

# 南海北部陆架和陆坡区小型底栖动物群落的 比较研究\*

周 红 Saif MD Uddin 黄梦娇 刘晓收 王正茂 尹泳桐 姜钱钱  
Rebeca Montero-Taboada Karim MD Abdul

(中国海洋大学海洋生命学院 青岛 266003)

**摘要** 为了解南海北部陆架与陆坡区小型底栖动物的群落特征,以及影响群落特征的环境因素,2015年6月对南海北部海域(19.3°—21.4°N, 112.4°—115.1°E)7个站位的小型底栖动物及环境因子进行了采样,并对陆架和陆坡区小型底栖动物群落的丰度、生物量、类群组成和群落结构进行比较。结果表明,在陆架站位,小型底栖动物由13个类群组成,平均丰度为(132±130)ind./10cm<sup>2</sup>,平均生物量为(169±79)μg dwt/10cm<sup>2</sup>;在陆坡站位由8个类群组成,平均丰度为(33±14)ind./10cm<sup>2</sup>,平均生物量为(56±35)μg dwt/10cm<sup>2</sup>。单因素方差分析结果表明,陆坡区小型底栖动物的总丰度和总生物量以及线虫和多毛类的丰度均显著低于陆架区,但优势类群的相对丰度组成没有显著不同,海洋线虫占总丰度的83%,其次为多毛类和挠足类,分别占7%和3%。环境因子的主成分分析(Principal Components Analysis, PCA)将陆架和陆坡站位沿第一主分量轴分开,小型底栖生物丰度和生物量与沉积物叶绿素 $a$ 和脱镁叶绿酸含量以及底层水温呈最大正相关,与水深呈负相关;聚类(Cluster)和排序(non-metric Multidimensional Scaling, MDS),以相似性系数65%将7个站位划分为2组,与按照水深划分的陆架和陆坡组基本吻合;单因素相似性分析(one-way ANOSIM)显示陆架和陆坡区小型底栖动物群落结构差异显著;生物-环境分析(Biota-Environment, BIOENV)表明影响群落结构的最佳环境因子组合为叶绿素 $a$ 和底层水温。综上可知,随水深增加的食物减少和底层水温的下降是限制南海北部研究海域小型底栖动物丰度和生物量及影响群落组成和结构的主要因素。

**关键词** 小型底栖动物群落; 丰度和生物量; 组成和结构; 陆架和陆坡; 南海北部

中图分类号 Q958.1 doi: 10.11693/hyhz20191100228

小型底栖动物是指栖息在海底沉积物底内或底表,分选时能通过0.5mm孔径网筛,但被0.031—0.063mm孔径网筛(深海生态研究者建议使用0.031mm作为分选下限)截留的一类底栖动物。

小型底栖动物数量巨大,种类丰富,分布广泛,生命周期短,对环境改变有快速反应的能力(陈海燕等,2009;王彦国等,2011),是海洋环境监测中的重要指示生物。同时,小型底栖生物是海洋底栖小食物网中的重要环节,是鱼、虾、蟹等经济动物的重

要饵料,在海洋底栖生态系统的能流和物质循环中发挥着重要作用(杜永芬等,2010;刘晓收等,2014)。

南海是西太平洋最大的边缘海,平均水深1212m,北接中国华南大陆,西临中南半岛,东界和南界为一系列岛弧围绕。其北部陆架边缘水深在200m左右,陆坡水深介于200—3000m之间(姚伯初,1998)。我国学者已对渤海、黄海、东海的小型底栖动物做了大量的研究和报道,但对南海的报道相对较少,且大部分聚焦在内湾、沿岸和浅海陆架(杜永芬等,2010;王彦

\* 国家自然科学基金资助项目,41376146号;国家海洋公益性行业专项,201505004号;中国海洋大学基本科研业务费,201262010号;2015年基金委南海北部共享航次。周红,教授, E-mail: hzhou@ouc.edu.cn

收稿日期:2019-11-25,收修改稿日期:2020-02-08

国等, 2011; 唐玲等, 2012; Cai *et al.*, 2012), 对水深超过 200m 的陆坡区的报道更是十分有限(王家栋等, 2009; 刘晓收等, 2014)。本文对南海北部海域的 7 个站位(4 个浅海陆架站位和 3 个深海陆坡站位)小型底栖动物的生态学特点及其与环境因子的关系进行了分析, 并与南海已有其他研究进行比较, 旨在为南海北部海域, 特别是陆坡深海区的小型底栖动物及其沉积环境研究提供更多的数据资料。

## 1 材料与方法

### 1.1 调查海域与站位

2015 年 6 月, 搭载中国科学院南海海洋研究所“实验三号”科考船, 对位于南海北部(19.3°—21.4°N, 112.4°—115.1°E)的 7 个站位(站位 15、17、18、24、26、28、30)进行了小型底栖动物和沉积物环境因子的调查研究。采样站位见图 1。

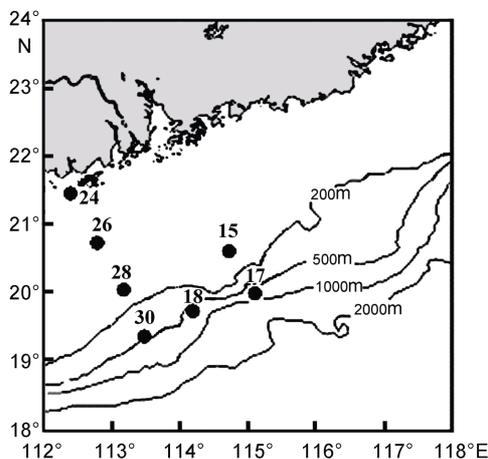


图 1 南海北部调查站位图

Fig.1 The sampling stations in the northern South China Sea  
注: 站位旁边数字代表站位编号

### 1.2 样品采集与实验室分析

沉积物粒度分析采用激光粒度仪进行测定, 依据《海洋调查规范》(中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 2007a)中采用的谢帕德法对沉积物粒度进行分类命名; 有机质测定参照《海洋调查规范》和刘昌岭等(2007)改进的方法, 叶绿素 *a* 和脱镁叶绿酸测定采用湿样法(王荣, 1986; Metaxatos *et al.*, 2002), 其他环境资料利用随船温盐深测定仪 (conductivity temperature depth, CTD)现场测定。

小型底栖动物样品采集和处理均按照《海洋调查规范》(中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,

2007b)进行, 在每个站位利用 0.16m<sup>2</sup> 改进型 Gray-O'Hara 箱式采泥器采集沉积物, 并用内径为 2.9cm 的采样管, 选取未受扰动的样品, 从中采集 4 个长度为 10cm 的重复, 分别加入等体积的 10% 的中性福尔马林溶液后, 摇匀并保存, 用于小型底栖动物的分析, 同时取一定量的表层沉积物, -20°C 冷冻避光保存, 用于环境因子的分析。

向小型底栖动物样品中加入虎红染色, 摇匀静置 24h 后, 用 0.05mm 和 0.031mm 孔径套筛冲洗, 转入比重为 1.15 的硅溶胶(Ludox-TM)中悬浮离心, 然后在解剖镜下按类群分选计数。

### 1.3 数据处理与统计分析

在解剖镜下按个体计数法计数, 并根据取样管的内径(2.9cm), 将每个站位的小型底栖动物个体数换算为每 10cm<sup>2</sup> 的个体数(ind./10cm<sup>2</sup>)作为丰度, 同时计算线虫/桡足类丰度比 (*N/C* 比)。生物量的测定采用估算法, 即以各类群丰度乘以个体平均干重, 不同类群个体平均干重参照 Widbom (1984)、McIntyre (1968)和 Zhang 等(2001)的研究结果(表 1)。

表 1 小型底栖动物各类群的个体平均干重  
Tab.1 Individual average dry weight of meiofauna taxa

类群	个体干重 (μg)	类群	个体干重 (μg)
线虫 Nematoda	0.4	介形类 Ostracoda	14.0
桡足类 Copepoda	1.86	涡虫 Turbellaria	3.5
多毛类 Polychaeta	14.0	温步类 Thermosbaenacea	3.5
无节幼 Nauplii	0.11	等足类 Isopoda	15.0
腹足类 Gastropoda	4.2	端足类 Amphipoda	15.0
双壳类 Bivalvia	4.2	异足类 Tanaidacea	15.0
动物类 Kinorhyncha	2.0	其他类 Others	3.5
涟虫 Cumacea	3.5		

采用 Surfer 8.0 软件绘制采样站位图。利用 SPSS 21 软件中 2 组独立样本的 Mann-Whitney U 非参数方法对陆架和陆坡区小型底栖动物丰度和生物量等单变量进行比较和差异检验。非参数方法不要求变量满足正态分布、方差齐性等统计学假定, 适用于丰度和生物量数据的分析。利用多元统计软件 PRIMER 6.0, 依据各站位小型底栖动物类群的丰度和生物量组成进行等级聚类(Cluster)和非度量多维标度(non-metric Multidimensional Scaling, MDS)排序, 分析各站位群落组成和结构的相似性, 并用相似百分比(Similarity Percentage, SIMPER)分析找出引起不同分组的主要

贡献类群; 利用主成分分析(Principal Components Analysis, PCA)解析陆架和陆坡区不同的环境特征及与小型底栖动物现存量分布相关的环境因子; 利用单因素相似性分析(one-way ANOSIM)对陆架和陆坡区小型底栖动物群落结构进行差异检验; 用生物-环境分析(Biota-Environment, BIOENV)找出影响群落结构的最佳环境因子组合(Clarke *et al.*, 2001)。

## 2 结果与分析

### 2.1 水层环境

南海海底地形从周边向中央倾斜, 水深逐渐增大, 发育的大型地貌单元依此为大陆架、大陆坡和边缘海盆地。本次调查站位最浅为站位 24(24m), 位于近岸的陆架区, 最深为站位 17(1062m), 位于陆坡区。随水深增加, 底层水温(以下简称“底温”)呈下降趋势, 陆架区水深最浅的 24 站位底温最高, 为 23.3°C, 陆坡区的 3 个站位(站位 17、18 和 30)底温均低于 9°C。

底层水盐度(以下简称“底盐”)差异较小, 没有明显的变化趋势, 波动范围为 34.5±0.1(表 2)。

### 2.2 沉积物组成

调查的 7 个站位属于 3 种沉积物类型, 主要为粉砂质砂(站位 15、18、26、28、30), 其余两种分别为砂质粉砂(站位 17)和砂-粉砂-黏土(站位 24)。中值粒径最大的是站位 15, 为 0.29mm(1.8Φ), 最小的是站位 24, 为 0.02mm(6.1Φ)。在陆架和陆坡区, 沉积物叶绿素 *a* 的平均含量分别为 0.19mg/kg 和 0.06mg/kg, 脱镁叶绿素的平均含量分别为 2.67mg/kg 和 1.88mg/kg; 总有机碳的平均含量分别为 0.40% 和 0.29%。在 7 个站位中, 水深最浅的陆架站位 24(24m)的叶绿素 *a*、脱镁叶绿素和总有机碳的含量均为最高, 分别为 0.32mg/kg、3.31mg/kg、0.50%; 水深较深的陆坡站位 30(485m)的叶绿素 *a*、脱镁叶绿素和总有机碳的含量均为最低, 分别为 0.06mg/kg、1.56mg/kg、0.11%(表 2)。

表 2 南海北部调查站位环境变量平均值  
Tab.2 The means of environmental variables at the sampling stations in the northern South China Sea

	陆架站位					陆坡站位			
	24	26	15	28	平均	30	18	17	平均
经度(°E)	112.4	112.8	114.7	113.2		113.6	114.2	115.1	
纬度(°N)	21.4	20.7	20.6	20.0		19.3	19.7	20.0	
水深(m)	24	69	108	122	81±44	485	627	1062	725±301
底层水温(°C)	23.3	19.6	19.6	17.6	20.0±2.4	8.6	6.8	4.6	6.7±2.0
底层水盐度	34.4	34.6	34.6	34.6	34.6±0.1	34.4	34.4	34.5	34.5±0.0
总有机碳含量(%)	0.50	0.39	0.25	0.45	0.40±0.10	0.11	0.42	0.35	0.29±0.16
叶绿素 <i>a</i> (mg/kg)	0.32	0.13	0.13	0.17	0.19±0.09	0.06	0.06	0.08	0.06±0.01
脱镁叶绿素(mg/kg)	3.31	2.87	2.16	2.32	2.67±0.52	1.56	1.66	2.42	1.88±0.47
粉砂-黏土(%)	71	45	29	49	48±17	49	43	75	56±17
分选系数(Φ)	3.5	2.5	2.9	2.5	2.8±0.5	3.0	2.8	2.8	2.9±0.1
中值粒径(Φ)	6.1	3.8	1.8	3.9	3.9±1.8	3.9	3.3	5.4	4.2±1.1
沉积物类型	砂-粉砂-黏土	粉砂质砂	粉砂质砂	粉砂质砂		粉砂质砂	粉砂质砂	砂质粉砂	

### 2.3 PCA 分析

PCA 分析结果表明, 两个主成分轴 PC1、PC2 保留的信息量占总信息量的 79%, 其中 PC1 轴可解释环境变异度的 51%, PC2 轴可解释环境变异度的 28%。表 3 显示, 对 PC1 轴贡献较大的环境变量为叶绿素 *a*、脱镁叶绿素和底温, 且它们与小型底栖动物的丰度和生物量呈正相关关系。对 PC2 轴贡献较大的环境变量为粉砂-黏土含量、底盐、中值粒径和水深。

按照所测定的 9 个环境变量以及小型底栖动物

总丰度和总生物量进行 PCA 排序, 可以将 7 个调查站位分为 3 组: 组 1 包括陆架近岸站位 24; 组 2 包括陆架离岸站位 15、26、28; 组 3 包括陆坡站位 17、18、30(图 2)。组 1 水深最浅(24m), 沉积物中值粒径最小, 叶绿素 *a*、脱镁叶绿素和有机碳含量最高, 小型底栖动物丰度和生物量最高; 组 2 水深较浅(69—122m), 叶绿素 *a*、脱镁叶绿素和有机碳含量较高, 小型底栖动物丰度和生物量较高; 组 3 水深最深(485—1062m), 叶绿素 *a*、脱镁叶绿素和有机碳含量低, 小型底栖动物丰度和生物量较低。

表 3 PCA 分析中各变量在前两个主分量轴的负荷系数  
Tab.3 Coefficients in the linear combinations of variables making up the first two PC axes

	主成分轴 PC1	主成分轴 PC2
总有机碳(%)	-0.24	-0.01
叶绿素 a (mg/kg)	<b>-0.41</b>	0.04
脱镁叶绿酸(mg/kg)	<b>-0.37</b>	0.01
水深(m)	0.27	<b>-0.40</b>
底层水温(°C)	<b>-0.34</b>	0.34
底层水盐度	-0.01	<b>0.46</b>
粉砂-黏土含量(%)	-0.16	<b>-0.47</b>
分选系数(Φ)	-0.24	-0.29
中值粒径(Φ)	-0.22	<b>-0.44</b>
总丰度(ind./10cm <sup>2</sup> )	<b>-0.40</b>	-0.10
总生物量(μg dwt/10cm <sup>2</sup> )	<b>-0.39</b>	0.11
变异(%)	51	28

注: 绝对值较大的负荷系数用粗体表示

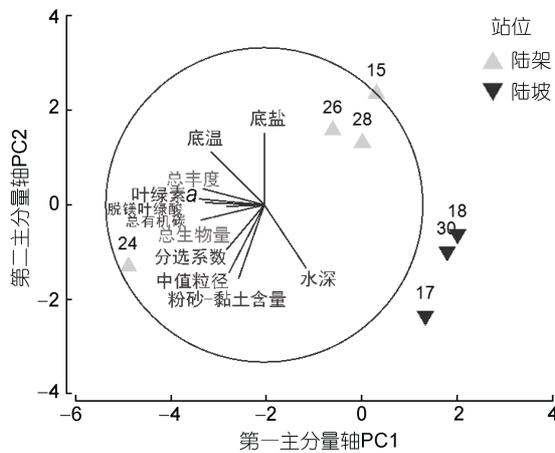


图 2 南海北部调查站位环境因子及小型底栖动物总丰度和总生物量的主成分分析

Fig.2 PCA plot of the sampling stations in the northern South China Sea

### 2.4 小型底栖动物的类群组成、丰度及生物量

本次调查共鉴定出 13 个主要小型底栖动物类群, 包括自由生活海洋线虫(以下简称线虫)、底栖桡足类(以下简称桡足类)、多毛类、涡虫、动物类、介形类、双壳类、腹足类、涟虫、等足类、异足类、端足类、温步类和其他未鉴定类群(表 1)。其中, 线虫在丰度上占绝对优势, 占总丰度的 83%, 其次为多毛类和桡足类, 分别占总丰度的 7%和 3%, 其他各类群合计所占比例不足总丰度的 7%(图 3)。研究海域小型底栖动物的平均丰度约为(90±108)ind./10cm<sup>2</sup>, 其中, 最高值位于水深最浅的近岸站位 24, 为(329±259)ind./10cm<sup>2</sup>, 最低值出现在水深较深的陆坡站位 18, 仅为(19±14)ind./10cm<sup>2</sup>。在生物量上, 多毛类生物量最大, 占总生物量的 47%, 其次为线虫和桡足类, 分别占总生物量的 30%和 5%(图 3)。小型底栖动物的平均生物量为(120±85)μg dwt/10cm<sup>2</sup>, 最高值同样位于站位 24, 为(276±164)μg dwt/10cm<sup>2</sup>, 最低值出现在陆坡站位 17 和 18, 平均值均为 36μg dwt/10cm<sup>2</sup>(表 4)。

采用非参数 Mann-Whitney U 检验对陆架和陆坡区小型底栖动物丰度、生物量、线虫丰度百分比和线虫/桡足类比等单变量进行差异检验(表 4)。结果显示, 在南海北部的陆架区, 线虫和多毛类丰度、小型底栖动物总丰度及总生物量均显著高于陆坡区( $P < 0.05$  或  $P < 0.01$ ), 而桡足类丰度、线虫丰度百分比和线虫/桡足类比没有显著差异( $P > 0.05$ )。该结果表明小型底栖动物优势类群的组成从陆架到陆坡区没有明显改变, 这可以从图 3 显示的线虫、桡足类、多毛类和其他类群丰度和生物量百分比看出来。尽管如此, 小型底栖动物的多样性伴随着丰度的下降而减少, 双壳类、动物类、涟虫、等足类和端足类在陆坡站位没有发现, 类群总数由陆架的 13 个减少为 8 个。

表 4 南海北部陆架和陆坡区各站位小型底栖动物丰度、生物量和线虫/桡足类比的平均值及 Mann-Whitney U 差异检验结果  
Tab.4 The means of meiobenthos abundance, biomass, N/C ratio, and Mann-Whitney U test for difference between shelf and slope stations in the northern South China Sea

	陆架站位				平均	陆坡站位				P 值	显著水平
	24	26	15	28		30	18	17	平均		
总丰度(ind./10cm <sup>2</sup> )	329±259	71±43	89±48	38±31	132±130	47±19	19±14	33±28	33±14	0.007	**
总生物量(μg dwt/10cm <sup>2</sup> )	276±164	163±163	149±93	87±80	169±79	96±52	36±30	36±28	56±35	0.010	*
线虫丰度(ind./10cm <sup>2</sup> )	311±248	52±31	72±39	32±26	117±130	37±15	16±14	30±26	28±11	0.010	*
多毛类丰度(ind./10cm <sup>2</sup> )	7±6	6±7	6±4	5±5	6±1	4±3	1±1	1±1	2±2	0.009	**
桡足类丰度(ind./10cm <sup>2</sup> )	8±7	3±3	8±5	0±0	5±4	2±2	1±1	1±2	1±1	0.103	ns
线虫丰度百分比(%)	94±2	74±26	79±6	85±1	83±8	79±10	76±19	92±6	83±9	0.943	ns
线虫/桡足类比	33±7	17±5	8±5	32±26	23±12	18±19	10±8	18±12	15±4	0.152	ns

注: ns:  $P > 0.05$ ; \*:  $P < 0.05$ ; \*\*:  $P < 0.01$ .

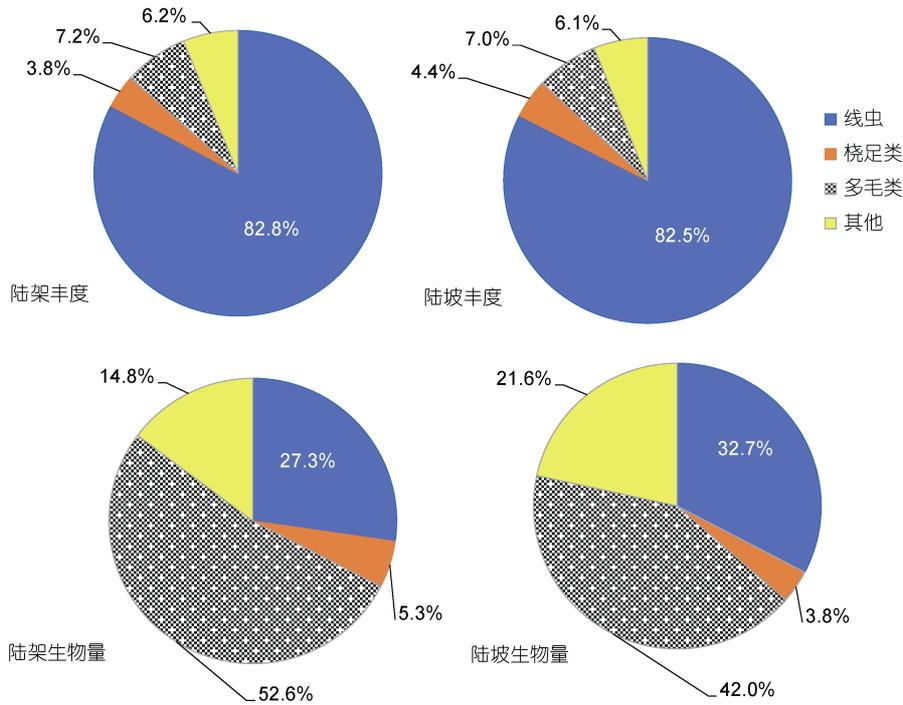


图 3 南海北部陆架和陆坡区小型底栖动物类群丰度和生物量百分比组成

Fig.3 Percentage compositions of the abundance and biomass of meiofaunal groups in the shelf and slope stations in the northern South China Sea

2.5 小型底栖动物的群落结构分析

根据各站位小型底栖动物丰度做 Cluster 聚类和 MDS 排序(图 4), 以相似性系数 65%可将 7 个站位划分为 2 个组。组 1 主要包括陆架浅水站位 15、24、26 和 1 个陆坡站位 30, 组 2 主要包括陆坡深水站位 17、18 和 1 个陆架站位 28。在 70%的相似性水平上, 组 1 中水深最浅的近岸站位 24 又与其他站位分开, 独立成组。根据小型底栖动物类群丰度矩阵的聚类分组结果(图 4)与结合

了底栖环境变量和小型底栖动物丰度和生物量数据的 PCA 分析结果基本上一致(图 2), 即: 近岸站位 24 与陆架其他站位分开, 而其余的站位基本按照陆架和陆坡分成 2 组。但在聚类分析中, 处于陆架和陆坡边缘的两个站位 28(122m)和 30(485m)分组发生换位, 说明小型底栖动物群落结构的聚类分析在类群的水平上难以将这两个站位清楚地分开, 这与涉及的变量数较少(13 个类群对应的 13 个变量)导致分辨率较低有关。

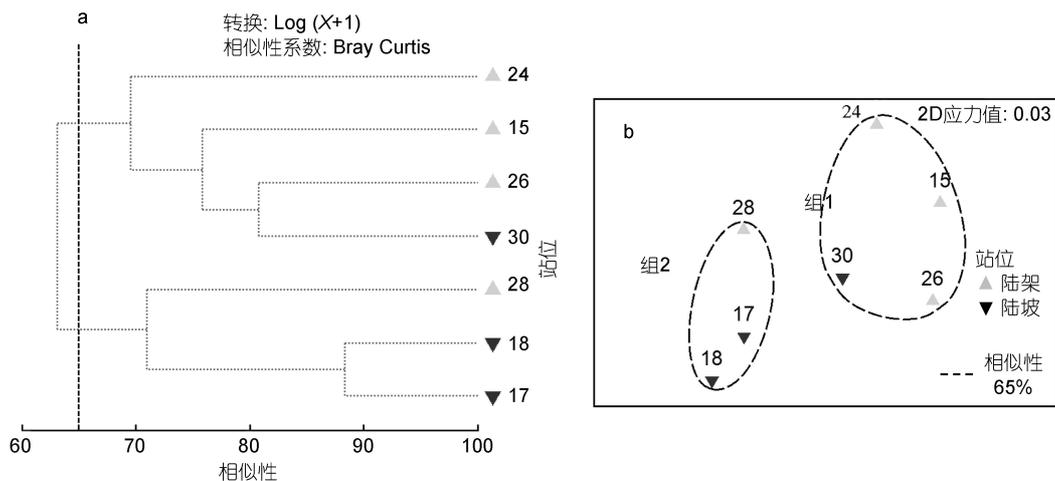


图 4 基于南海北部 7 个站位小型底栖动物类群丰度矩阵的聚类(a)和排序分析(b)

Fig.4 Cluster(a) and MDS(b) analysis based on abundance of meiofaunal taxa in the northern South China Sea  
注: X 表示各小型底栖动物类群的丰度

根据水深的变化,可以将海洋环境划分为陆架浅海带(水深小于 200m)和陆坡深海带(水深大于 200m) (Leduc *et al.*, 2012)。以 200m 为界限,将本次调查的 7 个站位划分为陆架浅海组(包括站位 15、24、26、28)和陆坡深海组(包括站位 17、18、30),利用 one-way ANOSIM 检验陆架和陆坡区小型底栖动物群落结构是否存在显著差异。结果表明,基于小型底栖动物丰度矩阵的陆架和陆坡区群落结构差异显著( $P < 0.05$ ),但基于生物量矩阵的群落差异不显著(表 5)。

对小型底栖动物类群的丰度矩阵进行相似百分比(Similarity Percentage, SIMPER)分析(表 6),找出引起陆架和陆坡组群落组成和结构差异的主要贡献类群。截取 70%的累积贡献率,结果表明,对陆架和陆坡群落结构非相似性贡献最大的是线虫,贡献率达 24.8%,其次是挠足类和多毛类,贡献率分别为 17.9%和 17.7%,涡虫的贡献率较小,为 7.1%。

表 5 南海北部陆架与陆坡区基于小型底栖动物类群丰度和生物量矩阵的单因素相似性分析

Tab.5 One-way ANOSIM test based on abundance and biomass matrices for the difference of meiofauna community between shelf and slope in the northern South China Sea

	丰度	生物量
显著水平 $P$	0.035*	0.074
统计量 $R$	0.116	0.098

注: \*: $P < 0.05$

表 6 南海北部陆架和陆坡区小型底栖动物群落的 SIMPER 分析

Tab.6 SIMPER analysis of shelf and slope meiofaunal communities in the northern South China Sea

类群	平均丰度(ind./10cm <sup>2</sup> )		贡献率 (%)	累积贡献率 (%)
	陆架	陆坡		
线虫	116.6	28.5	24.8	24.8
挠足类	4.7	1.4	17.9	42.6
多毛类	6.1	1.9	17.7	60.3
涡虫	0.7	0.5	7.1	67.5

## 2.6 小型底栖动物群落结构与环境因子的相关分析

对 7 个站位的环境因子与其对应的生物群落(类群水平)进行 BIOENV 相关分析(表 7),结果显示,能够解释研究海域小型底栖动物群落结构的最佳环境因子组合是叶绿素  $a$  和底温,相关系数为 0.551,其次是叶绿素  $a$ 、水深和底温的组合,相关系数为 0.532。单个环境因子与生物群落结构的相关系数按由大到小的顺序是:底温>水深>叶绿素  $a$ >中值粒径>分选系数,而脱镁叶绿酸、粉砂-黏土含量、底盐及总有机碳

含量的相关系数均为负数,表明这些变量对研究海域小型底栖动物群落结构的解释度较差(Clarke *et al.*, 2001)。

表 7 基于小型底栖动物各类群丰度数据的群落结构与环境因子的 BIOENV 分析

Tab.7 BIOENV analysis between meiofaunal community structure and environmental parameters

序号	变量	相关系数
1	底层水温(°C)	0.487
2	水深(m)	0.356
3	叶绿素 $a$ (mg/kg)	0.231
4	中值粒径( $\Phi$ )	0.100
5	分选系数( $\Phi$ )	0.071
6	脱镁叶绿酸(mg/kg)	-0.083
7	粉砂-黏土含量(%)	-0.083
8	底层水盐度	-0.299
9	总有机碳含量(%)	-0.332
环境变量最佳组合	底温和叶绿素 $a$	0.551

## 3 讨论

在本研究中,随着采样站位水深的增加,从 200m 以浅的陆架区到 1000m 左右的陆坡深海区,小型底栖动物的丰度和生物量呈显著下降的趋势:最优势的线虫丰度减少了约 75%,多毛类减少了约 70%。相应地,小型底栖动物的总丰度减少了约 75%,而总生物量也减少了近 70%。小型底栖动物的丰度和生物量随水深增加呈现下降的趋势,可能与其食物的含量和组成随水深的变化有关,也可能受水温条件和沉积物类型等非生物因素的影响(Soltwedel, 2000),但食物的缺乏被看作是小型底栖生物丰度减少最重要的原因(Cai *et al.*, 2012)。在本研究中,综合来看,该趋势主要受叶绿素  $a$  等因素的影响,从陆架到陆坡区,沉积物叶绿素  $a$  含量减少了近 70%,脱镁叶绿酸含量和总有机碳含量也有所减少,但仅约 30%。

在南海北部研究海域,由近岸到陆架坡折,再到深海陆坡,随着水深和离岸距离的增加,小型底栖动物可获得食物的量和质均发生变化:水深的增加导致底栖植物光合初级生产力下降,叶绿素  $a$  含量减少,意味着小型底栖动物可以利用的新鲜食物来源总体减少,同时通过径流(如珠江口)由陆源输入的有机和无机营养物也相应减少,食物的来源更多地依靠从上层水体沉降下来的死亡浮游植物和碎屑(这部分食

物的量更多地可由脱镁叶绿酸和总有机碳的含量反映出来), 从而引起小型底栖动物现存量的下降和群落结构的变化, 这与 Pfannkuche 的研究结果一致。沉积物中叶绿素 *a* 含量代表了活体植物有机质的现存量, 也反映底栖初级生产力水平, 其分解产物脱镁叶绿酸可以很好地被估入海底植物腐殖质的数量 (Pfannkuche, 1985), 也是底栖动物的一种重要食物来源。本研究的 PCA 分析表明沉积物叶绿素 *a* 和脱镁叶绿酸含量与小型底栖动物的丰度和生物量具有较高的正相关性, 而 BIOENV 分析则揭示了叶绿素 *a* 对小型底栖动物群落组成和结构的影响。因此叶绿素 *a* 被认为是本研究中影响小型底栖动物丰度和生物量及群落结构的最重要的环境因子, 而水深通过影响小型底栖动物食物的量和质, 间接影响着小型底栖动物的丰度 (王家栋等, 2009)。与水深增加有关的底层水温下降也会降低小型底栖动物的繁殖和发育速率, 从而引起其现存量和群落组成与结构发生改变。

海洋富营养化及有机污染在一定程度上可用线虫与桡足类的数量之比 (*N/C*) 来检测。Raffaelli (1987), Warwick (1981), Coull 等 (1981) 通常认为 *N/C* 比值小于 50 的环境质量属正常, 50—100 属富营养化, 而大于 100 则属有机污染。但 *N/C* 比主要适用于砂质潮间带的污染指示。在本研究中, 尽管 7 个站位的 *N/C* 比值均小于 50, 但应用这一比值的目的是反映小型底栖动物群落的优势类群组成, 而非环境质量的指示。在陆架和陆坡区 *N/C* 比和线虫丰度百分比没有明显差异, 说明尽管小型底栖动物的现存量有随水深呈显著下降的趋势, 但并未伴随着优势类群组成的改变, 意味着各优势类群丰度下降的趋势是一致的。

与南海其他研究相比 (表 8), 本研究小型底栖动

物在丰度上的绝对优势类群为线虫, 第二大优势类群为多毛类, 这与 Pavlyuk 等 (2006)、杜永芬等 (2010)、唐玲等 (2012) 和刘晓收等 (2014) 的调查结果一致。而在渤海、黄海、东海海域, 桡足类通常为第二大优势类群。这可能与南海叶绿素 *a* 含量较其他海域偏低有关, 叶绿素 *a* 代表着底栖藻类的现存量, 而大多数底栖桡足类通常以微藻为食, 食物的限制引起底栖桡足类减少, 而以沉积食性和肉食性为主的多毛类数量增加, 从而影响小型底栖动物的群落组成和结构 (杜永芬等, 2010)。

本研究所涉及的南海北部海域, 与南海其他研究的近岸 (杜永芬等, 2010) 和内湾 (Pavlyuk *et al*, 2006; 王彦国等, 2011; 唐玲等, 2012; Cai *et al*, 2012) 生境类型不同, 很难进行直接比较 (表 8)。与南海北部海域的其他研究相比, 本研究调查站位与王家栋等 (2009) 和刘晓收等 (2014) 具有较大程度的重叠, 但与后者的研究结果相比, 本研究小型底栖动物丰度和生物量明显偏低, 并且所呈现的随水深下降的趋势也与刘晓收等 (2014) 的结论相反。本研究的陆架站位 15 和水深最深的陆坡站位 17 分别与刘晓收等 (2014) 研究中的 X1 和 X6 在位置上最为接近, 具有较高的可比性。但是, 两次研究所揭示的小型底栖动物丰度和生物量随水深的变化趋势并不一致。从有限的具有可比性的环境数据方面, 发现可供解释这种差异的主要环境因子是两次研究的沉积物类型有很大的不同。本研究海域粉砂-黏土含量较低, 多数站位低于 50%, 沉积物中值粒径较大, 多数站位的沉积物类型为粉砂质砂 (其中陆坡站位 30 和 17 沉积物中含有大量有孔虫壳); 而刘晓收等 (2014) 所涉及的 6 个站位中, 5 个站位沉积物类型为粉砂或黏土质粉砂, 粉砂-黏土

表 8 小型底栖动物丰度与南海其他研究的比较

Tab.8 Comparison in meiofaunal abundance between the northern South China Sea and other areas of the South China Sea

研究海域	采样时间 (年.月)	水深范围 (m)	优势沉积物 类型	网筛孔径 ( $\mu\text{m}$ )	小型底栖动物总丰度 (ind./10cm <sup>2</sup> )	线虫丰度 百分比(%)	参考文献
南海北部	2015.6	24—1062	粉砂质砂	31	90±108	83	本研究
南海北部	2010.9	87—1600	粉砂	31	566±636	95	刘晓收等(2014)
南海北部	2007.9—10	1302—1394	粉砂质砂和砂- 黏土-粉砂	31	156±56	85	王家栋等(2009)
海南岛 以东沿岸	2007.10—11	20—160	砂质粉砂和 粉砂质砂	42	901±913	93	杜永芬等(2010)
北部湾	2008.10	4—35	粉砂	31	399±452	93	王彦国等(2011)
北部湾	2006—2007	20—120	粉砂	42	320±79—936±430	85	Cai 等(2012)
大亚湾	2009.10	11—17	黏土质粉砂	38	593±265	92	唐玲等(2012)
芽庄湾(越南)	2003.10	6—39	粗砂和细砂	63	1035±450	69	Pavlyuk 等(2006)

含量均超过 80%，且其中小型底栖动物丰度最高的站位 X6，粉砂-黏土含量超过 95%，相应地沉积物有机质含量也高于本研究。Liu 等(2015)对南海北部相同站位海洋线虫的种类组成和群落结构进一步研究也证实，由于南海北部多数站位的沉积物由细颗粒的粉砂组成，非选择沉积食性 1B 型在线虫群落的食性组成中比例最高。可见沉积物类型的不同，直接影响到小型底栖动物的生存环境，特别是其食物和量的差异。此外，考虑到本研究的取样时间是在夏季，与其他大部分研究的秋季相比，深水站位夏季温跃层的加深可能是引起本研究小型底栖动物总丰度偏低的另一个因素。

底栖生物现存量以及生物多样性随水深梯度的变化规律是生态学研究受到高度关注的科学问题之一。南海作为我国沿岸水深最深、生物多样性最高的区域之一，其海底的地形地貌单元依此发育为大陆架、大陆坡和边缘海盆地，是开展底栖生物现存量和生物多样性水深梯度研究的理想海域，针对该区域底栖生物的多样性和群落结构研究具有重要的学术意义。然而，因底栖生物样品采集存在费时费力等诸多客观困难，对南海陆架区和陆坡区，特别是对边缘海盆底栖群落可供比较的相关研究较少。以上对南海北部海域两次研究结果的不一致性为未来对南海小型底栖动物及其沉积环境开展进一步研究提供了科学问题：从浅海陆架到深水陆坡区，再到中央海盆，小型底栖动物的现存量和多样性是否存在随水深梯度的下降趋势，若存在是否受到食物和量的限制？南海北部的沉积环境特别是沉积物类型存在怎样的时空异质性，在何种程度上对小型底栖动物群落的数量、组成和结构产生影响？这些问题的回答，需结合多时空尺度的精巧的取样设计，并对优势类群特别是海洋线虫进行更加精细的种类组成和群落结构分析才能实现。

#### 4 结论

本研究通过对 2015 年 6 月南海北部共享航次所获得的陆架区 4 个站位(水深 24—122m)和陆坡区 3 个站位(水深 485—1062m)小型底栖动物在类群水平上丰度和生物量及群落组成和结构的比较，并与沉积物和水层环境因子进行相关分析，结果表明：

(1) 研究海域小型底栖动物及各优势类群的丰度和生物量有随水深增加呈下降的趋势，陆坡深海区显著低于陆架浅海区；随水深增加，研究海域沉积

物叶绿素 *a* 含量和底层水温度与小型底栖动物现存量的下降呈最大程度正相关性；

(2) 从陆架到陆坡，伴随着小型底栖动物现存量的下降，类群数量也明显减少，但优势类群的百分比组成没有显著改变，线虫始终是丰度的最优势类群，多毛类排第二位；

(3) 研究海域陆架站位与陆坡站位相比，小型底栖动物的群落结构(类群水平)存在显著差异，可用来解释这种差异的最佳环境因子组合是沉积物叶绿素 *a* 含量和底层水温度；

(4) 本研究的小型底栖动物丰度和生物量低于南海北部海域的其他研究结果，这可能与研究站位含砂量较高的沉积物类型有关。

以上结论说明，在南海北部，从陆架到陆坡，水深的增加可以通过改变小型底栖动物食物的可获得性和组成以及降低底温，从而间接影响小型底栖动物群落的数量和结构特征；同时，沉积物类型的不同对小型底栖动物群落的生存环境可能有着更为直接的影响。

#### 参 考 文 献

- 王 荣, 1986. 荧光法测定浮游植物色素计算公式的修正. 海洋科学, 10(8): 1—5
- 王彦国, 王春光, 陈小银等, 2011. 北部湾海域小型底栖动物丰度和生物量. 生态科学, 30(4): 375—382
- 王家栋, 类彦立, 徐奎栋等, 2009. 中国近海秋季小型底栖动物分布及与环境因子的关系研究. 海洋科学, 33(9): 62—70
- 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 2007a. GB/T 12763.8-2007 海洋调查规范 第 8 部分: 海洋地质地球物理调查. 北京: 中国标准出版社
- 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 2007b. GB/T 12763.6-2007 海洋调查规范 第 6 部分: 海洋生物调查. 北京: 中国标准出版社
- 刘昌岭, 朱志刚, 贺行良等, 2007. 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, 26(3): 205—208
- 刘晓收, 许 嫚, 张敬怀等, 2014. 南海北部深海小型底栖动物丰度和生物量. 热带海洋学报, 33(2): 52—59
- 杜永芬, 徐奎栋, 孟昭翠等, 2010. 南海小型底栖动物生态学的初步研究. 海洋与湖沼, 41(2): 199—207
- 张志南, 周 红, 慕芳红, 2001. 渤海线虫群落的多样性及中性模型分析. 生态学报, 21(11): 1808—1814
- 陈海燕, 周 红, 慕芳红等, 2009. 北黄海小型底栖生物丰度和生物量时空分布特征. 中国海洋大学学报, 39(4): 657—663
- 姚伯初, 1998. 南海北部陆缘的地壳结构及构造意义. 海洋地质与第四纪地质, 18(2): 1—16
- 唐 玲, 张洪波, 李恒翔等, 2012. 大亚湾秋季小型底栖生物

- 初步研究. 热带海洋学报, 31(4): 104—111
- Cai L Z, Fu S J, Yang J *et al*, 2012. Distribution of meiofaunal abundance in relation to environmental factors in Beibu Gulf, South China Sea. *Acta Oceanologica Sinica*, 31(6): 92—103
- Clarke K R, Warwick R M, 2001. Change in marine communities: an approach to statistical analysis and interpretation. 2nd ed. Plymouth, UK: PRIMER-E
- Coull B C, Hicks G R F, Well J B J, 1981. Nematode/copepod ratios for monitoring pollution: A rebuttal. *Marine Pollution Bulletin*, 12(11): 378—381
- Leduc D, Rowden A A, Probert P K *et al*, 2012. Further evidence for the effect of particle-size diversity on deep-sea benthic biodiversity. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 63: 164—169
- Liu X S, Xu M, Zhang J H *et al*, 2015. Community structure and biodiversity of free-living marine nematodes in the northern South China Sea. *Acta Oceanologica Sinica*, 34(6): 77—85
- McIntyre A D, 1968. The meiofauna and macrofauna of some tropical beaches. *Journal of Zoology*, 156(3): 377—392
- Metaxatos A, Ignatiades L, 2002. Seasonality of algal pigments in the sea water and interstitial water/ sediment system of an eastern Mediterranean coastal area. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 55(3): 415—426
- Pavlyuk O N, Trebukhova J A, 2006. Meiobenthos in Nha trang bay of the South China Sea (Vietnam). *Ocean Science Journal*, 41(3): 139—148
- Pfannkuche O, 1985. The deep-sea meiofauna of the Porcupine seamount and abyssal plain (NE Atlantic): population structure, distribution, standing stocks. *Oceanologica Acta*, 8(3): 343—353
- Raffaelli D, 1987. The behaviour of the Nematode/Copepod ratio in organic pollution studies. *Marine Environmental Research*, 23(2): 135—152
- Soltwedel T, 2000. Metazoan meiobenthos along continental margins: a review. *Progress in Oceanography*, 46(1): 59—84
- Warwick R M, 1981. The nematode/copepod ratio and its use in pollution ecology. *Marine Pollution Bulletin*, 12(10): 329—333
- Widbom B, 1984. Determination of average individual dry weights and ash-free dry weights in different sieve fractions of marine meiofauna. *Marine Biology*, 84(1): 101—108

## COMPARISON IN MEIOFAUNAL COMMUNITIES BETWEEN SHELF AND SLOPE OF THE NORTHERN SOUTH CHINA SEA

ZHOU Hong, Saif MD UDDIN, HUANG Meng-Jiao, LIU Xiao-Shou, WANG Zheng-Mao, YIN Yong-Tong, JIANG Qian-Qian, Rebeca MONTERO-TABOADA, Karim MD ABDUL  
(College of Marine Life Sciences, Ocean University of China, Qingdao 266003, China)

**Abstract** To understand the characteristics of meiofaunal communities from the shelf and slope depths, and the most relevant environmental factors, meiofaunal and environmental samples were collected at seven stations in the northern South China Sea (19.3°—21.4°N, 112.4°—115.1°E) in June 2015, and compared in meiofaunal abundance, biomass, taxon composition and community structure between the shelf and slope stations. Results showed that at the shelf, the meiofauna consisted of 13 major groups in average abundance of  $(132 \pm 130) \text{ ind./}10\text{cm}^2$  and biomass  $(169 \pm 79) \mu\text{g dwt/}10\text{cm}^2$ , while at the slope, the meiofauna covered 8 major groups in significantly lower abundance of  $(33 \pm 14) \text{ ind./}10\text{cm}^2$  and biomass of  $(56 \pm 35) \mu\text{g dwt/}10\text{cm}^2$  than those of the shelf. However, no significant difference was found in major taxon composition (Mann-Whitney U test), i.e., at both shelf and slope, nematode was the most dominant taxon (83% of the total abundance), followed by polychaete (7%) and copepod (3%). As PCA indicated, the separation of shelf and slope stations along PC1 and meiofaunal abundance and biomass were positively related with sedimentary chlorophyll *a*, phaeopigment, and bottom water temperature, while negatively related with water depth. At 65% similarity, Cluster and MDS classified the seven stations into two groups, which was largely consistent with the shelf and slope grouping. In addition, significantly different community structure was detected between the shelf and slope meiofaunal communities indicated by one-way ANOSIM according to the abundance matrix of major taxa. The best combination of environmental factors affecting meiofaunal community structure were chlorophyll *a* and bottom water temperature as revealed by BIOENV. Therefore, from the shelf to slope, as water depth increased, the food availability and bottom water temperature both decreased, and resulted in the different characteristics of meiofaunal communities between shelf and slope in the northern South China Sea.

**Key words** meiofaunal community; abundance and biomass; composition and structure; shelf and slope; northern South China Sea