

天津海域自由生活线虫分类学多样性

胡桂坤 张青田*

天津科技大学, 天津市海洋资源与化学重点实验室 天津 300457

摘要: 在我国海域进行了很多自由生活线虫的研究, 但是线虫分类学多样性的报道极少。2007年春季在天津海域的15个站位进行了底栖生物调查, 对自由生活线虫样品进行了分类学多样性的分析。共鉴定出自由生活线虫87种, 隶属于2纲2亚纲5目7亚目14科39属。以色列纲(Chromadorea)线虫居多, 有74种, 占总种数的85%。线虫平均分类学差异性指数(Δ^+)的理论平均值为60.5, 分类学差异性变异(Λ^+)的理论平均值约为420。平均分类学差异性指数随站位而变, 变化幅度为49.8~63.0; 各站位分类学差异性变异的波动范围较大, 从233到514不等。这些结果表明, 线虫在一些站位的分类学信息有较大的不同。漏斗图显示, 西南部近岸海域的线虫群落组成的分类学多样性较差, 预示着环境受到干扰。线虫在西南部近岸4个站位的分类学差异性受到了化学因素的影响, 多个化学指标具有较高值; 同时也与沉积物的粒径和叶绿素含量有一定关系。与一些传统多样性指数比较, 分类学差异性指数在反应环境差异方面有较好的灵敏性。

关键词: 线虫; 小型底栖生物; 分类学多样性; 天津

中图分类号: Q959.17, X820.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 0250-3263 (2016) 04-552-09

The Taxonomic Diversity of Free-living Nematodes in Tianjin Offshore

HU Gui-Kun ZHANG Qing-Tian*

Tianjin Key Laboratory of Marine Resources and Chemistry, Tianjin University of Science and Technology, Tianjin 300457, China

Abstract: Many studies on free-living marine nematodes were carried out in Chinese seas, but the taxonomic diversity of nematodes was seldom reported. A benthic survey with fifteen stations was conducted in Tianjin offshore (Fig. 1) in spring 2007, and the taxonomic distinctness of nematodes was analyzed based on the nematode samples. A total of 87 nematode species belonging to 2 classes, 2 subclasses, 5 orders, 7 suborders, 14 families and 39 genera were identified in this cruise, excluding the juvenile and incomplete individuals. The majority of nematodes belonged to Chromadorea, which included 74 species and accounted for about 85% of all nematode species. Two taxonomic indices, the average taxonomic distinctness index (Δ^+) and the variation in taxonomic distinctness (Λ^+) of nematode assemblage, were calculated with PRIMER software. The results of Δ^+ and Λ^+ in each station were listed in Table 1. The theoretical average value of Δ^+ and Λ^+ were 60.5 and ca. 420, respectively. The values of Δ^+ varied with station, which ranged from 49.8 to 63.0; the

基金项目 天津市高等学校科技发展基金计划项目 (No. 20120524), 国家海洋局近岸海域生态环境重点实验室基金项目 (No. 201302);

* 通讯作者, E-mail: qtzhang@163.com;

第一作者介绍 胡桂坤, 女, 高级工程师; 研究方向: 海洋技术; E-mail: huguikun@163.com。

收稿日期: 2015-11-31, 修回日期: 2016-03-26 DOI: 10.13859/j.cjz.201604006

fluctuation of Λ^+ was huge, from 233 to 514. The two indices indicated that the nematode assemblages had big changes along with the station. The funnel plots, Fig. 2 and 3, showed that the taxonomic distinctness of nematode assemblages was lower in the coastal southwest area, indicating that the environment was disturbed. The taxonomic distinctness of nematodes in these four stations was affected by some chemical factors, and was related to the particle size and chlorophyll *a* content of sediment, too. Compared with four traditional diversity indices, the average taxonomic distinctness index was more sensitive to environmental difference. The results indicated that Δ^+ and Λ^+ were good indices to reflect the variations of nematode assemblage and environment.

Key words: Nematode; Meiofauna; Taxonomic diversity; Tianjin, China

生物多样性是人类赖以生存的物质基础, 如何保护生物多样性是全球生态学家和自然保护学家的主要任务之一。人们已经创建了多种指数, 如 Shannon 多样性指数、Pielou 均匀度指数、Margalef 丰富度指数等, 用来表示和比较生物多样性差异, 以及用于评价环境优劣。这些传统多样性指数流行的时间较长、地域较广, 在环境评价中发挥了重要作用, 但是也显露了应用中的一些缺陷, 例如对取样样本大小敏感, 对所有物种等同对待, 无法体现生物差别等, 影响了人们对群落结构的理解和不同数据间的比较。在环境评价和生物保护时, 也需要了解生物的隶属关系及相应的功能多样性 (Gwalis et al. 2010)。分类学多样性指数则试图抓住生物种系发生多样性, 更接近反映生物功能多样性, 在一定程度上解决了传统多样性指数遇到的问题 (Clarke et al. 1999)。张青田等 (2016) 总结了国内浮游生物、大型底栖动物、鱼类和植物等方面的一些工作, 国内对海洋自由生活线虫的分析相对较少。

自由生活海洋线虫是海洋小型底栖动物的一个重要类群, 是底栖生态系统的重要组成部分, 在生态和环境分析中发挥着重要的作用 (Sandulli et al. 2014); 水生自由生活线虫的分类学研究也是非常有价值的, 因为它们提供了研究功能生态、行为和进化论观点所必须的基本表型信息 (Decraemer et al. 2015)。从近岸的高潮线到深海的最深海沟处, 从寒冷的两极到深海脊上的高温热泉生物群落都有线虫的踪迹

(Shimanaga et al. 2007)。在大多数海洋生境中, 海洋线虫数量占后生底栖动物的 60% 以上, 在我国近海往往超过 90% (张青田等 2009)。关于渤海小型底栖动物的研究起步较早, 多集中在渤海中部和渤海海峡区域, 对渤海湾近岸区域的研究报道不多, 但是这些结果为生态和环境分析提供了重要参考资料 (张培玉 2005, 张青田等 2009, Zhang et al. 2010)。进入 21 世纪后, 在天津海域陆续进行了自由生活线虫的研究, 包括线虫的群落分析 (胡桂坤等 2012, 张青田等 2012a, b) 和多样性分析等 (张青田等 2011), 也为底栖线虫分类学多样性的研究奠定了基础。环渤海区域是我国经济快速发展地区, 海洋环境正面临着干扰的威胁。在天津海域开展自由生活线虫的分类学多样性研究不但可以丰富我国海洋底栖生物学的研究内容, 而且可以和其他指数的结果进行对比, 为海洋环境监测和评价提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 站位设置和外业取样

在天津市近岸海域 10 m 等深线内设置 15 个站位采集小型底栖生物样品 (图 1), 本研究所需样品于 2007 年 4 月底采集。使用底面积 0.05 m² 的箱式采泥器采集沉积物样方, 一般每个站位采集 4 个样方。然后用有机玻璃管从采泥器中采集小型底栖生物的芯样, 芯样长度 10 cm; 每站采集 4 个芯样。为避免扰动的影响, 采样位置必须离开采泥器边缘 2 cm 以上, 然后

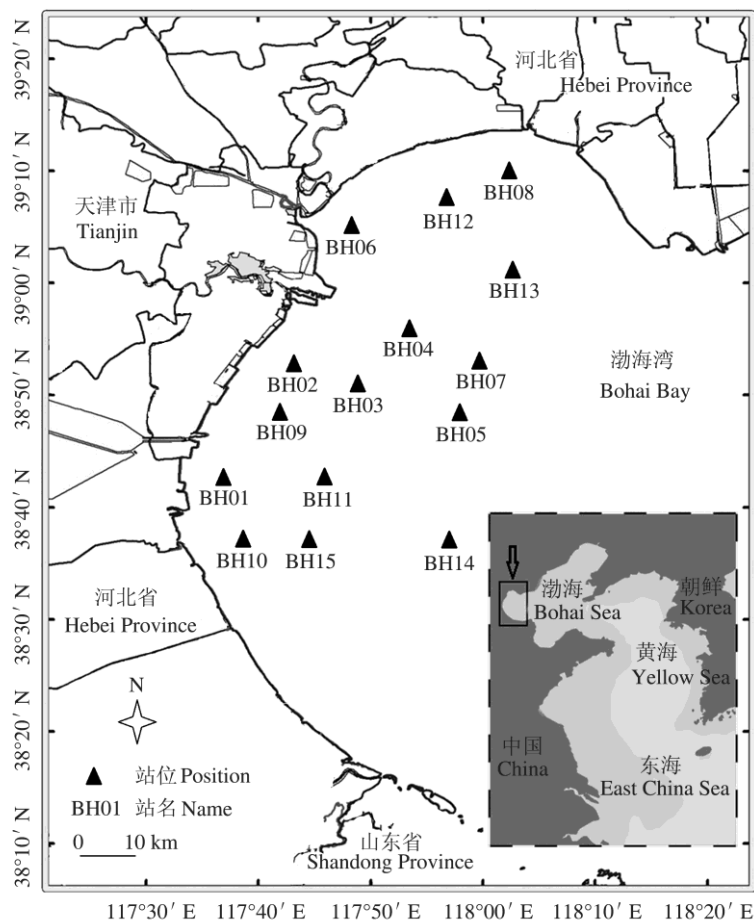


图 1 自由生活线虫调查的采样站位

Fig. 1 Sampling stations for free-living nematodes in Tianjin offshore

速按 0~2 cm、2~5 cm 和 5~10 cm 层次将芯样分段，分别装入样品瓶。样品经麻醉、固定后保存（参照海洋调查规范 GB/T 12763.6-2007）。同时，合作单位也同船测定了环境因素，分析用理化因子的数据由天津市海洋局提供。

1.2 室内处理和生物鉴定

回实验室后及时整理和清点芯样。采用离心法从沉积物中分选出小型底栖生物。分选前，生物样品经虎红染液染色约 24 h。沉积样品经过 500 μm 和 41 μm 孔径套筛冲洗，41 μm 套筛截留物转入硅溶胶(LUDOX-TM)中进行离心，上清液用 41 μm 套筛过滤后转入培养皿。在高倍体视显微镜下将线虫挑出以备制片。因为线

虫个体较小，必须制成装片才能进行观察和鉴定。封片前，要用盐酸和酒精对载玻片和盖玻片进行处理。用 50%的酒精和甘油按体积比 9 : 1 配成的溶液对虫体进行处理。等待酒精和水挥发，甘油渗入虫体内，使线虫透明便于观察。制片时挑选体积大小较一致的线虫 10~20 条放入一个片子，要求个体尽量分散，避免重叠到一起，同时，选取 3~4 粒直径与虫体直径大致相同的玻璃珠，尽量放置于线虫周围，然后加盖玻片，四周用加拿大树胶封闭（黄勇 2005）。待树胶干燥后，在 Olympus BX51TF 系统显微镜下进行参数测量和鉴定。

1.3 数据处理

生物分类学的多样性指数有多个形式，在

生物学研究和环境评价中常用的有如下两个指数 (Clarke et al. 1998, 2001): 平均分类学差

异性指数 (Δ^+): $\Delta^+ = \frac{2[\sum_{i<j} \omega_{ij}]}{s(s-1)}$, 分类学

差异性变异指数 (Λ^+): $\Lambda^+ = \frac{2[\sum_{i<j} (\omega_{ij} - \Delta^+)^2]}{s(s-1)}$,

式中, 因子 ω_{ij} 是“差异性权重”, 表示等级分类中第 i 种和第 j 种生物间的路径长度; s 是物种数量, 在双重求和中, i 和 j 表示 s 范围内的物种数, Δ^+ 表示任何两个随机选择的物种之间的平均分类路径长度; Λ^+ 指数则是为了表示生物类群在等级分类树中分布的不均匀程度。即使平均分类学差异性指数 (Δ^+) 值相等时, 生物间亲缘关系的远近会影响生物组成的不均匀程度。一些属具有很多种类时将减小平均分类学差异性指数 (Δ^+) 值, 而某些科只增加一种或很少种时将会增加平均分类学差异性指数 (Δ^+) 值; 因此, 需要结合分类学差异性变异指数 (Λ^+) 值来表示生物分类学的不均匀程度 (Clarke et al. 2001, Warwick et al. 2001)。根据海洋生物数据库 (www.marinespecies.org) 的最新资料确定线虫的分类学信息。采用门级别为 100 的权重系数系列, 其他级别分类阶元对应的权重系数分别为: 纲 87.5, 亚纲 75.0, 目 62.5, 亚目 50.0, 科 37.5, 属 25.0, 种 12.5。上述分类学多样性指数及 95% 置信曲线图由 PRIMER® 软件包中的 TAXDTEST 模块计算和绘制。

2 结果与分析

2.1 线虫分类信息概述

本次调查共采集到海洋自由生活线虫 87 种, 不包括未鉴定的幼体和线虫残体。线虫组成的详细名录参见张青田等 (2011) 文献, 这里不赘述。生物的分类学信息会随着人们的认识而有所改变, 根据前述海洋生物数据库 2015 年 5 月底的分类学信息, 海洋线虫已经由 2 个纲变为了 5 个纲, 分别是泄腺纲

(Adenophorea)、色矛纲 (Chromadorea)、刺嘴纲 (Enoplea)、胞管肾纲 (Secernentea) 和未定类 (Nematoda incertae sedis), 本研究的线虫隶属于 2 纲 2 亚纲 5 目 14 科 39 属。其中, 以色矛纲线虫居多, 有 74 种, 占总种数的 85%; 刺嘴纲线虫有 13 种, 占总种数的 15%。色矛纲色矛亚纲 (Chromadoria) 出现 4 个目, 为疏毛目 (Araeolaimida)、色矛目 (Chromadorida)、单宫目 (Monhysterida) 和绕线目 (Plectida); 刺嘴纲刺嘴亚纲 (Enoplia) 只出现了嘴刺目 (Enoplida)。线虫种类的出现频率差异较大, 生物丰度和出现频率以拉氏矛咽线虫 (*Dorylaimopsis rabalaisi*) 占有绝对优势, 也是唯一在 15 个站位都检测出的线虫。囊咽线虫属 (*Sphaerolaimus*) 的线虫也有很高的出现频率, 但是多个种类只在 1 或 2 个站位出现, 数量也不多。

2.2 分类学差异性指数的变化

根据前文 1.3 节的指数公式和线虫分类学信息计算各个站位的平均分类学差异性指数 (Δ^+) 及分类学差异性变异指数 (Λ^+) (表 1)。平均分类学差异性指数 (Δ^+) 的最高值为 63.02, 出现在 BH03 站位, 处于调查海域的中部, 这个站位也是平均分类学差异性指数 (Δ^+) 数值唯一超过 60 的站位。平均分类学差异性指数 (Δ^+) 最低值为 49.81, 出现在 BH09 站位, 邻近最高值站位, 但是位置更靠近岸边, 该站是平均分类学差异性指数 (Δ^+) 数值唯一小于 50 的站位。最高值和最低值的两个站位邻近, 均位于调查海域的中部, 表明这个区域线虫种类组成的变化较大。

对于平均分类学差异性指数 (Δ^+) 来说, 除了最高值和最低值有明显差距之外, 其余结果的差异并不悬殊。调查海域的西南部近岸是明显的平均分类学差异性指数 (Δ^+) 低值区域。从 BH06 站位 (北塘河口外侧) 至 BH04 站位 (海河口外侧) 的连线海域也是平均分类学差异性指数 (Δ^+) 低值区域, 而且, 深水处 BH13 站位的平均分类学差异性指数 (Δ^+) 也不高,

表 1 线虫平均分类学差异性指数(Δ^+)及分类学差异性变异指数(Λ^+)的站位比较Table 1 Comparison of average taxonomic distinctness (Δ^+) and variation in taxonomic distinctness (Λ^+) in each station

站位 Station	平均分类学差异性 (Δ^+) Average taxonomic distinctness		分类学差异性变异 (Λ^+) variation in taxonomic distinctness	
	结果 Value	显著性 (%) Significance	结果 Value	显著性 (%) Significance
BH01	50.63	1.0	259.51	2.0
BH02	58.97	64.7	347.58	22.6
BH03	63.02	56.5	469.78	38.2
BH04	52.22	17.6	245.06	22.4
BH05	54.31	15.0	353.29	37.8
BH06	52.50	31.2	233.33	20.4
BH07	59.32	81.1	342.15	57.1
BH08	58.86	75.1	424.28	80.9
BH09	49.81	0.2	383.37	47.2
BH10	51.51	0.2	261.07	0.2
BH11	57.41	31.0	442.82	63.7
BH12	55.83	52.5	504.17	27.6
BH13	53.75	6.4	361.39	42.6
BH14	57.26	45.2	513.68	12.2
BH15	51.96	1.4	341.83	22.4

这样就将平均分类学差异性指数 (Δ^+) 的高值区分为南北两个部分。南部以 BH03 站位为中心的高值区占据了大部分海域。低平均分类学差异性指数 (Δ^+) 值意味着多数线虫种集中于少量较低等级的分类阶元 (属或科), 在较高分类阶元上的差别也不大, 多数站位只有一个纲的线虫。

即使平均分类学差异性指数 (Δ^+) 值相等时, 生物间亲缘关系的远近也会影响生物组成的不均匀程度。本研究分类学差异性变异指数 (Λ^+) 的波动范围较大, 从 233.33 到 513.68 不等 (表 1), 最高值出现在 BH14 站位, 最低值出现在 BH06 站位。这两个站位相距甚远, 一个在调查海域的北部, 北塘河口附近, 而另一个位于调查海域的西南部最外侧。低值区以 BH06 站位为中心, 一部分沿着海岸伸展, 另一部分向远岸方向的 BH04 站位延伸, 将高值区分隔为南北两个部分, 以 BH12 站位为中心

的高值区范围较小, 从 BH14 开始向 BH03 站位延伸的高值区范围较大。高分类学差异性变异指数 (Λ^+) 值区域的线虫不均匀性高, 两个纲的线虫都有, 物种也常常属于不同的属, 物种间的亲缘关系较远。在低分类学差异性变异指数 (Λ^+) 区域往往只发现一个纲的线虫, 目阶元的数量也较少, 生物亲缘关系较近。

2.3 差异性指数的漏斗图分析

分类学差异性指数的漏斗图可以直观分析研究区域的理论平均值, 以及判断不同位置或者不同时期生物群落的分类学差异, 并常常被用来判断环境是否退化。计算得到本航次平均分类学差异性指数 (Δ^+) 的理论平均值约为 60.5 (图 2); 分类学差异性变异指数 (Λ^+) 的理论平均值约为 420, 在线虫种类数小于 10 的时候, 该值偏小 (图 3)。图 2 显示, 在 15 个站位中只有 BH03 站位的平均分类学差异性指数 (Δ^+) 结果高于理论平均值, 接近平均值的大约有 6

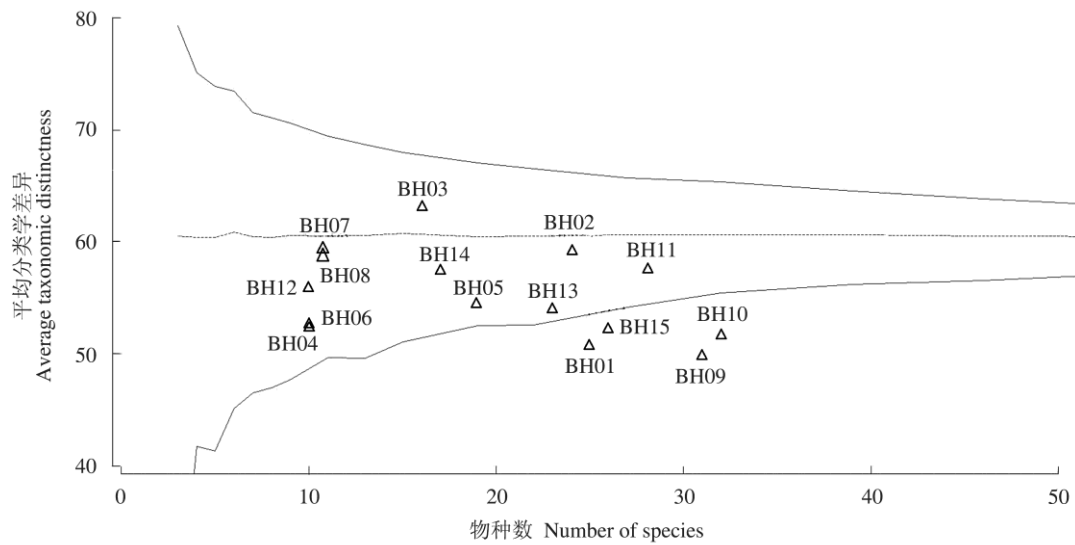


图 2 天津海域底栖线虫平均及各站位分类学差异指数 (Δ^+) 的漏斗分布图 (95%置信区间)

Fig. 2 Funnel plot for average taxonomic distinctness (Δ^+) with 95% confidence limit of each station in the Tianjin offshore

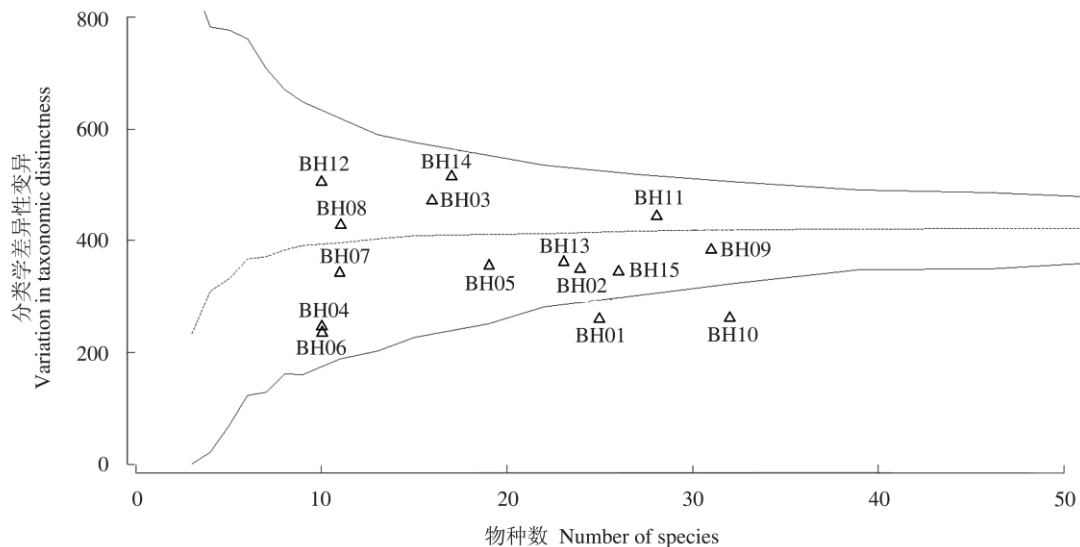


图 3 天津海域底栖线虫平均及各站位分类学差异变异指数 (Δ^+) 的漏斗分布图 (95%置信区间)

Fig. 3 Funnel plot for variation in taxonomic distinctness (Δ^+) with 95% confidence limit of each station in the Tianjin offshore

个站位, 生物分类学差异性明显不好的有 BH01、BH09、BH10 和 BH15 4 个站位, 均落于 95% 置信区间之外。这 4 个站位相互临近, 位于调查海域的西南部。根据经验, 低于 95% 置信区间的平均分类学差异性指数 (Δ^+) 值预

示着环境受到干扰, 环境质量明显低于其他站位。

分类学差异性变异指数 (Δ^+) 的结果显示, 只有 BH01 和 BH10 站位的线虫分类学不均匀度很差, 低于 95% 的置信下限。其他站位的结

果都在漏斗之内, 表明其线虫分类学差异的变异在合理范围之内。与 Δ^+ (图 2) 不同, 有 5 个站位的分类学差异性变异指数 (Λ^+) 值超过理论平均值, 低于 95% 下限的站位也减少为 2 个, 说明 BH09 和 BH15 站位虽然线虫分类学差异欠佳, 但是差异的均匀性较好, 种类间的亲缘关系较远。

3 讨论

3.1 线虫分类学指数的比较

国内陆续报道了我国海域线虫的种类数量 (徐重等 2014), 但是涉及分类学差异性的报道较少。Guo 等 (2002) 研究了渤海线虫的平均分类学差异性指数, 结果为 4.341 ~ 4.787, 其在渤海湾仅选择一站位, 两个航次的结果为 4.341 和 4.385, 低于其他站位。由于该文使用的权重系数与本文不同, 结果不具有可比性。刘晓收等测定南黄海线虫的平均分类学差异性指数 (Δ^+) 值为 64.23 ~ 69.09 (未发表数据), 稍高于本研究的结果。在英国近海, 线虫平均分类学差异性指数 (Δ^+) 值大约为 74 ~ 79, 分类学差异性变异指数 (Λ^+) 值大约 450 ~ 620 (Clarke et al. 1999, 2001), 总体上高于我国海域的水平。

3.2 分类学指数和环境因素的关系

Warwick 等 (1998) 认为生境类型会影响线虫分类学差异性, 但除非生境有一定方式的退化, 平均分类学差异性指数 (Δ^+) 值不会低于 95% 置信区间的下限。所以, 平均分类学差异性指数 (Δ^+) 和分类学差异性变异指数 (Λ^+) 常常被用来分析环境污染程度。在本研究中, BH01、BH09、BH10 和 BH15 站位的数据落于 95% 置信区间之外, 说明这些站位的线虫分类学多样性较低, 环境受到干扰。在这 4 个站位的区域, 沉积物化学物质浓度也显示出了该区域的特殊性。根据海洋沉积物质量标准 (GB18668-2002) 判断, 这 4 个站位沉积物中总汞、砷、铜、铅、锌、铬、镉、有机质、石油类、硫化物、滴滴涕、六六六、多氯联苯和

多环芳烃等均等因素并未超标。分析比较化学因素的分布情况后, 发现有几项指标为调查海域最高值或明显高于邻近海域, 例如, 氧化还原电位 Eh (约 200 mV), 硫化物 ($20 \times 10^{-6} \sim 37 \times 10^{-6}$), 总有机碳 (大于 0.5×10^{-6}), 油类 ($55 \times 10^{-6} \sim 760 \times 10^{-6}$), 以及总铬 (大于 5×10^{-6})。数值较高是 4 个站位所属小块区域与邻近区域的比较, 但在 4 个站位区域内, Eh 和硫化物的高值区域并不相同。同时, 这 4 个站位所在区域的一些化学因素浓度又低于邻近海域, 例如, 总氮、重金属 (Zn, Cu, Pb 和 Cd) 的浓度低于邻近站位。可以推断, 虽然这 4 个站位所在海域的化学因素并未出现严重污染, 但是是一些污染物的浓度明显高于其他海域, 这些沉积物化学因素的综合差异已经影响了该区域自由生活线虫的类别。环境退化造成一些生物灭绝或逃离, 具有相似特征和较近亲缘关系的线虫容易生存下来, 造成平均分类学差异性指数 (Δ^+) 值变小。本研究的平均分类学差异性指数 (Δ^+) 结果较敏感地反映出了有化学污染趋势的海域。

平均分类学差异性指数 (Δ^+) 和分类学差异性变异指数 (Λ^+) 对环境退化的反应稍有差异, BH9 和 BH15 站位表现出正常的群落不均匀性 (仍然低于理论平均值), 而 BH01 和 BH10 站位的线虫分类不均匀性依然较差。这些差异可能受到化学、物理和食物的影响。除了前述化学影响的共同作用, 一些化学因素在 4 个站位间也有明显差别, 可能影响到线虫的组成。BH01 和 BH10 站位具有较低的总氮浓度 ($398 \times 10^{-6} \sim 490 \times 10^{-6}$) 和 As 浓度 ($15.8 \times 10^{-6} \sim 17.1 \times 10^{-6}$), 与其他站位比较也属于较低水平; 而另两个站位的总氮 ($535 \times 10^{-6} \sim 591 \times 10^{-6}$) 和 As 浓度 ($18.1 \times 10^{-6} \sim 18.5 \times 10^{-6}$) 则稍高, 在各站中属于较高水平。根据 GB18668-2002 的阈值, As 的浓度都未超标, 处于良好水平, 该标准中没有总氮的评价标准。另一方面, 可能受物理因素和食物因素的影响较大, 因为这 4 个站位的粒度参数和叶绿素 a

(chlorophyll a, Chl-a) 含量等也存在差异(张青田等 2010)。

与线虫群落结构相关性最高的三个环境因子依次为有机质含量(%)、粘土含量(%)和叶绿素 a (Chl-a) 含量, 这三个环境因子的组合与群落结构之间的相关程度最为紧密(黄勇等 2007)。沉积物中的叶绿素 a (Chl-a) 和脱镁叶绿酸 (phaeophorbide, Pha-a) 的多少是底栖线虫食物多寡的表示形式之一(黄勇 2005)。在南黄海, 自由生活线虫的种类数量与有机质含量、含砂量呈显著相关, 与叶绿素 a (Chl-a) 含量, 以及与叶绿素 a (Chl-a) 和脱镁叶绿酸 (Pha-a) 的总和均极显著相关。BH01 和 BH10 站位具有食物较少的特征, 叶绿素 a (Chl-a) 含量仅为 0.96×10^{-6} 和 0.59×10^{-6} , 脱镁叶绿酸 (Pha-a) 在 BH01 站位最低; 可以认为叶绿素含量在一定程度上降低了线虫的多样性和种类的均匀性。而 BH09 和 BH15 站位具有较高的叶绿素量, 可以允许更多种类线虫生存, 其分类学差异性变异指数 (Δ^+) 并未低于 95% 置信区间。

在南黄海沉积物粒度最小(中值粒径为 8.64 和 7.64) 的两个站位, 线虫多样性最低, 在一定程度上反映了线虫物种多样性与沉积物环境之间的关系(黄勇 2005)。本研究中, 传统指数在沉积物粒径较细的站位 (BH10) 并未表现出较低的情形。但是, 在沉积物最细的 BH10 和最粗的 BH01 站位, 其平均分类学差异性指数 (Δ^+) 值和分类学差异性变异指数 (Δ^+) 值都处于非常低的水平。这预示着极高和极低的粒度值都降低了线虫的多样性, 影响其类别组成。

3.3 和已有文献的传统指数比较

包含分类学信息的分类学差异性指数平均分类学差异性指数 (Δ^+) 和传统多样性指数(张青田等 2011) 的变化趋势存在差异。如前所述, 平均分类学差异性指数 (Δ^+) 较好地显示了调查海域西南部沿岸的污染趋势, 而传统的种类数、Margalef 丰富度指数、Shannon 指数和

Pielou 均匀度指数却总体上显示这些区域具有较高的值, 环境好于其他站位。由此分析, 环境污染的程度会对生物多样性产生影响, 环境因素的综合作用也具有一定的影响力, 尤其是在没有出现某种严重污染物的情况下。在本研究中, 分类学差异性指数反映出了多个污染物综合作用的结果, 比其他 4 个传统多样性指数灵敏。

致谢 对参与野外调查的船只, 以及天津科技大学、天津市水产研究所和国家海洋技术中心的相关人员表示感谢; 感谢天津市海洋局提供了一部分同期的环境资料。感谢 K R Clarke, R M Warwick 和刘晓收的积极交流和建议; 感谢匿名审稿人的宝贵意见。

参 考 文 献

- Clark K R, Warwick R M. 1998. A taxonomic distinctness index and its statistical properties. *Journal of Applied Ecology*, 35(4):523-531.
- Clarke K R, Warwick R M. 1999. The taxonomic distinctness measure of biodiversity: weighting of step lengths between hierarchical levels. *Marine Ecology Progress Series*, 184(3): 21-29.
- Clarke K R, Warwick R M. 2001. A further biodiversity index applicable to species lists: variation in taxonomic distinctness. *Marine Ecology Progress Series*, 216(8): 265-278.
- Decraemer W, Backeljau T. 2015. Utility of classical alpha-taxonomy for biodiversity of aquatic nematodes. *Journal of Nematology*, 47(1): 1-10.
- Guo Y Q, Warwick R M, Zhang Z N, et al. 2002. Freelifving marine nematodes as a pollution indicator of the Bohai Sea. *Journal of Environmental Sciences*, 14(4): 558-562.
- Gwali S, Okullo P, Hafashimana D, et al. 2010. Taxonomic diversity, distinctness, and abundance of tree and shrub species in Kasagala forest reserve in Uganda: implications for management and conservation policy decisions. *Tropical Conservation Science*, 3(3): 319-333.
- Sandulli R, Semprucci F, Balsamo M. 2014. Taxonomic and functional biodiversity variations of meiobenthic and nematode

- assemblages across an extreme environment: a study case in a Blue Hole cave. *Italian Journal of Zoology*, 81(4): 508–516.
- Shimanaga M, Nomaki H, Suetsugu K, et al. 2007. Standing stock of deep sea metazoan meiofauna in the Sulu Sea and adjacent areas. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 54 (1/2): 131–144.
- Warwick R M, Clarke K R. 1998. Taxonomic distinctness and environmental assessment. *Journal of Applied Ecology*, 35(4): 532–543.
- Warwick R M, Clarke K R. 2001. Practical measures of marine biodiversity based on relatedness of species. *Oceanography and Marine Biology: an Annual Review*, 39(1): 207–231.
- Zhang Q T, Wang X H, Hu G K. 2010. Evaluation of estimation methods for meiofaunal biomass from a meiofaunal survey in Bohai Bay. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 28(1): 82–87.
- 胡桂坤, 张青田. 2012. 海洋自由生活线虫群落和环境的关系研究. *海洋通报*, 31(4): 415–420.
- 黄勇. 2005. 南黄海小型底栖生物生态学和海洋线虫分类学研究. 青岛: 中国海洋大学博士学位论文, 1–203.
- 黄勇, 张志南, 刘晓收. 2007. 南黄海冬季自由生活海洋线虫群落结构的研究. *海洋与湖沼*, 38(3): 199–205.
- 徐重, 黄勇. 2014. 中国自由生活海洋线虫研究进展. *聊城大学学报: 自然科学版*, 27(1): 55–60.
- 张培玉. 2005. 渤海湾近岸海域底栖动物生态学与环境质量评价研究. 青岛: 中国海洋大学博士学位论文, 1–204.
- 张青田, 胡桂坤, 杨若然. 2016. 分类学多样性指数评价生态环境的研究进展. *中国环境监测*, 32(2): 92–98.
- 张青田, 王新华, 房恩军, 等. 2009. 天津近海小型底栖动物丰度研究. *海洋通报*, 28(2): 57–64.
- 张青田, 王新华, 房恩军, 等. 2011. 天津近岸自由生活线虫多样性分析. *四川动物*, 30(3): 394–397.
- 张青田, 王新华, 胡桂坤. 2010. 天津近岸海域沉积物叶绿素状况分析. *天津科技大学学报*, 25(6): 18–21.
- 张青田, 王新华, 胡桂坤. 2012a. 底栖线虫和桡足类丰度比与环境的关系分析. *南开大学学报: 自然科学版*, 45(5): 52–57.
- 张青田, 王新华, 胡桂坤. 2012b. 渤海湾潮下带底栖线虫群落的垂直分布. *海洋科学进展*, 30(3): 416–422.