biomass of total meiofauna showed significant positive correlation with chlorophyll a concentration, while the biomass of the total meiofauna showed significant negative correlation with the concentrations of heavy metals Pb, Cu, Fe, Ni and Co in the sediment and a significant positive correlation with Cd. BIOENV analysis showed that the combination of moisture content, organic matter content and grain size of sediment can best explain the difference of meiofaunal assemblages among the stations. Based on the abundance and biomass of meiofauna, the study area can be divided into three regions, including the centre of cold water mass, area at the perimeter of the cold water mass were the highest, followed by that in the central area of the cold water mass and the coastal waters. The average abundance and biomass of meiofauna in the cold water mass area was 2.3 and 2.1 times of the coastal waters, respectively.

Key Words: meiofauna; free-living marine nematodes; abundance; biomass; southern Yellow Sea Cold Water Mass

小型底栖动物是指分选时能通过 1 mm(或 0.5 mm) 孔径的网筛,但被 0.042 mm 孔径的网筛(深海生态研 究者建议用 0.031 mm 作为小型底栖动物的下限)所截留的一类底栖生物,主要指多细胞动物,也包括一部分 原生动物,如有孔虫和纤毛虫<sup>[1-2]</sup>。本研究中小型底栖动物是指分选时通过 0.5 mm 而被 0.031 mm 孔径的网 筛所截留的后生动物。小型底栖动物是底栖生态系统中的重要组成成分,是构成底栖小食物网的重要环 节<sup>[3-4]</sup>,也是众多仔、稚、幼鱼和虾蟹等经济动物的重要饵料<sup>[5]</sup>。小型底栖动物由于其种类多,数量大且分布 广,以及独特的生殖对策(繁殖快,生活史短,无浮游幼虫期等),因而它们的代谢活动直接关系着底栖系统内 物质的代谢和营养元素的再生。相关研究表明小型底栖动物具有刺激微生物生产,加速有机物降解,促进营 养物质再循环,以及补充新生生产力对氮的要求等多方面的作用<sup>[6-7]</sup>。小型底栖动物还是连接碎屑食物链和 初级生产力以及水层-底栖耦合的重要环节。虽然小型底栖动物个体生物量较小,但其广泛的分布和庞大的 数量使其总生物量在沿岸、河口、海湾和深海等地区与大型动物生物量相持衡,其群落结构、多样性格局和生 物量的变动直接控制着大型经济无脊椎动物幼体的补充,相关研究还表明小型底栖动物对异养微生物的摄 食、胁迫和调控过程具有全球尺度的效应,并且在全球地化循环中占有重要地位<sup>[8]</sup>。作为重要的环境质量指 示生物,小型底栖动物正日益受到国际学术界的重视。

南黄海是指山东半岛的成山角与朝鲜半岛长山角连线以南与长江口与韩国济州岛连线以北的椭圆形半 封闭海域,地势平坦,大陆架延伸广阔,总面积达 30 多万 km<sup>2</sup>,平均水深 45.3 m,最大水深 140 m,位于济州岛 北侧,平均盐度为 32<sup>[9]</sup>。南黄海海产资源丰富,不但有大黄鱼、小黄鱼、带鱼、蓝点鲛、鲐鱼等经济鱼类,还盛 产虾、蟹等甲壳类和乌贼、蛤、螺等软体动物,是我国重要的浅海渔场,其寒暖流交汇处是经济鱼类重要产卵孵 化场地<sup>[10]</sup>。黄海冷水团是黄海的重要水文特征,其典型特点是低温、高盐,是一季节性水团,通常认为形成于 春季,夏季达到顶峰,秋季开始消失,黄海冷水团并不是单一水团,多种冷水团同时存在,统一称为黄海冷水 团<sup>[11-13]</sup>。目前,国内对小型底栖动物的研究主要集中在近岸沿海、潮间带、河口、海湾等地区,在南黄海地区 也展开了部分研究<sup>[6,14-18]</sup>,但对南黄海冷水团及其周边海域小型底栖动物现存量和空间分布结构的报道还很 有限,仅见王家栋等<sup>[16]</sup>。冷水团对小型底栖动物的影响尚不十分清楚。本研究旨在通过对黄海冷水团及其 周边海域小型底栖动物的研究,分析小型底栖动物和环境因子之间的关系,了解冷水团对小型底栖动物的影响,

## 1 材料和方法

#### 1.1 研究海域和站位

研究样品由"东方红 2 号"于 2011 年 6 月采自 31°—37°N,121°—125°E 的南黄海冷水团及其周边海 域,共计 23 个站位,站位分布如图 1 所示。

## 1.2 取样方法

使用内径为 2.9 cm 的取样管(由塑料注射器改 装),从未受扰动的 0.1 m<sup>2</sup>改进型 Gray-O'Hara 箱式采 泥器中取 3 个重复样。芯样长 8 cm,取出后立即按 0— 2 cm、2—5 cm 和 5—8 cm 分层装瓶,终浓度为 5%甲醛 溶液固定。在实验室内对样品进行虎红染色,使用 0.5 mm 和 0.031 mm 孔径的网筛过筛,Ludox-TM 悬浮离 心,按类群分别挑选计数。取表层 0—5 cm 沉积物装塑 料袋用作粒度分析;另取两个重复芯样,按 0—2 cm、 2—5 cm 和 5—8 cm 分别装袋,-20 ℃低温保存,带回实 验室分析叶绿素 a 和脱镁叶绿酸 a 的含量。小型底栖 动物主要类群个体平均干重依据 Liu 等<sup>[18]</sup>给出的计算 方法。小型底栖动物的干湿比按 1:4 计算<sup>[6,19]</sup>。沉积



图 1 南黄海冷水团及其周边海域研究站位图(闭合曲线内为冷 水团海域站位,据赫崇本等<sup>[11]</sup>)

Fig. 1 Map of the sampling stations in the southern Yellow Sea Cold Water Mass and its adjacent waters (Stations inside the circled area were located in the Yellow Sea Cold Water Mass according to He et al.<sup>[11]</sup>)

物粒度分析采用 Master Sizer3000 型激光粒度仪进行测定。有机质测定参照《海洋调查规范》及刘昌岭等<sup>[20]</sup> 改进的方法。叶绿素 a 和脱镁叶绿素 a 测定采用湿样法<sup>[21-23]</sup>。其它水层环境因子来自随船温盐深测定仪 (CTD)现场测定,包括水深,底层水温,底层水盐度等。

1.3 数据处理和分析

使用 Surfer8.0 绘制站位分布图和等值线图,使用 SPSS19.0 对小型底栖动物的丰度和生物量进行单因素 方差分析(One-way ANOVA)差异检验,分析不同站位之间的差异;同时使用 Spearman 相关分析(Spearman Correlation Analysis)对各种环境因子与小型底栖动物的丰度和生物量进行相关性分析。使用 PRIMER6.0 对 各环境因子进行 PCA(Principal Component Analysis)分析,站位间小型底栖动物丰度和环境因子的相似性分 析采用等级聚类(CLUSTER)和非度量多维标序(MDS)。用 BIOENV 分析连接环境和生物矩阵,分析环境变 量与小型底栖动物类群组成的相关性。

### 2 结果

#### 2.1 环境因子

2.1.1 水深、底层水温和盐度

研究站位平均水深为 52.6m,最深点出现在 HF1 站位(78m),H21 站位水深最浅(19m),水深呈现出由沿 岸向外海逐步增大的趋势(图 2a)。各研究站位盐度的分布情况和各站位水深分布情况基本一致,但波动很 小,平均盐度为 32.3,最大值出现在 H28(33.7)和 H30II 站位(33.7),最低值出现在 H21 站位(30.9),水深越 深相对盐度越高,这可能与近岸海域夏季受大量陆源淡水注入而外海地区主要受大洋性水团影响有关,这一 点与冷水团的分布存在一致性(图 2b,2c)。不同站位之间底层水温度值差别较大,H21 站位水温最高达到 20.1℃,H04 站位水温最低只有 6.1℃。整体上冷水团海域底层水温明显低于近岸海域(图 2c)。

#### 2.1.2 沉积物类型、含水量及有机质含量

研究站位沉积物类型主要有4种,其中以粘土质粉砂(YT)类型为主(共计11个站位,图3a,3b),粉砂含



图 2 南黄海冷水团及其周边海域(a)水深(m)、(b)底层盐度和(c)底层水温(℃)分布等值线图

Fig. 2 Contour map of (a) depth (m), (b) bottom water salinity and (c) bottom water temperature ( $^{\circ}$ C) in the southern Yellow Sea Cold Water Mass and its adjacent waters

量占 54.3%—69.3%,粘土含量占 16.2%—38.7%,中值粒径为 5—26 um,分选系数 σi:1.4—2.3,分选性差,主要分布在南黄海中部冷水团中心海域。另一常见类型为砂质粉砂(ST,6 个站位),主要集中在山东半岛南岸,其它类型包括粉砂质砂(TS,4 个站位)、砂-粉砂-粘土(STY,2 个站位)。冷水团中心海域中值粒径值明显低于冷水团周围海域,表明由冷水团边缘向外沉积物颗粒直径逐渐变大。

沉积物中有机质含量和含水量的分布存在相似性,都呈现出由近岸向中央冷水团逐步增加的趋势,最低 值分别出现在 H15(0.3%)和 H38(23.7%),最高值分别出现在 B01(4.1%)和 H43(46.9%)。沉积物中有机质 含量的分布趋势和以往研究相类似(王家栋等<sup>[16]</sup>)。

2.1.3 沉积物叶绿素(Chl-a)、脱镁叶绿酸(Ph-a)分布

4

对 11 个站位(B01,B03,B05,B08,B10,H30II,H38,H39,H42,H43,HF1)进行了叶绿素(Chl-a)、脱镁叶 绿酸(Ph-a)含量分析,结果显示 11 个站位叶绿素 a 平均含量为(0.73 ±0.84)μg/g,其中 B03 含量最高,为3.21 μg/g,H42 含量最低,为 0.33μg/g;脱镁叶绿酸的平均含量为(1.60±0.76)μg/g,H43 站位最高,为 2.74μg/g, H38 最低,只有 0.70μg/g。在垂直分布上,叶绿素 a 和脱镁叶绿酸在表层(0-2 cm)的含量最高,在 2-5 cm 的含量略微高于 5-8 cm 的含量,但差距并不大。

表1 南黄海冷水团及其周边海域部分站位叶绿素 a 和脱镁叶绿酸含量和垂直分布

Table 1 Content and distribution in depth of Chl-a and Pha at some stations in the southern Yellow Sea Cold Water Mass and its adjacent waters

).1. /2.	0—2/	′( cm )	2—5/	′( cm )	5—8/	/( cm )	平均值	Average
站1立 Station	Chl-a∕ (µg∕g)	Pha∕ (µg∕g)	Chl-a∕ (µg∕g)	Pha∕ (µg∕g)	Chl-a∕ (µg∕g)	Pha∕ (µg∕g)	Chl-a∕ (µg∕g)	Pha∕ (µg∕g)
H38	0.45	0.45	0.32	0.79	0.3	0.77	0.36	0.67
H39	—	—	—	—	—	—	0.37	0.99
H42	0.26	0.61	0.32	0.46	0.42	1.03	0.33	0.7
H30II	0.52	2.36	0.44	1.7	0.3	1.57	0.42	1.88
HF1	0.56	2.89	0.41	2.14	0.3	1.29	0.42	2.11
H43	0.55	4.69	0.39	2.03	0.26	1.5	0.4	2.74
B01	0.62	3.16	0.59	2.8	0.49	1.88	0.57	2.62
B03	6.64	0.48	2.46	1.3	0.52	1.52	3.21	1.1
B05	1.89	2.54	0.57	2.34	0.42	1.72	0.96	2.2
B08	0.76	2.34	0.47	1.36	0.32	1.03	0.52	1.58
B10	0.81	1.57	0.27	0.79	0.18	0.55	0.42	0.97

H39站位因取样原因未做分层处理,只取平均值。



图 3 南黄海冷水团及其周边海域沉积物(a)粉砂粘土含量(%)、(b)中值粒径(mm)、(c)有机质含量(%)和(d)含水量(%)分布等值 线图

Fig. 3 Contour map of (a) silt +clay content(%), (b) medium diameter (mm), (c) organic matters content (%) and (d) water content (%) of the sediment in the southern Yellow Sea Cold Water Mass and its adjacent waters

### 2.1.4 环境因子聚类分析

对八种环境因子(水深,底层水盐度,底层水温度,沉积物粉砂粘土含量、中值粒径、分选系数、有机质含量和含水量)进行 PCA 分析(图 4),主成分轴1(PC1)可解释环境变异度的 65.0%,主成分轴2(PC2)和主成分轴1(PC1)累积可解释环境变异度的 82.2%。CLUSTER 聚类分析结果显示调查站位的环境可以分为4组, 组1(H43,H06,H08,B01)和组2(H11,H13,H28,H30II,HF1)完全位于冷水团海域内,组3(B03,B05,B08,H02,H04,H21,H31,H35,H37,H42)和组4(B10,H15,H38,H39)主要分布冷水团边缘和非冷水团海域内。其中组1水深最深(71.5 m),底层水温最低(7.6℃),沉积物有机质含量(3.8%)、粉砂粘土含量(99.6%)和含水量(54.3%)都最高,沉积物中值粒径(5.5 um)最小;组2 底层水盐度(33.4)最高,水深(70.6 m)仅次于于组1;组3 水深(38.3 m)最浅,底层水盐度(31.8)最低,温度(12.8℃)最高;组4 底层水温(12.5℃)仅次于组3,沉积物有机质含量(0.6%)、粉砂粘土含量(42.1%)和含水量(26.4%)都最低,沉积物中值粒径最大(106.9 um),分选性最差。与非冷水团海域相比较,冷水团海域环境因子的特点是:水深深;底层水温度低、盐度高;沉积物中值粒径小,粉砂粘土含量、含水量、有机质含量高。

### 2.2 小型底栖动物

研究海域共鉴定出 20 个小型底栖动物类群(表 2),包括自由生活海洋线虫、底栖桡足类、多毛类、甲壳类





图 4 南黄海冷水团及其周边海域站位环境因子主成分分析结果和聚类分析图 Fig. 4 PCA plot and CLUSTER analysis of the sampling stations in the southern Yellow Sea Cold Water Mass and its adjacent areas

幼体、腹毛类、动吻类、寡毛类、端足类、等足类、异足类、涟虫类、温步类、曳鳃类、水螅类、双壳类、昆虫类、涡虫 类、海螨类、介形类、缓步类及其它未知种类,平均丰度为(1194±873) ind./10 cm<sup>2</sup>,平均生物量为(881±669) µgdwt./10 cm<sup>2</sup>,其中海洋线虫是绝对优势类群,占小型底栖动物总丰度的 89.7%,其它重要类群还有底栖桡足 类(5.5%)、甲壳类幼体(1.8%)、多毛类(1.2%),以上 4 个类群占小型底栖动物总丰度的 98.2%,剩余类群所 占比例都不到 1%(表 2);对生物量的贡献上依次为线虫(49.0%)、多毛类(22.9%)、底栖桡足类(13.9%)、介 形类(7.8%)、涡虫(2.0%)。

### 2.2.1 小型底栖动物类群群落结构

对小型底栖动物丰度进行 CLUSTER 聚类分析,结果显示小型底栖动物类群组成在 69% 相似度上可以分为两组(图 5),组 I 包括 H39,B08,H42,B05,H21,H31,B10,H35,H37,H30II,H04,H02,H15,B03;组 II 包括

表2 南黄海冷水团及其周边海域小型底栖动物各类群丰度和生物量	2 Abundance and biomass of different groups of meiofauna in the southern Yellow Sea Cold Water Mass and its adjacent area
	Table

			+++-	ε度 Abι	ındance						7	主物量	Biomass			
	所有海域		冷水团中央》	事域	冷水团边缘淮	<b>韩城</b>	非冷水团海坦	¥ ا	所有海域		冷水团中央》	草城	冷水团边缘海	耳域	非冷水团海	掝
类群 Groups	The whole		Central area	of	Marginal area	lo	Area outside of	the	The whole		Central area	of	Marginal area	of	Area outside o	f the
	study area		the Cold Water	Mass	the Cold Water	Mass	Cold Water Ma	ISS	study area	-	he Cold Water	Mass	the Cold Water	Mass	Cold Water M	lass
	$\mathrm{ind.}/10\mathrm{cm}^2$	%	$ind./10cm^{2}$	%	$ind./10cm^{2}$	%	$ind./10cm^2$	%	$ind./10cm^{2}$	%	$ind./10cm^2$	%	$ind./10cm^{2}$	%	$\mathrm{ind.}/10\mathrm{cm}^2$	%
线虫 Nematoda	$1071.6 \pm 771.5$	90.06	89.6±451.1	91.5	$1946.4\pm729.9$	88.5	$442.0 \pm 132.5$	90.6	$431.7 \pm 306.7$	49.0	$358.6 \pm 180.4$	54.3	$770.6\pm 292.0$	46.5	186.6±65.3	48.2
桡足类 Copepoda	$65.8 \pm 94.2$	5.5	$29.1\pm 26.8$	3.0	159.3±129.4	7.3	$19.6 \pm 12.3$	4.0	$122.3 \pm 175.3$	13.9	$54.0\pm49.8$	8.2	$296.2\pm 240.7$	17.9	$36.2\pm 20.9$	9.4
多毛类 Polychaeta	$14.2 \pm 13.8$	1.2	$10.4 \pm 7.8$	1.1	$28.5 \pm 15.5$	1.3	$4.8 \pm 3.8$	1.0	$201.3 \pm 193.6$	22.9	$146.1 \pm 109.3$	22.1	$398.9 \pm 217.0$	24.1	74.7±75.4	19.3
腹毛类 Gastrotricha	$1.0\pm 2.4$	0.1	2.6±3.4	0.3	$0.0 \pm 0.0$	0.0	$0.0 \pm 0.0$	0.0	$3.6\pm 8.5$	0.4	$9.2 \pm 11.8$	1.4	$0.0 \pm 0.0$	0.0	$0.0 \pm 0.0$	0.0
甲壳幼体 Naulii	$21.7 \pm 14.8$	1.8	$25.8 \pm 13.3$	2.6	$24.7 \pm 19.7$	1.1	$13.3 \pm 7.8$	2.7	$2.4 \pm 1.7$	0.3	$2.8 \pm 1.5$	0.4	$2.7\pm 2.2$	0.2	$1.4\pm 1.1$	0.4
涡虫类 Turbellaria	$5.1 \pm 6.1$	0.4	9.0±7.1	0.9	4.9±4.4	0.2	$0.2 \pm 0.6$	0.0	$17.8\pm 21.5$	2.0	$31.4\pm 25.0$	4.8	$17.2 \pm 15.4$	1.0	$0.8\pm 2.0$	0.2
涟虫类 Cumcea	$0.1 \pm 0.2$	0.0	$0.2 \pm 0.3$	0.0	$0.0 \pm 0.0$	0.0	$0.0 \pm 0.0$	0.0	$0.2 \pm 0.6$	0.0	$0.6 \pm 0.9$	0.1	$0.0 \pm 0.0$	0.0	$0.0 \pm 0.0$	0.0
双壳类 Bivalvia	$0.6 \pm 1.0$	0.1	$0.2 \pm 0.4$	0.0	$1.4 \pm 1.4$	0.1	$0.2 \pm 0.6$	0.0	$2.4 \pm 4.1$	0.3	$0.9\pm1.5$	0.1	$5.8 \pm 5.37$	0.3	$0.9\pm 2.4$	0.2
介形类 Ostrocoda	$2.6 \pm 3.0$	0.2	$1.1 \pm 1.2$	0.1	$4.4 \pm 4.1$	0.3	2.9±2.7	0.6	$69.1 \pm 77.2$	7.8	27.7±31.8	4.2	$114.4\pm105.5$	6.9	76.9±65.8	19.9
异足类 Tanaidacea	$0.2 \pm 0.5$	0.0	$0.6 \pm 0.7$	0.1	$0.0 \pm 0.0$	0.0	$0.0 \pm 0.0$	0.0	3.6±7.5	0.4	$9.3 \pm 9.9$	1.4	$0.0 \pm 0.0$	0.0	$0.0 \pm 0.0$	0.0
等足类 Isopoda	$0.3 \pm 0.6$	0.0	$0.7 \pm 0.8$	0.1	$0.0 \pm 0.0$	0.0	$0.0 \pm 0.0$	0.0	$4.3.\pm 9.4$	0.5	$10.9\pm 12.6$	1.7	$0.0\pm 0.0$	0.0	$0.0 \pm 0.0$	0.0
昆虫类 Insecta	$0.5 \pm 0.7$	0.0	$0.5\pm0.9$	0.0	$0.6 \pm 0.7$	0.0	$0.4 {\pm} 0.5$	0.1	$1.6\pm 2.4$	0.2	$1.6 \pm 3.0$	0.2	$2.0\pm 2.6$	0.1	$1.3 \pm 1.7$	0.3
水螅类 Hydrozoana	$0.4 \pm 0.8$	0.0	$0.6 \pm 0.8$	0.1	$0.5 \pm 1.1$	0.0	$0.0 \pm 0.0$	0.0	$1.4\pm 2.8$	0.2	$2.2\pm 2.8$	0.3	$1.8 \pm 4.0$	0.1	$0.0 \pm 0.0$	0.0
端足类 Amphipoda	$0.1 \pm 0.4$	0.0	$0.2 \pm 0.7$	0.0	$0.1 \pm 0.3$	0.0	$0.0 \pm 0.0$	0.0	$1.0\pm 2.6$	0.1	$0.8\pm 2.4$	0.1	$2.2 \pm 3.7$	0.1	$0.0 {\pm} 0.0$	0.0
海螨类 Halacaroidea	$0.9 \pm 1.3$	0.1	$0.8 \pm 1.5$	0.1	$1.3 \pm 1.2$	0.1	$0.7 \pm 1.3$	0.1	$1.4 \pm 1.9$	0.2	$1.3\pm 2.2$	0.2	$1.9 \pm 1.8$	0.1	$1.1 \pm 1.9$	0.3
动吻类 Kinarhyncha	$7.6 \pm 10.5$	0.6	$0.3 \pm 0.6$	0.0	$21.4 \pm 7.3$	1.0	$3.2\pm 5.1$	0.7	$15.2\pm 21.1$	1.7	$0.6\pm 1.1$	0.1	$42.8 \pm 14.7$	2.6	$6.3 \pm 10.2$	1.6
寡毛类 Oligochaeta	$0.0 \pm 0.1$	0.0	$0.1 {\pm} 0.2$	0.0	$0.0 \pm 0.0$	0.0	$0.0 \pm 0.0$	0.0	$0.3 \pm 1.5$	0.0	$0.8\pm 2.4$	0.1	$0.0\pm 0.0$	0.0	$0.0 \pm 0.0$	0.0
缓步类 Tardigrada	$0.0 \pm 0.1$	0.0	$0.1 \pm 0.2$	0.0	$0.0 \pm 0.0$	0.0	$0.0 \pm 0.0$	0.0	$0.1 \pm 0.4$	0.0	$0.2 \pm 0.6$	0.0	$0.0 \pm 0.0$	0.0	$0.0 \pm 0.0$	0.0
曵鰓类 Priapulida	$0.1 \pm 0.3$	0.0	$0.2 \pm 0.5$	0.0	$0.1 \pm 0.2$	0.0	$0.0 \pm 0.0$	0.0	$0.4 \pm 1.1$	0.0	$0.8 \pm 1.6$	0.1	$0.3 \pm 0.7$	0.0	$0.0 \pm 0.0$	0.0
温步类 Thermosbaenacea	$0.1 \pm 0.4$	0.0	$0.3 {\pm} 0.6$	0.0	$0.0 \pm 0.0$	0.0	$0.0 \pm 0.0$	0.0	$0.4 \pm 1.3$	0.0	$1.0\pm 2.0$	0.1	$0.0 \pm 0.0$	0.0	$0.0\pm0.0$	0.0
其它 Others	$1.1 \pm 4.2$	0.1	$0.2 \pm 0.5$	0.0	2.9±7.6	0.1	$0.4 {\pm} 0.6$	0.1	$0.4 \pm 1.4$	0.0	$0.0 \pm 0.1$	0.0	$0.3 \pm 0.8$	0.0	$0.9\pm 2.4$	0.2
.总和 Total	$1194.2\pm 872.7$	100	979.5±493.8	100	$2176.5\pm 819.5$	100	487.6±134.8 1	00	880.9±669.4 1	100	$660.7 \pm 305.2$	100	1657.8±663.4	100	$387.2 \pm 131.9$	100

刘清河 等:夏季南黄海冷水团及其周边海域小型底栖动物类群组成与分布

7

24 期

B01,HF1,H28,H11,H08,H06,H13,H38,H43。对分析结果进行 SIMPROF TEST 检验结果显示,组 II 各站位 之间无显著差异;组 I 内主要可以分为两组,组 I-a 七个站位(H39,B08,H42,B05,H21,H31,B10)之间无显著 差异,组 I-b 中 H02,H04,H15,H30II,B03 五个站位之间无显著差异。据此,研究海域小型底栖动物类群群落 结构可分为三类,即组 II、组 I-a 和组 I-b,冷水团海域内存在组 II 和组 I-b 两种群落结构,冷水团周边海域主 要存在组 I-a 一种群落类型。One-way ANOVA 分析结果显示,线虫、桡足类、多毛类和动吻类的丰度在此三类 群落之间差异显著(线虫:F=15.696,P<0.01;桡足类:F=7.102,P<0.05;多毛类:F=10.969,P<0.01;动吻类:F =9.531,P<0.05)。Tukey HSD 多重比较显示,组 I-b 与另外两个组(组 I-a 和组 II)在线虫、桡足类、多毛类和 动吻类的丰度上均值差显著(P<0.05),组 I-a 和组 II 之间均值差不显著。中央冷水团海域(组 II)较非冷水团 海域在小型底栖动物总丰度和类群上差异并不显著,冷水团边缘海域(组 I-b)特别是靠近山东半岛南岸海区 在小型底栖动物总丰度和线虫、桡足类、多毛类以及动吻类的丰度上都高于冷水团中央海域和非冷水团海域, 冷水团边缘海域小型底栖动物类群群落与另外两个海域有显著差异。





#### 2.2.2 小型底栖动物的丰度和生物量

研究海域小型底栖动物丰度和生物量最高值均出现在 H02 站位,分别为 3417.2 ind./10 cm<sup>2</sup>和 2764.0 µgdwt./10 cm<sup>2</sup>,该站位靠近山东半岛南岸,位于冷水团的边缘地区;次高值出现在 B03 站位,与 H02 站位邻近 同处于冷水团边缘地区,其沉积物中叶绿素含量为所测数据中最高;丰度和生物量最低值均出现在 H21 站位,分别为 303.5 ind./10 cm<sup>2</sup>和 275.3µgdwt./10 cm<sup>2</sup>,此站位位于江苏沿岸,属于非冷水团海域,水深浅,盐度低,水温高。在山东半岛南岸海域形成以 H02 和 B03 为中心的高生物量海区(冷水团边缘海域),江苏沿岸 (H21)至长江口附近海域(H37、H38、H39)生物量普遍偏低,中央冷水团海域(B01、H08、H11、H13 等)生物量 明显高于江苏沿岸至长江口区域但明显低于冷水团边缘区域(图6)。在丰度上,冷水团边缘海域约是非冷水团海域的 4.5 倍,冷水团中央海域约是非冷水团的 2.0 倍;在生物量上,冷水团边缘海域约是非冷水团海域的 4.3 倍,冷水团中央海域约是非冷水团海域的 1.7 倍(表 2)。从整体上看,冷水团海域包括组 II 和组 I-b 小型 底栖动物的总丰度和生物量要明显高于非冷水团海域(丰度比值为 2.3,生物量比值为 2.1)。依据 P = 9B(P 为生产力,B 为生物量)换算,研究海域小型底栖动物年平均生产力为(7928.31±6024.49)µgdwt 10 cm<sup>2</sup> a。

# 2.2.3 小型底栖动物垂直分布

研究结果表明(图7),小型底栖动物主要分布在沉积物 0—5 cm 的中上层(95%),79%小型底栖动物分



图 6 南黄海冷水团及其周边海域(a)小型底栖动物丰度(ind./10 cm<sup>2</sup>)和(b)生物量(µgdwt./10 cm<sup>2</sup>)分布等值线图 Fig. 6 Contour map of(a) abundance (ind./10 cm<sup>2</sup>) and (b) biomass (µgdwt./10 cm<sup>2</sup>) of meiofauna in the southern Yellow Sea Cold Water Mass and its adjacent areas

布在沉积物 0—2 cm 的表层,16%分布在 2—5 cm 的次 表层,只有不到 5%的小型底栖动物分布在沉积物 5—8 cm 的下层。冷水团海域内(组 II 和组 I-b)74.0%的小 型底栖动物分布 0—2 cm 的表层,19.2%分布在 2—5 cm 次表层,而非冷水团海域(包括组 I-a,H35,H37)79. 3%的小型底栖动物分布在 0—2 cm 的表层,15.6%分布 在 2—5 cm 次表层。不同类群的小型底栖动物在垂直 分布上略有差异,78%的线虫和 75%的多毛类都分布在 0—2 cm 的表层,而在桡足类中这一数值则高达 96%。 2.3 底栖环境与小型底栖动物相关性分析 2.3.1 环境因子与小型底栖动物相关性分析

利用 SPSS19.0 对环境因子与小型底栖动物数量进





行相关性分析结果表明(表 3),小型底栖动物的丰度和生物量与沉积物中叶绿素 a 含量(所测叶绿素相关性 仅为 10 个站位所测数据)呈显著的正相关,表明底栖微藻和沉降浮游植物应是小型底栖动物的主要食物来 源;小型底栖动物的生物量和沉积物中部分重金属(Pb、Cu、Fe、Ni、Co)含量(沉积物重金属数据来自 Jiang et al.<sup>[26]</sup>)呈显著负相关表,但与 Cd 含量呈极显著正相关(表 4),由此推测,体型相对较大的小型底栖动物对重 金属更为敏感,而在一定浓度范围内,Cd 可能在促进小型底栖动物的生产力方面起到重要作用。另外,0—2 cm 表层的小型底栖动物总丰度,线虫丰度以及多毛类丰度都和有机质含量呈显著负相关,其中多毛类丰度与 沉积物粘土含量呈负相关性。BIOENV 分析表明,沉积物有机质含量、含水量和分选系数的组合最能解释各 站位小型底栖动物丰度之间的差异,其相关系数为 0.484;所有单因子变量中,沉积物含水量最能解释各站位 小型底栖动物丰度之间的差异,其相关系数为 0.446。

2.3.2 环境聚类与生物聚类比较

分别对研究海域环境因子和小型底栖动物进行聚类分析,结果显示前者主要分为四组,后者可以划分为 三个主要类群。对两者划分结果(图4,5)进行比较发现,环境因子组3和生物组 I-b 具有极高的相似性;生物 组 II 和环境因子组1+组2 划分结果相似;环境因子组3部分站位+组4和生物组 I-a 具有相似性。由此可见, 组 II-b 生物类群主要分布在组3类型生境中,组 II 生物类群在组1和组2类型生境中都有分布,而组 I-a 生物

# 类群则在组4和部分组3类型生境中都有分布。

#### 表 3 南黄海冷水团及其周边海域小型底栖动物丰度和生物量与环境因子的相关分析结果

 Table 3 Results of correlation analysis between environmental factors and abundance and biomass of meiofauna in the southern Yellow Sea

 Cold Water Mass and its adjacent areas

丰度/生物量 Abundance/ Biomass	水深 Water depth	底盐 Bottom salinity	底温 Bottom temperature	有机质含量 Organic matter content	含水量 Water content	粉砂粘土含量 Silt +clay content	分选系数 Sorting coefficient	中值粒径 Medium diameter	叶绿 素 a Chl-a	脱镁 叶绿酸 Pha
TA	-0.141	-0.032	-0.312	-0.174	0	-0.019	-0.079	-0.072	0.748 **	-0.023
TB	-0.244	-0.138	-0.25	-0.279	-0.125	-0.142	-0.042	0.008	0.822 **	-0.106
ASL	-0.381	-0.324	-0.151	-0.422 *	-0.279	-0.241	0.041	0.084	0.804 **	-0.25
BSL	-0.41	-0.366	-0.139	-0.460 *	-0.344	-0.317	0.035	0.145	0.804 **	-0.25
NA	-0.364	-0.306	-0.158	-0.417 *	-0.27	-0.244	0.051	0.079	0.746 **	-0.245
NB	-0.364	-0.306	-0.158	-0.417 *	-0.27	-0.244	0.051	0.079	0.746 **	-0.245
CA	-0.403	-0.358	-0.11	-0.34	-0.238	-0.116	-0.06	0.053	0.969 **	-0.212
CB	-0.403	-0.358	-0.11	-0.34	-0.238	-0.116	-0.06	0.053	0.969 **	-0.212
PA	-0.415 *	-0.317	0.009	-0.449 *	-0.39	-0.476 *	0.102	0.25	0.149	-0.45
PB	-0.415 *	-0.317	0.009	-0.449 *	-0.391	-0.476 *	0.102	0.25	0.149	-0.45

TA:小型底栖动物总丰度(Total abundance of meiofauna);NA:线虫丰度(Abundance of nematodes);TB:小型底栖动物总生物量(Total biomass of meiofauna);NB:线虫生物量(Biomass of nematodes);CA:桡足类丰度(Abundance of copepods);PA:多毛类丰度(Abundance of polychaetes);CB: 桡足类生物量(Biomass of copepods);PB:多毛类生物量(Biomass of polycheates);ASL:表层小型底栖动物丰度(Abundance of meiofauna in the surface layer);BSL:表层小型底栖动物生物量(Biomass of meiofauna in the surface layer);\*\*.在.01 水平(双侧)上显著相关。;\*.在0.05 水平(双侧)上显著相关。

#### 表 4 南黄海冷水团及其周边海域小型底栖动物丰度和生物量与沉积物重金属含量的相关分析结果

# Table 4Results of correlation analysis between sediment heavy metals concentrations and abundance and biomass of meiofauna in the southernYellow Sea Cold Water Mass and its adjacent areas

丰度/生物量 Abundance/Biomass	Pb	Cd	Cu	Fe	Ni	Mn	Zn	Со
小型底栖动物丰度 Abundance of meiofauna	-0.33	0.644 **	-0.353	-0.335	-0.319	0.144	-0.256	-0.362
小型底栖动物生物量 Biomass of meiofauna	-0.437 *	0.617 **	-0.441 *	-0.436*	-0.416*	0.068	-0.359	-0.457 *
表层丰度 Abundance in surface layer	-0.531 **	0.618 **	-0.499*	-0.550 **	-0.520*	0.132	-0.476 *	-0.573 **
表层生物量 Biomass in surface layer	-0.589 **	0.560 **	-0.548 **	-0.607 **	-0.577 **	0.062	-0.527 **	-0.628 **
线虫丰度 Abundance of nematode	-0.526 **	0.642 **	-0.495 *	-0.549 **	-0.515 *	0.138	-0.477 *	-0.569 **
线虫生物量 Biomass of nematode	-0.526 **	0.642 **	-0. 495 *	-0.549 **	-0.515 *	0.138	-0.477 *	-0.569 **
桡足类丰度 Abundance of copepods	-0.403	0.343	-0.38	-0.401	-0.404	0.086	-0.327	-0.448 *
桡足类生物量 Biomass of copepods	-0.403	0.343	-0.38	-0.401	-0.404	0.086	-0.327	-0.448 *
多毛类丰度 Abundance of polychaetes	-0.566 **	0.471 *	-0.534 **	-0.581 **	-0.541 **	-0.085	-0.532 **	-0.565 **
多毛类生物量 Biomass of polychaetes	-0.566 **	0.471 *	-0.534 **	-0.581 **	-0.541 **	-0.085	-0.533 **	-0.565 **

\*\*. 在 .01 水平(双侧)上显著相关;\*. 在 0.05 水平(双侧)上显著相关。

# 3 讨论

## 3.1 小型底栖动物丰度与其他研究的比较

研究海域小型底栖动物平均丰度为(1194±873)ind./10 cm<sup>2</sup>,与国内同海域研究相比较,与张艳等<sup>[15]</sup>研究 最为接近,高于张志南等<sup>[14]</sup>但低于王家栋等<sup>[16]</sup>和 Liu et al.<sup>[18]</sup>(表5)。冷水团海域小型底栖动物的平均丰度 为(1536±927)ind./10 cm<sup>2</sup>,与其他研究相比较,表现出较高的丰度值,而非冷水团海域小型底栖动物丰度仅 为(662±416)ind./10 cm<sup>2</sup>,明显低于其它研究。同海域内小型底栖动物丰度的差异可能与取样深度和筛网孔 径选择有关,刘晓收等<sup>[27]</sup>在对南黄海小型底栖生物的研究中发现,50 μm 网筛分选获得的动物数量仅为 31μm 网筛所获动物数量的 91%,线虫的分选效率约为 90%,故张志南等<sup>[14]</sup>(取样深度 5 cm,网筛下限 50 μm)所得小型动物和线虫丰度均低于同海域其它研究。王家栋等<sup>[16]</sup>和 Liu et al.<sup>[18]</sup>所测小型底栖动物丰度均 高于本研究,这可能与二者选取站位有关,前者主要集中在冷水团海域,而本研究中冷水团海域表现出较高的 丰度值;后者主要集中在鯷鱼产卵场海域,具有较高的生产力。

与其它海域研究相比较,本研究中非冷水团海域小型底栖动物与其它研究相当但低于长江口海域,冷水 团海域小型底栖动物丰度高于其它研究。以上结果表明冷水团海域具有较高的生产力,导致小型底栖动物具 有较高的丰度值;长江口及其邻近海域小型底栖动物丰度较高可能是由于长江淡水带来丰富的营养盐,食物 充足所致<sup>[16,28]</sup>。本研究中线虫所占比例(90%)为同海域内研究最高,且高于渤海海域,但低于长江口及其邻 近海域,这可能与沉积物类型、含水量、有机质含量等密切相关。总体上,本研究和国内其它研究结果相当,取 样深度、网筛孔径等在一定程度上是造成同海域不同研究之间较大差异的原因,不同海域之间小型底栖动物 丰度和群落结构的差异与其生境及环境因子密切相关。

omnese waters							
				丰度 A	.bundance/(ind./	10cm <sup>2</sup> )	
研究海域 Study area	调查时间 Sampling time	取样深度 Sample depth/ cm	筛网下限 Mesh size/ μm	小型底栖 动物 Meiofauna	线虫 Nematode	百分比 Percentage/ %	- 参考文献 References
南黄海	2011.6	8	31	1194 ±873	1072 ±772	90	本研究
Southern Yellow Sea	2000.6	5	50	809±407	597±362	74	张志南[14]
	2003.7	10	31	$1584 \pm 686$	1186±425	89	Liu et al.[18]
	2004.1	10	31	$1186 \pm 486$	1064±470	90	张艳等[15]
	2007.6	8	31	1529±1121	$1350 \pm 1007$	88	王家栋等[16]
渤海 Bohai Sea	1998.09	5	48	869±510	758±475	87	慕芳红等[5]
	1999.04	5	48	632±400	$558 \pm 340$	87	慕芳红等[3]
长江口邻近海域	2009.11	8	31	$1081 \pm 700$	1021±665	94	于婷婷等[23]
Adjacent waters of Yangtze River Estuary	2007.05	10	32	1117±820	1066±792	95	王小谷等[24]
山东半岛南岸 Southern offshore waters of Shandong Peninsula	2006.12	10	61	915±408	821±388	90	杨世超等[25]

表 5 南黄海冷水团及其周边海域小型底栖动物丰度与国内同类研究的比较

Table 5 Comparison of meiofaunal abundance in the southern Yellow Sea Cold Water Mass and its adjacent area with other research in Chinese waters

# 3.2 冷水团对小型底栖动物的影响

与周边海域相比较,冷水团海域表现出低温、高盐、高有机质和高粉砂粘土(YT)含量的特征,且盐度、有机质和粘土含量随着水深的增加而增加,在冷水团中央水深、盐度等达到最大值。研究结果显示冷水团中央海域小型底栖动物丰度和生物量明显低于冷水团边缘区域,王家栋等<sup>[16]</sup>研究也指出冷水团中央海域小型底

栖动物丰度和生物均低于邻近非冷水团海域(丰度低 30%,生物量低 18%)。Pearson 相关分析表明小型底栖 动物丰度、线虫丰度以及多毛类丰度与沉积物有机质含量呈负相关性,其中多毛类与沉积物含水量及粉砂粘 土含量呈负相关,多毛类丰度在冷水团和非冷水团海域差别显著。推测冷水团沉积物有机质含量是影响小型 底栖动物分布的主要因素,而不是水温和盐度。

相关研究表明小型底栖动物丰度和生物量与沉积物叶绿素 a 含量呈正相关,本研究中山东半岛南岸海域 (H02、H04、B03等)小型底栖动物丰度和生物量最高,与该海域沉积物高叶绿素含量保持一致性,非冷水团海 域沉积物叶绿素含量是影响小型底栖动物丰度和生物量的决定因素。杨世超等[25]研究所测得小型底栖动物 丰度值略低于本研究平均值,这可能与其选取网筛孔径(61µm,为同类研究中最大)密切相关。山东半岛南 岸海域表现出的高生产力与鯷鱼等将此海域作为产卵场相吻合。

研究海域沉积物有机质含量呈现出有近岸向外海逐步增高的趋势,冷水团中央海域有机质含量最高,表 明冷水团海域沉积物有机质含量、粉砂粘土含量以及类型与冷水团的形成密切相关,黄海冬季冷水沉降和黄 海暖流的加入(张启龙等<sup>[13]</sup>)以及黄海表面夏季环流(于非等<sup>[12]</sup>)形成的漩涡可能是有机质在冷水团中央海 域沉积的重要原因,形成冷水团海域独特的沉积环境。对环境因子聚类结果与小型底栖动物类群聚类结果的 比较发现,两者在聚类结果上有一定的相似性,表明不同的生境类型决定了小型底栖动物类群的分布 特点<sup>[2]</sup>。

同时 BIOENV 分析结果表明,沉积物含水量、有机质含量和分选系数组合最能解释小型底栖动物在各站 位之间分布的差异,因此冷水团中央海域环境因子的特征在一定程度上解释了其低生产力的原因,但冷水团 对小型底栖动物的影响可能是从多方面的,比如冷水团较低的物质交换率,其对小型底栖动物的影响机制还 需进一步的研究。

致谢:感谢王振钟、季相星、冯春辉等人在样品采集过程中提供的帮助。特别感谢香港城市大学生物及化学系 Prof. Paul K.S. Shin 对本文英文摘要进行的修改润色。

#### 参考文献(References):

- [1] Higgins R P, Thiel H. Introduction to the Study of Meiofauna. Washington, D C: Smithsonian Institution Press, 1988.
- [2] Giere O. Meiobenthology-The Microscopic Motile Fauna of Aquatic Sediments. 2nd ed. Berlin, Heidelberg; Springer-Verlag, 2009.
- [3] 郭玉清, 张志南, 慕芳红. 渤海小型底栖动物丰度的分布格局. 生态学报, 2002, 22(9): 1463-1469.
- [4] 郭玉清,张志南,慕芳红.渤海小型底栖动物生物量的初步研究.海洋学报,2002,24(6):76-83.
- [5] 慕芳红, 张志南, 郭玉清. 渤海小型底栖生物的丰度和生物量. 青岛海洋大学学报, 2001, 31(6): 897-905.
- [6] 张志南,林岿旋,周红,韩洁,王睿照,田胜艳.东、黄海春秋季小型底栖生物丰度和生物量研究.生态学报,2004,24(5):997-1005.
- [7] Montagna P A. Rates of metazoan meiofaunal microbivory: a review. Vie et Milieu, 1995, 45(1): 1-9.
- [8] Coull B C. Role of meiofauna in estuarine soft-bottom habitats. Australian Journal of Ecology, 1999, 24(4): 327-343.
- [9] 范士亮,王宗兴,徐宗军,朱明远,王宗灵,刘兴光.南黄海冬季小型底栖生物分布特征.海洋环境科学,2011,30(2):185-188.
- [10] 杨纪明. 黄海西部渔业资源状况. 海洋科学, 1988, (4): 70-71.
- [11] 赫崇本,汪圆祥,雷宗友,徐斯.黄海冷水团的形成及其性质的初步探讨.海洋与湖沼,1959,2(1):11-15.
- [12] 于非,张志欣,刁新源,郭景松,汤毓祥.黄海冷水团演变过程及其与临近水团关系的分析.海洋学报,2006,28(5):26-34.
- [13] 张启龙,翁学传,杨玉玲. 南黄海春季水团分析. 海洋与湖沼, 1996, 27(4): 421-428.
- [14] 张志南,慕芳红,于子山,韩洁,周红.南黄海鳀鱼产卵场小型底栖生物的丰度和生物量.青岛海洋大学学报:自然科学版,2002,32 (2): 251-258.
- [15] 张艳,张志南,黄勇,华尔.南黄海冬季小型底栖动物丰度和生物量.应用生态学报,2007,18(2):411-419.
- [16] 王家栋, 类彦立, 徐奎栋, 杜永芬. 黄海冷水团及周边海域夏初小型底栖动物现存量及空间分布研究. 海洋与湖沼, 2011, 42(3); 359-366
- [17] Liu X S, Zhang Z N, Huang Y. Sublittoral meiofauna with particular reference to nematodes in the southern Yellow Sea, China. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2007, 71(3/4): 616-628.

12

- [18] Liu X S, Zhang Z N, Huang Y. Abundance and biomass of meiobenthos in the spawning ground of anchovy (*Engraulis japanicus*) in the southern Huanghai Sea. Acta Oceanologica Sinica, 2005, 24(3): 94-104.
- [19] Gerlach S A. On the importance of marine meiofauna for benthos communities. Oecologia, 1971, 6(2): 176-190.

- [21] 王荣. 荧光法测定浮游植物色素计算公式的修正. 海洋科学, 1986, 10(3): 1-5.
- [22] 刘晖,吴以平,高尚德,张志南. 虾病暴发前虾池中一些环境因子的变化. 青岛海洋大学学报, 1998, 28(3): 377-382.
- [23] 于婷婷, 徐奎栋. 长江口及邻近海域秋冬季小型底栖动物类群组成与分布. 生态学报, 2013, 33(15): 4556-4566.
- [24] 王小谷,王春生,张东声,洪丽莎,杨丹.长江口及其陆架春季小型底栖生物丰度和生物量.生态学报,2010,30(17):4717-4727.
- [25] 杨世超,慕芳红,周红,陈海燕,吴绍渊. 2006 年冬季胶州湾及邻近山东半岛南岸海域小型底栖动物丰度和生物量.中国海洋大学学报, 2009, 39(S1): 78-82.
- [26] Jiang X, Teng A K, Xu W Z, Liu X S. Distribution and pollution assessment of heavy metals in surface sediments in the Yellow Sea. Marine Pollution Bulletin, 2014, 83(1): 366-375.
- [27] 刘晓收. 南黄海鳀鱼产卵场小型底栖动物生态学研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2005.
- [28] 孟昭翠,徐奎栋.长江口及东海春季底栖硅藻、原生动物和小型底栖生物的生态特点.生态学报, 2013, 33(21):6813-6824.

<sup>[20]</sup> 刘昌岭,朱志刚,贺行良,张波,夏宁.重铬酸钾氧化-硫酸亚铁滴定法快速测定海洋沉积物中有机碳.岩矿测试,2007,26(3):205-208.