

中国百种杰出学术期刊
中国精品科技期刊
中国科协优秀期刊
中国科学院优秀科技期刊
新中国 60 年有影响力的期刊
国家期刊奖

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica

(Shengtai Xuebao)

第 31 卷 第 2 期
Vol.31 No.2
2011



中国生态学学会
中国科学院生态环境研究中心
科学出版社

主办
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 31 卷 第 2 期 2011 年 1 月 (半月刊)

目 次

长白山山杨种群的性比格局及其空间分布	潘春芳,赵秀海,夏富才,等 (297)
冬季融冻过程中白三叶叶片抗氧化酶活力和渗透调节物含量变化与抗冻性的关系	赵 梅,周瑞莲,刘建芳,等 (306)
黄土高原主要森林类型自然性的灰色关联度分析	王乃江,刘增文,徐 钊,等 (316)
两种抗生素对龙须菜的光合生理效应	简建波,邹定辉,刘文华,等 (326)
典型喀斯特峰丛洼地植被群落凋落物 C:N:P 生态化学计量特征	潘复静,张 伟,王克林,等 (335)
塔里木河下游地下水埋深对胡杨气体交换和叶绿素荧光的影响	陈亚鹏,陈亚宁,徐长春,等 (344)
基于 MODIS/NDVI 的陕北地区植被动态监测与评价	宋富强,邢开雄,刘 阳,等 (354)
火因子对荒漠化草原草本层片植物群落组成的影响	贺郝钰,苏洁琼,黄 磊,等 (364)
4 种阔叶幼苗对 PEG 模拟干旱的生理响应	冯慧芳,薛 立,任向荣,等 (371)
城市带状绿地宽度与温湿效益的关系	朱春阳,李树华,纪 鹏,等 (383)
西藏斧钺水鸟多样性及斑头雁繁殖活动区的变化	张国钢,刘冬平,钱法文,等 (395)
王朗自然保护区大熊猫生境选择	康东伟,康 文,谭留夷,等 (401)
东方田鼠警觉对其功能反应的作用格局	陶双伦,杨锡福,邓凯东,等 (410)
台州市路桥区重金属污染对土壤动物群落结构的影响	白 义,施时迪,齐 鑫,等 (421)
青岛湾小型底栖生物周年数量分布与沉积环境	杜永芬,徐奎栋,类彦立,等 (431)
叉尾斗鱼种群遗传变异与亲缘地理	王培欣,白俊杰,胡隐昌,等 (441)
C ₃ 和 C ₄ 植物寄主对华北地区棉铃虫越冬代和第一代的影响	叶乐夫,付 雪,戈 峰 (449)
3 种海拔高度茶园中 2 种害虫与其天敌间的数量和空间关系	毕守东,柯胜兵,徐劲峰,等 (455)
坝上地区农田和恢复生境地地表甲虫多样性	刘云慧,宇振荣,王长柳,等 (465)
若尔盖高寒湿地干湿土壤条件下微生物群落结构特征	牛 佳,周小奇,蒋 娜,等 (474)
红枣贮藏期果面微生物多样性	沙月霞 (483)
CO ₂ 和温度升高情况下白粉菌侵染对西葫芦生长特性的影响	刘俊稚,葛亚明,Pugliese Massimo,等 (491)
丛枝菌根真菌对中性紫色土土壤团聚体特征的影响	彭思利,申 鸿,袁俊吉,等 (498)
新疆断裂带泉水中细菌群落结构的 PCR-DGGE 分析	吴江超,高小其,曾 军,等 (506)
石油污染对海洋浮游植物群落生长的影响	黄逸君,陈全震,曾江宁,等 (513)
不同耐性水稻幼苗根系对镉胁迫的形态及生理响应	何俊瑜,任艳芳,王阳阳,等 (522)
基于 CLUE-S 模型的密云县面源污染控制景观安全格局分析	潘 影,刘云慧,王 静,等 (529)
基于生态足迹的生态地租分析	龙开胜,陈利根,赵亚莉 (538)
深圳市植被受损分级评价及其与景观可达性的关系	刘语凡,陈 雪,李贵才,等 (547)
专论与综述	
美国、加拿大环境和健康风险管理方法	贺桂珍,吕永龙 (556)
植物蜡质及其与环境的关系	李婧婧,黄俊华,谢树成 (565)
油田硫酸盐还原菌酸化腐蚀机制及防治研究进展	庄 文,初立业,邵宏波 (575)
叶际微生物研究进展	潘建刚,呼 庆,齐鸿雁,等 (583)

青岛湾小型底栖生物周年数量分布与沉积环境

杜永芬^{1,2}, 徐奎栋^{1,*}, 类彦立¹, 代仁海¹

(1. 中国科学院海洋研究所海洋生物分类与系统演化实验室, 青岛 266071;
2. 南京大学海岸与海岛开发教育部重点实验室, 南京 210093)

摘要: 2006年6月至2007年5月对青岛湾潮间带泥沙质和沙质沉积物中的小型底栖生物及环境因子进行了周年逐月采样。研究发现, 小型底栖生物在两个底质中的数量和分布上差异极大, 泥沙质中的年平均丰度高达(4853 ± 1292) 个/10 cm², 沙质中为(1528 ± 569) 个/10 cm², 生物量则分别为(3186.9 ± 1993.4) μg 干重/10 cm² 和(1601.5 ± 786.2) μg 干重/10 cm²。在季节相上, 小型底栖生物丰度在沙质底呈双峰模式(高值出现在6、12月份, 低值出现在3、9月份); 泥沙质中最高值出现在6月份, 最低值出现在11月份。在0—8 cm 深沉积物中, 48% 的小型底栖生物集中于0—0.5 cm 表层, 分布在0—4 cm 的逾86%。共发现13个主要类群, 线虫在丰度上占绝对优势(泥沙质中为95%, 沙质中为66%), 其它较优势类群在泥沙质依次为多毛类(2%)、甲壳类幼体(2%)和桡足类(1%); 沙质底则依次为甲壳类幼体(13%)、腹毛类(8%)和桡足类(6%)。泥沙质中线虫在生物量上的贡献达58%, 而在沙质中其所占生物量(25%)低于腹毛类(28%)。聚类分析表明, 泥沙质和沙质沉积环境间的相似度为87%, 生物丰度组成间的相似度为71%; BIOENV分析表明, 温度、盐度、粒度及粘土粉砂含量的组合最能解释月份和站位间的差异($r=0.614$)。结合历史资料的对比研究表明, 青岛湾近海的沙质环境状况已有明显改观, 但泥沙质的污染状况仍然堪忧, 这由小型底栖生物的高丰度值、相较耐污的线虫所占的极高比例以及线虫与桡足类丰度的高比值即可看出。

关键词: 小型底栖动物; 丰度; 生物量; 青岛湾; 生物监测

Annual quantitative distribution of meiofauna in relation to sediment environment in Qingdao Bay

DU Yongfen^{1,2}, XU Kuidong^{1,*}, LEI Yanli¹, DAI Renhai¹

1 Department of Marine Organism Taxonomy and Phylogeny, Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China

2 Key Laboratory for Coast and Island Development, Ministry of Education, Nanjing University, Nanjing 210093, China

Abstract: The abundance and biomass of meiofauna as well as benthic environments factors were investigated in silt-sand (near to bank) and sand (close to the sea) in Qingdao Bay, China, based on monthly samplings from June 2006 to May 2007. The results showed that the contents of the chlorophyll a, phaeophytin and organic matter in the surface 0—2 cm sediment were higher in the silt sand than those in the sand. The annual average abundance of meiofauna in the silt sand ((4853 ± 1292) inds/10 cm²) was more than three times higher than that in the sand ((1528 ± 569) inds/10 cm²), and the biomass was about two times higher in the silt sand than in the sand ((3186.9 ± 1993.4) μg dwt/10 cm² vs (1601.5 ± 786.2) μg dwt/10 cm²). The meiofauna in the sand showed a bimodal abundance pattern, with higher values in early summer (June) and early winter (December) and lower values in early spring (March) and early autumn (September). The abundance of meiofauna in the silt-sand peaked in June and reduced to the lowest in November, but no clear pattern could be recognized. Within the 0—8 cm deep sediment, about 48% of the meiofaunal abundance was distributed in the 0—0.5 cm surface layer and over 86% in the 0—4 cm layer. Two contrasting patterns were observed in the vertical distribution of meiofauna in the two sediments: about 61% of total meiofauna occurred in the 0—0.5 cm surface in winter-

基金项目: 中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX2-YW-417); 国家自然科学基金(40906066; 40706047); 中国科学院百人计划资助项目

收稿日期: 2009-12-02; 修订日期: 2010-09-09

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: kxu@qdio.ac.cn

spring and 42% in summer and autumn in the silt sand, while in the sand only 26% of total meiofauna was distributed in winter-spring and 66% in summer and autumn. Among the 13 meiofaunal groups sorted, nematodes were numerically predominant, accounting for about 95% of total abundance in the silt sand and 66% in the sand. Other main groups included Polychaeta (2%), crustacean nauplii (2%) and Copepoda (1%) in the silt sand and crustacean nauplii (13%), Gastrotricha (8%) and Copepoda (6%) in the sand. As concerns the biomass, nematodes contributed to 58% of total meiofaunal biomass in the silt sand, while in the sand nematodes (25%) were surpassed by Gastrotricha (28%). Pearson analyses suggested that meiofaunal abundance in the sand was positively correlated with the content of sediment organic matter ($r=0.731$; $p<0.01$) and negatively correlated with the content of phaeophytin ($r=-0.627$; $P<0.05$), while no correlation was observed between those in the silt sand. Cluster analyses indicated that the similarity was 87% in the benthic environments and 71% in the components of meiofaunal abundance between the silt-sand and sand sediments. Based on the BIOENV analysis, the combination of temperature, salinity, medium size and content of clay and silt accounted for the abundance differences in the sites and sampling months ($r=0.614$). Our study indicates that, in comparison with historic record, the environmental condition in the sand sediment has been greatly improved. However, the pollution situation in the silt-sand sediment is still serious, as indicated by the very high abundance of meiofauna, the extreme predominance of nematodes and the very high nematode/copepod (N/C) ratio.

Key Words: Meiofauna; abundance; biomass; Qingdao Bay; biomonitoring

在底栖生态系统中,小型和微型底栖生物组成底栖小/微食物网^[1-5],其本身又是许多经济鱼、虾和贝类幼体的优质饵料,由此在底栖生态系统的物质循环和能流中发挥重要作用^[6-8]。海洋小型底栖动物的物种多样性高,数量大且分布广泛,同时因其个体微小、繁殖率高且生命周期短,具有对微尺度环境改变的快速反应能力,故而成为近岸海域环境污染监测的良好生物指标^[7-15]。

青岛湾在 20 世纪 80 年代曾是青岛市南区生活污水和混合废水的主要排放区,随后进行了治理,并于 1990 年彻底截污。20 世纪 90 年代有关底栖生物生态研究表明,青岛湾有机污染带已向良性发展^[16-18]。之后历经近 20a 的经济飞速发展,加之旅游业的空前开发,但是有关该地域沉积环境的研究鲜有报道。昔日的排污口已被彻底改造,加之海洋工程建设,前人的研究断面已不可复得。本工作依据目前排水口的方位、潮位、沉积物类型及前人研究区域,在较高潮位的泥沙质和较低潮位的沙质沉积物中各选择了一个研究站位(图 1),对小型底栖生物及其沉积环境进行了周年按月采样和分析,旨在对青岛湾小型底栖生物的动态格局进行研究的同时,对其沉积环境状况进行评价。以期到底栖生物对环境胁迫的响应机制研究提供基础参量,同时为海洋环境的生物监测与评价提供科学依据。

1 研究方法

1.1 采样环境与研究站位

青岛湾(36°0'N, 120°19'E)位于黄海近岸胶州湾出口处,内有著名景区栈桥和小青岛。研究区域位于栈桥东侧和小青岛北侧的潮间带,海滩为南向半封闭,近海沉积物为沙质,向岸变为粉沙质沙。本研究在较高潮位的泥沙质和较低潮位的沙质滩选取两个采样点(简记为 St-S 和 S),二者相距约 100m(图 1)。

1.2 样品采集与分析

2006 年 6 月至 2007 年 5 月每月大潮时,用直径为 23 mm 的采样管,随机采集 0—8 cm 深的 4 个沉积物芯

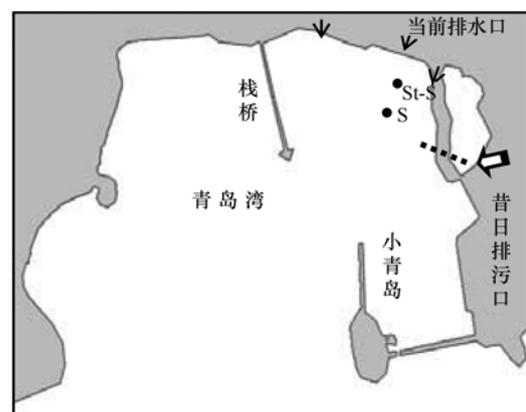


图 1 研究区域和采样站位 (●)

Fig. 1 Study area and sampling stations (●)

小箭头示当前排水口,大箭头示昔日排污口

样,按 0—0.5 cm, 0.5—2 cm, 2—4 cm, 4—8 cm 切片分层,并分别用冰冻的戊二醛溶液现场固定(终浓度为 2%),用于小型底栖生物分析。此外,另取 3 个芯样并将相应分层合并,混合均匀后置于 -20℃ 冷冻保存,用于叶绿素 a (Chla)、脱镁叶绿素 a (Pha) 及有机质 (OM) 分析。将温度计插入沉积物下约 5 cm 深测定泥温。盐度测定以挖穴 10 cm 后渗出水进行。初次采样刮取的表层沉积物用于粒度分析。

小型底栖生物(简称小型生物)的分选和计数采用本实验室研发的 Ludox-QPS 法^[19-20]。生物量的换算按照各个类群的丰度乘以对应类群的平均干重获得^[21]。沉积物粒度分析采用 Cilas (940L) 型激光粒度仪进行测定。有机质测定参照《海洋监测规范》^[22]。采用荧光法对沉积物湿样中的叶绿素 a 和脱镁叶绿素 a 含量进行测定^[22-23],其中脱镁叶绿素的含量依据王荣修订的公式计算^[24]。

数据处理和分析应用 PRIMER (5.0) (Plymouth Routines In Multivariate Ecological Research)^[25-26] 及 SPSS 10.0 软件包中的有关程序进行。

2 结果

2.1 沉积物的粒度组成和温盐变化

采样点沉积物的粒度组成见表 1,两样站点分别属于粉沙质沙(简称泥沙质)和沙质沉积物。温度年度变化范围为 5—25℃ (图 2),高温出现在夏季 8 月份,低温出现在冬季 1 月份,属于典型的北方温带气候。夏季气温较沉积物的温度高 2—3℃,冬季则相反。盐度的年度波动范围为 20—33 (图 2),高盐出现在 12 月(盐度 32)和 1 月份(盐度 32—33),低盐出现在 8 月份(盐度 20)和 2 月份(盐度 24),降雨和溶雪是导致盐度降低的主要原因。

表 1 青岛湾两采样站位的沉积物参数

Table 1 Sediment parameters of the two sampling sites in Qingdao Bay

采样点 Sampling sites	成分 Composition			粒度中值	类型 Types	
	砂 Sand	粉砂 Silt	粘土 Clay	Md (Φ)	GSM type	STC type
泥沙质 St-S	55.7%	36.6%	7.7%	3.844	Muddy Sand	Silt Sand
沙质 S	96.9%	2.40%	0.8%	1.965	Sand	Sand

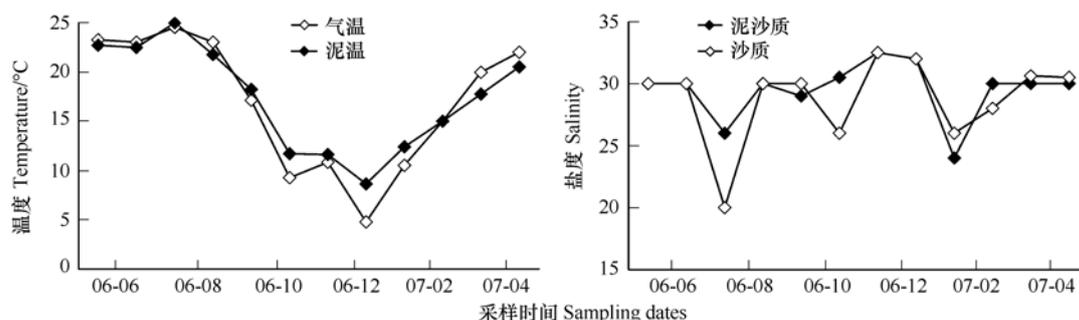


图 2 青岛湾潮间带气温、泥温及盐度的周年变化

Fig. 2 Annual variation of temperature in air and sediment and salinity at the intertidal area of Qingdao Bay

2.2 叶绿素 a (Chla)、脱镁叶绿素 a (Pha) 及有机质 (OM) 分布

在 8 cm 深度内,叶绿素 a 在泥沙中的年平均含量 (0.94 ± 0.36) $\mu\text{g/g}$ 低于沙质 (1.43 ± 0.3) $\mu\text{g/g}$; 脱镁叶绿素 a 含量则正相反:泥沙中的含量 (0.68 ± 0.12) $\mu\text{g/g}$ 是沙质沉积物中的 2 倍多 (0.28 ± 0.07) $\mu\text{g/g}$ 。说明叶绿素 a 在泥沙质中降解的比率相对较高。在垂直分布上 Chla 在泥沙质中分布在表层 (0—0.5 cm) 和次表层 (0.5—2 cm) 的含量相对较高,年平均值分别为 (2.06 ± 1.30) $\mu\text{g/g}$ 和 (1.91 ± 1.43) $\mu\text{g/g}$, 在 2—4 cm 和 4—8 cm 深层含量相对较低 (1.03 ± 0.50) $\mu\text{g/g}$ 和 (0.64 ± 0.33) $\mu\text{g/g}$ 。泥沙质沉积物深层硬质底的存在有碍于物质的垂直运输。相比较,沙质沉积物中的 Chla 在 0—0.5 cm、0.5—2 cm、2—4 cm 及

4—8 cm 的年平均含量差别较小, 分别为 $(1.82 \pm 0.42) \mu\text{g/g}$ 、 $(1.85 \pm 0.40) \mu\text{g/g}$ 、 $(1.76 \pm 0.38) \mu\text{g/g}$ 和 $(1.58 \pm 0.61) \mu\text{g/g}$ (图3)。

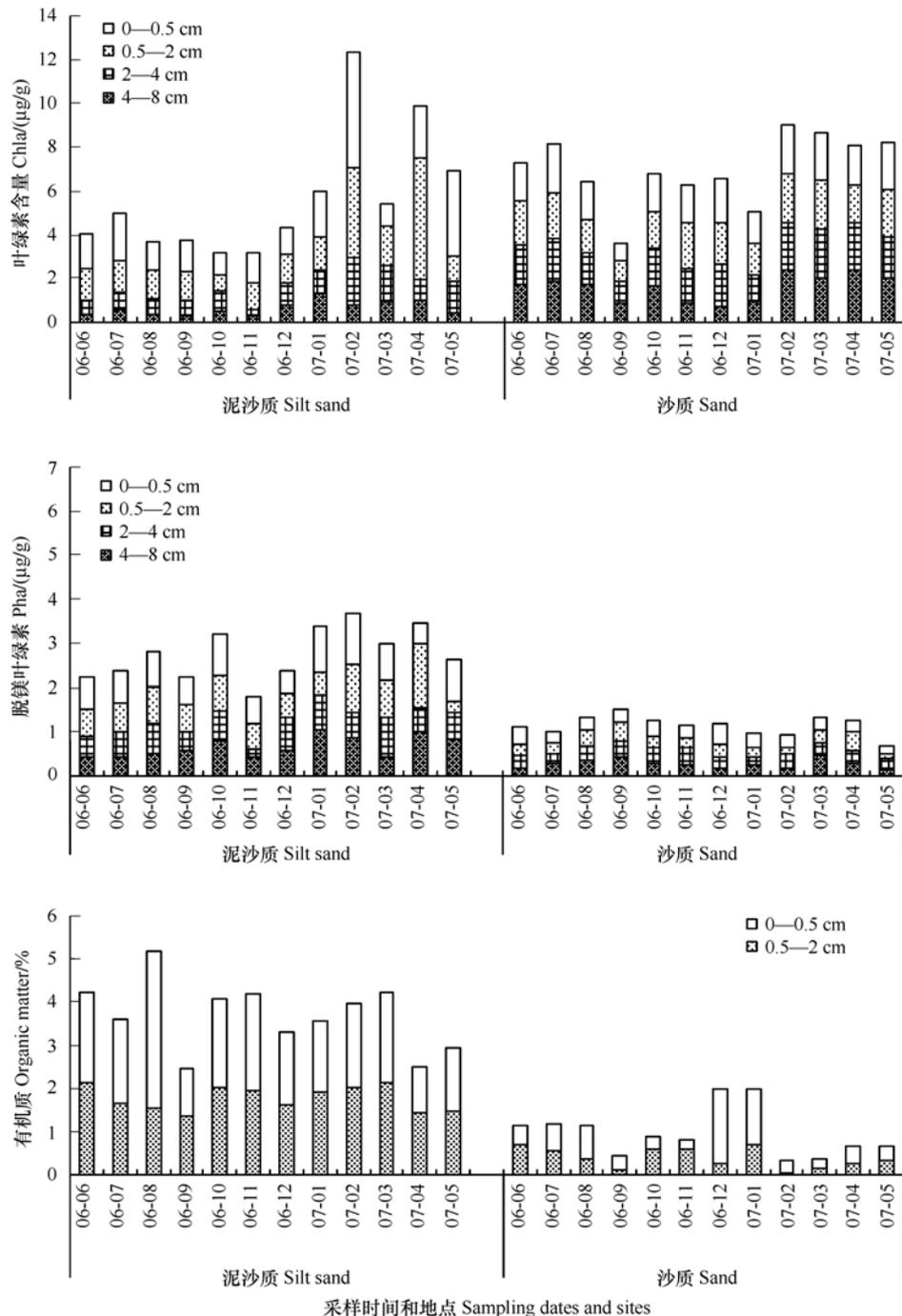


图3 青岛湾潮间带叶绿素 a、脱镁叶绿素 a 及有机质含量的垂直分布和周年变化

Fig.3 Vertical distribution and annual variation of Chla, Pha and organic matter content at intertidal area of Qingdao Bay

有机质在 0—2 cm 泥沙质沉积物中的年平均含量 $(1.81 \pm 0.30)\%$ 约达沙质年平均含量 $(0.44 \pm 0.22)\%$ 的 4 倍 (图3)。表层 (0—0.5 cm) 和次表层 (0.5—2 cm) 的含量在泥沙中含量为 $(1.92 \pm 0.66)\%$ 及 $(1.77 \pm 0.29)\%$, 在沙质中分别为 $(0.58 \pm 0.49)\%$ 和 $(0.39 \pm 0.23)\%$ 。在季节变化上, 泥沙质在 0—2 cm 内和 0.5—2 cm 以内峰值一致, 以 3 月份和 6 月份最高 $(2.12\%—2.13\%)$; 在 0—0.5 cm 表层, 峰值出现在 8 月份和 11 月份 $(3.62\%$ 和 $2.24\%)$, 其次是 3 月和 6 月份 (均为 2.1%); 沙质沉积物中则在 0—2 cm

和 0.5—2 cm 内峰值以 1 月份和 6 月份较高 (0.64%—0.86%), 表层则以 12 月份和 1 月份含量较高 (1.72% 和 1.32%), 其次是 7 月份和 8 月份 (0.65% 和 0.76%)。研究区域毗邻的管道排水主要是生活污水, 无机营养盐和有机质首先在泥沙质沉积物中滞留, 为底栖藻类的生长提供丰富的物源。从早春和晚秋, 岸边可见大量藻泥堆积, 由此加速了有机质的积累。沙质沉积物则常年基本未见藻屑富集。

2.3 沉积物环境变量多因子分析

对两站点不同月份的环境因子 PCA 分析表明, 两个排序轴保留的信息量占总信息量的 72.8% (图 4), 对第一主分量贡献较大的是粘土粉砂含量 (47.1%)、中值粒径 (47.1%) 和有机质 (45.9%), 对第二主成分影响较大的 Chla 和 Pha 累积含量 (71.7%) 和 Chla (46.9%)。说明有机质和沉积物类型是因影响泥沙质和泥质沉积物环境差异的主要因素。CLUSTER 聚类分析表明, 泥沙质和沙质中的相似性达 87.4% (图 5)。

2.4 小型底栖生物类群组成、丰度、生物量及垂直分布

共分出 13 个海洋小型生物类群 (表 2), 其中泥沙质中的线虫和多毛类的丰度明显高于沙质沉积物, 其它类群 (如轮虫) 相近或明显低于沙质沉积物中。泥沙质中的线虫在丰度和生物量上均占绝对优势 (95.2% 和 58%); 沙质沉积物中的线虫仅在丰度上占优势, 且优势度较低 (66.4%), 在生物量上低于腹毛类 (27.6%) 而居次 (25.3%)。依据小型生物各类群

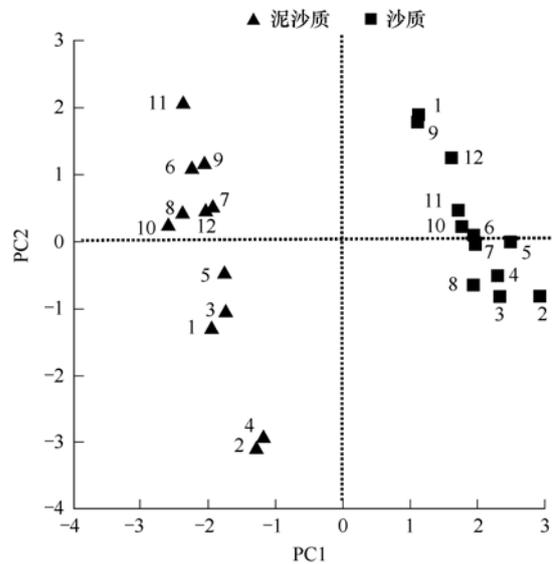


图 4 青岛湾泥沙质 (▲) 和沙质 (■) 环境变量的主成分分析排序图

Fig. 4 PCA plot based on the environments in Qingdao Bay between the silt sand (▲) and sand during monthly samplings

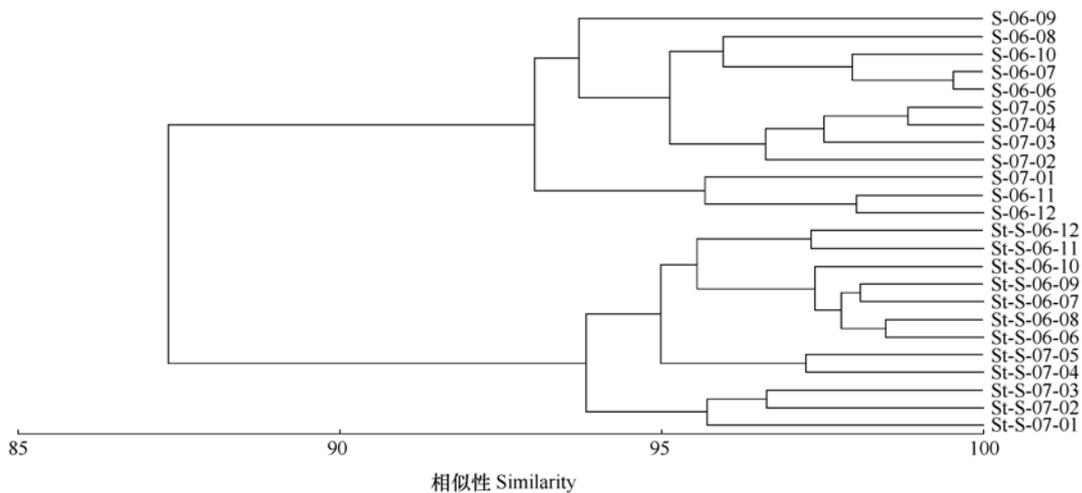


图 5 采样环境的聚类分析

Fig. 5 Cluster analysis of the samples from the silt-sand (St-S) and sand (S) based on environmental parameters

的丰度进行的 CLUSTER 聚类分析表明, 小型生物丰度组成在泥沙质和沙质中的相似性为 70.5%, 较沉积环境的相似度低 (图 6)。

小型生物在泥沙中的年平均丰度 ((4853 ± 1292) 个/ 10 cm^2) 约为沙质中的 ((1528 ± 569) 个/ 10 cm^2) 3 倍 (表 3)。在季节变化上, 沙质中小型生物在丰度上呈双峰模式 (图 5): 夏季 6 月份和冬季 12 月份较高 (分别为 (2958 ± 215) 个/ 10 cm^2 和 (1620 ± 649) 个/ 10 cm^2), 春季 3 月份和秋季 9 月份较低 (分别为

表 2 青岛湾小型底栖生物主要类群的年平均丰度和生物量

Table 2 Annual average abundance and biomass of main meiofaunal groups in Qingdao Bay

类群 Main groups	丰度 Abundance		生物量 Biomass	
	个/10 cm ² (St-S/S)	% (St-S/S)	μg 干重·10cm ⁻² (St-S/S)	% (St-S/S)
线虫 Nematoda	4619 ± 1255/1014 ± 376	95.2/66.4	1847.7 ± 501.9/405.6 ± 150.2	58.0/25.3
桡足类 Copepoda	32 ± 27/95 ± 165	0.7/6.2	60.1 ± 51.0/177.5 ± 306.3	1.9/11.1
甲壳类幼体 Nauplii	72 ± 87/193 ± 307	1.5/12.6	7.9 ± 9.6/21.2 ± 33.8	0.2/1.3
腹毛类 Gastrotricha	1 ± 3/126 ± 68	0.0/8.3	5.2 ± 12.1/441.8 ± 239.1	0.2/27.6
涡虫 Turbellaria	12 ± 13/24 ± 22	0.3/1.6	42.6 ± 43.9/83.8 ± 76.3	1.3/5.2
多毛类 Polychaeta	73 ± 125/17 ± 28	1.5/1.1	1026.9 ± 1743.7/243.5 ± 394.8	32.2/15.2
轮虫 Rotifera	32 ± 40/26 ± 25	0.7/1.7	111.9 ± 138.3/92.5 ± 88.6	3.5/5.8
双壳类 Bivalvia	2 ± 5/9 ± 21	0.0/0.6	8.4 ± 21.0/37.1 ± 89.2	0.3/2.3
动物类 Kinorhyncha	1 ± 2/2 ± 4	0.0/0.1	1.3 ± 4.6/4.5 ± 7.9	0.0/0.3
端足类 Amphipoda	0 ± 0/0 ± 1	0.0/0.0	0.0 ± 0.0/6.0 ± 20.9	0.0/0.4
介形类 Ostracoda	0 ± 1/1 ± 2	0.0/0.1	10.4 ± 36.1/20.9 ± 48.7	0.3/1.3
涟虫 Cumacea	2 ± 5/0	0.0/0.0	45.2 ± 122.6/	1.4/0.0
其它 Others	5 ± 10/19 ± 28	0.1/1.3	19.2 ± 34.0/67.2 ± 98.8	0.6/4.2
合计 Total	4853 ± 1292/1528 ± 569		3186.9 ± 1993.4/1601.5 ± 786.2	

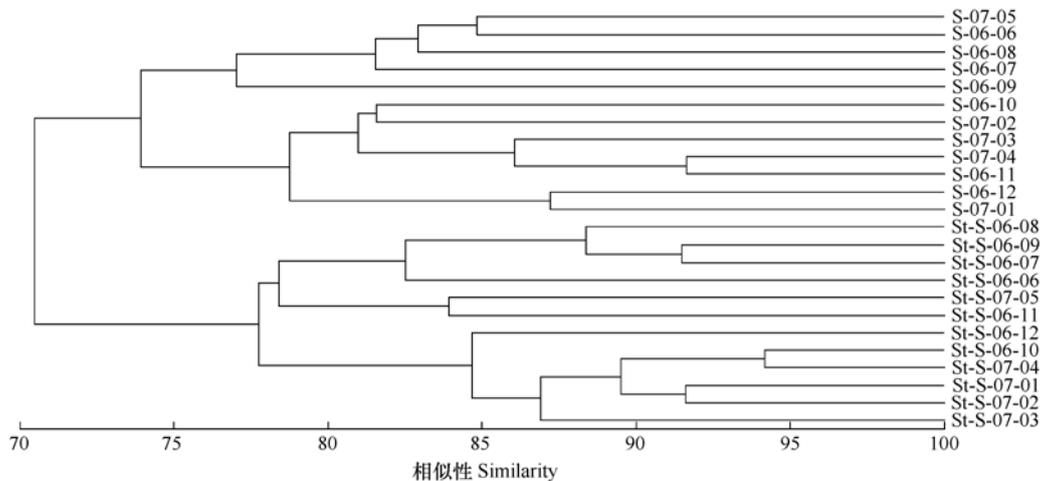


图 6 采样点各月份小型生物的聚类分析

Fig. 6 Cluster analysis of the samples from the silt-sand (St-S) and sand (S) based on abundance composition of main meiofaunal groups

(939 ± 38) 个/10 cm² 和 (830 ± 128) 个/10 cm²), 总体趋势为夏季 ((2024 ± 822) 个/10 cm²) > 冬季 ((1660 ± 353) 个/10 cm²) > 秋季 ((1247 ± 390) 个/10 cm²) > 春季 ((1179 ± 368) 个/10 cm²), 季节间差异不显著。泥沙质中小型生物的丰度除最高值出现在 6 月份 ((7992 ± 4381) 个/10 cm²), 最低值出现在 11 月份 ((2910 ± 430) 个/10 cm², 和沙质最高值相当), 季节变化不明显, 总趋势为: 夏季 ((6006 ± 1808) 个/10 cm²) > 春季 ((5010 ± 676) 个/10 cm²) > 冬季 ((4268 ± 774) 个/10 cm²) > 秋季 ((4128 ± 1233) 个/10 cm²), 季节间差异不显著 (图 7)。

BIOENV 分析表明, 温度、盐度、中值粒径和粘土粉砂含量的组合最能解释月份及样点间的丰度差异, 其相关系数为 0.614, 说明温盐是夏季出现高丰度的重要因素, 沉积物类型的差异是两站点丰度差异的重要原因。Pearson 相关分析表明, 沙质中的小型生物丰度与有机质含量正相关 ($r=0.731$, $P < 0.01$), 与脱镁叶绿素含量呈负相关 ($r = -0.627$, $P < 0.05$), 高有机质含量与小型生物丰度呈现的双峰模式吻合, 进一步表明在影响生物时空分布的诸多因素中, 有机质含量是控制沙质中的小型生物变动的主要因素; 比较而言, 泥

沙质中小型生物的丰度与测定的环境因子没有相关性,进而对其环境与生物的生物ENV分析表明,温度和丰度的相关性最高($r=0.342$),温度对生物生长具有重要影响,但并未呈现显著的相关性,泥沙质中高的有机质含量不仅支持较高的生物丰度,而且相对小型生物的需求而言,有机质可能处于富余状态。

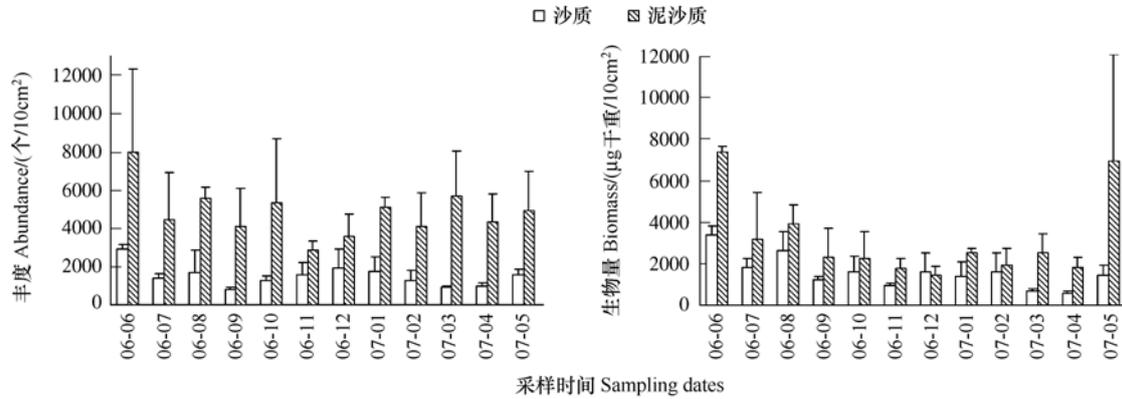


图7 青岛湾小型底栖生物丰度和生物量的周年变化

Fig. 7 Annual variation of meiofaunal abundance and biomass in Qingdao Bay

泥沙质沉积物中的小型生物年平均总生物量($(3186.9 \pm 1993.4) \mu\text{g}$ 干重/ 10 cm^2)约为沙质沉积物中的2倍($(1601.5 \pm 786.2) \mu\text{g}$ 干重/ 10 cm^2) (图7,表3),其变化趋势和丰度基本类似。沙质沉积物中生物量仅与丰度显著相关($r=0.734$; $P < 0.01$);泥沙质中生物量除与丰度显著相关外($r=0.717$; $P < 0.01$),还与温度相关($r=0.637$; $P < 0.05$)。

在垂直分布上,泥沙质中约占总丰度48.8%的小型生物分布在0—0.5 cm表层,0.5—2 cm、2—4 cm和4—8 cm的比率分别为23.6%、10.1%和13.5%;由于线虫占绝对优势,因此线虫丰度的分布模式与小型生物相近:自表层至深层的比率依次为48.4%、24%、10.3%和13.9%。沙质沉积物中约47.8%的小型生物丰度分布在0—0.5 cm表层,在0.5—2 cm、2—4 cm和4—8 cm的分布比率分别为25.6%、17%和9.6%;线虫丰度分布在0—0.5 cm表层的比率略低(34.4%),在0.5—2 cm和2—4 cm的比率相对较高(31.9%和21.2%),分布在4—8 cm的比率和分布在沙质层的基本相当(12.4%)。

在季节上,泥沙质中的小型动物及其主要类群线虫在冬春季主要分布在0—0.5 cm表层(60.8%),此表层在夏季和秋季则明显较少(41.6%);而沙质中的小型动物及其主要类群线虫则正相反,在夏季和秋季主要分布在0—0.5 cm表层(66.4%),在冬春季则明显较少(25.5%) (图8)。

2.5 海洋线虫与桡足类的比值

线虫和桡足类是小型生物中两个主要类群,通常决定着小型生物的总数量,二者的丰度比值已被用于海洋的生物监测中^[12-14]。一般认为海洋线虫与桡足类比值(N/C) > 100说明该区受到有机污染,大于50小于100属富营养化,<50说明环境状况较好。本研究泥沙质中12月没有发现桡足类,11月和5月份的N/C比值接近50,其余9个月份的比值均大于100,最高值出现在2月和4月份,分别达820和380(图9),年平均比值为236;沙质沉积物中年平均比值相对较低(60),其中10月、12月和1月份未发现桡足类,2月和4月份的N/C比值最高(分别为193和192),其余7个月份的比值介于1—56之间(图9)。

3 讨论

小型底栖生物作为底栖小食物网的重要构成,其群落结构和多样性一直是底栖生态学关注的重要内容之一。海洋小型底栖生物常规生态研究所涉工作量大,涉及的类群较多,且对优势类群——线虫的分类难度大,资料匮乏,成为制约小型底栖生物生态学发展的瓶颈。本研究采用Ludox-QPS方法对青岛湾小型底栖生物的周年分布进行了研究,与传统的Ludox 硅胶悬浮法获得的生物群落信息相比,由于没有进行过筛处理,避免了小个体线虫的遗失,故丰度常较经典方法略高,但没有显著性差异。而且,通过定量蛋白银的染色,大

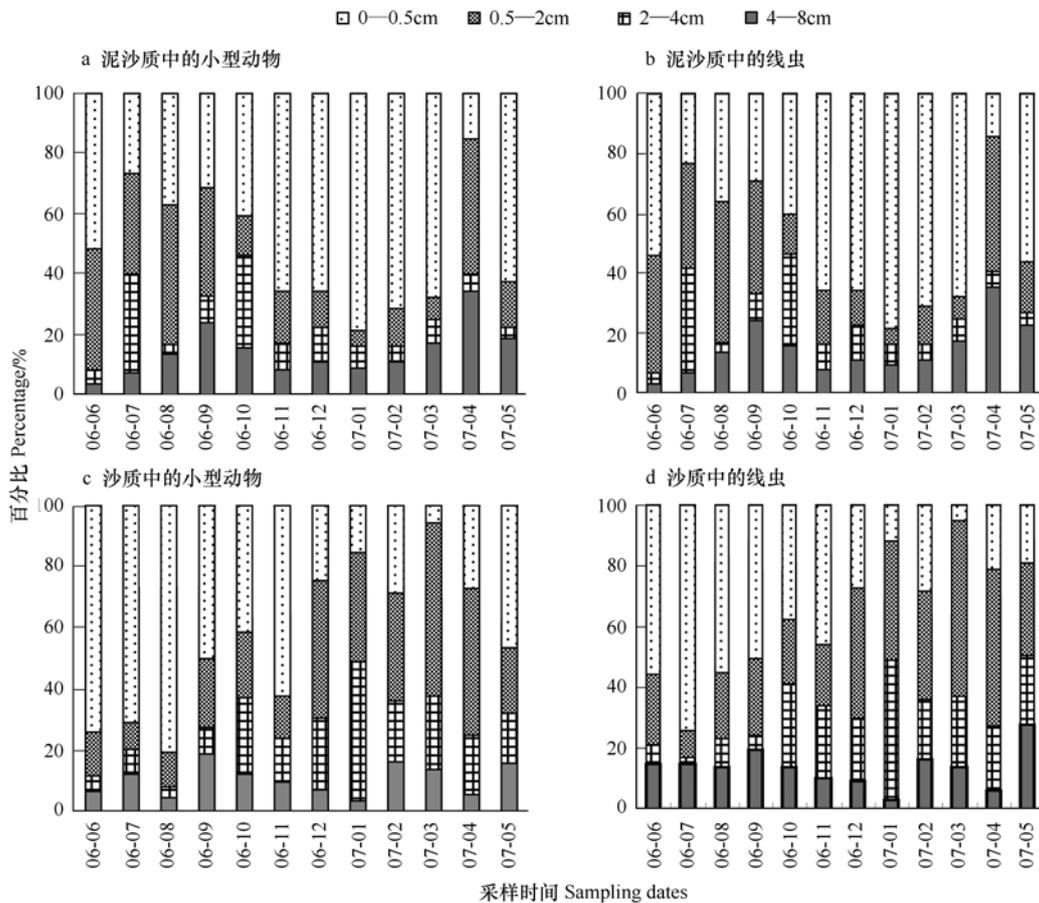


图 8 青岛湾泥沙质和沙质中小型动物和线虫丰度的垂直分布

Fig. 8 Vertical distribution of abundance proportion of meiofauna and nematodes at silt sand and sand in Qingdao Bay

多数小型动物特别是个体较小的类群(如腹毛类)均呈现较好的分类学分辨率,因此可以对小型生物进行类群水平的群落分析^[19]。通过该方法,本研究在沙质沉积物中发现了在丰度和生物量上较为庞大的腹毛类,丰富了对小型底栖动物优势类群的认识。本研究两沉积物中生物丰度组成之间的相似度(70.5%),较所测定的环境因子组合之间的相似性(87.4%)低的多(图5,图6),说明小型底栖生物群落分析更能反映沉积物环境的差异。

党宏月等曾在青岛湾沿昔日排污口方向设一断面(图1虚线所示),根据理化指标将采样点沿排污口向外依次划分为严重污染区、半污染区、污染带及污染边缘带^[18]。与其相较,本研究在青岛湾泥沙质沉积物中发现的小型底栖生物的年平均丰度((4853 ± 1292) 个/ 10 cm^2)与昔日污染带细沙质(4997 个/ 10 cm^2)和有机物污染带沙质粉砂((5029 ± 4744) 个/ 10 cm^2)和粗砂质((4757 ± 6353) 个/ 10 cm^2)的研究结果较为接近;而在沙质沉积物中获得的丰度((1528 ± 569) 个/ 10 cm^2)则明显较昔日相同底质的污染带和污染边缘带(4997 个/ 10 cm^2 和 1854 个/ 10 cm^2)低,但高于范士亮等在青岛太平湾的研究结果((1025 ± 169) 个/

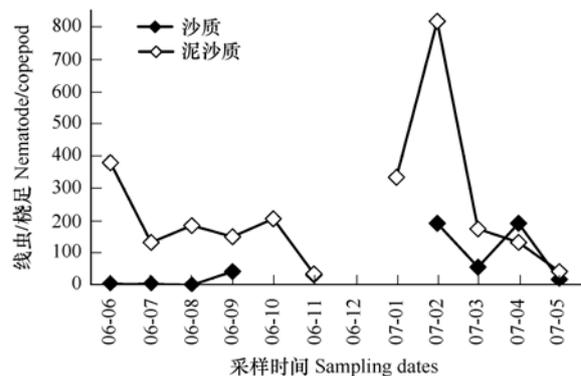


图 9 青岛湾潮间带不同月份海洋线虫与桡足类的丰度比值

Fig. 9 Ratio of nematode/copepod in each month at intertidal area in Qingdao Bay

10 cm²)^[16,18,27]。通常在有机质污染较重的环境中,当大多小型动物类群不能生存时,海洋线虫仍可维持正常生长,数量上甚至显著升高^[28]。本研究在泥沙质沉积物中发现海洋线虫的丰度高达(4619 ± 1255)个/10 cm²,几乎是临近沙质沉积物中的4倍((1014 ± 376)个/10 cm²),且在数量分布上占绝对优势(95%),表明泥沙质沉积物具有污染状态的群落特征。

以海洋线虫和桡足类的比值(N/C)检测海洋有机质污染的理论基础为:海洋线虫比较耐污,而底栖桡足类对环境较为敏感,随着污染程度增加,N/C呈增大趋势。尽管该比值的应用存在较大争议,例如N/C比值可能因桡足类对沙质底质的偏好而造成相对数量的增加,从而降低N/C比值,但该简易参数仍具有参考价值,并成功应用于许多海域^[12-14, 18]。有关青岛湾排污口的早期研究表明,其严重污染区、半污染区、污染带及污染边缘带的N/C的周年平均值依次分别为8、111、94和17^[18],相比较,该研究中泥沙质和沙质沉积物中的N/C的比值分别为236和60,说明沙质沉积物较截污前有明显改观,但泥沙质依然有机污染较重。在季节动态上,两沉积物均于冬末的2月份出现N/C最高比值,同时该季节盐度最低,叶绿素含量最高,说明该季节存在外源性淡水输入,该引起沉积环境的改变,继而改变了底栖生物群落构成。

综上所述,青岛湾沉积物环境和底栖生物的比较研究表明,泥沙质沉积物中含有较高的有机质含量,相对较高的小型生物丰度,相比较耐污的线虫所占的极高比例以及常年较高的N/C比值。本研究采样时可见泥沙质底的氧化还原层较浅,而沙质底的大部分月份氧化还原层较深,甚至不易发现。表明泥沙质沉积环境常年基本上处于有机污染状态。一方面泥沙质沉积物距排水口较近,持续排放的混合废水和生活污水首先在该沉积物中滞留,近乎充当了天然的过滤器。此外,由于沉积物自身性质的因素,早期污染的长期累积效应很可能依然对沉积环境产生重要影响。无论有机污染是来自目前的混合废水,还是早期污染的长期累积效应,均不利于泥沙质沉积污染的释放。相较于此,离岸稍远的沙质环境已明显改观,仅在个别月份受外源性排水的影响处于暂时污染状态。有关该区域环境演变过程、生物对环境胁迫的响应机制、污染源及其在沉积物中滞留效应等系列问题探测尚需连续的观测和生物与环境的集成研究,分子生态学和同位素示踪技术将有助于上述工作的深入开展。

致谢: 詹子峰、孟昭翠、王家栋参与了野外样品采集。

Reference:

- [1] Ansari Z A. Inter-relationship between marine meiobenthos and microbes//Ramaiah N eds. *Marine Microbiology: Facets & Opportunities*. Goa: National Institute of Oceanography, 2005:175-179.
- [2] Kuipers B R, De Wilde P, Creutzberg F. Energy flow in a tidal flat ecosystem. *Marine Ecology Progress Series*, 1981, 5: 215-221.
- [3] Montagna P A, Bauer J E, Hardin D, Spies R B. Meiofaunal and microbial trophic interactions in a natural submarine hydrocarbon seep. *Vie et Milieu-life and Environment*, 1995, 45: 17-25.
- [4] Epstein S S. Microbial food webs in marine sediments. I. Trophic interactions and grazing rates in two tidal flat communities. *Microbial Ecology*, 1997, 34: 188-198.
- [5] Epstein S S. Microbial food webs in marine sediments. II. Seasonal changes in trophic interactions in a sandy tidal flat community. *Microbial Ecology*, 1997, 34: 199-209.
- [6] Coull B C. Ecology of the marine meiofauna//Higgins R P, Thiel H eds. *Introduction to the Study of Meiofauna*. Washington, D. C.: Smithsonian Institution Press, 1988:18-28.
- [7] 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: 565-576.
- [8] Coull B C. Role of meiofauna in estuarine soft-bottom habitats. *Australian Journal of Ecology*, 1999, 24: 327-343.
- [9] Giere O. *Meiobenthology*. Berlin Heidelberg New York: Springer-Verlag, 1993: 328.
- [10] Kennedy A D, Jacoby C A. Biological indicators of marine environmental health: meiofauna-a neglected benthic component? *Environmental Monitoring and Assessment*, 1999, 54: 47-68.
- [11] Pinckney J L, Carman K R, Lumsden S E, Hymel S N. Microalgal - meiofaunal trophic relationships in muddy intertidal estuarine sediments.

- Aquatic Microbial Ecology, 2003, 31: 99-108.
- [12] Raffaelli D. The behaviour of the Nematode/Copepod ratio in organic pollution studies. *Marine Environmental Research*, 1987, 23: 135-152.
- [13] Raffaelli D G, Mason C F. Pollution monitoring with meiofauna, using the ratio of nematode to copepod. *Marine Pollution Bulletin*, 1981, 12: 158-163.
- [14] Warwick R M. The nematode/copepod ratio and its use in pollution ecology. *Marine Pollution Bulletin*, 1981, 12: 329-333.
- [15] Coull B C, Hicks G R F, Well J B J. Nematode/copepod ratios for monitoring pollution: a rebuttal. *Marine Pollution Bulletin*, 1981, 12: 378-381.
- [16] Zhang Z N, Dang H Y, Yu Z S. Study of Meiobenthos community in an organic polluted area of Qingdao Bay. *Journal of Ocean University of Qingdao*, 1993, 23 (1): 83-91.
- [17] Wu B L, Lu H, Qiu J W. The macrobenthos of the sewage discharging area of Qingdao Cove-cladistic analysis. *Acta Scientiae Circumstiae*, 1993, 13(1): 121-126.
- [18] Dang H Y, Huang B, Zhang Z N. Study on marine benthos in an organically polluted intertidal beach of Qingdao Bay. II The pollution ecology of meiobenthos. *Studia Marine sinica*, 1996, 37: 91-101.
- [19] Du Y F, Xu K D, Lei Y L. Simultaneous enumeration of diatom, protozoa and meiobenthos from marine sediments using Ludox-QPS method, *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 2009, 27: 775-783.
- [20] Xu K D, Du Y F, Lei Y L, Dai R H. A practical method of Ludox density gradient centrifugation combined with protargol staining for extracting and estimating ciliates in marine sediments. *European Journal of Protistology*, 2010. doi:10.1016/j.ejop.2010.04.005.
- [21] Widbom B. Determination of average individual dry weight and ash-free dry weight in different sieve fractions of marine meiofauna. *Marine Biology*, 1984, 84: 101-108.
- [22] National Technology Supervision Bureau of China, The Specification for Marine Monitoring Part 5; Sediment Analysis. Beijing: Standards Press of China, 1998.
- [23] Metaxatos A, Ignatiades L. Seasonality of algal pigments in the sea water and interstitial water/sediment system of an eastern Mediterranean coastal area. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2002, 55: 415-426.
- [24] Wang R. Correction of the formula to convert fluorescence measurement to phaeophorbide a concentration in acidification method. *Marine Sciences*, 1986, 10 (3): 1-5.
- [25] Clarke K R, Warwick R M. *Change in Marine Communities; An Approach to Statistical Analysis and Interpretation*. Plymouth: Plymouth Marine laboratory, 1994: 140.
- [26] Zhou H, Zhang Z N. Rationale of the multivariate statistical software PRIMER and its application in benthic community ecology. *Journal of Ocean University of Qingdao*, 2003, 33(1): 58-64.
- [27] Fan S L, Liu H B, Zhang Z N, Deng K, Yuan W. Study on the abundance and biomass of meiofauna in the sandy beach of Taiping Bay, Qingdao. *Journal of Ocean University of Qingdao*, 2006, 36 (3): 98-104.
- [28] Bouwman L A, Romeijn K, Admiraal W. On the ecology of meiofauna in an organically polluted estuarine mudflat. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 1984, 19: 633-653.

参考文献:

- [16] 张志南, 党宏月, 于子山. 青岛湾有机质污染带小型底栖生物群落的研究. *青岛海洋大学学报*, 1993, 23 (1): 83-91.
- [17] 吴宝玲, 陆华, 丘建文. 青岛湾排污海滩底栖动物的支序分类研究. *环境科学学报*, 1993, 13(1): 121-126.
- [18] 党宏月, 黄勃, 张志南. 青岛湾有机质污染潮间带底栖生物研究. II. 小型底栖动物生态特点. *海洋科学集刊*, 1996, 37: 91-101.
- [22] 国家质量技术监督局, 海洋监测规范 第5部分: 沉积物分析. 北京: 中国标准出版社, 1998.
- [24] 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.
- [26] 周红, 张志南. 大型多元统计软件 PRIMER 的方法原理及其在底栖群落生态学中的应用. *青岛海洋大学学报*, 2003, 33(1): 58-64.
- [27] 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 (3): 98-104.

CONTENTS

Sex ratio and spatial pattern in *Populus davidiana* in Changbai Mountain PAN Chunfang, ZHAO Xiuhai, XIA Fucui, et al (297)

The relationship between freeze-tolerance and changes in activities of antioxidant enzymes and osmolyte content in the leaves of white clover during early winter freeze-thaw cycles ZHAO Mei, ZHOU Ruilian, LIU Jianfang, et al (306)

Gray correlation analysis on naturalness of the primary forest types on the Losses Plateau WANG Naijiang, LIU Zengwen, XU Zhao, et al (316)

Photosynthetic responses of *Gracilaria lemaneiformis* to two antibiotics JIAN Jianbo, ZOU Dinghui, LIU Wenhua, et al (326)

Litter C:N:P ecological stoichiometry character of plant communities in typical Karst Peak-Cluster Depression PAN Fujing, ZHANG Wei, WANG Kelin, et al (335)

Effects of groundwater depth on the gas exchange and chlorophyll fluorescence of *Populus euphratica* in the lower reaches of Tarim River CHEN Yapeng, CHEN Yaning, XU Changchun, et al (344)

Monitoring and assessment of vegetation variation in Northern Shaanxi based on MODIS/NDVI SONG Fuqiang, XING Kaixiong, LIU Yang, et al (354)

Effects of fire on the structure of herbage synusia vegetation in desertified steppe, North China HE Haoyu, SU Jieqiong, HUANG Lei, et al (364)

Physiological responses of four broadleaved seedlings to drought stress simulated by PEG FENG Huifang, XUE Li, REN Xiangrong, et al (371)

Effects of the different width of urban green belts on the temperature and humidity ZHU Chunyang, LI Shuhua, JI Peng, et al (383)

Diversity of waterbirds and change in home range of bar-headed geese *Anser indicus* during breeding period at Hangcuo Lake of Tibet, China ZHANG Guogang, LIU Dongping, QIAN Fawen, et al (395)

The habitat selection of Giant panda in Wanglang Nature Reserve, Sichuan Province, China KANG Dongwei, KANG Wen, TAN Liuyi, et al (401)

Effects of vigilance on the patterns of functional responses of foraging in voles (*Microtus fortis*) TAO Shuanglun, YANG Xifu, DENG Kaidong, et al (410)

Influence of heavy metal pollution on soil animal community in Luqiao, Taizhou City BAI Yi, SHI Shidi, QI Xin, et al (421)

Annual quantitative distribution of meiofauna in relation to sediment environment in Qingdao Bay DU Yongfen, XU Kuidong, LEI Yanli, et al (431)

Population genetic variations and phylogeography of *Macropodus opercularis* WANG Peixin, BAI Junjie, HU Yinchang, et al (441)

Contribution of C₃ and C₄ host plants for the overwintering and 1st generation of *Helicoverpa armigera* (Hübner) in Northern China YE Lefu, FU Xue, GE Feng (449)

Relationships between two species of insect pests and their natural enemies in tea gardens of three different altitudes BI Shoudong, KE Shengbing, XU Jinfeng, et al (455)

The diversity of ground-dwelling beetles at cultivated land and restored habitats on the Bashang plateau LIU Yunhui, YU Zhenrong, WANG Changliu, et al (465)

Characteristics of soil microbial communities under dry and wet condition in Zoige alpine wetland NIU Jia, ZHOU Xiaoqi, JIANG Na, et al (474)

Microbial diversity of the jujube (*Zizyphus jujuba* Mill.) fruits surface during harvesting and storage stages SHA Yuexia (483)

Effects of powdery mildew infection on zucchini growth under elevated CO₂ and temperature LIU Junzhi, GE Yaming, Pugliese Massimo, et al (491)

Impacts of arbuscular mycorrhizal fungi on soil aggregation dynamics of neutral purple soil PENG Sili, SHEN Hong, YUAN Junji, et al (498)

The bacterial community structures in Xinjiang fault belt spring analyzed by PCR-DGGE WU Jiangchao, GAO Xiaoqi, ZENG Jun, et al (506)

The impact of oil pollution on marine phytoplankton community growth change HUANG Yijun, CHEN Quanzhen, ZENG Jiangning, et al (513)

Root morphological and physiological responses of rice seedlings with different tolerance to cadmium stress HE Junyu, REN Yanfang, WANG Yangyang, et al (522)

Non-point pollution control for landscape conservation analysis based on CLUE-S simulations in Miyun County PAN Ying, LIU Yunhui, WANG Jing, et al (529)

Analysis on ecological land rent based on ecological footprint LONG Kaisheng, CHEN Ligen, ZHAO Yali (538)

Relationship of vegetation degradation classification and landscape accessibility classification in Shenzhen LIU Yufan, CHEN Xue, LI Guicai, et al (547)

Review and Monograph

Risk management approaches for environmental and human health risks in the United States and Canada HE Guizhen, LÜ Yonglong (556)

Plant wax and its response to environmental conditions: an overview LI Jingjing, HUANG Junhua, XIE Shucheng (565)

Acid corrosion mechanism of the sulfate-reducing bacteria and protecting studies in oilfield ZHUANG Wen, CHU Liye, SHAO Hongbo (575)

Advance in the research of phyllospheric microorganism PAN Jiangang, HU Qing, QI Hongyan, et al (583)

2009 年度生物学科总被引频次和影响因子前 10 名期刊*

(源于 2010 年版 CSTPCD 数据库)

排序 Order	期刊 Journal	总被引频次 Total citation	排序 Order	期刊 Journal	影响因子 Impact factor
1	生态学报	11764	1	生态学报	1.812
2	应用生态学报	9430	2	植物生态学报	1.771
3	植物生态学报	4384	3	应用生态学报	1.733
4	西北植物学报	4177	4	生物多样性	1.553
5	生态学杂志	4048	5	生态学杂志	1.396
6	植物生理学通讯	3362	6	西北植物学报	0.986
7	JOURNAL OF INTEGRATIVE PLANT BIOLOGY	3327	7	兽类学报	0.894
8	MOLECULAR PLANT	1788	8	CELL RESEARCH	0.873
9	水生生物学报	1773	9	植物学报	0.841
10	遗传学报	1667	10	植物研究	0.809

★《生态学报》2009 年在核心版的 1964 种科技期刊排序中总被引频次 11764 次,全国排名第 1;影响因子 1.812,全国排名第 14;第 1—9 届连续 9 年入围中国百种杰出学术期刊;中国精品科技期刊

编辑部主任:孔红梅

执行编辑:刘天星 段 靖

生态学报
(SHENGTAI XUEBAO)
(半月刊 1981 年 3 月创刊)
第 31 卷 第 2 期 (2011 年 1 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA
(Semimonthly, Started in 1981)
Vol. 31 No. 2 2011

编 辑 《生态学报》编辑部
地址:北京海淀区双清路 18 号
邮政编码:100085
电话:(010)62941099
www.ecologica.cn
shengtaixuebao@rcees.ac.cn

主 编 冯宗炜
主 管 中国科学技术协会
主 办 中国生态学会
中国科学院生态环境研究中心
地址:北京海淀区双清路 18 号
邮政编码:100085

出 版 科 学 出 版 社
地址:北京东黄城根北街 16 号
邮政编码:100717

印 刷 北京北林印刷厂
发 行 科 学 出 版 社
地址:东黄城根北街 16 号
邮政编码:100717
电话:(010)64034563
E-mail:journal@cspg.net

订 购 全国各地邮局
国外发行 中国国际图书贸易总公司
地址:北京 399 信箱
邮政编码:100044

广告经营 京海工商广字第 8013 号
许 可 证

Edited by Editorial board of
ACTA ECOLOGICA SINICA
Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
Tel:(010)62941099
www.ecologica.cn
Shengtaixuebao@rcees.ac.cn

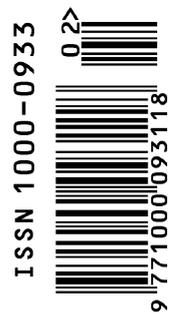
Editor-in-chief FENG Zong-Wei
Supervised by China Association for Science and Technology
Sponsored by Ecological Society of China
Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS
Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China

Published by Science Press
Add:16 Donghuangchenggen North Street,
Beijing 100717, China

Printed by Beijing Bei Lin Printing House,
Beijing 100083, China

Distributed by Science Press
Add:16 Donghuangchenggen North
Street, Beijing 100717, China
Tel:(010)64034563
E-mail:journal@cspg.net

Domestic All Local Post Offices in China
Foreign China International Book Trading
Corporation
Add:P. O. Box 399 Beijing 100044, China



ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 70.00 元