

# 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

曲方圆 于子山\*

(中国海洋大学海洋生命学院, 山东青岛 266003)

**摘要:** 根据文献资料, 系统整理了黄海大型底栖动物物种名录, 并得到了其平均分类差异指数和分类差异变异指数的理论平均值及95%置信区间漏斗图。结果表明, 黄海共有大型底栖动物1,360种, 分属于17门35纲91目368科842属。其平均分类差异指数的理论平均值为93.7, 分类差异变异指数为213.6。将已知受到中度扰动的胶州湾部分站位真实值叠加到平均分类差异指数的95%置信区间漏斗图中, 发现全部站位均显著低于95%置信区间, 显示了平均分类差异指数在海洋污染监测方面的良好应用前景。

**关键词:** 分类多样性, 大型底栖动物, 黄海

## The application of taxonomic diversity in macrobenthic ecology: taking Yellow Sea for example

Fangyuan Qu, Zishan Yu\*

College of Marine Life Sciences, Ocean University of China, Qingdao, Shandong 266003

**Abstract:** Using all available taxonomic data, we updated the master list of macrobenthos for the Yellow Sea, analyzed its taxonomic diversities and 95% probability funnels. There have been 1,360 species, belonging to 17 phyla, 35 classes, 91 orders, 368 families and 842 genera of macrobenthos recorded in the Yellow Sea. The value of average taxonomic distinctness for the region was 93.7, and the variation in taxonomic distinctness was 213.6. To explore the efficacy of these two diversity measures for environmental assessment, we superimposed estimates of these two values for some moderately polluted sites in Jiaozhou Bay on the 95% probability funnels, and all of the stations fell significantly below the 95% probability funnel of average taxonomic distinctness. This result shows the good application foreground of taxonomic diversity in marine pollution monitoring.

**Key words:** taxonomic diversity, macrobenthos, Yellow Sea

生物多样性的含义十分广泛, 不仅包括物种的多样性, 还包括物种间进化关系、进化历史以及生态系统等各种层面的多样性。传统的物种多样性指数, 如 Shannon-Wiener 多样性指数 (Shannon & Weaver, 1949), 反映的只是物种层面的多样性, 它将群落中每个物种视为一致, 没有考虑到各个物种彼此之间在进化关系以及分类距离上的远近。同时在实际的污染监测应用中也存在着许多问题, 如: 受采样大小、方法及环境类型影响很大; 对于人为

干扰的响应变化非线性等 (Connell, 1978; Leonard *et al.*, 2006)。试想, 两个具有相同种数的群落, 一个是由同一个属的不同物种组成, 另一个是由不同门的物种组成, 这两个群落的生物多样性肯定是不相同的, 而传统的物种多样性指数却不能区别这两个群落。因此, 要完整地体现一个群落的生物多样性, 需要将其群落结构及复杂性也考虑在内 (Tilman *et al.*, 1997)。因而将物种之间的分类距离纳入到生物多样性的计算中这一思想, 越来越为人们所重视

收稿日期: 2009-06-30; 接受日期: 2009-11-11

基金项目: 国家 908 专项: ST-02 区块水体环境调查与研究; 山东省 908 专项生物生态和化学调查

\* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: yu\_zishan@ouc.edu.cn

(Anand & Orloci, 1996)。基于上述思想, Warwick和Clarke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, AvTD,  $\Delta^+$ )和分类差异变异指数(variation in taxonomic distinctness, VarTD,  $\Delta^+$ ) (Warwick & Clarke, 1995; Clarke & Warwick, 1998, 2001)。Warwick认为这些分类多样性指数能够克服传统物种多样性指数的缺点, 具有平均值不受采样方法及环境条件影响、仅用种名录便可进行计算等优势。

该类指数提出后得到了广泛的应用, 目前主要用于海洋大型底栖动物(Warwick & Turk, 2002)、自由生活线虫(Gambi & Vanreusel, 2003)以及鱼类(Emmanuil & Athanassios, 2005)等生物群落。Warwick(Warwick & Clarke, 1995; Warwick, 1998)通过研究北海大型底栖动物以及英国线虫发现, 受到污染的海区其分类多样性指数低于未受污染海区, 因此提出该类指数在海洋环境污染监测中具有良好应用前景。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(Raut *et al.*, 2005)。然而, 在某些研究中(Mouillot *et al.*, 2005)也发现 $\Delta^+$ 在污染程度增强时反而有升高的趋势, 这使得 $\Delta^+$ 的污染监测能力受到了质疑, 但对于这种现象仍无法有确切的解释。我国对于该类指数的应用起步较晚, 目前仅应用于对长江口大型底栖动物<sup>①</sup>、渤海线虫(Guo *et al.*, 2001)以及黄、渤海与长江口鱼类(徐宾铎等, 2005; 张衡和陆健健, 2007)多样性的研究。

本文的目的有二: 首先, 搜集整理现有黄海大型底栖动物分类学书籍、文献, 并结合2006–2007年908专项对北黄海海域大型底栖动物的调查资料, 建立较为全面而系统的黄海大型底栖动物物种名录, 在此基础上计算 $\Delta^+$ 以及 $\Delta^+$ 的理论平均值及两者的95%置信区间漏斗图, 为今后开展黄海不同海区、时期、采样方式的大型底栖动物多样性对比提供基础资料; 其次, 将已知受到中度扰动的南黄海胶州湾部分站位真实值叠加到95%置信区间漏斗图中, 对该类多样性指数在海洋污染监测方面的应用

作初步的探索, 并结合本文结果深入分析 $\Delta^+$ 在海洋污染监测方面存在的问题。

## 1 材料与方法

### 1.1 数据来源

依据《中国海洋生物种类与分布》(黄宗国, 2008)以及其他分类学文献(杨德渐和孙瑞平, 1988; 齐钟彦等, 1989; 杨德渐和王永良, 1996; 吴宝铃等, 1997; 孙瑞平和杨德渐, 2004; 任先秋, 2006; 徐凤山和张素萍, 2008; 类彦立和孙瑞平, 2008), 系统整理黄海大型底栖动物种类及其相应的分类层次, 排除同种异名的情况, 建立全面的黄海大型底栖动物物种名录。

胶州湾站位分布详见于子山等(2000), 选用1995年9月的B1、B2、B3和C3站数据进行计算。

### 1.2 数据分析

采用平均分类差异指数和分类差异变异指数对黄海大型底栖生物分类多样性进行分析。

平均分类差异指数可以在仅存在种名录时进行计算, 其含义为种名录中任意一对物种之间的平均分类距离路径长度。

$$\Delta^+ = \frac{\sum_{i < j} \omega_{ij}}{s(s-1)/2} \quad (\text{Clarke \& Warwick, 1998}) \quad (1)$$

其中 $s$ 为名录中的种类数。 $\omega_{ij}$ 为两个物种之间分类距离的路径长度权重值。

分类差异变异指数与平均分类差异指数一样, 也是可以在只有种名录存在的情况下进行计算。其含义为物种间路径长度的差异程度, 衡量的是物种间分类距离的“不均匀性”。

$$\Delta^+ = \frac{\sum_{i \neq j} (\omega_{ij} - \bar{\omega})^2}{s(s-1)} = \frac{\sum_{i \neq j} \omega_{ij}^2}{s(s-1)} - \bar{\omega}^2 \quad (\text{Clarke \& Warwick, 2001}) \quad (2)$$

其中 $\bar{\omega} = \Delta^+$ 。

采用PRIMER 5.0软件对数据进行分析。先通过特定程序对所研究区域的物种名录(master list)进行随机抽样(程序中默认1,000次), 作出多样性值的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, 如果真实值在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; 如果在95%置信区间外, 则拒绝零假设。在海洋污

<sup>①</sup> 刘文亮 (2007) 长江河口大型底栖动物及其优势种探讨。硕士论文, 华东师范大学河口海岸学国家重点实验室。

染监测中, 低于95%置信区间通常意味着环境受到了扰动。而 $\Delta^+$ 与 $\Delta^+$ 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 $\Delta^+$ 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 $\Delta^+$ 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)。若真实值处于相应抽样种数的等值线范围之内, 则接受零假设; 反之, 则拒绝。

本文对数据处理所选用的分类等级为种、属、科、目、纲、门, 各等级间的路径距离权重值( $\omega_{ij}$ )为等差递增, 即种间16.67、属间33.33、以此类推直至门间100。

2 结果

2.1 黄海大型底栖动物种类组成

黄海共有大型底栖动物17门35纲91目368科842属1,360种(表1)。软体动物最多, 占总种数的29.6%, 环节动物与节肢动物次之, 分别占25.1%和23.3%, 种数在各类群中的分布较为均匀。

2.2 平均分类差异指数及分类差异变异指数

黄海大型底栖动物平均分类差异指数( $\Delta^+$ )的

理论平均值为93.7, 其理论平均值不随抽样种数的变化而变化(图1A)。分类差异变异指数( $\Delta^+$ )的理论平均值为213.6, 其理论平均值仅在抽样种类数极少时有所减少, 也不随种数的变化而变化(图1B)。

2.3 分类多样性指数在污染监测方面的应用: 以胶州湾为例

胶州湾底栖动物中以环节动物最多, 为24种, 占64.9%; 软体动物其次, 为9种, 占24.3%; 节肢动物与棘皮动物各2种, 分别占5.4%(于子山等, 2000), 种数在门类间的分布不均匀。各站位基本参数见表2。

4个站位的 $\Delta^+$ 均显著低于95%置信区间的下边界(图2A); B1和C3站位的 $\Delta^+$ 在置信区间之内, B2和B3则显著高于置信区间上边界(图2B)。结合两种指数分析可知(图3), 4个站位全部偏离95%置信区间等值线。因此, 总体而言, 胶州湾4个站位的 $\Delta^+$ 偏低,  $\Delta^+$ 接近或略高于理论平均值。

3 讨论

3.1 分类多样性指数在海洋污染监测中的应用

Warwick(Warwick & Clarke, 1995; Warwick, 1998)曾指出, 受到污染的海区其分类多样性指数

表1 黄海大型底栖动物种类组成  
Table 1 Species composition of macrobenthos in Yellow Sea

门 Phylum	纲 Class	目 Order	科 Family	属 Genus	种 Species
海绵动物门 Porifera	2	5	6	6	10
腔肠动物门 Coelentera	2	5	17	33	49
扁形动物门 Platyhelminthes	1	2	7	10	11
纽形动物门 Nemertinea	2	4	8	13	20
曳鳃动物门 Priapulida	1	1	1	1	1
环节动物门 Annelida	2	16	52	195	342
星虫动物门 Sipuncula	2	2	2	2	2
螯虫动物门 Echiura	1	3	3	5	5
软体动物门 Mollusca	7	21	126	277	403
节肢动物门 Arthropoda	3	8	76	181	317
苔藓动物门 Bryozoa	2	3	34	61	109
腕足动物门 Brachiopoda	1	3	3	3	4
帚虫动物门 Phoronida	1	1	1	1	3
棘皮动物门 Echinodermata	5	13	22	40	59
半索动物门 Hemichordata	1	1	2	3	3
尾索动物门 Urochordata	1	2	7	10	21
脊索动物门 Chordata	1	1	1	1	1
总计 Total	35	91	368	842	1,360

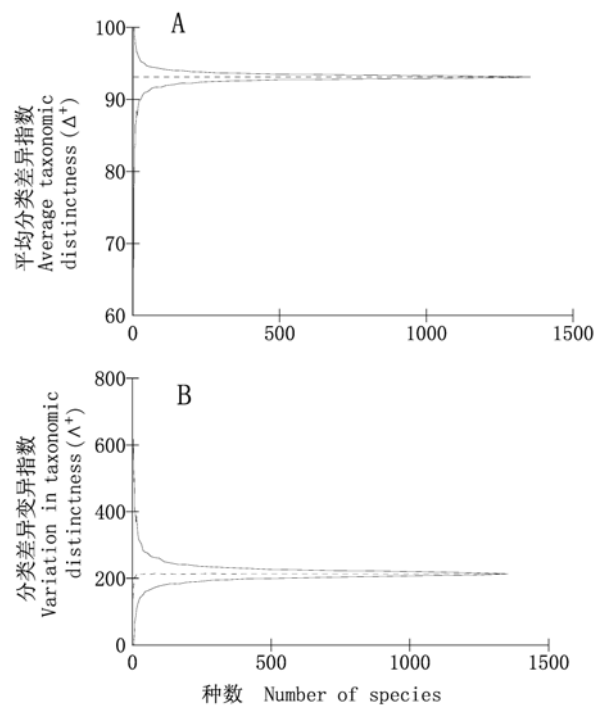


图1 黄海大型底栖动物平均分类差异指数(A)和分类差异变异指数(B)的95%置信区间漏斗图

Fig. 1 95% probability funnels of average taxonomic distinctness (A) and variation in taxonomic distinctness (B) of macrobenthos in Yellow Sea

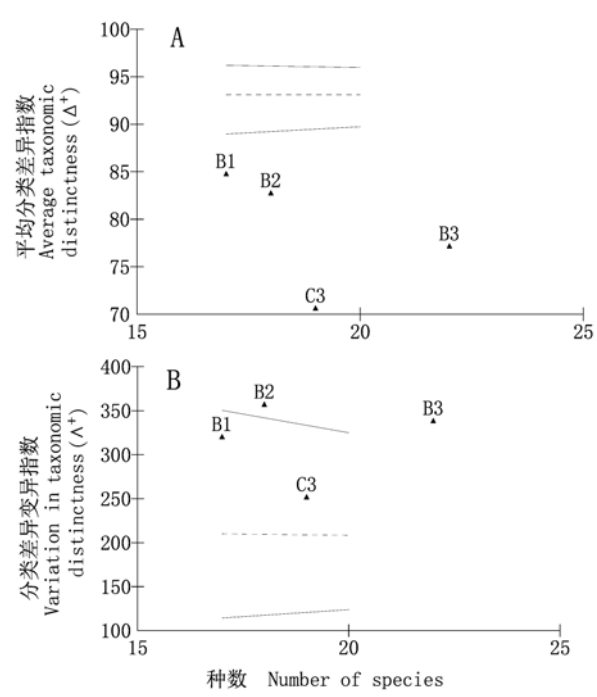


图2 胶州湾大型底栖动物平均分类差异指数(A)和分类差异变异指数(B)的95%置信区间漏斗图

Fig. 2 95% probability funnels of average taxonomic distinctness (A) and variation in taxonomic distinctness (B) of macrobenthos in Jiaozhou Bay

表2 胶州湾各站大型底栖动物多样性指数及底质类型

Table 2 Macrobenthic diversities and substrates of each station in Jiaozhou Bay

站号 Station	Shannon-Wiener 多样性指数 ( $H'$ )	Margalef 丰富度指数 $d$	Pielou均匀度 指数 $J'$	种数 No. of species	平均分类差异指 数 $\Delta^+$	分类差异变异 指数 $\Lambda^+$	底质类型 Substrate
B1	2.52	2.93	0.615	17	84.8	320.5	黏土质粉砂 Clay silt
B2	2.86	2.99	0.685	18	82.79	357.4	黏土质粉砂 Clay silt
B3	3.03	3.50	0.683	22	77.2	338.8	粗砂 Coarse sand
C3	3.46	3.44	0.815	19	70.66	252.1	黏土质粉砂 Clay silt
全部站 Total	3.472	5.124	0.667	37	83.48	337	—

$H'$ , Shannon-Wiener diversity index;  $d$ , Margalef species richness index;  $J'$ , Pielou's evenness index.  $\Delta^+$ , Average taxonomic distinctness;  $\Lambda^+$ , Variation in taxonomic distinctness.

低于未受污染海区。这是由于底栖动物群落在未受扰动时, 通常包含多个不同门类, 而受到污染或扰动后, 最先消失的通常是个体数较少的门类, 如棘皮动物等, 余下种类则多集中于耐污的门类中, 如环节动物多毛类等, 这就导致了物种间平均分类距离的下降。根据2006–2008年《中国海洋环境质量

公报》中“全海域环境质量状况”可知, 黄海全海域绝大部分属于清洁海域, 整体而言, 环境质量较好, 种数在各类群中的分布较为均匀, 因此 $\Delta^+$ 较高。而处于南黄海的胶州湾则由于沿岸经济的迅速发展, 过量污染物被排放入海, 使得90年代胶州湾受到了较为严重的污染(王修林等, 2006)。底栖动物多集

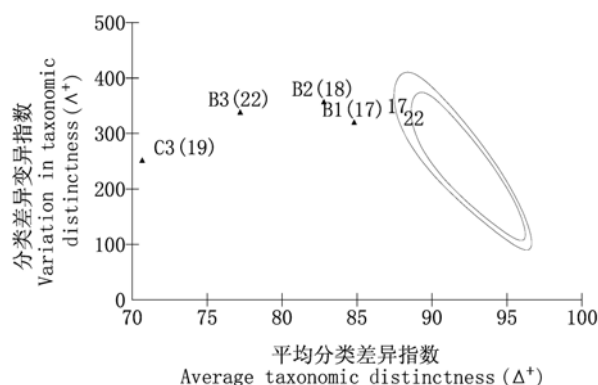


图3 胶州湾大型底栖动物95%置信区间等值线图。等值线上的数字代表相应的模拟抽样种数。站号后面括号中的数字代表该站的种类数。由于相近的抽样种数其等值线差别很小, 为图像清晰起见, 仅做种数最高和最低的两条等值线。

Fig. 3 95% probability contours of macrobenthos in Jiaozhou Bay. Number on the contours stand for the species selected from the master list of Yellow Sea. Numbers in the parentheses are species of each station. Because contours of adjacent species are nearly the same, for greater clarity, we only draw the contours of two extremes.

中于多毛类, 其 $\Delta^+$ 全部显著低于理论平均值, 表明了胶州湾站位处于被扰动的不稳定状态。同时, 在受到人为及自然环境双重扰动的长江口, 其 $\Delta^+$ 也低于黄海<sup>①</sup>。

$\Lambda^+$ 的情况与 $\Delta^+$ 不同。Clarke在研究英国14个不同地区的线虫多样性值时发现,  $\Delta^+$ 与 $\Lambda^+$ 在实际中呈很强的线性相关关系。因此, 尽管他在文中分析过两种指数理论上的相关性很低, 也仍然提出 $\Lambda^+$ 可以被应用于监测污染(Clarke & Warwick, 2001)。但是, Mouillot (2005)在其研究中发现:  $\Lambda^+$ 在污染程度增强时, 非但没有下降, 反而有升高的趋势, 这与本文结果相近, 对于受到中度扰动的底栖生物群落, 其 $\Lambda^+$ 高于理论平均值。

实际上,  $\Lambda^+$ 对污染的响应并非线性的, 可以通过一个简单的模式图来说明这个问题。如图4所示: 建立一个从种到目的分类树状图。路径权重为种间25、属间50、科间75、目间100。从左至右的过程为一个简化的模式图, 显示随着污染程度升高, 底栖生物群落结构的改变。由图4可见,  $\Lambda^+$ 的改变是先增大后减小的。因此, 尽管某些情况下(如从图4中第二阶段到第三阶段),  $\Lambda^+$ 可以对污染呈线性响应,

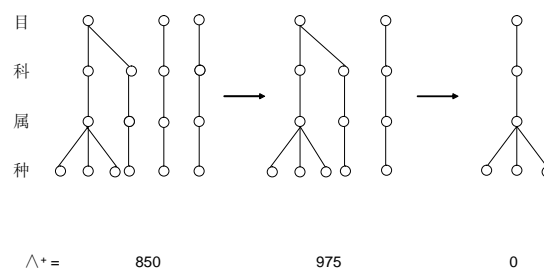


图4 大型底栖动物群落结构及分类差异变异指数 $\Lambda^+$ 随污染梯度变化的简化模型

Fig. 4 A simplified model of changes in community structure and variation in taxonomic distinctness under different pollution conditions

但这种情况是无法预料的, 因此 $\Lambda^+$ 的非线性特征使其值的高低不能代表污染的程度, 从而限制了它在污染监测方面的应用。由于 $\Lambda^+$ 与 $\Delta^+$ 反映了群落中分类多样性的不同侧面, 因此, 两者结合可以更好地对不同群落进行区分。

### 3.2 分类多样性指数与物种多样性指数的关系

胶州湾4个站位的 $H'$ 与 $\Delta^+$ 呈现完全相反的变化趋势。对于B1站,  $H'$ 最低而 $\Delta^+$ 最高, 而C3站则相反。对比两站的种类组成不难发现其原因: B1站, 在17种生物中, 多毛类11种, 软体动物3种, 节肢动物2种, 棘皮动物1种; 而C3站, 在19种生物中, 仅有2种软体动物, 其余17种全部为多毛类(于子山等, 2000), 因此B1站的 $\Delta^+$ 最高而C3站最低。而B1站 $H'$ 低的原因是中蚓虫(*Mediomastus* sp.)与寡鳃齿吻沙蚕(*Nephtys oligobranchia*)的数量过高, 降低了均匀度, 且该站种类数最少。而C3站优势种的优势度为4站中最低, 从而提高了其均匀度, 使得 $H'$ 成为最高。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。

### 参考文献

- Anand M, Orloci L (1996) Complexity in plant communities: the notion and quantification. *Journal of Theoretical Biology*, **179**, 179–186.
- Clarke KR, Warwick RM (1998) A taxonomic distinctness index and its statistical properties. *Journal of Applied Ecology*, **35**, 523–531.
- Clarke KR, Warwick RM (2001) A further biodiversity index applicable to species lists: variation in taxonomic distinctness. *Marine Ecology Progress Series*, **216**, 265–278.
- Connell JH (1978) Diversity in tropical rain forests and coral

① 刘文亮(2007)长江河口大型底栖动物及其优势种探讨。硕士论文, 华东师范大学河口海岸学国家重点实验室。

- reefs. *Science*, **199**, 1302–1310.
- Emmanuil TK, Athanassios C (2005) Temporal variability of the ichthyofauna in a Northern Aegean coastal lagoon (Greece). *Hydrobiologia*, **543**, 245–257.
- Gambi C, Vanreusel A (2003) Biodiversity of nematode assemblages from deep-sea sediments of the Atacama Slope and Trench (South Pacific Ocean). *Deep-Sea Research I*, **50**, 103–117.
- Guo Y, Somerfield PJ, Warwick RM, Zhang ZN (2001) Large-scale patterns in community structure and biodiversity of freeliving nematodes in the Bohai Sea, China. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom*, **81**, 755–763.
- Huang ZG (黄宗国) (2008) *Marine Species and Their Distribution in China* (中国海洋生物种类与分布). Ocean Press, Beijing. (in Chinese)
- Lei YL (类彦立), Sun RP (孙瑞平) (2008) Species diversity and faunal characteristics of marine polychaetes in the Yellow Sea. *Marine Sciences* (海洋科学), **32**(4), 40–51. (in Chinese with English abstract)
- Leonard DRP, Clarke KR, Somerfield PJ, Warwick RM (2006) The application of an indicator based on taxonomic distinctness for UK marine biodiversity assessments. *Journal of Environmental Management*, **78**, 52–62.
- Mouillot D, Laune J, Tomasini JA, Aliaume C, Brehmer P, Dutrieux E, Do Chi T (2005) Taxonomic diversity of fish, zoobenthic and macrophyte communities along an eutrophication gradient in Mediterranean coastal lagoons. *Hydrobiologia*, **550**, 121–130.
- Qi ZY (齐钟彦), Ma XT (马绣同), Wang ZR (王祯瑞) (1989) *Mollusca of Huanghai and Bohai* (黄渤海的软体动物). Agriculture Press, Beijing. (in Chinese)
- Raut D, Ganesh T, Murty NVSS, Raman AV (2005) Macrobenthos of Kakinada Bay in the Godavari delta, East coast of India: comparing decadal changes. *Estuarine, Coastal and Shelf*, **62**(4), 609–620.
- Ren XQ (任先秋) (2006) *Fauna Sinica: Invertebrata, Vol. 41. Crustacea, Amphipoda, Gammaridea (I)* (中国动物志: 无脊椎动物第四十一卷、甲壳动物亚门、端足目、钩虾亚目(一)). Science Press, Beijing. (in Chinese)
- Shannon CE, Weaver W (1949) *The Mathematical Theory of Communication*. University of Illinois Press, Urbana.
- Sun RP (孙瑞平), Yang DJ (杨德渐) (2004) *Fauna Sinica, Invertebrata, Vol. 33, Annelida, Polychaeta (II), Nereidida* (中国动物志: 无脊椎动物第三十三卷、环节动物门、多毛纲(二)、沙蚕目). Science Press, Beijing. (in Chinese)
- Tilman D, Knops J, Wedin D, Reich P, Ritchie M, Siemann E (1997) The influence of functional diversity and composition on ecosystem processes. *Science*, **277**, 1300–1302.
- Wang XL (王修林), Li KQ (李国强), Shi XY (石晓勇) (2006) *Marine Environmental Capacity of Pollutants in Jiaozhou Bay* (胶州湾主要化学污染物海洋环境容量). Science Press, Beijing. (in Chinese)
- Warwick RM, Clarke KR (1995) New ‘biodiversity’ measures reveal a decrease in taxonomic distinctness with increasing stress. *Marine Ecology Progress Series*, **129**, 301–305.
- Warwick RM (1998) Taxonomic distinctness and environmental assessment. *Journal of Applied Ecology*, **35**, 532–543.
- Warwick RM, Turk SM (2002) Predicting climate change effects on marine biodiversity: comparison of recent and fossil molluscan death assemblages. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom*, **82**, 847–850.
- Wu BL (吴宝铃), Wu QQ (吴启泉), Qiu JW (邱健文), Lu H (陆华) (1997) *Fauna Sinica: Phylum Annelida, Class Polychaeta, Order Phyllodocimorpha* (中国动物志: 环节动物门、多毛纲、叶须虫目). Science Press, Beijing. (in Chinese)
- Xu BD (徐宾铎), Jin XS (金显仕), Liang ZL (梁振林) (2005) Calculation of hierarchical diversity of fish in the Huanghai and Bohai Seas. *Periodical of Ocean University of China* (中国海洋大学学报), **35**, 25–28. (in Chinese with English abstract)
- Xu FS (徐凤山), Zhang SP (张素萍) (2008) *An Illustrated Bivalvia Mollusca Fauna of China Seas* (中国海产双壳类图志). Science Press, Beijing. (in Chinese)
- Yang DJ (杨德渐), Sun RP (孙瑞平) (1988) *Polychaetous Annelids Commonly Seen From the Chinese Water* (中国近海多毛环节动物). Agriculture Press, Beijing. (in Chinese)
- Yang DJ (杨德渐), Wang YL (王永良) (1996) *The Invertebrates of Northern China Seas* (中国北部海洋无脊椎动物). Higher Education Press, Beijing. (in Chinese)
- Yu ZS (于子山), Zhang ZN (张志南), Wang SH (王诗红) (2000) Study on the abundance and biomass of macrobenthos in the muddy bottom in the northern part of Jiaozhou Bay. *Periodical of Ocean University of China* (青岛海洋大学学报), **30**, 39–44. (in Chinese with English abstract)
- Zhang H (张衡), Lu JJ (陆健健) (2007) Calculation of the taxonomic diversity of fish communities in the Yangtze River Estuary. *Journal of East China Normal University (Natural Science)* (华东师范大学学报(自然科学版)), (2), 11–22. (in Chinese with English abstract)