

DOI: 10.5846/stxb201801220173

陈玉珍, 郭玉清, 刘爱原. 福建海坛岛长江澳沙滩自由生活海洋线虫群落的研究. 生态学报, 2019, 39(7): - .

Chen Y Z, Guo Y Q, Liu A Y. Community structures of free-living marine nematodes on sandy beach of Changjiangao (Haitan Island, Fujian Province). Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(7): - .

福建海坛岛长江澳沙滩自由生活海洋线虫群落的研究

陈玉珍^{1,2}, 郭玉清^{1,*}, 刘爱原³

1 集美大学水产学院, 厦门 361021

2 国家海洋局第三海洋研究所, 厦门 361005

3 集美大学图书馆, 厦门 361021

摘要: 于 2013—2014 年间在海坛岛长江澳沙滩采样, 对小型底栖动物的类群组成、丰度及分布, 自由生活海洋线虫 (简称海洋线虫) 群落的优势属、摄食类型、年龄结构及性比、物种多样性等方面进行研究。结果表明: 小型底栖动物年平均丰度为 (810.87 ± 696.75) 个/10 cm²。在鉴定出的 16 个类群中, 海洋线虫的丰度占小型底栖动物总丰度的 52.36%, 其次为腹毛虫, 占 21.14%。海洋线虫的年平均丰度为 (424.54 ± 400.23) 个/10 cm², 季节变化总趋势为夏季 (783.45 ± 336.45) 个/10 cm² > 春季 (600.67 ± 309.42) 个/10 cm² > 秋季 (298.26 ± 424.57) 个/10 cm² > 冬季 (113.05 ± 95.79) 个/10 cm²。4 个季度共鉴定出海洋线虫 105 种或分类实体, 隶属于 75 个属, 26 个科。4 个季度数量百分比超过 5% 的优势海洋线虫属有 10 个, 分别是 *Axonolaimus*、*Theristus*、*Metachromadora*、*Mesacanthion*、*Rhynchonema*、*Epacanthion*、*Microlaimus*、*Viscosia*、*Lauratonema* 和 *Enoplodes*, 不同季度的优势属存在差异。CLUSTER 聚类表明, 春、夏、秋季各潮带海洋线虫群落较为相似, 与冬季差异较大。海洋线虫 4 种摄食类型年平均丰度百分比由高到低的顺序是 1B (32.19%) > 2A (31.32%) > 2B (31.12%) > 1A (5.37%); 春夏季以 2A 和 1B 为主导, 秋冬季以 2B 和 1B 为主导。海洋线虫群落的物种多样性最高值出现在秋季 ($d = 8.45$, $H' = 3.36$), 最低在冬季 ($d = 7.36$, $H' = 2.92$), 春季与夏季的多样性相当; 周年幼体的数量所占比例为 45.47%, 成体中雌雄个体比例为 1.10:1。

关键词: 海坛岛; 海洋线虫; 群落结构

Community structures of free-living marine nematodes on sandy beach of Changjiangao (Haitan Island, Fujian Province)

CHEN Yuzhen^{1,2}, GUO Yuqing^{1,*}, LIU Aiyuan³

1 Fisheries College, Jimei University, Xiamen 361021, China

2 Third Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Xiamen 361005, China

3 Library, Jimei University, Xiamen 361021, China

Abstract: The main island of Pingtan Comprehensive Pilot Zone, Haitan Island, which is the zone nearest to Taiwan Province, is the fifth largest island in China and the largest island in Fujian Province. With the development and increase in the urbanization of Pingtan, the beach tourism industry has developed rapidly. However, the beach is a simple and sensitive ecosystem, and the development of beach tourism would affect the assemblages and distribution of benthos, which would affect the structure and function of the sandy beach ecosystem. It is necessary to study the biological baseline and establish basic data for the evaluation of the ecosystem in Haitan Island. Meiofauna is one of the most important indicators of marine environmental quality owing to its ecological characteristics, such as high abundance and short life cycle. In order to study the groups, abundance, and distribution of meiofauna, feeding types and species diversity, age structure and sex ratio of

基金项目: 国家自然科学基金 (31772416); 福建省自然科学基金项目 (2017J01450)

收稿日期: 2018-01-22; **网络出版日期:** 2018-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: guoyuqing@jmu.edu.cn

marine nematodes, meiofaunal samples were collected from the sandy beach of Changjiangao, Haitan Island in Fujian Province in 2013 and 2014. The results showed that the mean annual abundance of meiofauna was (810.87 ± 696.75) ind/ 10 cm^2 , consisting of 16 meiofaunal assemblages. Nematoda was the most dominant group, accounting for 52.36%, followed by Gastrotricha, which constituted 21.14%. The mean annual abundance of nematodes was (424.54 ± 400.23) ind/ 10 cm^2 , the abundance varied seasonally as follows: summer $((783.45 \pm 336.45) \text{ ind}/10 \text{ cm}^2) > \text{spring} ((600.67 \pm 309.42) \text{ ind}/10 \text{ cm}^2) > \text{autumn} ((298.26 \pm 424.57) \text{ ind}/10 \text{ cm}^2) > \text{winter} ((113.05 \pm 95.79) \text{ ind}/10 \text{ cm}^2)$. A total of 105 species of nematodes were identified in the four seasons, belonging to 75 genera and 26 families. There were 10 genera of nematodes with dominance greater than 5% in the four seasons—*Axonolaimus*, *Theristus*, *Metachromadora*, *Mesacanthion*, *Rhynchonema*, *Epacanthion*, *Microaimus*, *Viscosia*, *Lauratonema*, and *Enoploides*, but the dominant genera varied seasonally. Hierarchical cluster analysis showed that the nematode communities in spring, summer, and autumn shared greater similarity than those in winter. The percentage of the mean annual abundance of feeding types were 1B (32.19%) > 2A (31.32%) > 2B (31.12%) > 1A (5.37%), among which 2A and 1B were dominant in spring and summer, whereas 2B and 1B were dominant in autumn and winter. The number of nematode genera in autumn was the largest, whereas that in winter was the lowest. Nematode diversity was the highest in autumn ($d=8.45$, $H'=3.36$) and the lowest in winter ($d=7.36$, $H'=2.92$), and the diversity in spring and in summer was similar. The age structure of the nematodes revealed that the proportion of juveniles accounted by 45.47%, and the sex ratio (female : male) was 1.10:1.

Key Words: Haitan Island; marine nematode; community structure

平潭综合实验区主岛海坛岛是我国的第五大岛、福建第一大岛^[1]。海坛岛沙滩滩面广阔,沙质均匀、洁白,是海坛岛重要的旅游资源。沙滩是由潮汐、沉积物运动等物理力相互作用而形成的简单而敏感的生态系统^[2],随着海坛岛大规模的开发建设以及城市扩张,沙滩旅游业迅猛发展。人为的过度干扰会影响沙滩底栖动物群落的种类组成、数量及分布,进而影响沙滩生态系统的结构和功能。为有效监测和保护沙滩生态系统的健康,有必要研究其生物基线,为未来海坛岛的生态健康评价提供基础数据。

小型底栖动物生活周期短、每年平均 3—5 代,生活史无浮游阶段等特点,使得这类生物已经逐渐成为海岸湿地中海洋沉积环境质量状况的重要的指示生物^[3]。我国砂质潮间带小型底栖动物的研究主要集中在秦皇岛^[4]、青岛^[5]和厦门^[6],内容主要涉及小型底栖动物丰度及生物量的分布,自由生活海洋线虫(Free-living marine nematode,以下简称海洋线虫)群落的研究相对较少^[7]。海洋线虫作为小型底栖动物的优势类群,其群落结构,包括优势属、功能类群、年龄结构及性比等方面的变化受到物理、化学、生物等各种因子的影响,通过对海洋线虫群落结构的研究可以在一定程度上反映沉积物的环境情况。本文旨在阐述海坛岛砂质潮间带小型底栖动物,特别是海洋线虫群落结构的季节性差异,深化海洋线虫的生物生态学基础研究,为评价海坛岛潮间带沉积环境、促进海洋生物资源的可持续利用提供科学依据。

1 材料与方法

长江澳位于海坛岛北部,是海坛岛三大海滨沙滩之一。本研究于 2013—2014 年间选取该沙滩的一个断面(119.78°E , 25.62°N)进行沉积物小型底栖动物样品的采集(采样位置如图 1 所示)。利用内径为 2.9 cm 的采样管,在低潮时分别于低潮区、中潮区和高潮区采集深度为 0—10 cm 的分样各 3 个重复。每个分样按 0—5 cm 和 5—10 cm 分层,分装后以 5% 的福尔马林溶液进行固定。海洋线虫的分选、观察玻片的制作方法见文献^[8]。海洋线虫的鉴定在 Nikon 80i 显微镜下进行,鉴定到种或分类实体单元。

海洋线虫摄食类型的划分采用 Wieser^[9-10]的方法,根据海洋线虫的口腔结构将海洋线虫的摄食类型分为四类,1A (Selective deposit feeder): 选择性沉积食性者。1B (Non-selective deposit feeder): 非选择性沉积食性者,2A (Epigrowth feeder): 底上食性者。2B (Predator/omnivore): 捕食者或杂食者。利用 Excel 2010、SPSS 19.0

和 Primer 6.0 进行数据处理和分析。

2 结果

2.1 小型底栖动物的类群组成和丰度

海坛岛长江澳沙滩 4 个季度共发现 16 个类群的小型底栖动物,包括海洋线虫(Nematoda)、桡足类(Copepoda)、多毛类(Polychaeta)、寡毛类(Oligochaeta)、涡虫(Turbellaria)、腹毛虫(Gastrotricha)、无节幼体(Nauplii)、海螨类(Halacaroidea)、介形类(Ostracoda)、弹尾类(Collembola)、缓步类(Tardigrada)、端足类(Amphipoda)、涟虫(Cumacea)、动吻类(Kinorhyncha)、水生昆虫(Aquatic insect)及其他未鉴定类群(Others)。各季度小型底栖动物的类群组成和丰度见表 1。小型底栖动物的年平均丰度为 (810.87 ± 696.75) 个/ 10 cm^2 。季度间变化总趋势为:春季 $((1459.36 \pm 458.68)$ 个/ 10 cm^2) > 夏季 $((1363.25 \pm 558.13)$ 个/ 10 cm^2) > 秋季 $((383.09 \pm 515.12)$ 个/ 10 cm^2) > 冬季 $((256.13 \pm 132.31)$ 个/ 10 cm^2)。从年平均丰度看,海洋线虫是长江澳沙滩小型底栖动物中的绝对优势类群,占小型底栖动物丰度的 52.36%,其次为腹毛虫,占 21.14%。从季节变化来看,除春季海洋线虫与腹毛虫的丰度相当外,夏季、秋季、冬季均以海洋线虫为第一优势类群,但第二优势类群则分别为缓步类、寡毛类、腹毛虫,其丰度百分比分别是 13.20%、6.90%和 29.57%。

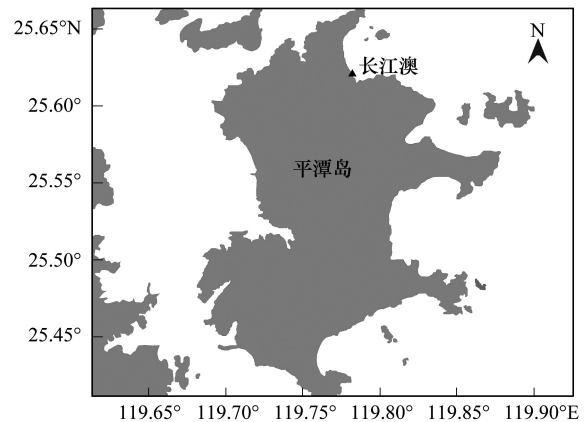


图 1 采样站

Fig.1 Sampling station

表 1 小型底栖动物各类群的平均丰度及百分比的季节变化/(个/ 10 cm^2)

Table 1 Seasonal fluctuations of meiofaunal average abundance and ratio

类群 Assemblage	春季 Spring	夏季 Summer	秋季 Autumn	冬季 Winter	年平均丰度 Annual mean abundance
海洋线虫 Nematoda	600.67±309.42 41.16%	783.45±336.45 57.47%	298.26±424.57 77.86%	113.05±95.79 44.14%	424.54±400.23 52.36%
桡足类 Copepoda	72.54±36.51 4.97%	127.24±230.45 9.33%	22.86±24.16 5.97%	9.50±8.22 3.71%	53.85±116.12 6.64%
多毛类 Polychaeta	30.80±22.45 2.11%	90.88±130.86 6.67%	11.15±15.50 2.91%	0.83±1.04 0.32%	30.67±69.81 3.78%
寡毛类 Oligochaeta	17.00±10.01 1.16%	15.32±9.29 1.12%	26.44±46.78 6.90%	5.92±4.57 2.31%	16.17±25.78 1.99%
涡虫 Turbellaria	60.59±62.97 4.15%	24.57±16.01 1.80%	3.03±4.39 0.79%	42.83±24.78 16.72%	31.77±38.72 3.92%
腹毛虫 Gastrotricha	618.01±592.77 42.35%	35.18±58.84 2.58%	13.08±17.59 3.41%	75.74±112.79 29.57%	171.39±368.91 21.14%
无节幼体 Nauplii	7.57±6.15 0.52%	66.31±86.40 4.86%	0 0	0 0	16.62±47.78 2.05%
海螨类 Halacaroidea	0 0	0.34±0.67 0.02%	0 0	0 0	0.08±0.33 0.01%
介形类 Ostracoda	0.84±2.02 0.06%	5.89±10.31 0.43%	0 0	0 0	1.51±5.34 0.19%
弹尾类 Collembola	0.17±0.50 0.01%	1.85±3.19 0.14%	0 0	0 0	0.45±1.65 0.06%
缓步类 Tardigrada	2.86±3.42 0.20%	179.92±272.98 13.20%	0 0	0 0	41.12±145.00 5.07%

续表

类群 Assemblage	春季 Spring	夏季 Summer	秋季 Autumn	冬季 Winter	年平均丰度 Annual mean abundance
端足类 Amphipoda	3.37±2.81 0.23%	0 0	0 0	0 0	0.76±1.91 0.09%
涟虫 Cumacea	0.34±1.01 0.02%	0 0	0 0	0 0	0.08±0.48 0.01%
动吻类 Kinorhyncha	5.55±7.42 0.38%	0 0	0 0	0 0	1.25±4.10 0.15%
水生昆虫 Aquatic insect	0.17±0.50 0.01%	0 0	0 0	0 0	0.04±0.24 0
其他类 Others	38.88±11.03 2.66%	32.31±11.13 2.37%	8.26±13.11 2.16%	8.26±7.55 3.22%	20.56±17.43 2.54%
总计 Total	1459.36±458.68 100%	1363.25±558.13 100%	383.09±515.12 100%	256.13±132.31 100%	810.87±696.75 100%

2.2 海洋线虫的丰度与水平分布

长江澳沙滩海洋线虫的年平均丰度为(424.54±400.23)个/10 cm²。海洋线虫丰度的季节变化总趋势为夏季((783.45±336.45)个/10 cm²)>春季((600.67±309.42)个/10 cm²)>秋季((298.26±424.57)个/10 cm²)>冬季((113.05±95.79)个/10 cm²),与小型底栖动物丰度变化趋势一致。

各潮带海洋线虫丰度分布的总趋势为:低潮带((661.56±400.01)个/10 cm²)>中潮带((440.24±440.10)个/10 cm²)>高潮带((205.54±218.58)个/10 cm²),与小型底栖动物丰度潮带变化趋势一致。各季度变化情况见图2。对4个季度不同潮带间的海洋线虫丰度进行方差分析表明,春季中潮带与高潮带间存在显著性差异($P < 0.05$);夏季高潮带与低潮带、与中潮带间存在显著性差异($P < 0.05$);秋季低潮带与中潮带、与高潮带间存在极显著差异($P < 0.01$);冬季各潮带间差异性不显著($P > 0.05$)。

2.3 海洋线虫优势属(种)与摄食类型

长江澳沙滩4个季度共鉴定海洋线虫105种或分类实体,隶属于75个属,26个科,4个目。4个季度丰度百分比超过>5%的优势海洋线虫属有10个(图3),其中,*Theristus*在4个季度均占优势,*Metachromadora*在除冬季外的其他三个季度均为优势属。只在一个季度占优势的属有*Lauratonema*(7.59%)、*Viscosia*(5.82%)、*Axonolaimus*(10.13%)和*Enoploides*(5.45%)。在两个季度占优势的有*Mesacanthion*、*Epacanthion*、*Microlaimus*、*Rhynchonema*。进一步鉴定到种(或分类实体),*Theristus*属包括4个种,*Theristus* sp1在4个季度都出现。*Metachromadora*包括五个种,其中*Metachromadora* sp1在春季和夏季占优势。*Axonolaimus*、*Enoploides*、*Mesacanthion*、*Epacanthion*均只包括一个种。*Rhynchonema*包括两个种,其中*Rhynchonema* sp1在夏季和秋季均为优势种。*Microlaimus*与*Viscosia*均包括两个种,但仅在夏季*Microlaimus* sp1和*Viscosia* sp1的优势度超过5%。*Lauratonema*包括三个种,分别是*Lauratonema dongshanense*、*Lauratonema macrostoma*^[11]及*Lauratonema* sp1,前两者在4个季度均有出现,*Lauratonema* sp1仅在春季和冬季出现,但三个种在各季度的优势度均不超过5%。

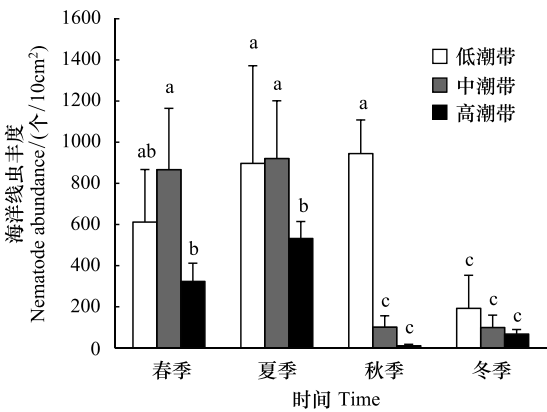


图2 海洋线虫丰度水平分布的季节变化

Fig.2 Seasonal fluctuations of horizontal distribution of nematode abundance

相同字母表示无显著性差异($P > 0.05$),不同字母表示差异显著($P < 0.05$)

长江澳沙滩春季和夏季海洋线虫的摄食类型相似,均为 $2A > 1B > 2B > 1A$;秋季与冬季相似,为 $2B > 1B > 2A > 1A$ (图 4)。摄食类型为 1A 的海洋线虫在各季度所占的比例均最少,特别是在冬季几乎没出现(0.26%),1B 在各季度所占比例(28.27%—37.14%)基本稳定。春夏季,2A 数量最多,2B 较少;秋冬季,2B 占主导地位,成为 4 种摄食类型中所占比例最高的类型。周年来看,海洋线虫的摄食类型及比例的变化趋势为:1B (32.19%) > 2A (31.32%) > 2B (31.12%) > 1A (5.37%);1B、2A 与 2B 三种摄食类型的海洋线虫所占比例差异不大,而摄食类型为 1A 的海洋线虫所占的比例则远低于其他 3 个类型。

2.4 海洋线虫群落潮带分布与垂直分布的聚类分析

对长江澳沙滩各季度不同潮带的海洋线虫种类进行聚类分析(图 5),发现在潮带间分布的相似性较低,按 35% 的相似度划分,可以将各季度不同潮带的海洋线虫群落分为四组,夏季低潮带和秋季高潮带的群落结构与其他各季度各潮带的相似性最低,独立为一组;冬季高、中、低潮带之间的群落结构较为相似,为一组;春季与夏季各潮带间的群落结构较为相似,互有交叉,分为一组。

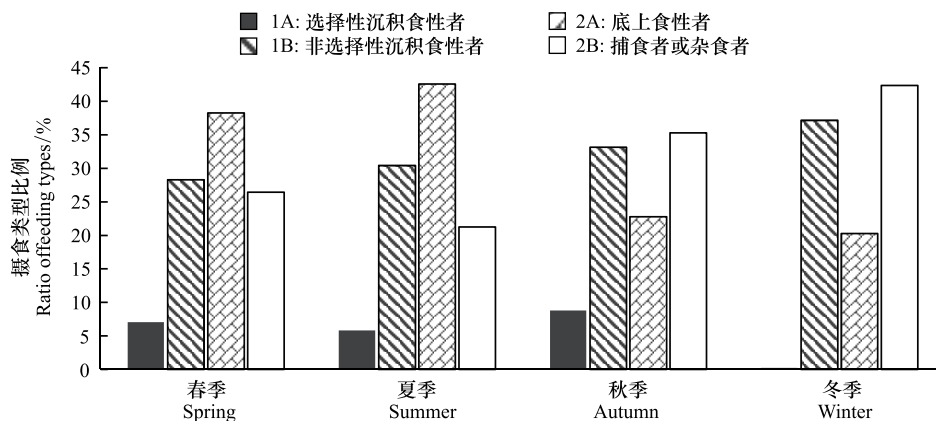


图 4 海洋线虫摄食类型的季节变化

Fig.4 Seasonal fluctuations of free-living marine nematode feeding types

对各季度表层(0—5 cm)和底层(5—10 cm)的海洋线虫种类群落进行聚类分析(图 6),按照 50% 的相似度划分,可以将长江澳沙滩 4 个季度的海洋线虫群落分为 3 组,秋季与冬季各自独立为一组,春季与夏季为一组。春季与夏季海洋线虫群落较为相似。同一季节表层与底层的海洋线虫群落相似度最高。

2.5 海洋线虫群落的年龄结构及性比

将海洋线虫按其生殖系统的结构及发育情况划分为成熟的雄性(以交接器的存在为标准),成熟的雌性(以虫体子宫内怀卵或具发育好的卵巢为标准)和幼体。长江澳沙滩各季度海洋线虫的年龄结构如图 7 所示。总体而言,长江澳沙滩周年海洋线虫群落中幼体数量占海洋线虫总个体数量的 45.47%,成体中雌雄个体数量比例为 1.10:1。按季度进行分析,各季度海洋线虫数量的年龄结构及性别比例为,春季:雄性 < 雌性 < 幼体,比值为 0.80:1:1.33;夏季:雌性 < 雄性 < 幼体,比值为 1:1.18:1.81;秋季:雄性 < 雌性 < 幼体,比值为 0.84:1:1.04;冬季:雄性 < 雌性 < 幼体,比值为 0.84:1:2.40。幼体在不同季度所占比例均最大,冬季幼体个体

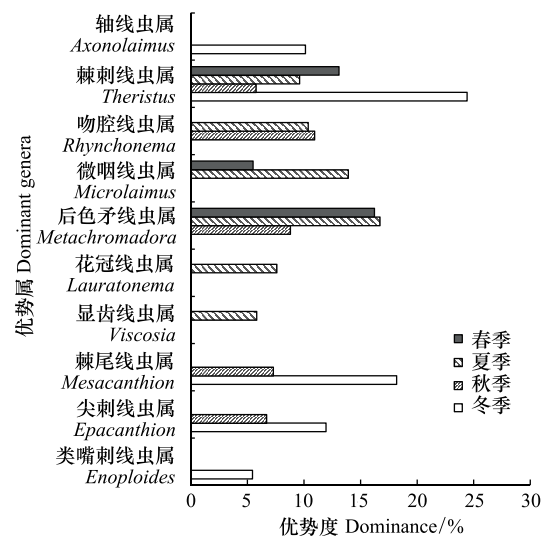


图 3 海洋线虫优势属(丰度 > 5% 的属)优势度的季节变化

Fig.3 Seasonal fluctuations of nematode dominance (genera with abundance > 5%)

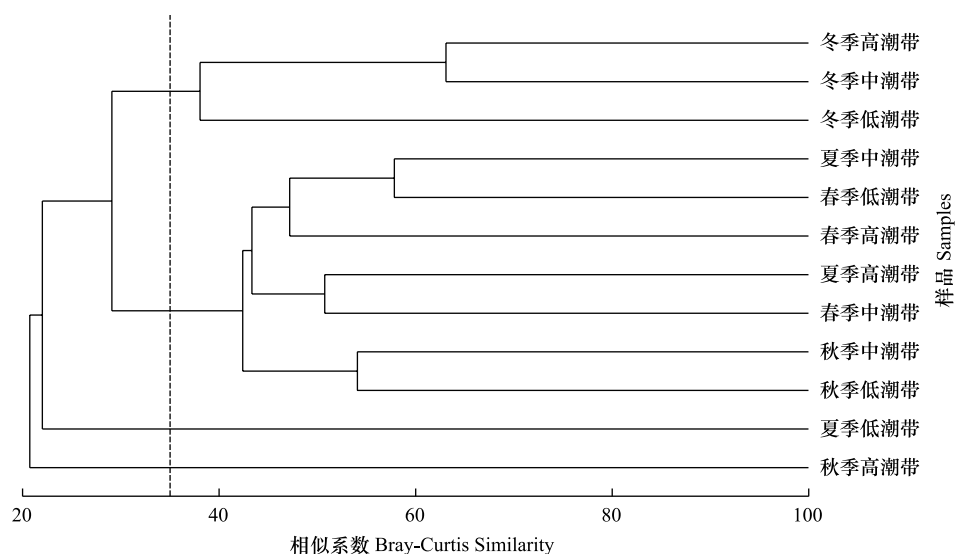


图 5 不同潮带海洋线虫群落结构的季节变化聚类图

Fig.5 Seasonal fluctuations of hierarchical cluster analysis based on tidal distribution of nematode assemblages

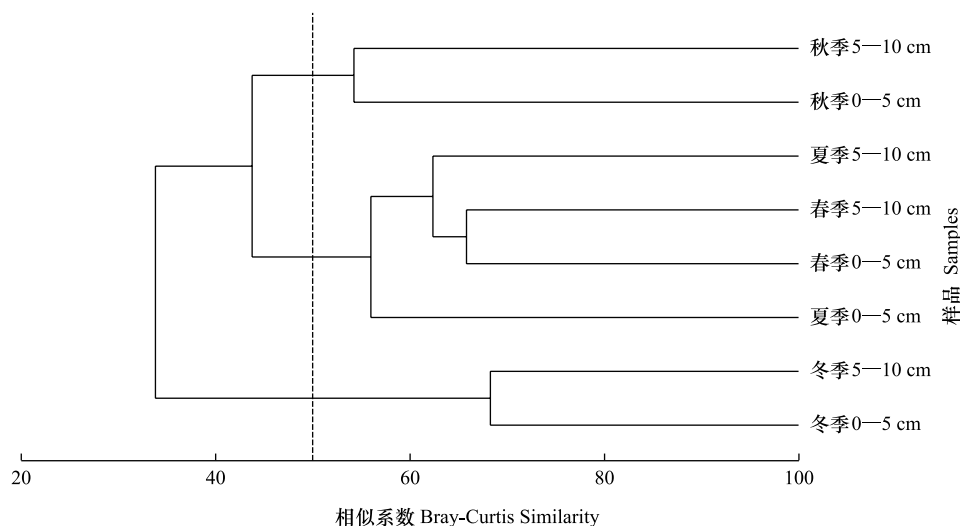


图 6 不同采样深度海洋线虫群落结构的季节变化聚类图

Fig.6 Seasonal fluctuations of hierarchical cluster analysis based on vertical distribution of nematode assemblages

数占海洋线虫总个体数的 56.62%, 其他各季度不超过 50%。除夏季雄性比例略大于雌性比例外, 其他三个季度均为雄性 < 雌性 < 幼体。

2.6 海洋线虫群落的物种多样性

对长江澳沙滩出现的线虫属的多样性分析表明, 秋季出现的海洋线虫属数最多, 冬季最少, 前者为后者的两倍。4 个季度海洋线虫群落多样性最高为秋季 ($d = 8.45$, $H' = 3.36$), 最低为冬季 ($d = 7.36$, $H' = 2.92$), 春季与夏季的多样性相当。均匀度指数亦在秋季最高, 冬季最低; 优势度指数则相反, 秋季最低, 冬季最高。春季和夏季的各种指数最为接近, 差异不大。对其进行 K-优势度曲线分析表明 (图 8), 秋季的曲线位于图中曲线的最下端, 表明该季节群落的物种多样性最高。

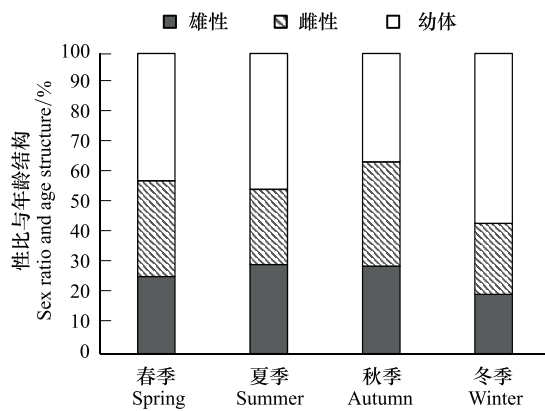


图 7 海洋线虫性比与年龄结构的季节变化

Fig.7 Seasonal fluctuations of sex ratio and age structure of free-living marine nematodes

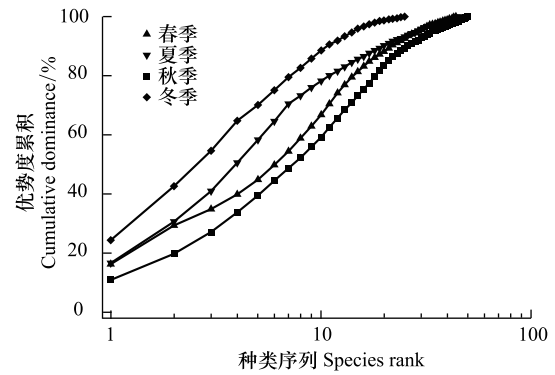


图 8 不同季节海洋线虫群落的 K-优势度曲线

Fig.8 K-dominance curves derived from nematode abundance in different seasons

3 讨论

3.1 小型底栖动物和海洋线虫的丰度变化

我国不同区域砂质潮间带小型底栖动物丰度及海洋线虫丰度的比较见表 2。本研究中长江澳沙滩小型底栖动物周年平均丰度为 (810.87 ± 696.75) 个/ 10 cm^2 , 其中海洋线虫丰度所占比例为 52.36%, 与舟山的研究结果较为接近。小型底栖动物丰度的高低受到多种因素的影响, 如沉积物粒度、有机质含量、温度、溶解氧等环境因子及自身繁殖特性等^[13, 15, 17-19]。此外, 优势类群海洋线虫所占的比例亦是影响小型底栖动物丰度的一个重要因子^[20]。有研究发现, 在有丰富有机质输入的沙滩, 海洋线虫的优势度更高; 有机质含量较低的沙滩, 小型底栖动物的类群组成更为多样^[21]。

表 2 海坛岛长江澳沙滩与其他砂质潮间带小型底栖动物丰度的比较/(个/ 10 cm^2)

Table 2 Comparison of meiofauna abundance between the Changjiagao and other intertidal zones

研究区域 Study area	采样时间 Sampling time	小型底栖动物丰度 Meiofauna abundance	海洋线虫丰度 Nemotade abundance	海洋线虫与小型 底栖动物丰度之比 The ratio of nemotade abundance to meiofauna abundance
长江澳沙滩	2013—2014	810.87 ± 696.75	424.54 ± 400.23	52.36%
青岛薛家岛 ^[12]	2008—2009	1384.69 ± 424.97	1286.70 ± 225.13	86.59%
青岛一浴 ^[13]	2011	1859.9 ± 705.1	1545.9 ± 632.7	83.1%
青岛太平湾 ^[14]	2004—2005	1025.4 ± 268.8	914.2 ± 208.7	89.2%
青岛二浴 ^[15]	2008	950.4 ± 668.9	815.9 ± 572.0	91%
舟山大沙里 ^[16]	2010—2011	768.4 ± 381.4	340.44 ± 163.71	44.84%
舟山朱家尖 ^[17]	2010—2011 *	459 ± 250	—	49%
厦门大德记沙滩 ^[6]	2010—2011	660.23 ± 192.44	—	35.1%
厦门黄厝沙滩 ^[6]	2010—2011	521.86 ± 146.30	—	72.56%

* 2010 年 7 月与 2011 年 1 月

在季节变化上, 温度是控制潮间带沙滩小型底栖动物群落结构的主要因素之一, 它可以直接或间接地影响小型底栖动物的丰度, 例如促进小型底栖动物的繁殖^[22] 或通过影响食物, 如细菌和硅藻的生长和可利用率, 来影响小型底栖动物的类群组成及丰度^[18]。本研究中, 海洋线虫丰度在春夏季高, 秋冬季低, 其原因可能与温度上升而引起的食物可获得性与繁殖率的上升有关。在热带和亚热带地区的研究表明, 海洋线虫的季节

性变化主要与食物的可利用率有关^[23]。在温带地区,潮间带沙滩的海洋线虫丰度最高值一般出现在春季、夏季和秋季,初级生产力提高为海洋线虫提供了丰富的食物来源^[19, 24-26]。Tietjen^[27]在潮下带河口区的砂质潮间带沉积物中发现,海洋线虫的丰度在春夏季达到最大,丰度的增加主要是由于底上硅藻捕食者种类与数量的增加,底上硅藻捕食者的数量与底栖微生物的生产量几乎同时达到最大。此外,温度的升高也可能通过促进海洋线虫的繁殖从而使丰度提高^[28]。Harris 连续两年在英国白沙湾观察到海洋线虫丰度均在夏季达到峰值,其原因是水温的周期性升高促进了海洋线虫的繁殖^[18]。Nicholas^[25]连续两年对澳大利亚东部海岸沙滩海洋线虫的研究发现,海洋线虫全年均可繁殖,但在较为暖和的月份具有更高的生长与繁殖率。

3.2 海洋线虫的优势属(种)

在潮间带沙滩,海洋线虫的优势类群与沉积物环境条件紧密相关。一般情况下,潮间带沙滩的海洋线虫以 Chromadoridae、Cyatholaimidae、Desmodoridae 和 Oncholaimidae 等科中的属为优势^[29],但由于不同海洋线虫属对环境的耐受程度不同,因此在不同的环境条件中各海洋线虫属的优势度不同。Blome 等^[30]在调查澳大利亚东部沙滩小型底栖动物时发现该区域海洋线虫的优势度依次为 Xyalidae、Chromadoridae、Thoracostomopsidae、Desmodoridae、Oncholaimidae、Leptolaimidae、Microlaimidae 和 Cyatholaimidae。本研究中,长江澳沙滩的海洋线虫优势类群与 Blome 等的研究结果较为接近,周年主要以 Xyalidae、Thoracostomopsidae、Desmodoridae 和 Microlaimidae 等科中的属为优势,但除 *Theristus* 外,不同季节的优势类群有所差异。*Theristus* 在 4 个季度中均有较大优势度,这可能与它们具有利用不同种类食物的能力有关^[31]。

3.3 海洋线虫的摄食类型

本研究中,长江澳沙滩周年海洋线虫的摄食类型丰度变化趋势为:1B > 2A > 2B > 1A。总体而言,1B、2A 与 2B 三种摄食类型的海洋线虫所占比例差异不大,均占 30% 左右,而摄食类型为 1A 的海洋线虫所占的比例则远低于其他三个类型,仅为 5.37%。各季节间海洋线虫的优势摄食类型有所差异,春夏季,2A 的数量最多,2B 的数量也低于 1B;但 2B 在秋季和冬季反而占主导地位,成为 4 种摄食类型中所占比例最高的类型。

海洋线虫口腔结构的差异代表了摄食类型的不同,摄食类型的变化反映了食物来源的不同,反应了沉积环境中有机物存在形式的差异^[32]。已有研究发现,潮间带沙滩中,1B 和 2A 一般占优势,而 1A 所占比例一般很低^[33]。1B 主要以沉积物中的小颗粒有机物为食,2A 主要以硅藻为食,二者的数量比值(1B/2A)可以在一定程度上指示海洋线虫食性的转换及底质中有机碎屑的多少^[34]。春夏两季,长江澳沙滩海洋线虫摄食类型 1B/2A 的比值分别为 0.74 和 0.71;秋冬季分别为 1.45 和 1.83。由此可以推断长江澳沙滩海洋线虫春夏季的主要食物来源是微生物,秋冬季的主要食物来源是有机碎屑。

3.4 海洋线虫的年龄结构及性比

为繁殖更多后代,在不稳定的环境中,一些海洋物种为了维持种群大小,倾向于保持较高数量的雌性个体^[35]。在海洋线虫群落结构中,一般雌性的数量略高于雄性的数量^[36]。本研究中,长江澳沙滩周年成体海洋线虫雌雄比例为 1.10:1,总体上符合该规律。不同季度中,除夏季海洋线虫雌雄比例为 1:1.18 外,其他三个季度雌性海洋线虫的数量均略高于雄性。有研究发现某些海洋线虫的性比受到温度的显著影响,在温度较高的季节,海洋线虫的雄性比例增大^[37]。

大部分海洋线虫的繁殖活动贯穿全年,并不在特定的时间进行繁殖^[38],海洋线虫群落中全年均存在幼龄个体。Warick 等^[38]对英国 Northumberland 近岸海洋线虫的研究发现,幼体海洋线虫在全年中均占主导地位,且周年内年龄结构保持稳定。然而 Lorenzen^[39]在德国湾的研究结果则表明海洋线虫群落中,幼龄海洋线虫所占的比例不超过 50%^[36]。本研究区域周年海洋线虫的幼体所占比例为 45.47%,且存在季节差异,与 Lorenzen 的研究结果较为接近。海洋线虫的年龄结构可能与其种类组成关系较为密切,不同种类的海洋线虫的繁殖时间与能力有所差异^[25]。长江澳沙滩冬季海洋线虫幼体比例最大,占 56.6%,这可能与海洋线虫的优势种类有关,冬季, Xyalidae 在丰度上占绝对优势,仅 *Theristus* 就占海洋线虫丰度的 24.42%。Xyalidae 为 r 对策者^[40],具有高的繁殖能量分配, Nicholas^[25]连续两年对澳大利亚沙滩海洋线虫的研究结果显示,除个别季

度外, *Theristus* 的幼体所占比例均高于 50%, 此结果可以在一定程度上解释长江澳沙滩冬季幼体比例高于成体的结果, *Theristus* 的高优势度与高幼体比例在一定程度上改变了冬季海洋线虫的年龄结构。本研究依据的信息有限, 不足以了解海洋线虫的性比对潮间带沙滩的生态意义, 更深入的研究有待进一步开展。

参考文献 (References):

- [1] 张志南. 美丽福建 美丽海洋. 福州: 海峡出版发行集团, 2014: 356-357.
- [2] Gheskiere T, Vincx M, Weslawski J M, Scapini F, Degraer S. Meiofauna as descriptor of tourism-induced changes at sandy beaches. *Marine Environmental Research*, 2005, 60(2): 245-265.
- [3] 杜永芬, 高抒, Warwick R M, 华尔. 海岸带湿地自由生活海洋线虫的生态功能研究进展. *科学通报*, 2014, 59(31): 3043-3056.
- [4] 张志南. 秦皇岛沙滩海洋线虫的数量研究. *青岛海洋大学学报*, 1991, 21(1): 63-75.
- [5] 张志南, 周红, 华尔, 慕芳红, 刘晓收, 于子山. 中国小型底栖生物研究的 40 年——进展与展望. *海洋与湖沼*, 2017, 48(4): 657-671.
- [6] 张婷. 厦门典型沙滩小型底栖动物生态学的研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2011.
- [7] 华尔, 李佳, 董洁, 徐凤凤, 张志南. 砂质潮间带自由生活海洋线虫对缺氧的响应——微型受控生态系研究. *生态学报*, 2012, 32(13): 3975-3986.
- [8] Somerfield P J, Warwick R M. *Meiofauna in Marine Pollution Monitoring Programmes: A Laboratory Manual*. Lowestoft, UK: Directorate of Fisheries Research, 1996: 9-16.
- [9] Wieser W. Die Beziehung zwischen Mundhöhlengestalt, Ernährungsweise und Vorkommen bei freilebenden marinen Nematoden; eine ökologisch-morphologische Studie. *Arkiv för Zoologi*, 1953, 4: 439-484.
- [10] Wieser W. Benthic studies in Buzzards Bay. II. The meiofauna. *Limnology and Oceanography*, 1960, 5(2): 121-137.
- [11] Chen Y Z, Guo Y Q. Two new species of *Lauratonema* (Nematoda: Lauratonematidae) from the intertidal zone of the East China Sea. *Journal of Natural History*, 2015, 49(29/30): 1777-1788.
- [12] 韦晓慧, 慕芳红, 杨世超, 王玉堃. 青岛薛家岛砂质潮间带小型底栖生物丰度和生物量. *中国海洋大学学报*, 2013, 43(10): 60-66.
- [13] 黄德铭, 刘晓收, 林明仙, 陈怀璞, 韦连明, 黄新, 张志南. 污水排海对小型底栖生物丰度和生物量的影响. *应用生态学报*, 2014, 25(10): 3023-3031.
- [14] 范士亮, 刘海滨, 张志南, 邓可, 袁伟. 青岛太平湾砂质潮间带小型底栖生物丰度和生物量的研究. *中国海洋大学学报*, 2006, 36(S1): 98-104.
- [15] 李佳, 华尔, 张志南. 青岛砂质潮间带小型底栖动物分布及季节动态. *应用生态学报*, 2012, 23(12): 3458-3466.
- [16] 丛冰清. 舟山砂质潮间带小型底栖生物空间分布及季节动态[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2011.
- [17] 许书会, 周红, 华尔, 雷莹, 张凯, 孙昕雨. 夏冬两季舟山砂质潮间带小型底栖生物的分布特征及影响因素. *中国海洋大学学报*, 2013, 43(8): 60-68.
- [18] Harris R P. The distribution and ecology of the interstitial meiofauna of a sandy beach at Whitsand Bay, East Cornwall. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom*, 1972, 52(1): 1-18.
- [19] Sharma J, Webster J M. The abundance and distribution of free-living nematodes from two Canadian Pacific beaches. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 1983, 16(2): 217-227.
- [20] 黄勇. 南黄海小型底栖生物生态学和海洋线虫分类学研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2005.
- [21] Menn I. Beach morphology and food web structure: comparison of an eroding and an accreting sandy shore in the North Sea. *Helgoland Marine Research*, 2002, 56(3): 177-189.
- [22] Riera R, Núñez J, Brito M D C, Tuya F. Temporal variability of a subtropical intertidal meiofaunal assemblage: contrasting effects at the species and assemblage-level. *Vie et Milieu-Life and Environment*, 2011, 61(3): 129-137.
- [23] Alongi D M. The ecology of tropical soft-bottom benthic ecosystems. *Oceanography and Marine Biology: An Annual Review*, 1990, 28: 381-496.
- [24] Boaden P J S, Platt H M. Daily migration patterns in an intertidal meiobenthic community. *Thalassia Jugoslavica*, 1971, 7: 1-12.
- [25] Nicholas W L. Seasonal variations in nematode assemblages on an Australian temperate ocean beach; the effect of heavy seas and unusually high tides. *Hydrobiologia*, 2001, 464(1/3): 17-26.
- [26] Hourston M, Warwick R M, Valesini F J, Potter I C. To what extent are the characteristics of nematode assemblages in nearshore sediments on the west Australian coast related to habitat type, season and zone? *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2005, 64(4): 601-612.
- [27] Tietjen J H. The ecology of shallow water meiofauna in two New England estuaries. *Oecologia*, 1969, 2(3): 251-291.
- [28] Albuquerque E F, Pinto A P B, de Queiroz Perez A D, Veloso V G. Spatial and temporal changes in interstitial meiofauna on a sandy ocean beach of South America. *Brazilian Journal of Oceanography*, 2007, 55(2): 121-131.

- [29] Maria T F, Paiva P, Vanreusel A, Esteves A M. The relationship between sandy beach nematodes and environmental characteristics in two Brazilian sandy beaches (Guanabara Bay, Rio de Janeiro). *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 2013, 85(1): 257-270.
- [30] Blome D, Faubel A, Schleier U. Investigations on eulittoral meiobenthos of exposed sandy beaches of eastern Australia;-including catalogues of free living marine nematode, gastrotrich, and turbellarian genera. [2018-01-17]. <https://www.researchgate.net/publication/254674298>.
- [31] Moreno M, Ferrero T J, Gallizia I, Vezzulli L, Albertelli G, Fabiano M. An assessment of the spatial heterogeneity of environmental disturbance within an enclosed harbour through the analysis of meiofauna and nematode assemblages. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2008, 77(4): 565-576.
- [32] Moens T, Vincx M. Observations on the feeding ecology of estuarine nematodes. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom*, 1997, 77(1): 211-227.
- [33] Schratzberger M, Warr K, Rogers S I. Functional diversity of nematode communities in the southwestern North Sea. *Marine Environmental Research*, 2007, 63(4): 368-389.
- [34] Lamshead P J D. Sub-catastrophic sewage and industrial waste contamination as revealed by marine nematode faunal analysis. *Marine Ecology Progress Series*, 1986, 29: 247-259.
- [35] Tahseen Q. Nematodes in aquatic environments: adaptations and survival strategies. *Biodiversity Journal*, 2012, 3(1): 13-40.
- [36] 郭玉清, 张志南, 慕芳红. 不同采样时期渤海自由生活海洋线虫种类组成的比较. *生态学报*, 2002, 22(10): 1622-1628.
- [37] dos Santos G A P, Derycke S, Fonsêca-Genevois V G, Coelho L C B B, Correia M T S, Moens T. Differential effects of food availability on population growth and fitness of three species of estuarine, bacterial-feeding nematodes. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 2008, 355(1): 27-40.
- [38] Warwick R M, Buchanan J B. The meiofauna off the coast of Northumberland. II. Seasonal stability of the nematode population. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom*, 1971, 51(2): 355-362.
- [39] Lorenzen S. Die Nematodenfauna der sublitoralen Region der Deutschen Bucht, insbesondere im Titan-abwassergebiet bei Helgoland. *Veröffentlichungen des Instituts für Meeresforschung in Bremerhaven*, 1974, 14: 305-327.
- [40] Bongers T, Alkemade R, Yeates G W. Interpretation of disturbance-induced maturity decrease in marine nematode assemblages by means of the maturity index. *Marine Ecology Progress Series*, 1991, 76: 135-142.