应用生态学报 2017年5月 第28卷 第5期 http://www.cjae.net
Chinese Journal of Applied Ecology, May 2017, **28**(5): 1687-1698 DOI: 10.13287/j.1001-9332.201705.002

电厂温排水增温对浮游动物粒径谱的影响

余 晶[1] 朱艺峰[1,2,3*] 戴美霞[1] 林 霞[1,3] 毛硕乾[2]
([1]宁波大学海洋学院, 浙江宁波 315211; [2]宁波海洋研究院, 浙江宁波 315832; [3]宁波大学应用海洋生物技术教育部重点实验室, 浙江宁波 315211)

摘 要 利用浮游生物Ⅰ(孔径505 μm)、Ⅱ(160 μm)、Ⅲ(77 μm)型拖网所得的10个站位、4个季节丰度数据,以浮游动物生物体积为单位划分粒级,探讨了国华电厂排水口附近海域浮游动物Sheldon型粒径谱和标准化粒径谱的时空变化特征,以期探明海域增温对浮游动物粒径谱影响.结果表明:浮游动物个体体积范围为0.00012~127.0 $mm^3 \cdot ind^{-1}$,可划分为21个对数粒级组,对数范围为-13.06~6.99.据Sheldon型粒径谱结果,构成不同月份粒径谱主谱峰的主要种类有桡足幼体、墨氏胸刺水蚤、中华哲水蚤、仔鱼、百陶箭虫、拿卡箭虫和球型侧腕水母,小谱峰大多由个体较小的幼体类、剑水蚤类、针刺拟哲水蚤构成.在不同增温区断面中,桡足幼体、鱼卵和剑水蚤类等基本不受增温影响,而大型浮游动物,如百陶箭虫、拿卡箭虫、球型侧腕水母、中华哲水蚤和瓜水母等明显倾向于迁离排水口.从标准化粒径谱参数变化看,截距从低到高分别发生在11、2、5和8月;斜率变化以2月最小,5月与8月斜率相似且较大,表明2月小型浮游动物在群落中所占比例最高,而中大型浮游动物以5月和8月较高.在不同断面中,斜率以距离排水口0.2 km断面最低,且随着断面距离增加而增加,说明距离排水口越近,浮游动物小型化越明显.象山港标准化粒径谱年平均截距为4.68,斜率为-0.655.

关键词 象山港; 电厂; 温排水; 浮游动物; 粒径谱

Effects of temperature increase on zooplankton size spectra in thermal discharge seawaters near a power plant, China. YU Jing[1], ZHU Yi-feng[1,2,3*], DAI Mei-xia[1], LIN Xia[1,3], MAO Shuo-qian[2] ([1]*School of Marine Sciences, Ningbo University, Ningbo* 315211, *Zhejiang, China*; [2]*Ningbo Institute of Oceanography, Ningbo* 315832, *Zhejiang, China*; [3]*Ministry of Education Key Laboratory of Applied Marine Biotechnology, Ningbo University, Ningbo* 315211, *Zhejiang, China*).

Abstract: Utilizing the plankton Ⅰ (505 μm), Ⅱ (160 μm), Ⅲ (77 μm) nets to seasonally collect zooplankton samples at 10 stations and the corresponding abundance data was obtained. Based on individual zooplankton biovolume, size groups were classified to test the changes in spatio-temporal characteristics of both Sheldon and normalized biovolume size spectra in thermal discharge seawaters near the Guohua Power Plant, so as to explore the effects of temperature increase on zooplankton size spectra in the seawaters. The results showed that the individual biovolume of zooplankton ranged from 0.00012 to 127.0 $mm^3 \cdot ind^{-1}$, which could be divided into 21 size groups, and corresponding logarithmic ranges were from -13.06 to 6.99. According to Sheldon size spectra, the predominant species to form main peaks of the size spectrum in different months were Copepodite larvae, *Centropages mcmurrichi*, *Calanus sinicus*, fish larvae, *Sagitta bedoti*, *Sagitta nagae* and *Pleurobrachia globosa*, and minor peaks mostly consisted of individuals with smaller larvae, Cyclops and *Paracalanus aculeatus*. In different warming sections, Copepodite larvae, fish eggs and Cyclops were mostly unaffected by the temperature increase, while the macrozooplankton such as *S. bedoti*, *S. nagae*, *P. globosa*, *C. sinicus* and *Beroe cucumis* had an obvious tendency to avoid the outfall of the power plant. Based on the results of normalized size spectra, the intercepts from low to high

本文由海洋公益性行业科研专项(201105009-3)、国家科技支撑项目(2011BAD13B08)、浙江省新苗人才项目(2014R405047)和宁波大学水产养殖浙江省重中之重一级学科开放基金项目资助(421500052) This work was supported by the Science and Technology Research Project of Ocean in the Public Interest (201105009-3), the National Science & Technology Pillar Program (2011BAD13B08), the Zhejiang Province Xinmiao Talents Project (2014R405047), and the Zhejiang Open Foundation of the Most Important Subjects for Aquaculture in Ningbo University (421500052).
2016-08-15 Received, 2017-02-07 Accepted.
* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhuyifeng@nbu.edu.cn

occurred in November, February, May and August, respectively. At the same time, the minimum slope was found in February, and similarly bigger slopes were observed in May and August. These results indicated that the proportion of small zooplankton was highest in February, while the proportions of the meso- and macro-zooplankton were relatively high in May and August. Among different sections, the slope in the 0.2 km section was minimum, which increased with the increase of section distance to the outfall. The result obviously demonstrated that the closer the distance was from outfall of the power plant, the smaller the zooplankton became. On the whole, the average intercept of normalized size spectrum in Xiangshan Bay was 4.68, and the slope was −0.655.

Key words: Xiangshan Bay; power plant; thermal discharge; zooplankton; size spectra.

Sheldon 等[1]在 1972 年首次报道了海洋生物粒径谱,发现生物量在各粒级组分布大致相同,这一基本观点得到了广泛的研究.经过半个世纪的发展[2],尽管粒径谱谱型有基于碳生物量、生物体积、球体直径等多种变形,但研究表明,粒径谱仍是描述水生生态系统的良好工具,可借助生态系统成员间物质和能量的关系,来反映生态系统的结构和功能[3].譬如,分析粒径谱中粒级分布和生物组成,就是一种分析浮游生态系统结构变化的非生物学分类方法.迄今为止,粒径谱变化不仅可用于定量估计浮游动物生长、死亡和营养过程,也可用于研究气候变化和人类活动对浮游动物的影响[4].

Platt 等[5]在 Sheldon 粒径谱的基础上进行了改进,并得到了标准化粒径谱,这摒弃了传统营养级的概念,认为能量流动沿着粒径谱从小个体到大个体是一个连续的过程,因此,标准化粒径谱可进行直线回归.在数学上,可用斜率和截距特征参数描述,斜率反映生态系统的环境营养水平和生态转化效率;截距代表浮游生物的丰度,表示生态系统的生产力状况[2].在理论上,稳定状态生物群落的标准化粒径谱是一条斜率为-1 的直线(以体积为单位)[5],当斜率>-1 时,表示小型浮游生物生物量相对较少;斜率<-1 时则表示较多.由于海洋环境各因素相互影响,往往使生态系统标准化粒径谱偏离稳定状态,因此,特征参数在不同海区也都有其特殊性.

象山港是一个半封闭的狭长港湾,主湾中心线长约 60 km,是多种海洋生物繁殖、索饵和肥育的优良场所,尤其在港底区,是开展海洋牧场建设的重要海域.然而,随着港底区国华电厂的建设,电厂的温排水导致排水口附近浮游动物在空间上发生迁移,运动能力强的大型浮游动物往往避开排水口[6],而低温种有倾向于靠近弱增温区甚至排水口的趋势,这会明显导致浮游动物粒径谱在空间上发生变化,进而影响海域浮游动物的生产力分布.在国内,有关浮游生物粒径谱已有不少报道,如针对水库、河口[7]、黄渤海[8]、海湾[9],而有关象山港浮游动物粒径谱的时空变化,尤其是温排水的增温对粒径谱影响尚未见报道.

因此,本文通过进一步分析前期调查数据,探讨象山港国华电厂排水口附近浮游动物粒径谱的时空变化,目标是探明国华电厂排水口强增温区浮游动物群落的粒级组成和时空变化特征,以及增温对粒径谱的影响,以期为象山港海洋牧场建设以及海洋资源可持续利用提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 调查站位与采样

站位与采样在先前针对浮游生物Ⅱ网的群落结构研究中已有详细描述[10].调查时间为 2011 年 2、5、8、11 月.站位设置时主要考虑国华电厂温排水影响距离约在 2 km 范围内[11],因此,设 4 个扇形断面(图 1),即与排水口距离分别为 0.2 km(S_4)、0.7 km(S_3、S_5、S_8)、1.2 km(S_2、S_6、S_9)、2 km(S_1、S_7、S_{10}),共 10 个站位.在各站位,使用浮游生物Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ网(网孔分别为 505、160、77 μm)从底层至表层同步垂直拖网采集浮游动物,并将样品固定于终浓度为 5%的福尔马林海水溶液中.

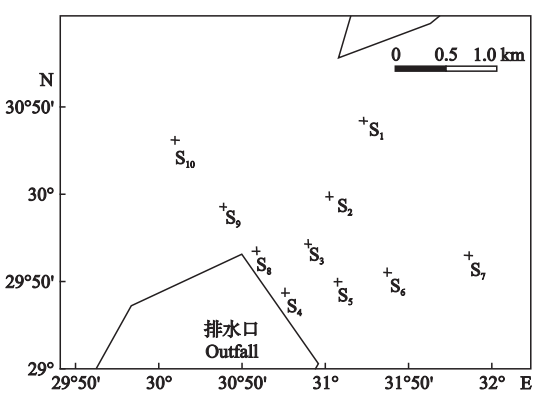


图 1 采样站位

Fig.1 Sampling sites.

1.2　种类鉴定、形态测量与个体体积计算

室内利用显微镜(Olympus BX41)或体视镜(Olympus SZX9)对浮游动物进行计数.计数时,对高丰度浮游动物,先用 Folsom 分样器(Hydro-Bios,德国)反复 2 分样品,直到约含 200 个浮游动物后计数,并折算丰度(ind · m^{-3})[10].种类鉴定参阅文献[12-14].

个体形态测量时,除个别大型浮游动物(箭虫、毛虾)直接用直尺测量外,一般在显微镜下放大 40~100倍测量,其中,优势种至少测量 30 个,稀疏物种全部测量.最主要类群桡足类体积按下式计算:

$$V=\frac{4}{3}\times\pi\times\frac{1}{2}\times PL\times\frac{1}{2}\times PW\times\frac{1}{2}\times PD$$

式中:PL 为前体长;PW 为前体宽;PD 为前体厚.糠虾类、涟虫类、等足类、端足类、短尾类幼虫和瓣鳃类幼虫的体积计算公式按文献[15].其他类群按近似几何形体测量、计算体积.

1.3　粒径谱绘制

采用生物体积方法构建粒径谱[3].以 $\log_2$ 转换的浮游动物个体体积(v,单位为 $mm^3 \cdot ind^{-1}$)为横坐标(X)划分粒级,并设置个体体积最小值为起点,粒级间隔增量为 1 个 $\log_2 v$ 单位.以拖网单位体积(m^3)上对应第 i 粒级各种浮游动物的总体积(B_i,单位为 $mm^3 \cdot m^{-3}$)为纵坐标,绘制 Sheldon 型生物体积粒径谱,以反映各粒级的谱峰变化特征及其相应谱峰的种类构成.

由于粒径谱中每个粒级间隔增量相同(1 个 $\log_2 v$ 单位),但每个粒级实际生物体积的增量(Δv)不同,故需要进行粒径谱的标准化.绘制标准化粒径谱时,横坐标与 Sheldon 型生物体积粒径谱相同,但以 $\log_2 b_i$ 为纵坐标(Y,单位为 m^{-3}),b_i 为体积比,即拖网单位体积(m^3)上第 i 粒级的各浮游动物总体积(B_i)除以第 i 粒级区间体积增量(Δv_i).基于这些计算,标准化粒径谱服从线性模型 $Y=a+bX$.式中:a 为粒径谱截距;b 为斜率[5].

1.4　数据处理

所有数据处理统计分析在 R3.2 软件下进行.标准化粒径谱拟合采用线性回归,拟合时剔除粒级组中生物体积为 0 的数据(空粒级组)[3].粒级多样性指数采用 Shannon 指数和均匀度指数,不同时空分组的粒级多样性差异经单因素方差分析,组间多重比较采用 Tukey 检验($\alpha=0.05$).所有图形制作于 R 绘图包 ggplot2[16].

2　结果与分析

2.1　浮游动物 Sheldon 型生物体积粒径谱结构

2.1.1 年度结构　本次调查共鉴定出浮游动物 95 种,个体平均体积为 0.00012~127.0 $mm^3 \cdot ind^{-1}$,以 2 为底可划分为 21 个对数粒级组(表 1),对数值范围为-13.06~6.99,其中,对数粒级组-0.1~0.9 为空粒级,未检出浮游动物.象山港浮游动物年平均生物体积为 1342.9 $mm^3 \cdot m^{-3}$,年平均丰度为 32862.5 $ind \cdot m^{-3}$,个体平均体积为 0.041 $mm^3 \cdot ind^{-1}$.由表 1 可知,在年度粒级组成中,占据较小粒级组(-13.1~-5.1),且生物体积较大的主要类群是小型浮游动物,按照各粒级生物累积体积从大到小分别为针刺拟哲水蚤(*Paracalanus aculeatus*)、小拟哲水蚤(*Paracalanus parvus*)、驼背隆哲水蚤(*Acrocalanus gibber*)、桡足类无节幼体、日本角眼剑水蚤(*Corycaeus japonicus*)等.占据中间粒级组(-5.1~-1.1)的主要种类是中小型浮游动物,如桡足幼体、鱼卵、墨氏胸刺水蚤(*Centropages mcmurrichi*)、异体住囊虫(*Oikopleura dioica*)、瘦尾胸刺水蚤(*Oikopleura dioica*)等.占据大粒级组(-1.1~7.9)的主要种类是大型浮游动物,如拿卡箭虫(*Sagitta nagae*)、仔鱼、中华哲水蚤(*Calanus sinicus*)、球型侧腕水母(*Pleurobrachia globosa*)、中华假磷虾(*Pseudeuphausia sinica*)等.

从周年粒径谱变化看(图 2),有 5 个不同程度的生物体积峰(P_1~P_5),生物体积从大到小列于前 3 个谱峰分别为 P_2、P_5 和 P_4,其中,P_2 位于-5.1~-4.1粒级组(表 1),主要种类为桡足幼体和鱼卵;P_5 则出现在 3.9~4.9 粒级组,主要种类是拿卡箭虫和球型侧腕水母;P_4 出现在 1.9~2.9 粒级组,主要种类为仔鱼和百陶箭虫(*Sagitta bedoti*).其他2个峰较

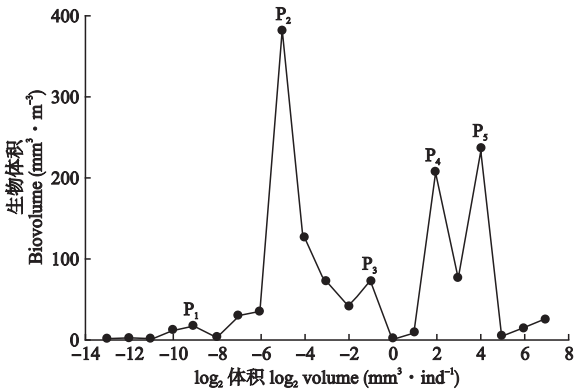


图 2　象山港浮游动物生物体积粒径谱结构

Fig.2　Zooplankton biovolume size spectra in Xiangshan Bay. P_1~P_5为峰代码, 见表 1 The peak codes from P_1 to P_5 saw Table 1.

表 1 象山港浮游动物不同粒级组的主要种类

Table 1 Main species of different size-class zooplankton in Xiangshan Bay

编号 No.	对数粒级组 Log size group	峰代码 Peak code	年平均 Annual mean	月 Month			
				2	5	8	11
1	-13.1~-12.1		砂壳虫 *Difflugia* sp.	-	-	砂壳虫 *Difflugia* sp.	-
2	-12.1~-11.1		布氏拟铃虫 *Tintinnopsis butschlii* 麻铃虫 *Leprotintinnus* sp.	-	麻铃虫 *Leprotintinnus* sp. 布氏拟铃虫 *Tintinnopsis butschlii*	布氏拟铃虫 *Tintinnopsis butschlii* 麻铃虫 *Leprotintinnus* sp.	布氏拟铃虫 *Tintinnopsis butschlii*
3	-11.1~-10.1		镖剑水蚤 *Cyclopina* sp. 筒螅辐射幼虫 *Tubularia actinula*	-	筒螅辐射幼虫 *Tubularia actinula* 镖剑水蚤 *Cyclopina* sp.	镖剑水蚤 *Cyclopina* sp.	镖剑水蚤 *Cyclopina* sp.
4	-10.1~-9.1	P_6	桡足类无节幼体 Copepod nauplius larva 钟状网纹虫 *Favella campanula*	桡足类无节幼体 Copepod nauplius larva	桡足类无节幼体 Copepod nauplius larva	桡足类无节幼体 Copepod nauplius larva 钟状网纹虫 *Favella campanula*	桡足类无节幼体 Copepod nauplius larva
5	-9.1~-8.1	P_1	伪长腹剑水蚤 *Oithona fallax* 短角长腹剑水蚤 *Oithona brevicornis*	短角长腹剑水蚤 *Oithona brevicornis* 伪长腹剑水蚤 *Oithona fallax*	伪长腹剑水蚤 *Oithona fallax* 短角长腹剑水蚤 *Oithona brevicornis*	短角长腹剑水蚤 *Oithona brevicornis* 伪长腹剑水蚤 *Oithona fallax*	短角长腹剑水蚤 *Oithona brevicornis* 伪长腹剑水蚤 *Oithona fallax*
6	-8.1~-7.1		长尾住囊虫 *Oikopleura longicauda* 涡虫类牟勒氏幼虫 Mullers larva	尖额真猛水蚤 *Euterpe acutifrons*	长尾住囊虫 *Oikopleura longicauda* 涡虫类牟勒氏幼虫 Mullers larva	涡虫类牟勒氏幼虫 Mullers larva 角水蚤 Pontellidae spp.	长尾住囊虫 *Oikopleura longicauda* 齿隆剑水蚤 *Oncaea dentipes*
7	-7.1~-6.1	P_{10}	针刺拟哲水蚤 *Paracalanus aculeatus* 瓣鳃类幼虫 Lamellibranchia larva	针刺拟哲水蚤 *Paracalanus aculeatus* 克氏纺锤水蚤 *Acartia clausi*	针刺拟哲水蚤 *Paracalanus aculeatus* 瓣鳃类幼虫 Lamellibranchia larva	针刺拟哲水蚤 *Paracalanus aculeatus* 瓣鳃类幼虫 Lamellibranchia larva	针刺拟哲水蚤 *Paracalanus aculeatus* 瓣鳃类幼虫 Lamellibranchia larva
8	-6.1~-5.1		小拟哲水蚤 *Paracalanus parvus* 驼背隆哲水蚤 *Acrocalanus gibber*	小拟哲水蚤 *Paracalanus parvus* 驼背隆哲水蚤 *Acrocalanus gibber*	多毛类幼虫 Polychaeta larva 驼背隆哲水蚤 *Acrocalanus gibber*	小拟哲水蚤 *Paracalanus parvus* 驼背隆哲水蚤 *Acrocalanus gibber*	长尾基齿哲水蚤 *Clausocalanus furcatus* 多毛类幼虫 Polychaeta larva
9	-5.1~-4.1	P_2	桡足幼体 Copepods larva 鱼卵 Fish egg	桡足幼体 Copepods larva 中华胸刺水蚤 *Centropages sinensis*	桡足幼体 Copepods larva 强真哲水蚤 *Eucalanus crassus*	桡足幼体 Copepods larva 鱼卵 Fish egg	桡足幼体 Copepods larva 腹足类幼虫 Gastropods larva
10	-4.1~-3.1		异体住囊虫 *Oikopleura dioica* 瘦尾胸刺水蚤 *Centropages tenuiremis*	瘦尾胸刺水蚤 *Centropages tenuiremis* 介螅水母 *Hydractinia* sp.	异体住囊虫 *Oikopleura dioica* 太平洋纺锤水蚤 *Acartia pacifica*	太平洋纺锤水蚤 *Acartia pacifica* 特氏歪水蚤 *Tortanus derjuginii*	异体住囊虫 *Oikopleura dioica* 太平洋纺锤水蚤 *Acartia pacifica*
11	-3.1~-2.1	P_7	墨氏胸刺水蚤 *Centropages mcmurrichi* 汤氏长足水蚤 *Calanopia thompsoni*	墨氏胸刺水蚤 *Centropages mcmurrichi* 刺尾歪水蚤 *Tortanus spinicaudatus*	墨氏胸刺水蚤 *Centropages mcmurrichi* 汤氏长足水蚤 *Calanopia thompsoni*	汤氏长足水蚤 *Calanopia thompsoni* 唇角水蚤 *Labidocera* sp.	汤氏长足水蚤 *Calanopia thompsoni* 唇角水蚤 *Labidocera* sp.
12	-2.1~-1.1	P_8	亚强真哲水蚤 *Eucalanus subcrassus* 短尾类幼体 Brachyura larva	亚强真哲水蚤 *Eucalanus subcrassus* 短尾类幼体 Brachyura larva	短尾类幼体 Brachyura larva 长尾类幼虫 Macrura larva	亚强真哲水蚤 *Eucalanus subcrassus* 短尾类幼体 Brachyura larva	真刺唇角水蚤 *Labidocera euchaeta* 长尾类幼虫 Macrura larva
13	-1.1~-0.1	P_3	中华哲水蚤 *Calanus sinicus* 耳状囊水母 *Euphysa aurata*	中华哲水蚤 *Calanus sinicus* 钩虾 *Monoculodes* sp.	中华哲水蚤 *Calanus sinicus* 耳状囊水母 *Euphysa aurata*	中华哲水蚤 *Calanus sinicus* 海洋真刺水蚤 *Euchaeta marina*	中华哲水蚤 *Calanus sinicus* 精致真刺水蚤 *Euchaeta concinna*
14	-0.1~0.9		-	-	-	-	-
15	0.9~1.9		短额刺糠虾 *Acanthomysis brevirostris*	短额刺糠虾 *Acanthomysis brevirostris*	短额刺糠虾 *Acanthomysis brevirostris*	短额刺糠虾 *Acanthomysis brevirostris*	短额刺糠虾 *Acanthomysis brevirostris*
16	1.9~2.9	P_4	仔鱼 Fish larva 百陶箭虫 *Sagitta bedoti*	-	仔鱼 Fish larva 百陶箭虫 *Sagitta bedoti*	仔鱼 Fish larva 百陶箭虫 *Sagitta bedoti*	百陶箭虫 *Sagitta bedoti* 仔鱼 Fish larva

续表 1
Table 1　Continued

编号 No.	对数粒级组 Log size group	峰代码 Peak code	年平均 Annual mean	月 Month 2	5	8	11
17	2.9~3.9		中华假磷虾 *Pseudeuphausia sinica* 美丽箭虫 *Sagitta pulchra*	中华假磷虾 *Pseudeuphausia sinica*	中华假磷虾 *Pseudeuphausia sinica*	美丽箭虫 *Sagitta pulchra* 中华假磷虾 *Pseudeuphausia sinica*	中华假磷虾 *Pseudeuphausia sinica*
18	3.9~4.9	P_5	拿卡箭虫 *Sagitta nagae* 球型侧腕水母 *Pleurobrachia globosa*	-	拿卡箭虫 *Sagitta nagae* 球型侧腕水母 *Pleurobrachia globosa*	拿卡箭虫 *Sagitta nagae*	拿卡箭虫 *Sagitta nagae* 球型侧腕水母 *Pleurobrachia globosa*
19	4.9~5.9		阿利玛幼虫 Alima larva 印度八拟杯水母 *Octophialucium indicum*	-	印度八拟杯水母 *Octophialucium indicum* 阿利玛幼虫 Alima larva	阿利玛幼虫 Alima larva	-
20	5.9~6.9	P_9	瓜水母 *Beroe cucumis*	-	瓜水母 *Beroe cucumis*	-	-
21	6.9~7.9		日本毛虾 *Acetes japonicus*	日本毛虾 *Acetes japonicus*	日本毛虾 *Acetes japonicus*	日本毛虾 *Acetes japonicus*	日本毛虾 *Acetes japonicus*
年平均生物体积 Annual mean biovolume ($mm^3 \cdot m^{-3}$)			1342.9	839.1	1914.3	2208.7	409.5
年平均丰度 Annual mean abundance ($ind \cdot m^{-3}$)			32862.5	27153.2	37370.7	57364.8	9561.4
个体平均体积 Individual mean volume ($mm^3 \cdot ind^{-1}$)			0.041	0.031	0.051	0.039	0.043

同粒级物种按照生物体积值降序排列,仅列前 2 位 In the same size group, species were listed in descending order according to biovolume, and only top 2 species were listed; -: 该粒级未检出物种 No species were found in the size group. 下同 The same below.

小,P_3位于-1.1~-0.1 粒级组,主要种类是中华哲水蚤、耳状囊水母(*Euphysa aurata*);而 P_1位于-9.1~-8.1粒级组,主要种类有伪长腹剑水蚤(*Oithona fallax*)和短角长腹剑水蚤(*Oithona brevicornis*).显然,象山港浮游动物群落粒级组成主要以中小型桡足幼体、鱼卵为主,拿卡箭虫、球型侧腕水母、仔鱼和百陶箭虫等大型浮游动物为辅.

2.1.2 月份结构　由图 3 可以看出,浮游动物生物体积粒径在 2 月有 2 个主谱峰,分别由 P_2(桡足幼体)和 P_7(墨氏胸刺水蚤)控制;此外,2 个小谱峰主要种类分别为 P_3(中华哲水蚤)和 P_6(桡足类无节幼体).5 月群落有 3 个主谱峰,由仔鱼、百陶箭虫组成的 P_4峰,拿卡箭虫和球型侧腕水母组成的 P_5峰,以及桡足幼体的 P_2峰组成,此外,还伴随 3 个峰高差不多的小谱峰,分别是 P_9(瓜水母 *Beroe cucumis*)、P_8(短尾类和长尾类幼体)和 P_1(伪长腹剑水蚤、短角长腹剑水蚤).8 月则有 4 个主谱峰和 1 个小谱峰,除主谱峰 P_3(中华哲水蚤)不同外,其他峰(P_2、P_5、P_4、P_1)的主要种类组成与 5 月相似.到 11 月,只有 2 个主谱峰 P_2(桡足幼体)和 P_5(拿卡箭虫),同时还有 1 个很小的 P_{10}峰(针刺拟哲水蚤).

由图 3 可以看出,不同月份粒径谱差异明显.首先,P_2峰在所有月份都为主谱峰,说明桡足幼体是构成象山港粒径谱最主要类群;其次,除 P_2峰外,2 月粒径谱主要由墨氏胸刺水蚤(P_7)控制,11 月则由拿卡箭虫和球型侧腕水母(P_5)控制,而在 5 月和 8 月粒径谱中,除 8 月出现大量中华哲水蚤(P_3)外,其他主谱峰更相似,即群落主要由拿卡箭虫(P_5)和仔鱼、百陶箭虫(P_4)控制;最后,各月小谱峰大多由个体较小的浮游动物组成,如幼体类(P_6、P_8、P_{10})、剑水蚤类(P_1)、针刺拟哲水蚤(P_{10}).表 1 显示,各月平均生物体积、平均丰度均以 8 月最高,11 月最低;个体平均体积以 5 月最大,2 月最小.

2.1.3 空间结构　由图 4 和表 2 可以看出,从 D_2断面看,只有 P_2主谱峰(桡足幼体),另有 3 个小谱峰,分别为 P_1(伪长腹剑水蚤和短角长腹剑水蚤)、P_{10}(针刺拟哲水蚤和瓣鳃类幼体)和 P_4(仔鱼和百陶箭虫);在 D_7断面,除 P_2和 P_1峰与 D_2断面相似外,P_4变为主谱峰;到 D_{12}断面,除 P_1、P_2和 P_4与 D_7断面相似外,P_5(拿卡箭虫和球型侧腕水母)为主谱峰;而到 D_{20}断面,除与 D_{12}断面相似的峰外,还增加了主谱峰 P_3(中华哲水蚤与海洋真刺水蚤 *Euchaeta marina*)和次谱峰 P_9(瓜水母).

结合图 4 和表 2 可知:第一,主谱峰 P_2和小谱

峰 P_1 在不同断面均出现，说明桡足幼体、鱼卵和剑水蚤类等基本不受排水口距离的影响；第二，仔鱼和百陶箭虫（P_4）大量出现开始于 D_7 断面，且以 D_{12} 断面最大，由于 P_4 峰以仔鱼体积占绝大部份，说明仔鱼倾向于向中间断面迁移；第三，拿卡箭虫和球型侧腕水母（P_5）大量开始出现于 D_{12} 断面，中华哲水蚤（P_3）和瓜水母（P_9）仅出现在 D_{20} 断面，说明在大型浮游动物中，百陶箭虫、拿卡箭虫、球型侧腕水母、中华哲水蚤和瓜水母等明显倾向于迁离排水口.据断面平均结果（表 2），各断面平均生物体积、个体平均体积距离排水口越远，值越大，而平均丰度却以排水口附近 D_2 断面最高.

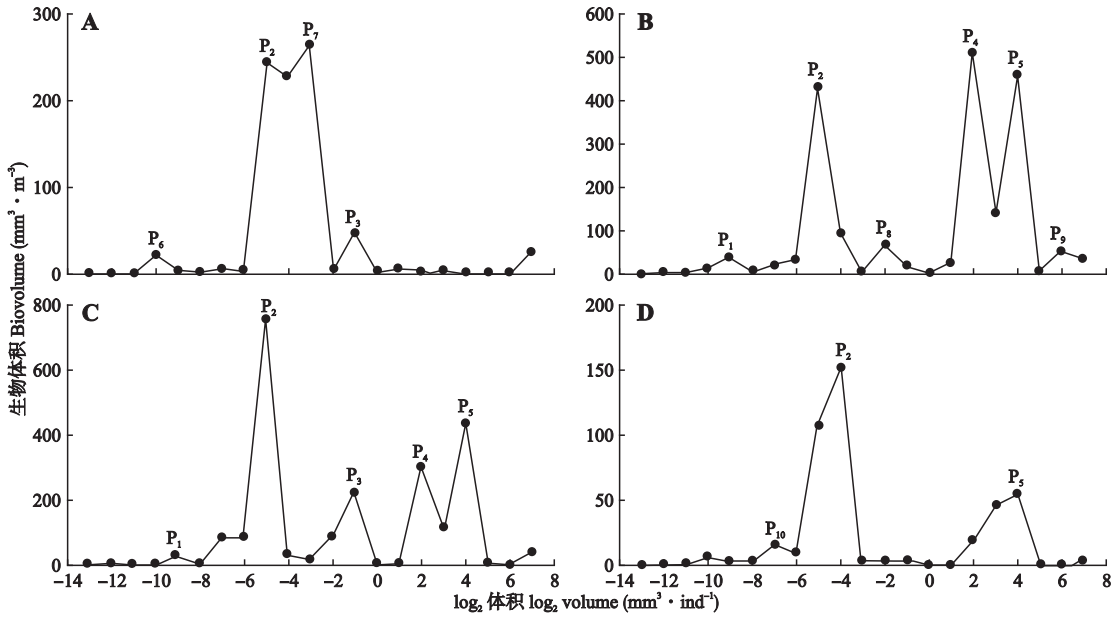


图 3 浮游动物生物体积粒径谱月份结构

Fig.3 Monthly structures of zooplankton biovolume size spectra.

P_1～P_{10} 为峰代码，见表 1 The peak codes from P_1 to P_{10} saw Table 1. A：2 月 February；B：5 月 May；C：8 月 August；D：11 月 November. 下同 The same below.

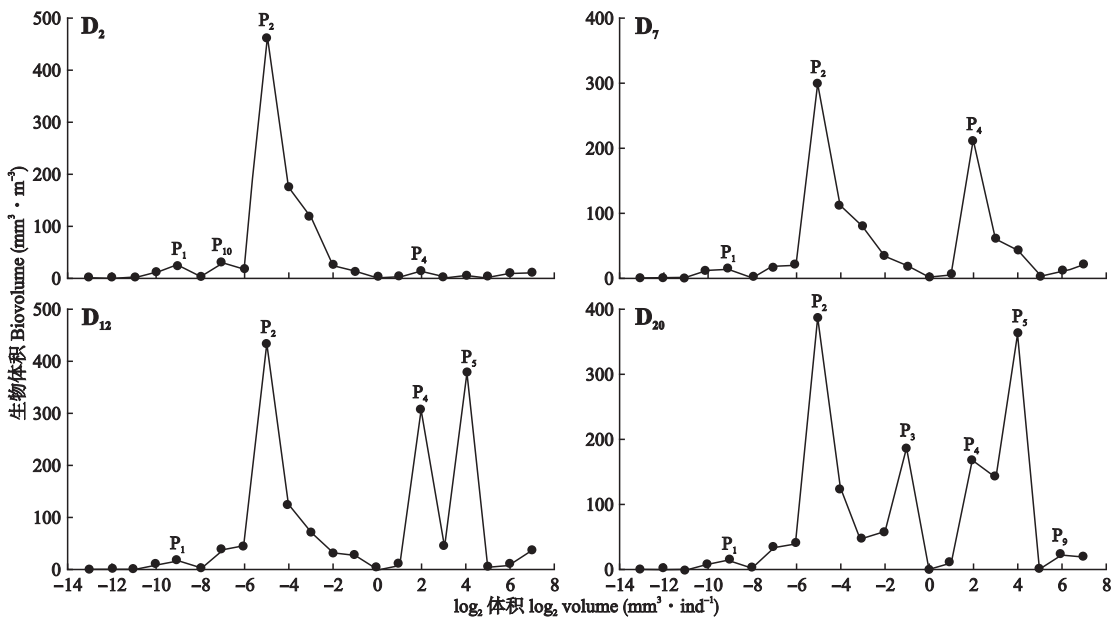


图 4 浮游动物生物体积粒径谱断面结构

Fig.4 Section structures of zooplankton biovolume size spectra.

D_2、D_7、D_{12} 和 D_{20} 代码分别表示距离排水口 0.2、0.7、1.2 和 2 km D_2, D_7, D_{12} and D_{20} stood for at a distance of 0.2, 0.7, 1.2 and 2 km away from the outfall of the power plant, respectively. 下同 The same below.

表 2　浮游动物不同断面粒级组的主要种类

Table 2　Main species of different size-class zooplankton in each section

编号 No.	对数粒级组 Log size group	峰代码 Peak code	断面 Section			
			D_2	D_7	D_{12}	D_{20}
1	−13.1～−12.1		砂壳虫 *Difflugia* sp.	砂壳虫 *Difflugia* sp.	砂壳虫 *Difflugia* sp.	砂壳虫 *Difflugia* sp.
2	−12.1～−11.1		布氏拟铃虫 *Tintinnopsis butschlii* 麻铃虫 *Leprotintinnus* sp.	麻铃虫 *Leprotintinnus* sp. 布氏拟铃虫 *Tintinnopsis butschlii*	布氏拟铃虫 *Tintinnopsis butschlii* 麻铃虫 *Leprotintinnus* sp.	布氏拟铃虫 *Tintinnopsis butschlii* 麻铃虫 *Leprotintinnus* sp.
3	−11.1～−10.1		–	镖剑水蚤 *Cyclopina* sp. 筒螅辐射幼虫 *Tubularia actinula*	镖剑水蚤 *Cyclopina* sp. 筒螅辐射幼虫 *Tubularia actinula*	筒螅辐射幼虫 *Tubularia actinula*
4	−10.1～−9.1	P_6	桡足类无节幼体 Copepod nauplius larva	桡足类无节幼体 Copepod nauplius larva 钟状网纹虫 *Favella campanula*	桡足类无节幼体 Copepod nauplius larva	桡足类无节幼体 Copepod nauplius larva
5	−9.1～−8.1	P_1	伪长腹剑水蚤 *Oithona fallax* 短角长腹剑水蚤 *Oithona brevicornis*	伪长腹剑水蚤 *Oithona fallax* 短角长腹剑水蚤 *Oithona brevicornis*	伪长腹剑水蚤 *Oithona fallax* 大同长腹剑水蚤 *Oithona similis*	短角长腹剑水蚤 *Oithona brevicornis* 伪长腹剑水蚤 *Oithona fallax*
6	−8.1～−7.1		长尾住囊虫 *Oikopleura longicauda* 等足类幼体 Isopoda larva	长尾住囊虫 *Oikopleura longicauda* 角水蚤 *Pontellidae* sp.	长尾住囊虫 *Oikopleura longicauda* 蛇尾类长腕幼虫 Ophiopluteus larva	长尾住囊虫 *Oikopleura longicauda* 涡虫类牟勒氏幼虫 Mullers larva
7	−7.1～−6.1	P_{10}	针刺拟哲水蚤 *Paracalanus aculeatus* 瓣鳃类幼虫 Lamellibranchia larva	针刺拟哲水蚤 *Paracalanus aculeatus* 瓣鳃类幼虫 Lamellibranchia larva	瓣鳃类幼虫 Lamellibranchia larva 针刺拟哲水蚤 *Paracalanus aculeatus*	针刺拟哲水蚤 *Paracalanus aculeatus* 克氏纺锤水蚤 *Acartia clausi*
8	−6.1～−5.1		多毛类幼虫 Polychaeta larva 长尾基齿哲水蚤 *Clausocalanus furcatus*	驼背隆哲水蚤 *Acrocalanus gibber* 小拟哲水蚤 *Paracalanus parvus*	小拟哲水蚤 *Paracalanus parvus* 长尾基齿哲水蚤 *Clausocalanus furcatus*	驼背隆哲水蚤 *Acrocalanus gibber* 小拟哲水蚤 *Paracalanus parvus*
9	−5.1～−4.1	P_2	桡足幼体 Copepods larva 鱼卵 Fish egg	桡足幼体 Copepods larva 鱼卵 Fish egg	桡足幼体 Copepods larva 鱼卵 Fish egg	桡足幼体 Copepods larva 鱼卵 Fish egg
10	−4.1～−3.1		异体住囊虫 *Oikopleura dioica* 瘦尾胸刺水蚤 *Centropages tenuiremis*	异体住囊虫 *Oikopleura dioica* 瘦尾胸刺水蚤 *Centropages tenuiremis*	瘦尾胸刺水蚤 *Centropages tenuiremis* 异体住囊虫 *Oikopleura dioica*	瘦尾胸刺水蚤 *Centropages tenuiremis* 异体住囊虫 *Oikopleura dioica*
11	−3.1～−2.1	P_7	墨氏胸刺水蚤 *Centropages mcmurrichi* 汤氏长足水蚤 *Calanopia thompsoni*	墨氏胸刺水蚤 *Centropages mcmurrichi* 汤氏长足水蚤 *Calanopia thompsoni*	墨氏胸刺水蚤 *Centropages mcmurrichi* 汤氏长足水蚤 *Calanopia thompsoni*	墨氏胸刺水蚤 *Centropages mcmurrichi* 汤氏长足水蚤 *Calanopia thompsoni*
12	−2.1～−1.1	P_8	真刺唇角水蚤 *Labidocera euchaeta* 亚强真哲水蚤 *Eucalanus subcrassus*	亚强真哲水蚤 *Eucalanus subcrassus* 短尾类幼体 Brachyura larva	短尾类幼体 Brachyura larva 长尾类幼虫 Macrura larva	亚强真哲水蚤 *Eucalanus subcrassus* 短尾类幼体 Brachyura larva
13	−1.1～−0.1	P_3	中华哲水蚤 *Calanus sinicus*	中华哲水蚤 *Calanus sinicus* 海洋真刺水蚤 *Euchaeta marina*	中华哲水蚤 *Calanus sinicus* 耳状囊水母 *Euphysa aurata*	中华哲水蚤 *Calanus sinicus* 海洋真刺水蚤 *Euchaeta marina*
14	−0.1～0.9		–	–	–	–
15	0.9～1.9		短额刺糠虾 *Acanthomysis brevirostris*	短额刺糠虾 *Acanthomysis brevirostris*	短额刺糠虾 *Acanthomysis brevirostris*	短额刺糠虾 *Acanthomysis brevirostris*
16	1.9～2.9	P_4	仔鱼 Fish larva 百陶箭虫 *Sagitta bedoti*	仔鱼 Fish larva 百陶箭虫 *Sagitta bedoti*	仔鱼 Fish larva 百陶箭虫 *Sagitta bedoti*	仔鱼 Fish larva 百陶箭虫 *Sagitta bedoti*
17	2.9～3.9		中华假磷虾 *Pseudeuphausia sinica*	中华假磷虾 *Pseudeuphausia sinica* 美丽箭虫 *Sagitta pulchra*	中华假磷虾 *Pseudeuphausia sinica*	中华假磷虾 *Pseudeuphausia sinica* 美丽箭虫 *Sagitta pulchra*

续表 2
Table 2 Continued

编号 No.	对数粒级组 Log size group	峰代码 Peak code	断面 Section D_2	D_7	D_{12}	D_{20}
18	3.9~4.9	P_5	球型侧腕水母 *Pleurobrachia globosa*	拿卡箭虫 *Sagitta nagae* 球型侧腕水母 *Pleurobrachia globosa*	拿卡箭虫 *Sagitta nagae* 球型侧腕水母 *Pleurobrachia globosa*	拿卡箭虫 *Sagitta nagae* 球型侧腕水母 *Pleurobrachia globosa*
19	4.9~5.9		–	印度八拟杯水母 *Octophialucium indicum* 阿利玛幼虫 Alima larva	阿利玛幼虫 Alima larva 印度八拟杯水母 *Octophialucium indicum*	–
20	5.9~6.9	P_9	瓜水母 *Beroe cucumis*	瓜水母 *Beroe cucumis*	瓜水母 *Beroe cucumis*	瓜水母 *Beroe cucumis*
21	6.9~7.9		日本毛虾 *Acetes japonicus*	日本毛虾 *Acetes japonicus*	日本毛虾 *Acetes japonicus*	日本毛虾 *Acetes japonicus*
年平均生物体积 Annual mean biovolume ($mm^3 \cdot m^{-3}$)			911.1	963.1	1590.0	1619.6
年平均丰度 Annual mean abundance ($ind \cdot m^{-3}$)			38167.7	27646.6	36537.5	32635.1
个体平均体积 Individual mean volume ($mm^3 \cdot ind^{-1}$)			0.024	0.035	0.044	0.050

D_2、D_7、D_{12}和 D_{20}代码分别表示距离排水口 0.2、0.7、1.2 和 2 km D_2, D_7, D_{12} and D_{20} stood for at a distance of 0.2, 0.7, 1.2 and 2 km away from the outfall of the power plant, respectively. 下同 The same below.

表 3 不同月份和断面的浮游动物粒级多样性
Table 3 Size-class diversity of zooplankton in different months and sections

指数 Index	月 Month 2	5	8	11	断面 Section D_2	D_7	D_{12}	D_{20}
粒级组数 Number of size group	10.00±1.49b	15.10±2.13a	14.40±2.17a	13.00±1.89a	12.50±1.29a	13.25±2.30a	13.83±3.19a	12.50±3.03a
Shannon 指数 Shannon index	1.42±0.11a	1.63±0.50a	1.53±0.39a	1.41±0.18a	1.27±0.16a	1.56±0.32a	1.57±0.44a	1.43±0.24a
均匀度 Evenness	0.62±0.04a	0.60±0.17a	0.57±0.14a	0.55±0.05a	0.51±0.09a	0.61±0.12a	0.60±0.14a	0.57±0.08a

不同月份或断面的同行不同字母表示显著差异($P<0.05$) Different letters in the same row meant significant difference among months or sections at 0.05 level.

2.2 标准化粒径谱

2.2.1 月份变化 由图 5 可以看出,截距从低到高分别是 11、2、5 和 8 月.从斜率变化来看,2 月斜率最小,5 月与 8 月斜率较相似且较大,11 月斜率在 4 个月中处于中等水平,说明 2 月小型浮游动物在群落中所占比例最高,11 月次之,而中大型浮游动物则以 5 月和 8 月最高.从象山港周年平均看(图 5),标准化粒径谱的截距为 4.68,斜率为-0.655.

2.2.2 断面变化 由图 6 可知,D_2断面截距最低,为 3.078,且随着断面距离增加而增加,到 D_{20}达到最大,截距最大为 5.462.从斜率变化看,D_2斜率最小为-0.968,D_7和 D_{12}断面斜率相似,分别为-0.660 和-0.668,而断面 D_{20}斜率最大为-0.545,说明距离排水口越近,浮游动物小型化越明显.

2.3 时空粒级多样性

不同月份间(表 3),以 2 月的粒级组数最低,5 月最高;Shannon 指数以 2 月和 11 月较低,5 月和 8 月较高;均匀度以 2 月和 5 月较高.经方差分析,不同月份的粒级组数存在显著差异,其中,2 月粒级组数显著低于其他月份;Shannon 指数和均匀度指数在不同月份间无显著差异.

在空间上,D_2断面和 D_{20}断面的粒级组数相似,且低于 D_7和 D_{12}断面;Shannon 指数和均匀度指数明显以 D_2断面最低,D_7和 D_{12}断面相似且较高,D_{20}断面指数值中等.经检验,不同粒级组数、Shannon 指数、均匀度在不同断面间差异均不显著.

3 讨 论

3.1 电厂温排水增温对浮游动物粒级的影响

电厂温排水对海域会产生不同程度增温,在象山港,温排水对海域表层增温范围约 1.63 km^2,距离排水口约 2 km 内[11],排水口 0.2 km 处年平均水温比 2 km 处高 2.16 ℃[10].本研究中,随着断面距离增加,浮游动物标准化粒径谱斜率增大(图 6),指示排水口海域水温增加时,大型浮游动物倾向于迁离排水口.在排水口 0.2 km 断面(图 4),高生物体积分布

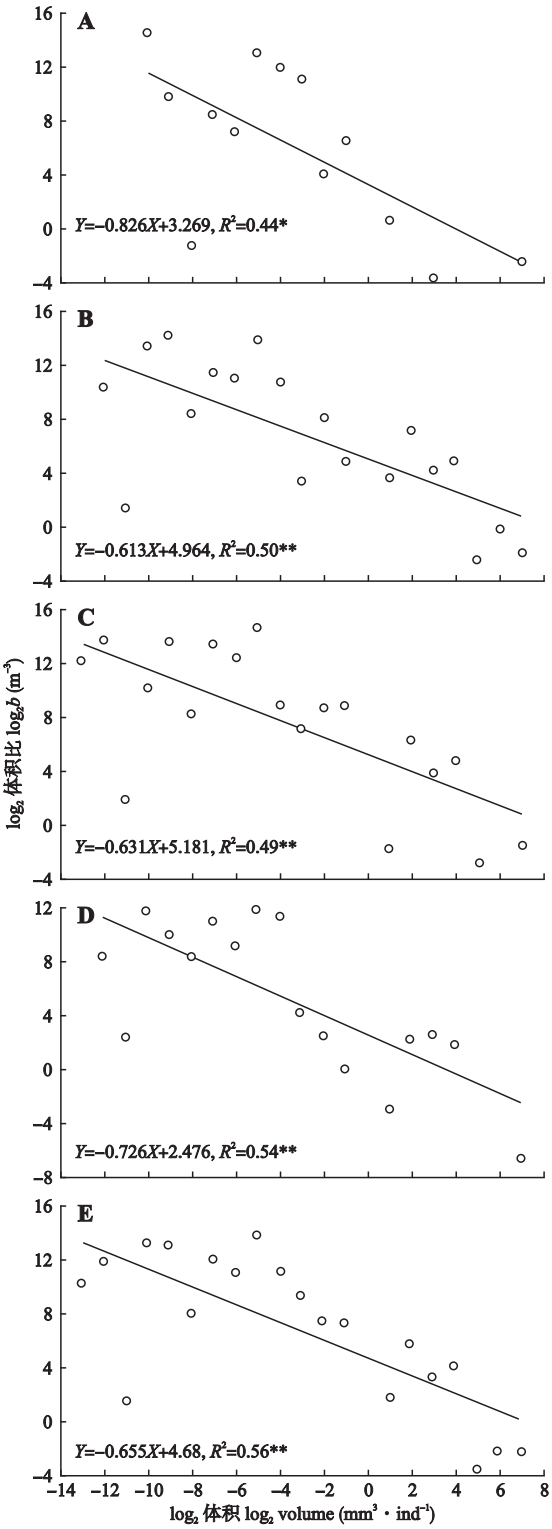


图 5　不同月份浮游动物的标准化粒径谱

Fig.5　Normalized biovolume size spectra of zooplankton in each month.

$*P<0.05$；$**P<0.01$. 下同 The same below.

种类主要有小型桡足幼体和剑水蚤，中大型浮游动物则主要出现在 1.2 或 2 km 断面，这导致0.2 km 断面粒级组数下降，Shannon 多样性指数和均匀度降低（表 3）.几个针对电厂增温研究也报道了这种现象，如个体较小、运动能力较低的桡足幼体，桡足类无节幼体，剑水蚤对增温影响不大，这些类群在不同增温区分布较均匀，而运动能力强的大型浮游动物明显避开排水口[6,17].从全球变暖研究结果看，在大陆架海域，小型浮游动物不受海域升温影响，但大型桡足类和磷虾类明显发生迁移[18].即使在南极海域增温 1 ℃，丰度占到 90%以上的 4 类大型浮游动物同样会发生区域迁移，使得部分种类丰度约下降 100 倍[19].

本研究表明，由于大型浮游动物从排水口向外迁移后，排水口个体平均体积比 2 km 处约小 1 倍，即个体小型化非常明显（表 2）.有趣的是，大型浮游动物发生迁移后，0.2 km 断面处浮游动物丰度不仅没有下降，反而在所有断面中最高（表 2），这说明大量的小型浮游动物大幅度聚集于排水口.经检查发现，丰度高于 1000 ind · m^{-3}的主要种类除桡足幼体和剑水蚤外，还有桡足类无节幼体、针刺拟哲水蚤、鱼卵、瓣鳃类幼体和原生动物的钟状网纹虫（*Favella campanula*），其中剑水蚤主要为伪长腹剑水蚤、短角长腹剑水蚤、大同长腹剑水蚤（*Oithona similis*）.已有研究认为，由于升温导致大型浮游动物外迁，要使升温海域浮游动物群落生物量稳定，必然需要补充更多小型浮游动物，即升温海域浮游动物粒级变小[20].显然，电厂增温会进一步加剧内湾浮游动物本已小型化的趋势，如对象山港 2 个电厂调查发现，温排水已导致小型桡足类克氏纺锤水蚤（*Acartia clausi*）丰度大幅增加[21].此外，有报道显示，海域升温也会使浮游植物小型化，粒级甚至小 1 个数量级[20]，因此，浮游动物的小型化很可能是对浮游植物小型化的适应性响应.由于海洋浮游动物的主要类群桡足类对环境变化响应是滞后的[22]，随着增温滞后响应的链锁反应，会不断引起部分桡足类的逐渐迁移[23]，直至改变区域物种库[24]，因而，增温区粒级变小是个渐进的长期过程.

3.2　电厂温排水增温对浮游动物生产力的影响

在标准化粒径谱研究中，斜率与截距是 2 个关键参数.其中，斜率除了可以评价上述的粒级结构外，还可评价营养传递效率、捕食关系和海域生产力[4,25]，但斜率与生产力关系解释不一致，主要有以下 3 种解释方法.第 1 种，与理论值相比的方法.当粒径谱以生物体积为单位时，由于稳定态的理论斜率为−1[5]，因此，当研究海域斜率与理论斜率−1 相比更陡时，指示该海域为高生产力，否则为低生产

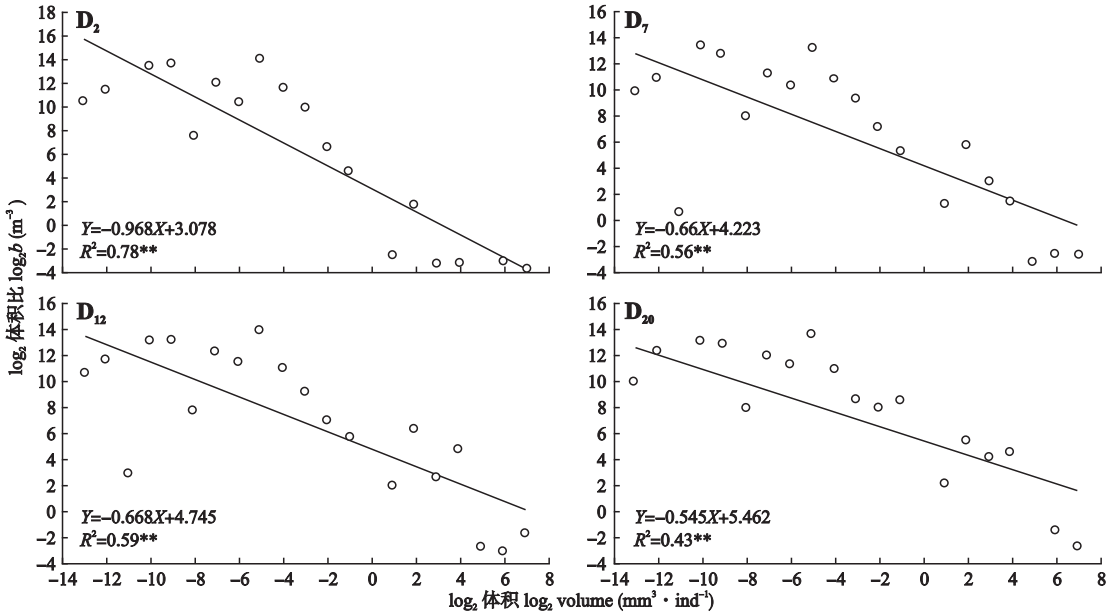


图 6 不同断面浮游动物标准化粒径谱

Fig.6 Normalized biovolume size spectra of zooplankton in each section.

力[26-27].第 2 种,更陡斜率具有高生产力,反之则为低生产力.Zhou 等[4]研究认为,更陡斜率通常有高比例的草食性浮游动物,因而可指示高生产力,而平缓斜率则与更小生产力相对应[28];第 3 种解释方法则与第 2 种结论相反.据已有研究,在寡营养生态系统中的生产力较小,且主要由微食物网提供,而微食物网由大量的小型生物构成,从而使斜率更陡[29].这符合寡营养生态系统特点,因小型生物具更高的表面积/体积值,使营养吸收更高效[28].然而,对上升流海域研究时却发现,当海域中有大量大型浮游动物时,其粒径谱斜率更平,但大型浮游动物的营养获得可直接通过上升流的脉冲扰动方式实现,因而也会具有高生产力[29].这些例子说明,在不同海域生态环境条件下,更陡或更平的斜率都可指示高生产力.因此,在应用粒径谱斜率时,尤其是对比研究时,对生产力解释不仅要根据海域的生态环境特征,而且还要检查制作粒径谱时的粒级范围,因为不同粒级范围产生的粒径谱斜率大小存在差异.

截距也可表征海域生产力大小,且应用更广泛.普遍认为,截距越大指示海域的生产力水平越高,反之则越低[7-8,28,30-31].据截距推断,由于距离排水口越近截距减少(图 6),表明当越靠近排水口高增温区时,浮游动物生产力越低.但我们认为,按照截距来推断增温海域生产力变化时,会存在如下 2 个大的偏差:一是,基于截距的生产力推断没有考虑浮游动物的生理代谢影响,而增温会影响生理代谢.按照 Huo 等[32]介绍的生理模型换算方法,生产力可通过以下 3 个公式计算:

$$\ln R_{O_2} = -0.2512 + 0.7886 \ln W + 0.049T$$

$$R_c = 0.215 R_{O_2}$$

$$P = 18 \times A \times R_c$$

式中:R_{O_2}为某种浮游动物个体呼吸率(μL O_2 · ind^{-1} · h^{-1});W 为个体干质量(mg C · ind^{-1});T 为水温;R_c是转换为碳单位后的个体呼吸率(mg C · ind^{-1} · h^{-1});A 为某种浮游动物丰度(ind · m^{-3});P 为每日生产力(mg C · m^{-3} · d^{-1}).显然,每日生产力 P 与水温变化呈正相关.有研究发现,浮游动物粒径谱截距的季节变化尽管与生物量变化一致,但截距与海区生产力高低并不完全一致[9,33].二是,基于截距的生产力推断也没有考虑增温会导致浮游动物周转增加的特殊性,这会低估海域的生产力.当水温升高时,不仅使浮游动物物种及其丰度周转加快[18,24,34],而且由于增温会导致浮游动物小型化,而小型浮游动物其生活史更短、周转更快、可多代生产[35],因此,尽管小型化后的总生物量降低(表 2),但对生产力贡献仍然巨大[36].很明显,基于截距的生产力推断会低估电厂增温海域的生产力,因此,海域增温对浮游动物的生产力影响仍有待进一步评估.

参考文献

[1] Sheldon RW, Parkash A, Sutcliffe WH. The size distribution of particles in the ocean. *Limnology and Oceanography*, 1972, **17**: 327-340

[2] Zhou L-B (周林滨), Tan Y-H (谭烨辉), Huang L-M (黄良民), *et al*. The advances in the aquatic particle/biomass size spectra study. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2010, **30**(12): 3319-3333 (in Chinese)
[3] Garcia-Comas G, Chang CY, Ye L, *et al*. Mesozooplankton size structure in response to environmental conditions in the East Sea: How much does size psectra theory fit empirical data of a dynamic coast area? *Progress in Ocenography*, 2014, **121**: 141-157
[4] Zhou M, Tande KS, Zhu Y, *et al*. Productivity, trophic levels and size spectra of zooplankton in northern Norwegian shelf regions. *Deep Sea Research* Ⅱ, 2009, **56**: 1934-1944
[5] Platt T, Denman K. The structure of pelagic marine ecosystems. *Journal du Conseil International pour l' Exploration de la Mer*, 1978, **173**: 60-65
[6] Jiang ZB, Zeng JN, Chen QZ, *et al*. Potential impact of rising seawater temperature on copepods due to coastal power plants in subtropical areas. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 2009, **368**: 196-201
[7] Li Z-S (李自尚), Liu G-X (刘光兴). Studies on the Community Characteristics and Size Spectra of Zooplankton in the Yellow River Estuary and Its Adjacent Waters in Spring. Master Thesis. Qingdao: Ocean University of China, 2012: 1-71 (in Chinese)
[8] Song L (宋　伦), Wang N-B (王年斌), Song Y-G (宋永刚), *et al*. Characteristics of particle size structure of plankton community in turbidity zone of nearshore waters, Liaoning Province of Northeast China. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2013, **24**(4): 900-908 (in Chinese)
[9] Peng R (彭　荣), Ma S-S (马绍赛), Zuo T (左涛). The Preliminary Study of Zooplankton Biomass Size Spectrum in the Centraland Southern Yellow Sea and Laizhou Bay. Master Thesis. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2012: 1-42 (in Chinese)
[10] Zhu Y-F (朱艺峰), Huang J-Y (黄简易), Lin X (林霞), *et al*. Spatiotemporal characteristics of zooplankton community structure and diversity in the strong temperature increment seawaters near Guohua power plant in Xiangshan Bay. *Environmental Science* (环境科学), 2013, **34**(4): 1498-1509 (in Chinese)
[11] Miao Q-S (苗庆生), Zhou L-M (周良明), Deng Z-Q (邓兆青). Numerical simulation and *in situ* measurement for heat discharge from Xiangshangang Power Plant into sea. *Coastal Engineering* (海岸工程), 2010, **29**(4): 1-11 (in Chinese)
[12] Zheng Z (郑　重), Li S-J (李少菁), Xu Z-Z (许振祖). Marine Planktology. Beijing: Ocean Press, 1984 (in Chinese)
[13] Shu Y-F (束蕴芳), Han M-S (韩茂森). Marine Plankton of China Illustrata. Beijing: Ocean Press, 1992 (in Chinese)
[14] Zhang J-B (张金标). Pelagic Siphonophora in China Seas. Beijing: Ocean Press, 2005 (in Chinese)
[15] Reichert MJM. Diet, consumption, and growth of juvenile fringed flounder (*Etropus crossotus*): A test of the 'maximum growth/optimum food hypothesis' in a subtropical nursery area. *Journal of Sea Research*, 2003, **50**: 97-116
[16] Wickham H. ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis. New York: Springer, 2009
[17] Evans MS, Warren GJ, Page DI. The effects of power plant passage on zooplankton mortalities: Eight years of study at the Donald C. Cook nuclear plant. *Water Research*, 1986, **20**: 725-734
[18] Stabeno PJ, Kachel NB, Moore SE, *et al*. Comparison of warm and cold years on the southeastern Bering Sea shelf and some implications for the ecosystem. *Deep Sea Research* Ⅱ, 2012, **65-70**: 31-45
[19] Mackey AP, Atkinson A, Hill SL, *et al*. Antarctic macrozooplankton of the southwest Atlantic sector and Bellingshausen Sea: Baseline historical distributions (Discovery Investigations, 1928-1935) related to temperature and food, with projections for subsequent ocean warming. *Deep Sea Research* Ⅱ, 2012, **59/60**: 130-146
[20] Yvon-Durocher G, Montoya JM, Trimmer M, *et al*. Warming alters the size spectrum and shifts the distribution of biomass in freshwater ecosystems. *Global Change Biology*, 2011, **17**: 1681-1694
[21] Wang Y-C (王扬才), Wu X-F (吴雄飞), Shi H-X (施慧雄), *et al*. Study on zooplankton communities near coastal power plants in Xiangshan Bay. *Journal of Ningbo University* (Natural Science and Engineering) (宁波大学学报：理工版), 2011, **24**(3): 5-10 (in Chinese)
[22] Bode A, Alvarez-Ossorio MT, Miranda A, *et al*. Comparing copepod time-series in the north of Spain: Spatial autocorrelation of community composition. *Progress in Oceanography*, 2012, **97-100**: 108-119
[23] Gregory B, Christophe L, Martin E. Rapid biogeographical plankton shifts in the North Atlantic Ocean. *Global Change Biology*, 2009, **15**: 1790-1803
[24] Hillebrand H, Soininen J, Snoeijs P. Warming leads to higher species turnover in a coastal ecosystem. *Global Change Biology*, 2010, **16**: 1181-1193
[25] Rodriguez J, Mullin MM. Relation between biomass and body weight of plankton in a steady state oceanic ecosystem. *Limnology & Oceanography*, 1986, **31**: 361-370
[26] Matsuno K, Yamaguchi A, Lmai L. Biomass size spectra of mesozooplankton in the Chukchi Sea during the summers of 1991/1992 and 2007/2008: An analysis using optical plankton counter data. *ICES Journal of Marine Science*, 2012, **69**: 1205-1217
[27] Sprules WG, Munawar M. Plankton size spectra in relation to ecosystem productivity, size and perturbation. *Canadian Journal of Fisheries & Aquatic Sciences*, 1986, **43**: 1789-1794
[28] Marcolin CR, Schultes S, Jackson GA, *et al*. Plankton and seston size spectra estimated by the LOPC and ZooScan in the Abrolhos Bank ecosystem (SE Atlantic). *Continental Shelf Research*, 2013, **70**: 74-87
[29] Iriarte JL, González HE. Phytoplankton size structure

during and after the 1997/98 El Niño in a coastal upwelling area of the northern Humboldt Current System. *Marine Ecology Progress Series*, 2004, **269**: 83-90

[30] Chen J-F (陈俊峰), Zuo T (左 涛). The Biomass Size Spectrum and Its Application in the Southern Yellow Sea. Master Thesis. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2013: 1-43 (in Chinese)

[31] Kimmel DG, Roman MR, Zhang X. Spatial and temporal variablility in factors affecting mesozooplankton dynamics in Chesapeake Bay: Evidence from biomass size specitra. *Limnology & Oceanography*, 2006, **51**: 131-141

[32] Huo Y, Sun S, Zhang F, *et al*. Biomass and estimated production properties of size-fractionated zooplankton in the Yellow Sea, China. *Journal of Marine Systems*, 2012, **94**: 1-8

[33] Liu Y-S (刘育莎). Studies of Ecological Characteristies of Food Zooplankton and Estimationof Secondary Production in Sansha Bay and Xinghua Bay, Fujian Province. Master Thesis. Xiamen: Xiamen University, 2009: 1-90 (in Chinese)

[34] Li Q (李 强), Ma C-A (马长安), Lyu W-W (吕巍巍), *et al*. Variations of zooplankton's community structure in reclaimed waters of Nanhui east tidal flat of Shanghai, East China. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2012, **23**(8): 2287-2294 (in Chinese)

[35] Park W, Sturdevant M, Orsi J, *et al*. Interannual abundance patterns of copepods during an ENSO event in Icy Strait, southeastern Alaska. *ICES Journal of Marine Science*, 2004, **61**: 464-477

[36] Zervoudaki S, Christou ED, Nielsen TG, *et al*. The importance of small-sized copepods in a frontal area of the Aegean Sea. *Journal of Plankton Research*, 2007, **29**: 317-338

作者简介 余 晶, 男, 1990 年生, 硕士研究生. 主要从事海洋生物学研究. E-mail: 348336679@qq.com

责任编辑 肖 红

余晶, 朱艺峰, 戴美霞, 等. 电厂温排水增温对浮游动物粒径谱的影响. 应用生态学报, 2017, **28**(5): 1687-1698
Yu J, Zhu Y-F, Dai M-X, *et al*. Effects of temperature increase on zooplankton size spectra in thermal discharge seawaters near a power plant, China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2017, **28**(5): 1687-1698 (in Chinese)