

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第34卷 第4期

Vol.34 No.4

2013

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

唐山大气颗粒物中水溶性无机盐的观测研究	苗红妍, 温天雪, 王丽, 李杏茹, 王跃思 (1225)
鼎湖山 PM _{2.5} 中水溶性离子浓度特征分析	赵亚南, 王跃思, 温天雪, 刘全 (1232)
北京夏冬季霾天气下气溶胶水溶性离子粒径分布特征	黄怡民, 刘子锐, 陈宏, 王跃思 (1236)
深圳市 PM _{2.5} 化学组成与时空分布特征	云慧, 何凌燕, 黄晓峰, 兰紫娟, 李响, 曾立武 (1245)
福州城市及郊区冬、夏两季大气中多环芳烃特征研究	易志刚, 黄幸然, 毕峻奇, 郭萍萍, 郑丽丽 (1252)
河西走廊及兰州地区典型有机氯农药的大气残留及时空分布特征	丁中原, 毛潇萱, 马子龙, 田慧, 郭强, 黄韬, 高宏, 李军, 张干 (1258)
淄博市大气污染特征模型模拟及环境容量估算	薛文博, 王金南, 杨金田, 雷宇, 燕丽, 贺晋瑜, 韩宝平 (1264)
香溪河秋季水-气界面温室气体通量日变化观测及影响因素分析	黄文敏, 朱孔贤, 赵玮, 余博识, 袁希功, 冯瑞杰, 毕永红, 胡征宇 (1270)
变异系数法评价人类活动对地下水环境的影响	赵微, 林健, 王树芳, 刘记来, 陈忠荣, 寇文杰 (1277)
基于 ArcSWAT 模型的长乐江流域非点源氮素污染源识别和分析	邓欧平, 孙嗣咏, 吕军 (1284)
西安周边河流溶解无机碳浓度及同位素组成初探	郭威, 李祥忠, 刘卫国 (1291)
滇池流域宝象河暴雨径流初始冲刷效应	郭怀成, 向男, 周丰, 王永华, 李发荣, 朱翔, 毛国柱, 于书霞, 李娜, 盛虎, 杨永辉, 何成杰, 王翠榆 (1298)
三峡库区沉积物秋冬初的磷释放通量估算	牛凤霞, 肖尚斌, 王雨春, 刘德富, 黎国育, 王亮, 纪道斌, 杨正健 (1308)
海南东部河流、河口及近岸水域颗粒态重金属的分布及污染状况	辛成林, 任景玲, 张桂玲, 郭亚平, 张国玲, 刘素美 (1315)
黄河口表层沉积物中重金属的环境地球化学特征	吴斌, 宋金明, 李学刚 (1324)
扎龙湿地沉积物重金属空间分布特征及其潜在生态风险评价	叶华香, 臧淑英, 张丽娟, 张玉红 (1333)
上海市典型疏浚泥重金属生态风险评价	唐庆丽, 程金平, 高昊旻, 姚磊, 蒋真毅, 吴旻, 谢翠松, 梁海, 王鹤, 皮帅帅, 余朝毅 (1340)
我国沿海地区城镇污水处理厂污泥重金属污染状况及其处置分析	张灿, 陈虹, 余忆玄, 王立军, 韩建波, 陶平 (1345)
江苏某地长江、太湖水源水及出厂水中有机物雌激素活性的比较	金涛, 吕学敏, 曾一凡, 张冰冰, 马鲲鹏, 姜朴, 唐非 (1351)
北京市污水处理厂中邻苯二甲酸酯污染水平及其归趋	周益奇, 刘云霞 (1357)
降解 DMF 引起污泥毒性及其毒性空间分布特性研究	胡园园, 杨娜, 丁毅, 徐文璐, 陈秀荣, 艾奇峰, 陈善佳, 王利鹏, 黄华 (1363)
渤海湾有机锡污染对野生脉红螺的生态风险	安立会, 张燕强, 宋双双, 刘玥, 高俊敏, 陈浩, 赵兴茹, 雷坤, 郑丙辉 (1369)
巨牡蛎 (<i>Crassostrea</i> sp.) 对燃煤电厂脱硫海水中汞的生物累积	刘锡尧, 袁东星, 陈耀瑾 (1374)
咪唑盐离子液体对蚯蚓急性毒性及体重影响研究	黄若男, 范军杰, 涂宏志, 谭凌燕, 刘惠君, 徐冬梅 (1380)
铝盐混凝除砷影响因素及机制研究	陈桂霞, 胡承志, 朱灵峰, 童华卿 (1386)
混凝和活性炭吸附去除微污染源水中 DON 的研究	刘冰, 余国忠, 古励, 赵承美, 李清飞, 翟慧敏 (1392)
活性炭催化臭氧氧化扑热息痛的机制研究	王佳裕, 戴启洲, 鱼杰, 颜亦舟, 陈建孟 (1402)
氯酚溶液的 γ 辐照还原降解研究	彭云霞, 何仕均, 龚文琪, 王建龙 (1411)
C/N 比对反硝化过程中亚硝酸盐积累的影响分析	袁怡, 黄勇, 邓慧萍, 盛学敏, 潘杨, 李祥 (1416)
以甲醇为碳源生物反硝化过程释放一氧化二氮的试验研究	翟晓峰, 蒋成爱, 吴光学, 曾运涛 (1421)
固体纤维素类废物作为反硝化碳源滤料的比选	李斌, 郝瑞霞 (1428)
基于能源回收的城市污水厌氧氨氧化生物脱氮新工艺	卢健聪, 高大文, 孙学影 (1435)
多模式厌氧/缺氧/好氧污水处理工艺的稳态与动态模拟	周振, 吴志超, 王志伟, 杜兴治, 蒋玲燕, 邢灿 (1442)
高氨氮废水与城市生活污水短程硝化系统菌群比较	赵志瑞, 马斌, 张树军, 李滨, 白志辉, 王晓辉, 庄国强, 张洪助 (1448)
活性污泥絮体的分形结构分析	阮晓东, 刘俊新 (1457)
负荷交替法快速培养好氧硝化颗粒污泥的研究	沈娜, 杨昌柱, 濮文虹, 罗应东 (1464)
预加不同比例不同粒径好氧颗粒对 SBR 中好氧颗粒污泥形成的影响	熊光城, 濮文虹, 杨昌柱 (1472)
同时回收氮磷提高碱性发酵污泥脱水性能的机制研究	张超, 陈银广, 顾国维 (1479)
利用流式细胞仪分选技术研究湖泊真核超微藻的遗传多样性	谢薇薇, 龚伊, 王张伟, 孔繁翔, 史小丽 (1485)
阿魏酸和香豆素对铜绿微囊藻的化感作用	郭亚丽, 傅海燕, 黄国和, 高攀峰, 柴天, 严滨, 廖欢 (1492)
象山港国华电厂强增温海域浮游动物群落结构和多样性的时空特征	朱艺峰, 黄简易, 林霞, 杨莹, 邢超, 严小军 (1498)
环氧树脂降解嗜盐菌的筛选及其处理高盐环氧树脂废水的特性研究	王进, 徐真, 彭书传, 夏明山, 岳正波, 陈天虎 (1510)
铜绿假单胞菌胞内酶粗提液对十溴联苯醚的降解	史广宇, 尹华, 叶锦韶, 彭辉, 张娜, 何宝燕 (1517)
酵母提取物对葡萄糖发酵生产生物破乳菌 <i>Alcaligenes</i> sp. S-XJ-1 的影响	黄翔峰, 王凯, 黎明霞, 王彩林, 陆丽君, 刘佳 (1524)
玉米秸秆厌氧降解复合菌系的微生物群落结构	乔江涛, 郭荣波, 袁宪正, 师晓爽, 许晓晖, 范晓蕾, 邱艳玲 (1531)
红霉素对产甲烷菌的抑制及其驯化	刘子旭, 孙力平, 李玉友, 邱春生 (1540)
4 种 NAPLs 污染物在二维砂箱中的指进锋面形态特征研究	杨宾, 李慧颖, 伍斌, 杜晓明, 李发生 (1545)
污灌区土壤中多环芳烃的垂直分布及可能来源	姚林林, 张彩香, 李佳乐, 廖小平, 王焰新 (1553)
呼和浩特市不同功能区土壤重金属污染特征及评价	郭伟, 孙文惠, 赵仁鑫, 赵文静, 付瑞英, 张君 (1561)
水稻光合同化碳在土壤不同粒径、密度分组中的分配特征	李苗苗, 聂三安, 陈晓娟, 罗璐, 朱捍华, 石辉, 葛体达, 童成立, 吴金水 (1568)
亚热带不同稻田土壤微生物量碳的剖面分布特征	盛浩, 周萍, 袁红, 廖超林, 黄运湘, 周清, 张杨珠 (1576)
施用堆腐有机肥对水稻土中六氯苯脱氯降解影响	刘翠英, 蒋新 (1583)
螯合剂和生物表面活性剂对 Cu、Pb 污染壤土的淋洗修复	刘霞, 王建涛, 张萌, 王力, 杨亚提 (1590)
不同温度下烧制的秸秆炭对可变电荷土壤吸附 Pb(II) 的影响	蒋田雨, 姜军, 徐仁扣, 周立祥, 王世梅 (1598)
绿色木霉改性玉米秸秆溢油吸附剂的制备及其性能研究	蓝丹琳, 彭丹, 郭楚玲, 朱超飞, 薛秀玲, 党志 (1605)
改性与成型层状氢氧化镁铝对不同水体中 PO ₄ ³⁻ 的脱除性能	邢坤, 王海增 (1611)
羧基化碳纳米管载铂催化剂对微生物燃料电池阴极氧还原性能的影响	涂丽杏, 朱能武, 吴平霄, 李平, 吴锦华 (1617)
新型生物质活性炭烟气脱硫研究	刘洁岭, 汤争光, 陈杰, 蒋文举, 江霞 (1623)
城市工业行业能源消费强度等级划分方法及应用	毛建素, 马兰 (1628)
厦门城市化进程中的居民食物碳消费及其环境负荷	闫祯, 崔胜辉, 李桂林, 任引, 徐礼来 (1636)
《环境科学》征订启事 (1283) 《环境科学》征稿简则 (1332) 信息 (1350, 1509, 1582, 1644) 专辑征稿通知 (1523)	

象山港国华电厂强增温海域浮游动物群落结构和多样性的时空特征

朱艺峰^{1,2}, 黄简易¹, 林霞^{1,2}, 杨莹¹, 邢超¹, 严小军^{1,2}

(1. 宁波大学海洋学院, 宁波 315211; 2. 宁波大学应用海洋生物技术教育部重点实验室, 宁波 315211)

摘要: 为探明电厂强增温海域浮游动物群落结构和多样性的时空特征, 于 2011 年在象山港国华电厂附近海域, 采用浮游生物 II 型网(网目 160 μm)进行 10 站位 2 重复的浮游动物季节性采样。结果表明, 共识别出 62 种浮游动物(含幼体), 平均丰度为 9 531.1 ind·m⁻³。该海域浮游动物群落主要由桡足类和浮游幼体类组成, 且以浮游幼体类为主, 比例高达 66.6%。相似性分析显示, 各月间浮游动物群落结构差异极显著($P < 0.01$), 控制群落结构的优势种有 18 种, 最重要的判别种有瘦尾胸刺水蚤 *Centropages tenuiremis*、大同长腹剑水蚤 *Oithona similis*、伪长腹剑水蚤 *Oithona fallax*、克氏纺锤水蚤 *Acartia clausi*、长尾基齿哲水蚤 *Clausocalanus furcatus*、针刺拟哲水蚤 *Paracalanus aculeatus* 和小拟哲水蚤 *Paracalanus parvus*。GLM 分析显示, 月份间的多样性指数也存在极显著差异($P < 0.01$), 经计算, 各多样性指数随水温增加而下降的拐点水温范围为 20.31 ~ 22.31℃。在断面上, 离排水口 0.2 km 断面(D02)的平均水温比 2 km 断面高 2.16℃。受温度影响, 主要优势种如瘦尾胸刺水蚤和长腹剑水蚤倾向于向 D02 断面移动, 克氏纺锤水蚤、尤其是大型浮游动物倾向于远离排水口, 并向 1.2 km 断面聚集, 使 D02 断面的种类数最少(33 种)、丰度最低(5 522.8 ind·m⁻³), 而 1.2 km 断面的种类数(53 种)和丰度(16 491.0 ind·m⁻³)最高; 同时, D02 断面的多样性指数也明显低于其它断面。经线性回归分析, 海域增温使多样性指数极显著下降($P < 0.01$), 每增温 1℃浮游动物丰富度下降 12.3%。

关键词: 象山港; 电厂; 增温; 浮游动物; 多样性; 适应性; 网目

中图分类号: X171; X835 **文献标识码:** A **文章编号:** 0250-3301(2013)04-1498-12

Spatiotemporal Characteristics of Zooplankton Community Structure and Diversity in the Strong Temperature Increment Seawaters near Guohua Power Plant in Xiangshan Bay

ZHU Yi-feng^{1,2}, HUANG Jian-yi¹, LIN Xia^{1,2}, YANG Ying¹, XING Chao¹, YAN Xiao-jun^{1,2}

(1. School of Marine Sciences, Ningbo University, Ningbo 315211, China; 2. Key Laboratory of Applied Marine Biotechnology, the Ministry of Education, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

Abstract: To explore the spatiotemporal characteristics of the zooplankton community structure and diversity in the strong temperature increment seawaters near a power plant, zooplankton samples were seasonally collected in duplicate by the type II net with mesh size of 160 μm at 10 stations near Guohua power plant in Xiangshan Bay in 2011. The results showed that a total of 62 species (including larvae) were identified in the samples, and the average abundance was 9 531.1 ind·m⁻³. In the seawaters, zooplankton communities were mainly composed of copepods and pelagic larvae, and pelagic larvae were the dominant with an average percentage of abundance reached up to 66.6%. Analysis of similarities demonstrated that significant differences existed in zooplankton community structures among different months ($P < 0.01$). In these zooplankton communities, there were 18 dominant species controlling these community structures, among which the most important discriminating species were *Centropages tenuiremis*, *Oithona similis*, *Oithona fallax*, *Acartia clausi*, *Clausocalanus furcatus*, *Paracalanus aculeatus* and *Paracalanus parvus*. GLM analysis indicated that diversity indices were also significantly different among different months ($P < 0.01$). According to the calculation results, the inflection point, where the diversity index began to decrease with increasing water temperature, fell within 20.31-22.31℃. In sections, the average water temperature in the 0.2 km section (D02), away from the outfall, was 2.16℃ higher than that in the 2 km section. Driven by temperature, the main dominant species such as *C. tenuiremis* and *O. similis* tended to move into the 0.2 km section, while *A. clausi* and especially large zooplankton tended to stay away from the outfall, and then gathered in the 1.2 km section. As a result, the number of species (33 species) and abundance (5 522.8 ind·m⁻³) were minimum in the section D02, while the number of species (53 species) and abundance (16 491.0 ind·m⁻³) reached the highest in the 1.2 km section. Meanwhile, diversity indices in the 0.2 km section were also obviously lower than those in other sections. Linear regression analysis showed that the diversity indices significantly

收稿日期: 2012-07-30; 修订日期: 2012-10-10

基金项目: 海洋公益性行业科研专项(201105009-3); 国家科技支撑计划项目(2011BAD13B08); 浙江省自然科学基金项目(Y5100369, Y5080274); 海洋赤潮灾害立体监测技术与应用国家海洋局重点实验室基金重点项目(MATHAB200902); 宁波市自然科学基金项目(2011A610015)

作者简介: 朱艺峰(1964 ~)男, 副教授, 主要研究方向为海洋生物资源与环境, E-mail: zhuyifeng@nbu.edu.cn

decreased with increasing water temperature ($P < 0.01$). The zooplankton richness decreased by 12.3% when the water temperature increased by 1°C .

Key words: Xiangshan Bay; power plant; temperature increment; zooplankton; diversity; adaptation; mesh size

浮游动物在海洋生态系统中是链接浮游植物和高营养层次生物的一个关键环节,其时空分布受到许多环境因子的影响,其中,温度是最重要的影响因素之一^[1,2]. 近年来,随着象山港社会 and 经济发展,一批能源和基础设施相继建成,而电厂建设的温排水会影响附近海域的生态环境和海洋生物资源^[3,4].

涉及电厂温排水对浮游动物影响研究很多,除了利用室内可控实验来探讨浮游动物的热忍耐外^[5],广泛采用的是野外大面站调查,调查时在排水口附近设点并与整个海域其它站位进行对比分析^[3,6~8],但这些野外研究仍存在 2 个主要问题值得进一步探讨. 一是研究的网目过大,基本上使用上世纪 50~60 年代规定的浮游生物 I 型网(网目 $505\ \mu\text{m}$)^[9],涉及到 II 型网(网目 $160\ \mu\text{m}$)极少^[8]. 近年来,随着浮游动物研究的深入,已发现小网目丰度比大网目丰度高出几十倍到上百倍^[10,11],由于群落分析基本上使用丰度值,这意味着使用 I 型网时,仅用了调查海域 1%~10% 的丰度值来推断整个浮游动物的群落格局. 此外,大网目对小型桡足类检出率低,对物种数乃至生物多样性的结果有不同程度影响^[11,12],甚至会产生错误的结论^[13]. 二是对温排水影响的强增温海域(高于自然水温 3°C 以上^[14])仍缺乏系统的研究. 虽然温排水影响与电厂地形、排水量、海域水文状况、调查站位等有关^[15],这会对不同海域水温产生时空影响,如夏季海域温升 $1.3\sim 10^{\circ}\text{C}$ ^[8,14];大亚湾海域影响面积达 $5.51\ \text{km}^2$ ^[3],而国华电厂

表层增温面积为 $1.63\ \text{km}^2$ ^[16]. 但是,受温排水直接冲击所产生的强增温海域范围是小的,且明显存在随距离增加而下降的水温梯度变化,从距离上看,一般在 $1\sim 2\ \text{km}$ 内^[17]. 如国华电厂冬季温排水引起海域增温达 8°C 到恢复正常水温也仅 $1\ \text{km}$ 距离^[18],而针对这仅 $1\ \text{km}$ 左右距离、导致海域强增温的浮游动物群落结构和多样性变化却缺乏系统研究.

因此,本研究拟采用浮游生物 II 型网,在象山港国华电厂温排水的强增温海域进行浮游动物群落结构和多样性研究,目标是查明该海域:①浮游动物群落结构的时空变化特征;②多样性变化及其与温度的关系;③不同网目研究所得结果的差异. 此外,探讨电厂附近海域浮游动物对海域升温的适应性变化,以期今后电厂温排水对海域环境影响和生物多样性评价提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 研究海域概况与调查站位

象山港位于浙江省沿海中北部,海域面积 $563\ \text{km}^2$,长约 $70\ \text{km}$,水深约 $10\ \text{m}$. 国华电厂坐落于港底区(图 1),电厂的取水口设置在铁港的卸煤码头附近,排水口设置在铁港入口附近. 在港底海域,海流较平稳,水交换缓慢,95% 水交换率约需 4 个月^[19]. 此外,港底海域生物资源比象山港其它海域丰富,历来是部分鱼类的主要繁殖场所.

站位设置主要考虑电厂的增温影响范围^[16,17]和调查船只的可进入程度. 排水口南侧因浅滩而未设

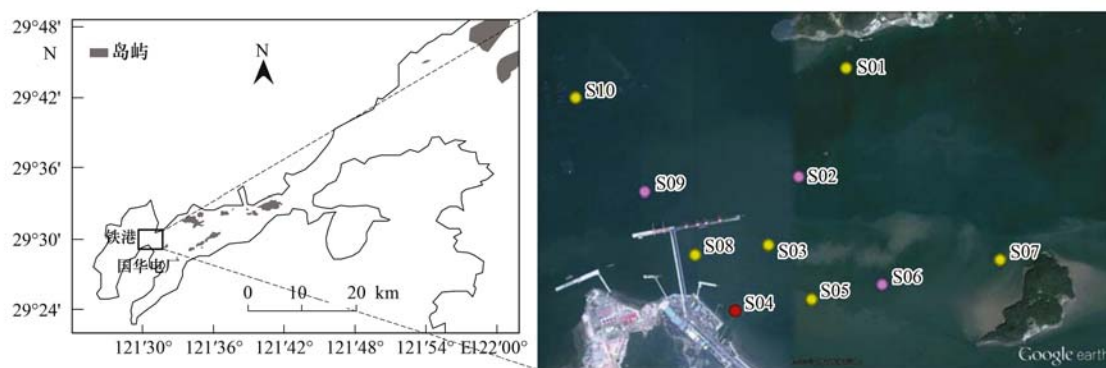


图 1 采样站位设置示意

Fig. 1 Distribution of sampling stations

置采样点,进水口由于位于增温区内^[16],不能作为温度对照组,也不进行取样分析. 因此,采样共设置 10 个站位,并按照距离排水口 0.2、0.7、1.2 和 2.0 km 划分为 4 个断面,分别记为 D02、D07、D12 和 D20 断面. 除 D02 断面只设一个站位(S04)外,D07(S08、S03、S05)、D12(S09、S02、S06)和 D20(S10、S01、S07)断面分别设置 3 个采样站位(图 1).

1.2 样品采集、处理与水温检测

采样时间为 2011 年 2 月 26 日、5 月 24 日、8 月 28 日和 11 月 25 日. 各站位浮游动物样品用网口带数字流量计(Hydro-Bios, 德国)的浅水浮游生物 II 型网(网目 160 μm , 网长 140 cm, 网口面积 0.08 m^2)进行 2 重复垂直拖网,样品 5% 福尔马林固定. 室内计数和物种鉴定用体视镜(Olympus SZX9)或显微镜(Olympus BX41),物种鉴定参照文献[20~22]. 计数时,大型浮游动物和稀疏种全部计数,优势种则用 Folsom 浮游生物分样器(Hydro-Bios, 德国)反复二分样品,直至样品中含 200 个以上优势种进行计数. 计数值按滤水量转换为丰度值($\text{ind}\cdot\text{m}^{-3}$),生物量因水体中较多小颗粒煤灰干扰未称量.

水温测定与拖网同步,用附带温度计的南森采水器(Hydro-Bios, 德国),记录表层和底层约 50 cm 处的水温,平均值作为拖网时的水柱温度.

1.3 计算

1.3.1 优势种

根据优势度值大于 0.02 确定^[23].

1.3.2 多样性指数

Margalef 丰富度:

$$d = \frac{S-1}{\ln N}$$

Shannon 多样性指数:

$$H' = - \sum_{i=1}^S (P_i \times \ln P_i)$$

Pielou 均匀度:

$$J' = \frac{H'}{\ln S}$$

Simpson 指数:

$$D' = 1 - \frac{\sum_{i=1}^S n_i(n_i - 1)}{N(N - 1)}$$

式中, S 为某站位样品总物种数, N 为该样品所有物种总个体数, P_i 为该样品中第 i 种个体数(n_i)与总个体数之比(N)^[24].

1.4 数据处理与统计分析

由于不同浮游动物具极高的数量差异,丰度经 $\ln(X+1)$ 转换^[25],再用 Bray-Curtis 相似性系数构建三角矩阵. 群落格局识别时,先经非约束排序的多维尺度分析(Multidimensional Scaling, MDS)以直观判断群落格局,再结合基于组平均连接法(Group-average link)的聚类分析进行格局确认. 不同月份间、不同断面间的群落格局显著性差异经相似性分析(One-Way ANOSIM). 浮游动物种类对各月份、各断面群落的贡献大小用相似性百分比(SIMPER)分析. 上述所有分析,包括多样性分析均在 PRIMER (Ver. 6.1.15) 软件中进行^[24],统计学概率(P)计算基于 999 次随机排列.

不同月份和断面间的水温、多样性指数均经一般线性模型(GLM)方差分析,平均值经 Tukey 检验. 分析前,水温和多样性指数经平方根转换. 多样性指数与温度的拟合曲线用回归分析(REG),曲线拐点温度求解用优化程序(NLP,非线性规划). 为进一步分析增温幅度对生物多样性的影响,以各月份最低水温为基准,各站位水温与基准的差值作为增温幅度,然后与多样性指数进行回归分析(REG). 上述 GLM 方差分析、回归分析及优化计算采用 SAS 9.0 软件^[26].

2 结果与分析

2.1 研究海域水温变化

由表 1 可知,月份间的水温差异极显著($P < 0.01$),8 月水温最高,2 月最低. 据不同月份的断面水温分析,离排水口远水温降低明显. 其中,2 月断面间温差最大,0.2 km 断面水温比 2 km 断面显著高出 4.35 $^{\circ}\text{C}$; 5 月和 11 月的 0.2 km 断面水温显著高于 1.2 km 断面; 8 月未检出水温显著下降($P > 0.05$). 从年平均水温变化看,0.2 km 断面比 2 km 断面平均水温高 2.16 $^{\circ}\text{C}$.

2.2 种类组成与丰度

4 个调查月份共识别出 10 个大类、62 种浮游动物(包括幼体,见表 2),其中,桡足类 33 种,毛颚类、水螅水母类、栉水母类、端足类和糠虾类各 2 种,被囊类、十足类和磷虾类各 1 种,浮游幼体类 16 种(包括仔鱼和卵). 各月出现的种类数中,以 5 月最多,2 月最少,相差 30 种; 8 月和 11 月种类数居中,比 2 月多 12 种以上. 不同断面中,离排水口越远种类数明显增加,以 1.2 km 断面最高,比 0.2 km 断面多 20 种,而 2.0 km 和 1.2 km 断面的种类数相当.

表 1 采样月份和断面的平均水温¹⁾ (平均值 ± 标准差) / °C

Table 1 Mean temperature of sampling month and section (Mean ± SD) / °C

月份	月平均	断面			
		D02	D07	D12	D20
2	12. 08 ± 1. 93 ^d	15. 01 ± 3. 45 ^X	12. 78 ± 1. 81 ^{XY}	11. 83 ± 1. 01 ^{XY}	10. 66 ± 1. 01 ^Y
5	21. 45 ± 1. 13 ^b	23. 30 ± 1. 48 ^X	21. 57 ± 1. 06 ^{XY}	20. 95 ± 0. 97 ^Y	21. 23 ± 0. 77 ^{XY}
8	29. 61 ± 0. 58 ^a	30. 08 ± 0. 85	29. 72 ± 0. 55	29. 69 ± 0. 66	29. 24 ± 0. 31
11	18. 51 ± 0. 61 ^c	19. 63 ± 1. 32 ^X	18. 58 ± 0. 42 ^{XY}	18. 34 ± 0. 31 ^Y	18. 24 ± 0. 40 ^Y
年平均	20. 41 ± 6. 45	22. 00 ± 6. 09	20. 66 ± 6. 33	20. 20 ± 6. 58	19. 84 ± 6. 83

1) 同列不同上标字母(a、b、c、d)代表月份间差异显著; 同行不同上标(X、Y)代表断面间差异显著; D02、D07、D12 和 D20 分别为离排水口 0.2、0.7、1.2 和 2.0 km 断面

表 2 浮游动物的时空丰度¹⁾ / ind·m⁻³

Table 2 Spatiotemporal abundance of marine zooplankton / ind·m⁻³

种类	月份				断面				年平均
	2	5	8	11	D02	D07	D12	D20	
桡足类 Copepoda	3 921. 21 (33. 83)	1 806. 56 (83. 42)	6 670. 98 (28. 22)	296. 17 (40. 59)	1 938. 08 (35. 09)	1 904. 06 (29. 25)	5 405. 02 (32. 78)	2 623. 99 (37. 87)	3 173. 71 (33. 30)
1. 克氏纺锤水蚤 <i>Acartia clausi</i>	—	199. 59	1 417. 69	13. 24	93. 67	109. 63	742. 36	475. 55	407. 63
2. 红眼纺锤水蚤 <i>Acartia erythraea</i>	—	0. 52	—	—	—	—	0. 16	0. 27	0. 13
3. 太平洋纺锤水蚤 <i>Acartia pacifica</i>	—	29. 20	207. 41	8. 47	31. 30	38. 77	132. 06	22. 97	61. 27
4. 刺尾纺锤水蚤 <i>Acartia spinicauda</i>	—	0. 64	—	—	—	—	—	0. 53	0. 16
5. 中华哲水蚤 <i>Calanus sinicus</i>	—	10. 58	—	—	0. 27	0. 40	1. 50	6. 83	2. 64
6. 背针胸刺水蚤 <i>Centropages dorsispinatus</i>	—	0. 21	—	—	—	—	—	0. 18	0. 05
7. 墨氏胸刺水蚤 <i>Centropages mcmurrichi</i>	418. 56	1. 52	—	—	145. 56	94. 92	127. 97	78. 67	105. 02
8. 瘦尾胸刺水蚤 <i>Centropages tenuiremis</i>	2 657. 36	0. 17	—	0. 29	686. 36	570. 20	680. 17	735. 69	664. 45
9. 左指华哲水蚤 <i>Sinocalanus laevidactylus</i>	401. 46	—	—	—	352. 43	68. 54	126. 20	22. 34	100. 37
10. 细巧华哲水蚤 <i>Sinocalanus tenellus</i>	82. 63	—	—	0. 29	—	35. 30	33. 56	0. 24	20. 73
11. 精致真刺水蚤 <i>Euchaeta concinna</i>	—	0. 43	—	0. 29	—	—	0. 18	0. 42	0. 18
12. 海洋真刺水蚤 <i>Euchaeta marina</i>	—	0. 91	1. 81	—	—	0. 05	1. 51	0. 71	0. 68
13. 驼背隆哲水蚤 <i>Acrocalanus gibber</i>	—	1. 03	0. 12	—	1. 28	0. 44	—	0. 10	0. 29
14. 针刺拟哲水蚤 <i>Paracalanus aculeatus</i>	13. 16	183. 08	462. 11	77. 59	50. 95	126. 70	336. 84	132. 74	183. 98
15. 强额拟哲水蚤 <i>Paracalanus crassirostris</i>	31. 15	98. 27	1 341. 49	53. 93	81. 43	128. 35	888. 41	226. 80	381. 21
16. 小拟哲水蚤 <i>Paracalanus parvus</i>	10. 09	155. 56	2 417. 41	40. 79	89. 29	246. 71	1 537. 88	372. 19	655. 96
17. 汤氏长足水蚤 <i>Calanopia thompsoni</i>	—	0. 03	32. 82	6. 12	9. 57	13. 13	9. 50	6. 65	9. 74
18. 唇角水蚤 <i>Labidocera</i> sp.	—	—	12. 54	—	6. 61	1. 80	5. 71	0. 74	3. 13
19. 双刺唇角水蚤 <i>Labidocera bipinnata</i>	—	0. 21	—	—	—	—	—	0. 18	0. 05
20. 真刺唇角水蚤 <i>Labidocera euchaeta</i>	—	6. 76	3. 73	0. 26	0. 92	0. 05	5. 11	3. 49	2. 69
21. 长尾基齿哲水蚤 <i>Clausocalanus furcatus</i>	—	188. 56	413. 53	54. 51	28. 90	125. 89	258. 85	152. 79	164. 15
22. 太平洋真宽水蚤 <i>Eurytemora pacifica</i>	7. 67	—	—	—	9. 68	—	3. 17	—	1. 92
23. 特氏歪水蚤 <i>Tortanus derjuginii</i>	1. 70	0. 33	18. 36	0. 05	3. 64	10. 54	1. 51	3. 77	5. 11
24. 钳状歪水蚤 <i>Tortanus forcipatus</i>	—	—	48. 42	0. 31	3. 64	9. 73	21. 83	7. 83	12. 18
25. 刺尾歪水蚤 <i>Tortanus spinicaudatus</i>	11. 01	—	—	—	—	—	9. 18	—	2. 75
26. 虫肢歪水蚤 <i>Tortanus vermiculus</i>	—	0. 99	—	—	—	0. 06	0. 76	—	0. 25
27. 日本角眼剑水蚤 <i>Corycaeus japonicus</i>	41. 84	—	—	0. 73	0. 66	14. 55	10. 74	9. 96	10. 64
28. 短角长腹剑水蚤 <i>Oithona brevicornis</i>	176. 95	131. 49	246. 88	10. 87	77. 08	107. 82	202. 09	136. 22	141. 55
29. 伪长腹剑水蚤 <i>Oithona fallax</i>	—	211. 73	—	15. 23	36. 83	46. 66	75. 43	54. 77	56. 74
30. 大同长腹剑水蚤 <i>Oithona similis</i>	34. 67	584. 65	40. 24	12. 63	204. 90	143. 48	185. 25	163. 13	168. 05
31. 齿隆剑水蚤 <i>Oncaea dentipes</i>	—	—	6. 42	0. 57	—	—	0. 47	5. 35	1. 75
32. 挪威小毛猛水蚤 <i>Microsetella norvegica</i>	3. 87	0. 10	—	—	9. 68	—	0. 08	—	0. 99
33. 红小毛猛水蚤 <i>Microsetella rosea</i>	29. 09	—	—	—	13. 43	10. 34	6. 54	2. 88	7. 27
毛颚类 Chaetognatha	—	2. 11 (0. 10)	16. 07 (0. 07)	0. 89 (0. 12)	—	4. 73 (0. 07)	7. 87 (0. 05)	3. 29 (0. 05)	4. 77 (0. 05)
1. 百陶箭虫 <i>Sagitta bedoti</i>	—	1. 24	16. 07	0. 89	—	4. 68	7. 66	2. 83	4. 55
2. 拿卡箭虫 <i>Sagitta nagae</i>	—	0. 87	—	—	—	0. 05	0. 21	0. 46	0. 22
被囊类 Tunicata	—	0. 06 (0)	—	—	—	0. 05 (0)	—	—	0. 01 (0)

续表 2

种类	月份				断面				年平均
	2	5	8	11	D02	D07	D12	D20	
1. 异体住囊虫 <i>Oikopleura dioica</i>	—	0.06	—	—	—	0.05	—	—	0.01
水螅水母类 Hydromedusae	—	0.38 (0.02)	—	—	—	0.06 (0)	0.25 (0)	—	0.10 (0)
1. 耳状囊水母 <i>Euphysa aurata</i>	—	0.30	—	—	—	—	0.25	—	0.08
2. 印度八拟杯水母 <i>Octophialucium indicum</i>	—	0.08	—	—	—	0.06	—	—	0.02
栉水母类 Ctenophora	—	1.19 (0.05)	—	0.05 (0.01)	—	0.27 (0)	0.17 (0)	0.59 (0.01)	0.31 (0)
1. 瓜水母 <i>Beroe cucumis</i>	—	0.51	—	—	—	0.10	0.06	0.26	0.13
2. 球型侧腕水母 <i>Pleurobrachia globosa</i>	—	0.68	—	0.05	—	0.17	0.11	0.33	0.18
端足类 Amphipoda	0.10 (0)	0.10 (0)	0.05 (0)	0.12 (0.02)	—	0.18 (0)	0.04 (0)	0.09 (0)	0.09 (0)
1. 麦杆虫 <i>Caprella</i> sp.	—	0.05	—	—	—	0.04	—	—	0.01
2. 钩虾 <i>Monoculodes</i> sp.	0.10	0.05	0.05	0.12	—	0.14	0.04	0.09	0.08
十足类 Decapoda	—	—	0.15 (0)	—	—	0.08 (0)	—	0.05 (0)	0.04 (0)
1. 日本毛虾 <i>Acetes japonicus</i>	—	—	0.15	—	—	0.08	—	0.05	0.04
磷虾类 Euphausiacea	—	0.32 (0.01)	0.59 (0)	0.25 (0.03)	—	0.36 (0.01)	0.48 (0)	0.13 (0)	0.29 (0)
1. 中华假磷虾 <i>Pseudeuphausia sinica</i>	—	0.32	0.59	0.25	—	0.36	0.48	0.13	0.29
糠虾类 Mysidacea	—	1.19 (0.05)	0.17 (0)	0.07 (0.01)	—	0.04 (0)	0.28 (0)	0.86 (0.01)	0.36 (0)
1. 短额刺糠虾 <i>Acanthomysis brevirostris</i>	—	0.85	0.17	0.07	—	0.04	0.11	0.75	0.27
2. 儿岛囊糠虾 <i>Gastrosaccus kojimaensis</i>	—	0.34	—	—	—	—	0.17	0.11	0.09
浮游幼体类 Pelagic larva	7 668.33 (66.17)	353.62 (16.33)	16 951.67 (71.71)	432.06 (59.22)	3 584.66 (64.91)	4 598.97 (70.66)	11 076.87 (67.17)	4 300.7 (62.06)	6 351.42 (66.64)
1. 卵 Eggs	—	32.83	8 808.23	127.65	1 086.21	1 704.35	4 500.43	907.07	2 242.18
2. 仔鱼 Fish larva	—	52.26	0.63	0.03	1.01	2.23	40.05	1.48	13.23
3. 桡足幼体 Copepods larva	5 020.86	102.14	5 332.5	242.18	1 663.90	1 808.48	4 318.37	2 233.25	2 674.42
4. 桡足类无节幼体 Copepods nauplius larva	2 643.96	10.16	5.06	1.19	642.48	481.84	568.52	952.47	665.09
5. 蔓足类幼虫 Cirripedite larva	—	1.17	1.41	5.04	2.01	2.59	1.95	1.14	1.90
6. 等足类幼虫 Isopoda larva	—	0.16	—	—	—	0.13	—	—	0.04
7. 阿利玛幼体 Squillidae alima larva	—	0.04	0.06	—	—	—	0.08	—	0.02
8. 瓣鳃类幼虫 Lamellibranchia larva	—	—	2 322.95	32.64	164.24	491.38	1 286.38	130.49	588.90
9. 腹足类后期幼虫 Gastropoda post larva	—	34.37	397.24	5.24	10.57	68.34	267.55	24.63	109.21
10. 长尾类幼虫 Macrura larva	0.29	28.70	1.37	0.63	0.92	2.86	13.64	9.03	7.75
11. 短尾类幼虫 Brachyura larva	—	3.45	46.51	—	—	7.55	24.6	9.48	12.49
12. 多毛类幼虫 Polychaeta larva	3.22	0.20	0.12	17.46	8.91	6.70	4.88	2.95	5.25
13. 海星类羽腕幼虫 Bipinnaria larva	—	85.19	—	—	4.41	22.47	22.85	24.2	21.30
14. 磷虾类幼体 Euphausiacea larva	—	2.10	—	—	—	—	0.25	1.51	0.53
15. 蛇尾类长腕幼虫 Ophiopluteus larva	—	—	35.59	—	—	—	27.07	2.59	8.90
16. 筒螈辐射幼虫 Tubularia actinula	—	0.85	—	—	—	0.05	0.25	0.41	0.21
总种类数	20	50	33	32	33	48	53	52	62
平均丰度	11 589.6	2 165.5	23 640.0	729.6	5 522.8	6 508.8	16 491.0	6 929.7	9 531.1

1) “—”表示种类未检出；括号中数值代表类群丰度百分比；断面代码见表 1

研究海域浮游动物的年平均丰度高达9 531.1 ind·m⁻³,各月份丰度从高到低依序为 8 月>2 月>5 月>11 月. 在各断面上,排水口附近丰度最低,1.2 km 断面最高,其丰度比 0.2 km 断面高出约 2 倍,比 2 km 断面高 1.38 倍.

据各类群丰度百分比分析,该海域几乎全由桡足类和浮游幼体类组成,无论在月份上还是在断面

上,2 大类合计占 99.75% 以上,而隶属于大型浮游动物的主要类群(毛颚类、被囊类、水母类、端足类、十足类、磷虾类和糠虾类)不仅在丰度上几乎可忽略不计,而且全部远离 0.2 km 断面. 2 大类中,浮游幼体类除 5 月份最低外,其它月份至少占到 59.22% 以上. 从幼体类的绝对丰度看,有 2 个明显高峰,一个是 2 月,主要由桡足幼体和桡足类无节幼

体组成; 另一个是 8 月, 除桡足幼体外, 卵和瓣鳃类幼虫大幅增加, 这指示 8 月是象山港鱼类、贝类等水生动物的主要繁殖月份之一。

按海洋调查规范, 内湾浮游动物采样宜用 I 型或 II 型网, 而定量时用 I 型网。针对电厂温排水研究, 仅在田湾核电站调查中涉及 II 型网, 且与 I 型网同时使用^[8]。本研究与 I 型网结果相比, 从种类上看, 周年种类数明显高于 I 网结果(53 种)^[6], 甚至高于整个象山港的周年调查结果(53 种)^[27]; 丰度上, 是整个港区年平均丰度的 33~51 倍^[27~29], 比电厂附近海域高出约 25 倍^[6]; 类群组成上, 主要是浮游幼体类高出 2 倍^[6]。不难分析, 若以最低相差 25 倍丰度计算, 意味着使用 I 型网研究时, 仅约使用本海域实际丰度的 4% 来分析、推断整个群落格局。显然, 基于丰度角度, 结论会明显不同, 如夏季丰度最高(表 2), 变成春季最高^[6]。对此, 有研究指出: 使用大网目的惟一理由是样品具历史数据可比, 即使调查数据会存在绝对偏差^[30]。

2.3 优势种

各月份共检出 18 种优势种(含幼体, 表 3), 2

月主要优势种是桡足幼体、瘦尾胸刺水蚤 *Centropages tenuiremis* 和桡足类无节幼体; 5 月主要有大同长腹剑水蚤 *Oithona similis*、伪长腹剑水蚤 *Oithona fallax*、克氏纺锤水蚤 *Acartia clausi*、长尾基齿哲水蚤 *Clausocalanus furcatus* 和针刺拟哲水蚤 *Paracalanus aculeatus*; 8 月主要是卵、桡足幼体和小拟哲水蚤 *Paracalanus parvus*; 11 月有桡足幼体、卵和针刺拟哲水蚤。

不同断面共检出 9 种优势种, 除桡足幼体和桡足类无节幼体在各断面都为优势种、且较均匀分布外, 瘦尾胸刺水蚤和大同长腹剑水蚤趋向于 0.2 km 断面, 克氏纺锤水蚤趋向于远离排水口, 其它哲水蚤类趋向于 1.2 km 断面, 而卵、瓣鳃类幼虫则主要分布于 0.7 km 和 1.2 km 断面。

与 I 型网结果相比^[6], 尽管调查月份及其环境因子不同, 其优势种会存在差异^[18, 28], 但使用 I 网时 4 个季节明显丢失了剑水蚤类、小型哲水蚤类、桡足幼体、瓣鳃类幼虫和卵等小型浮游动物(表 3), 而大网目丢失小型浮游动物已广泛得到验证^[11~13, 31, 32]。

表 3 浮游动物的优势种与优势度¹⁾

Table 3 Dominant species and their dominance in zooplankton

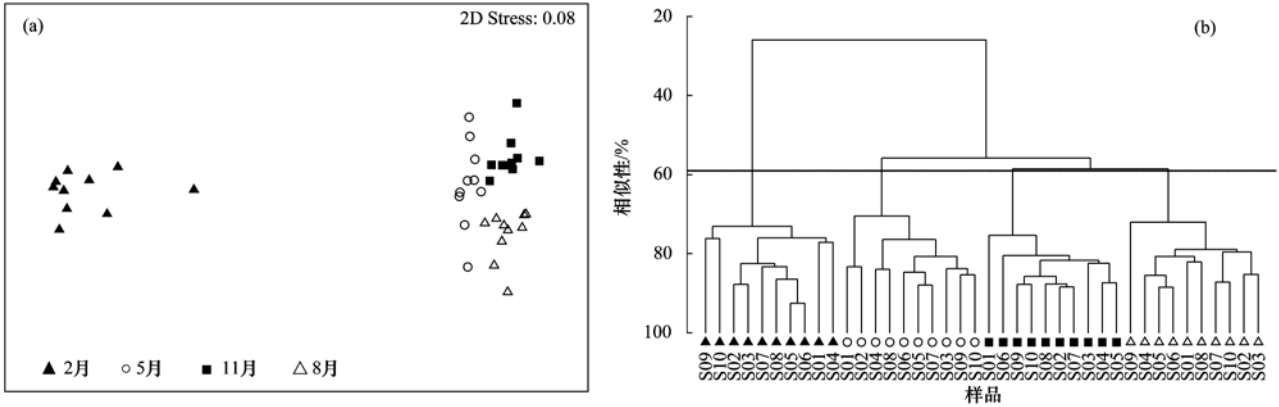
种类	月份				断面			
	2	5	8	11	D02	D07	D12	D20
克氏纺锤水蚤 <i>A. clausi</i>	—	0.092	0.06	—	—	—	0.032	0.051
墨氏胸刺水蚤 <i>C. memurichi</i>	0.036	—	—	—	—	—	—	—
瘦尾胸刺水蚤 <i>C. tenuiremis</i>	0.229	—	—	—	0.062	0.026	—	0.027
左指华哲水蚤 <i>S. laevidactylus</i>	0.024	—	—	—	—	—	—	—
针刺拟哲水蚤 <i>P. aculeatus</i>	—	0.085	0.02	0.106	—	—	—	—
强额拟哲水蚤 <i>P. crassirostris</i>	—	0.045	0.057	0.074	—	—	0.045	0.03
小拟哲水蚤 <i>P. parvus</i>	—	0.072	0.102	0.056	—	0.028	0.078	0.043
长尾基齿哲水蚤 <i>C. furcatus</i>	—	0.087	—	0.075	—	—	—	—
短角长腹剑水蚤 <i>O. brevicornis</i>	—	0.061	—	—	—	—	—	—
伪长腹剑水蚤 <i>O. fallax</i>	—	0.098	—	—	—	—	—	—
大同长腹剑水蚤 <i>O. similis</i>	—	0.27	—	—	0.023	—	—	—
卵	—	—	0.373	0.175	0.098	0.185	0.182	0.087
仔鱼	—	0.024	—	—	—	—	—	—
桡足幼体	0.433	0.047	0.226	0.332	0.301	0.278	0.262	0.322
桡足类无节幼体	0.228	—	—	—	0.058	0.052	0.02	0.057
瓣鳃类幼虫	—	—	0.098	0.045	—	0.038	0.039	—
多毛类幼虫	—	—	—	0.024	—	—	—	—
海星类羽腕幼虫	—	0.039	—	—	—	—	—	—

1) “—”表示月份中不出现或非优势种; 断面代码见表 1

2.4 群落时空格局与相似性分析

由 MDS 图可知[图 2(a)], 右上角的压力值(Stress < 0.1)指示该排序图是一个好的排序^[25]。其中, 2 月群落与其它月份的群落相隔较远, 说明该月份群落很特殊, 主要原因是该月份的优势种与其

它月份很少相同(表 3)。8 月和 11 月各群落也分别聚集, 可直观判断这 2 个月份群落具明显不同。而 5 月较分散, 但不与 8 月和 11 月混杂, 群落格局具不确定性。聚类图进一步显示[图 2(b)], 按照 58.5% 相似性就可完整地划分出隶属于 4 个月份的



站位代码见图 1

图 2 浮游动物群落的 MDS 排序与聚类

Fig. 2 MDS ordination and cluster of zooplankton community

群落. 在空间格局上, 不难分析, 由于 2 月群落较远、而 8 月和 11 月又相互分离, 使各月份相同断面样品不可能聚集在一起. 因此, 该海域季节性群落格局是清晰的, 但断面间群落格局不能分辨.

各月、各断面群落间相似性分析 (ANOSIM) 和相似性百分比 (SIMPER) 分析结果进一步证实 (表 4): 不同月份群落格局存在极显著差异 ($P < 0.01$), 其中, 2 月和 5 月间、11 月和 2 月间的群落非相似性高于 70%, 决定群落格局差异的主要判别种全是

2 月的低温种瘦尾胸刺水蚤、墨氏胸刺水蚤 *Centropages mcmurricchi* 和桡足类无节幼体. 其它月份间非相似性则小于 50%, 主要判别种是瓣鳃类幼虫、卵、伪长腹剑水蚤和克氏纺锤水蚤, 这 4 种中仅伪长腹剑水蚤出现在 5 月, 其它全由 8 月种类控制. 据表 4 分析, 各断面间差异不显著 ($P > 0.05$), 各断面群落的主要判别种均完全相同, 主要由 8 月的卵和 2 月的低温种 (桡足类无节幼体和瘦尾胸刺水蚤) 决定.

表 4 浮游动物群落格局的 ANOSIM 和 SIMPER 分析结果¹⁾

Table 4 ANOSIM and SIMPER results for spatiotemporal differences in the patterns of zooplankton communities

组	ANOSIM		SIMPER						
	R	P	平均非相似性/%	判别种 1	贡献/%	判别种 2	贡献/%	判别种 3	贡献/%
月份	0.968	0.001							
2、5	1.0	0.001	74.56	瘦尾胸刺水蚤	8.77	桡足类无节幼体	6.83	墨氏胸刺水蚤	6.29
5、8	0.955	0.001	48.20	瓣鳃类幼虫	9.59	卵	9.04	伪长腹剑水蚤	6.90
8、11	0.910	0.001	42.77	瓣鳃类幼虫	7.53	卵	6.84	克氏纺锤水蚤	6.61
11、2	1.0	0.001	76.81	瘦尾胸刺水蚤	10.19	桡足类无节幼体	9.64	墨氏胸刺水蚤	7.77
断面	-0.025	0.86							
D02、D07	-0.004	0.41	52.02	卵	6.24	桡足类无节幼体	5.68	瘦尾胸刺水蚤	5.41
D07、D12	-0.035	0.99	51.37	卵	5.79	桡足类无节幼体	5.24	瘦尾胸刺水蚤	4.91
D12、D20	-0.016	0.48	51.61	卵	5.59	桡足类无节幼体	5.42	瘦尾胸刺水蚤	4.99
D20、D02	0.002	0.42	52.32	卵	6.12	桡足类无节幼体	5.64	瘦尾胸刺水蚤	5.52

1) 断面代码见表 1

2.5 多样性时空特征

据表 5 可知, 各月份间的多样性指数均存在极显著差异 ($P < 0.01$), 其中, 5 月平均种类数 (S) 显著高于 8 月和 11 月, 2 月最少 ($P < 0.05$). 5 月和 11 月的丰富度 (d) 和 Shannon 指数 (H') 显著高于 8 月, 8 月显著高于 2 月. 均匀度 (J') 和 Simpson 指数 (D') 也以 5 月和 11 月最高, 且显著高于 2 月和 8 月. 不同断面间, 仅均匀度和 Simpson 指数差异显著 ($P < 0.05$), 0.2 km 断面显著低于其它断面. 与不

同断面总种类数明显不同 (表 2), 各断面间平均种类数相差较小, 其变化特征与丰富度、Shannon 相似, 均以排水口附近最低, 但各断面间未检出显著差异 ($P > 0.05$).

2.6 多样性指数与水温关系

各月监测水温 (T) 与多样性指数 (y) 存在极显著的抛物线回归关系 ($P < 0.01$), 见图 3. 以丰富度回归方程解释程度最高, 达 78.4%, 说明水温是影响丰富度最主要因素. 解释程度最低是均匀度, 为 53.4%,

指示仍有其他因子影响均匀度,如水文状况^[33, 34]. 各曲线均存在拐点,当海域水柱温度为 22.31、20.31、21.96 和 21.38℃时,丰富度、均匀度、Shannon 多样性指数和 Simpson 指数分别达到最大值.

表 5 浮游动物多样性指数时空差异¹⁾(平均值±标准差)

指数	月份				断面			
	2	5	8	11	D02	D07	D12	D20
<i>S</i>	9.15±1.76 ^c	20.15±4.51 ^a	16.15±4.07 ^b	16.10±2.17 ^b	14.00±3.34	15.17±4.57	16.38±5.38	15.08±6.04
<i>d</i>	0.91±0.17 ^c	2.59±0.41 ^a	1.71±0.32 ^b	2.43±0.25 ^a	1.84±0.65	1.92±0.78	1.93±0.69	1.9±0.79
<i>H'</i>	1.38±0.13 ^c	2.14±0.33 ^a	1.74±0.24 ^b	2.07±0.09 ^a	1.59±0.39	1.86±0.33	1.86±0.36	1.86±0.41
<i>J'</i>	0.63±0.06 ^b	0.72±0.10 ^a	0.63±0.07 ^b	0.75±0.04 ^a	0.61±0.13 ^Y	0.70±0.07 ^X	0.68±0.08 ^X	0.70±0.08 ^X
<i>D'</i>	0.68±0.04 ^b	0.81±0.11 ^a	0.74±0.09 ^b	0.82±0.02 ^a	0.67±0.15 ^Y	0.77±0.07 ^X	0.77±0.09 ^X	0.78±0.08 ^X

1) 同行不同上标 a、b、c、d 代表月份间存在显著差异; 同行不同上标 (X、Y) 代表断面间差异显著; 断面代码见表 1

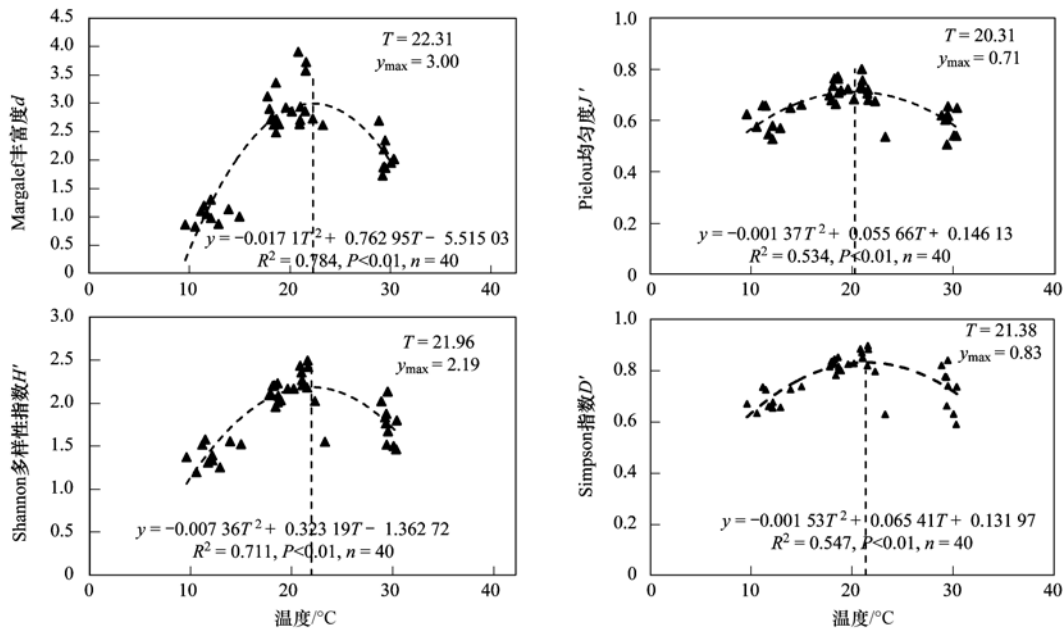


图 3 多样性指数与温度回归关系

Fig. 3 Regressional relationship between diversity index and temperature

海域增温 (ΔT) 与多样性指数 (y) 也存在极显著的线性回归关系 (表 6), 但相关系数显示, 增温与丰富度、Shannon 多样性指数和 Simpson 指数间的相关性中等, 而与均匀度弱相关. 中等或弱的相关性明显与多样性指数的拐点温度有

关, 因低温下增温 (图 3 中拐点左侧) 生物多样性增加, 而高温下 (拐点右侧) 增温则降低生物多样性. 显然, 回归方程的显著性体现二者综合的结果, 即增温仍会极显著地降低该海域的浮游动物多样性 ($P < 0.01$).

表 6 海域增温与多样性指数的线性回归

指数	方程	<i>P</i>	<i>n</i>	ΔT 区间	相关系数 <i>r</i>
<i>d</i>	$y = 2.66236 - 0.32758\Delta T$	<0.01	40	[0, 5.395]	-0.450
<i>H'</i>	$y = 2.05467 - 0.14261\Delta T$	<0.01	40	[0, 5.395]	-0.451
<i>J'</i>	$y = 0.67857 - 0.01711\Delta T$	<0.01	40	[0, 5.395]	-0.263
<i>D'</i>	$y = 0.80676 - 0.02878\Delta T$	<0.01	40	[0, 5.395]	-0.401

3 讨论

3.1 国华电厂强增温海域浮游动物群落结构的时空变化特征及适应性变化趋势

据本研究结果, 国华电厂强增温海域浮游动物群落结构存在显著的季节性差异 (表 4), 4 季格局清晰 (图 2), 说明季节变化是决定该海域浮游动物群落结构的主因, 增温不会扰乱季节性特征^[1]. 与

象山港 1980 ~ 1981 年的 I 型网资料相比^[27],主要种中华哲水蚤 *Calanus sinicus*、针刺拟哲水蚤、墨氏胸刺水蚤、太平洋纺锤水蚤 *Acartia pacifica*、大型浮游动物(如中华假磷虾 *Pseudeuphausia sinica*、箭虫),以及浮游幼体类的季节分布基本一致. 近年 I 型网研究结果也显示^[6],除大量小型浮游动物遗漏以及由此产生的优势种不同外,中大型浮游动物季节性分布也与本研究基本相似. 但明显不同的是,冬季优势种差异较大,如 12 月主要优势种为真刺唇角水蚤^[28],1 月为墨氏胸刺水蚤(即原文中的腹针胸刺水蚤 *Centropages abdominalis*)^[6, 18, 29],而本研究 2 月的主要优势种除墨氏胸刺水蚤外,瘦尾胸刺水蚤是最主要优势种(表 3),该种为偏低温、低盐种,在其他内湾也是常见的优势种^[35]. 已有研究指出,冬季水温差异较大时优势种会明显不同^[28],为适应电厂附近海域冬季的强增温(表 1),适低温优势种会提前出现甚至暴增^[18]. 这种提前发生现象在全球变暖影响研究中同样得到验证,如北海的飞马哲水蚤 *Calanus finmarchicus* 和亚得里亚海的长伪哲水蚤 *Pseudocalanus elongatus*,当海表层水温升高时也会脱离原本最佳季节窗口,并提前成为群落主要优势种^[36].

据表 4 可知,季节性调查不能检出不同断面的群落格局差异,但分析发现存在 2 个较明显的空间适应性特征. 首先,物种存在迁移现象,且绝大部份物种倾向于迁出排水口(表 2),尤其是运动能力强的大型浮游动物,而运动能力低的桡足幼体和桡足类无节幼体对温度敏感性低^[5, 7],分布较均匀. 在优势种中(表 3),迁离排水口主要是克氏纺锤水蚤和哲水蚤类^[5, 37],低温种^[18]和小型剑水蚤^[37]影响不大,且倾向于靠近弱增温区^[14]甚至排水口(如大同长腹剑水蚤). 不同物种随海域升温的迁移现象同样出现于全球变暖,如在大陆架海域,变暖期间小型浮游动物类群不会受升温影响,但大型桡足类和磷虾类往往发生迁移而缺乏^[38]. 从大尺度的纬度变化上看,海域升温通常使生物向低温区的极地方向迁移,导致温带种丰度下降,而适温性强的热带种增加^[39]. 其次,物种丰度存在聚集现象,丰度最高值明显在 1.2 km 断面,指示浮游动物分布具一定的趋温性. 在冬季,丰度明显以 1 km 处最高^[18],即使是无运动能力的卵也主要聚集在 0.7 km 和 1.2 km 断面(表 3),由于卵主要出现在夏、秋季节,结合夏、秋季节的这 2 个断面水温分析(表 1),平均温度为 0.77℃,这与鱼卵产卵区主要在 0.5 ~ 1.0℃温

升海域的结论相吻合^[40]. 显然,由于物种的迁移和丰度聚集,会使不同断面群落处于不稳定状态. 模拟研究显示,水温升高 4℃ 下,浮游动物群落丰度的时空变化加快^[38],尤其在空间变化上,生物营养级越高周转率越快^[4, 41].

此外,强增温海域由于物种的迁移也会使群落成分的粒级组成发生适应性变化,围隔(mesocosm)实验表明^[42],升温 4℃ 下不会改变浮游动物的生物量,由于升温海域大型浮游动物的外迁^[5, 7],浮游动物群落明显需要更多的小型浮游动物才能保证生物量的稳定,即浮游动物粒级变小^[5],这会加剧内湾浮游动物本已小型化的趋势^[33]. 王扬才等^[6]对象山港 2 个电厂附近海域的浮游动物研究后发现,温排水已导致小型桡足类克氏纺锤水蚤的丰度大幅度增加,超过了象山港历史上最主要的春季优势种墨氏胸刺水蚤(2 ~ 3 月最多,为象山港低温期渔业种)^[27],并担忧该种会演变为象山港最主要的优势种. 据本研究结果,这种情况发生的可能性不大,第一:其检测的平均距离在排水口 1 km 外,克氏纺锤水蚤会发生一定程度的聚集(表 3),使检测结果更高;第二:春季群落丰度不高,其绝对丰度也不高(表 2). 第三:不同网目下优势种完全不同^[34],再者,由于 I 型网会使大量小型浮游动物流失^[10, 11, 13],极大地放大了克氏纺锤水蚤的优势度^[12]. 第四:克氏纺锤水蚤主要摄食大的浮游植物^[43],而象山港以微型和微微型浮游植物为主^[44],这些浮游植物对克氏纺锤水蚤可食性差^[45]. 除浮游动物小型化外,已有研究显示,海域升温也使浮游植物小型化^[46],粒级甚至比对照组小 1 个数量级^[42],粒径谱斜率变得更陡. 这似乎说明浮游动物小型化是适应浮游植物小型化的结果,对此,有待进一步分析、验证.

3.2 海域增温对浮游动物多样性的影响

海域增温对浮游动物多样性影响历来受到广泛关注,但系列研究结论有所差异. 国华电厂冬季(1 月)温排水(水温范围 9.5 ~ 18.4℃)的温升会提高浮游动物多样性^[18];江苏射阳港电厂温排水(4 ~ 7 月)对浮游生物不会产生明显的危害,在低温季节反而会提高丰度和多样性指数^[15];江苏田湾核电厂夏季(8 月)温排水(25.3 ~ 26.6℃)使浮游动物多样性指数、丰富度指数及均匀度指数下降^[8];而金琼贝等^[14]对东北长山电厂温排水(1 ~ 39.6℃)研究后发现,只有夏季的高增温下才会使多样性下降. 在这里,有 3 点必须指出,一是低温和高温针对的是

多样性与水温关系的拐点温度,即必须分别位于拐点水温左侧和右侧(图3),否则多样性指数的评价结果相反。这也指示采样的月份选择会影响多样性的评估结果,如5月水温恰与拐点水温相近(表1和图3),离散的群落结构(图2)也指示各站位浮游动物群落对水温响应很不相似。

二是多样性变化与电厂地理位置和浮游动物群落组成有关。如东北长山电厂^[14],增温区浮游动物年平均丰度和多样性指数最高,这明显与本研究结果相反(表2和表5),这是因为处于高纬度区的长山电厂年平均水温(14.1℃)是低的(表1),而低水温下的浮游动物群落对海域升温有更高的热忍耐^[38];此外,淡水环境的群落组成主要是纤毛虫、轮虫和枝角类,桡足类极少且以剑水蚤为主。由于增温对原生动物、枝角类有促进作用,剑水蚤靠近弱增温区,这些因素会使增温区浮游动物的年平均多样性上升^[14]。相反,据表6结果,随着海域增温会导致多样性指数极显著下降,这种趋势同样报道于大亚湾核电厂的纤毛虫中^[47],22年观察数据也显示^[3],在整个海域升高1℃下,浮游动物从46种已降到36种。据回归方程(表6),在各多样性指数中,以丰富度下降斜率最大,水温每升高1℃,浮游动物丰富度将下降12.3%,这低于已报道的大型底栖动物的长期观察结果^[48],即水温每升高1℃,丰富度下降21%。即使对温带鱼类,当海表层水温升高0.46℃时,丰度也会下降10%~13%^[39]。

三是不同空间采样对多样性指数的评估结果会有明显影响。据不同断面水温结果(表1),断面间平均温差达2.16℃,这对全球变暖来说是很大的温差^[39]。据表5可知,尽管不同多样性指数差异的显著性不同,但排水口附近海域浮游动物多样性指数均最低,尤其是均匀度和Simpson指数存在显著差异。这指示不同断面的丰度聚集很不均匀;此外,不同于Shannon多样性指数,Simpson指数是惟一不受取样努力(sampling effort)和随物种个体数增加而增大影响的多样性指数^[25],反映了随机取样的2个有机体为不同物种的概率。显然,Simpson指数明显反映在不同断面取样时,物种不同的概率很大。

4 结论

(1)国华电厂增温海域水温以8月最高,2月最低。离排水口0.2 km年平均水温比离排水口2 km处高2.16℃。

(2)通过浮游生物Ⅱ型网调查,共识别62种浮

游动物,以5月种类数最多(50种),2月最少(20种)。年平均丰度为9 531.1 ind·m⁻³,各月份丰度从高到低依序为8月>2月>5月>11月。空间上,离排水口0.2 km的种类数最少(33种),丰度最低(5 522.8 ind·m⁻³),而1.2 km断面种类数最多(53种)、丰度最高(16 491.0 ind·m⁻³)。

(3)增温海域浮游动物类群主要由桡足类和浮游幼体类组成,合计丰度占99.75%以上,大型浮游动物丰度极低。该海域以浮游幼体类为主,平均丰度占66.64%,发生高峰期在2月和8月,2月主要由桡足幼体和桡足类无节幼体组成,8月以桡足幼体、卵和瓣鳃类幼虫为主。

(4)该海域主要优势种类有瘦尾胸刺水蚤、墨氏胸刺水蚤、大同长腹剑水蚤、伪长腹剑水蚤、克氏纺锤水蚤、针刺拟哲水蚤、小拟哲水蚤、强额拟哲水蚤、长尾基齿哲水蚤,以及浮游幼体类(桡足幼体、桡足类无节幼体、卵、瓣鳃类幼虫)。这些优势种中,瘦尾胸刺水蚤和大同长腹剑水蚤趋向于0.2 km断面,克氏纺锤水蚤、大型浮游动物趋向于远离排水口,其它优势种倾向于1.2 km断面。

(5)各月份间的多样性指数存在极显著差异,以5月和11月最高,2月最低,多样性指数季节性曲线的拐点温度范围为20.31~22.31℃。空间上,0.2 km多样性指数显著低于其它断面。海域增温使多样性指数极显著下降,每增温1℃浮游动物丰富度下降12.3%。

(6)电厂运行的强增温不改变浮游动物的季节性格局。季节性调查不能检出不同断面的群落格局差异,但不同断面中由于物种的迁移和丰度聚集,使不同断面间群落处于不稳定状态。电厂运行会显著降低强增温海域的浮游动物多样性,而多样性指数又明显受到时空取样影响,因此,评价电厂运行对浮游动物多样性影响,尤其下结论时需慎重。

参考文献:

- [1] Heinle D R. Temperature and zooplankton [J]. Chesapeake Science, 1969, 10(3-4): 186-209.
- [2] Tuck C, Romanuk T N. Robustness to thermal variability differs along a latitudinal gradient in zooplankton communities [J]. Global Change Biology, 2012, 18(5): 1597-1608.
- [3] Wang Y S, Lou Z P, Sun C C, et al. Ecological environment changes in Daya Bay, China, from 1982 to 2004 [J]. Marine Pollution Bulletin, 2008, 56(11): 1871-1879.
- [4] Hillebrand H, Soininen J, Snoeijs P. Warming leads to higher species turnover in a coastal ecosystem [J]. Global Change Biology, 2010, 16(4): 1181-1193.
- [5] Jiang Z B, Zeng J N, Chen Q Z, et al. Potential impact of rising

- seawater temperature on copepods due to coastal power plants in subtropical areas [J]. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 2009, **368**(2): 196-201.
- [6] 王扬才, 吴雄飞, 施慧雄, 等. 象山港电厂附近海域浮游动物群落特征研究[J]. *宁波大学学报(理工版)*, 2011, **24**(3): 5-10.
- [7] 徐晓群, 曾江宁, 曾淦宁, 等. 滨海电厂温排水对浮游动物分布的影响[J]. *生态学杂志*, 2008, **27**(6): 933-939.
- [8] 吴建新, 阎斌伦, 冯志华, 等. 田湾核电站海域浮游动物生态特征[J]. *生态学报*, 2011, **31**(22): 6902-6911.
- [9] 王荣, 张鸿雁, 王克, 等. 小型桡足类在海洋生态系统中的功能作用[J]. *海洋与湖沼*, 2002, **33**(5): 453-460.
- [10] Marques S C, Azeiteiro U M, Marques J C, *et al.* Zooplankton and ichthyoplankton communities in a temperate estuary: Spatial and temporal patterns[J]. *Journal of Plankton Research*, 2006, **28**(3): 297-312.
- [11] 尹健强, 黄良民, 李开枝, 等. 南沙群岛珊瑚礁浮游动物多样性与群落结构[J]. *生物多样性*, 2011, **19**(6): 685-695.
- [12] Tseng L C, Dahms H U, Hung J J, *et al.* Can different mesh sizes affect the results of copepod community studies? [J]. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 2011, **398**(1-2): 47-55.
- [13] 王荣, 王克. 两种浮游生物网捕获性能的现场测试[J]. *水产学报*, 2003, **27**(z1): 98-102.
- [14] 金琼贝, 盛连喜, 张然. 电厂温排水对浮游动物的影响[J]. *环境科学学报*, 1989, **9**(2): 208-217.
- [15] 翟水晶, 李缙来, 胡维平, 等. 火电厂温排水对湿地生态系统的影响分析——以江苏射阳港电厂为例[J]. *海洋环境科学*, 2008, **27**(6): 571-575.
- [16] 苗庆生, 周良明, 邓兆青. 象山港电厂温排水的实测和数值模拟研究[J]. *海岸工程*, 2010, **29**(4): 1-11.
- [17] 刘书田. 核动力站对海洋环境的影响[J]. *海洋通报*, 1984, **3**(4): 83-90, 101.
- [18] 杜萍, 刘晶晶, 徐晓群, 等. 象山港不同生境冬季浮游动物生态特征比较研究[J]. *水产科技情报*, 2011, **38**(2): 92-99.
- [19] 黄秀清, 王金辉, 蒋晓山. 象山港海洋环境容量及污染物总量控制研究[M]. 北京: 海洋出版社, 2008. 54-93.
- [20] 郑重, 李少菁, 许振祖. 海洋浮游生物学[M]. 北京: 海洋出版社, 1984. 166-653.
- [21] 束蕴芳, 韩茂森. 中国海洋浮游生物图谱[M]. 北京: 海洋出版社, 1993. 24-206.
- [22] 萧贻昌. 中国动物志, 无脊椎动物. 第38卷. 毛颚动物门. 箭虫纲[M]. 北京: 科学出版社, 2004. 67-155.
- [23] 徐兆礼, 陈亚瞿. 东黄海秋季浮游动物优势种聚集强度与鲈鲶渔场的关系[J]. *生态学杂志*, 1989, **8**(4): 13-15.
- [24] Clarke K R, Gorley R N. *PRIMER V6 User Manual Tutorial* [M]. *PRIMER-E: Plymouth*, 2006. 7-180.
- [25] Clarke K R, Warwick R M. *Change in marine communities: An approach to statistical analysis and interpretation (2nd ed)* [M]. *PRIMER-E: Plymouth*, 2001. Chapter 2, 1-9; Chapter 8, 1-3; Chapter 17, 1-2.
- [26] SAS Institute Inc. *SAS/STAT User's Guide. Version 8* [M]. North Carolina: SAS Institute Inc, 1999. 1465-1636.
- [27] 柏怀萍, 陈亚瞿, 宋海棠, 等. 象山港浮游动物调查报告[J]. *海洋渔业*, 1984, **6**(6): 249-253.
- [28] 刘镇盛, 王春生, 杨俊毅, 等. 象山港冬季浮游动物的分布[J]. *东海海洋*, 2004, **22**(1): 34-42.
- [29] 王春生, 刘镇盛, 何德华. 象山港浮游动物生物量和丰度的季节变动[J]. *水产学报*, 2003, **27**(6): 595-599.
- [30] Riccardi N. Selectivity of plankton nets over mesozooplankton taxa: implications for abundance, biomass and diversity estimation[J]. *Journal of Limnology*, 2010, **69**(2): 287-296.
- [31] Leandro S M, Morgado F, Pereira F, *et al.* Temporal changes of abundance, biomass and production of copepod community in a shallow temperate estuary (Ria de Aveiro, Portugal) [J]. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 2007, **74**(1-2): 215-222.
- [32] Hwang J S, Kumar R, Dahms H U, *et al.* Mesh size affects abundance estimates of *Oithona* spp. (Copepoda, Cyclopoida) [J]. *Crustaceana*, 2007, **80**(7): 827-837.
- [33] 黄长江, 陈善文, 何歆, 等. 2001-2002年粤东柘林湾浮游动物的生态学研究[J]. *海洋与湖沼*, 2003, **34**(2): 117-130.
- [34] 黄加祺. 九龙江口大、中型浮游动物的种类组成和分布[J]. *厦门大学学报(自然科学版)*, 1983, **22**(1): 88-95.
- [35] 刘育莎, 林元烧, 郑连明, 等. 福建省三沙湾饵料浮游动物生态特征研究[J]. *厦门大学学报(自然科学版)*, 2010, **49**(1): 102-108.
- [36] Mackas D L, Greve W, Edwards M, *et al.* Changing zooplankton seasonality in a changing ocean: Comparing time series of zooplankton phenology [J]. *Progress in Oceanography*, 2012, **97-100**: 31-62.
- [37] Evans M S, Warren G J, Page D I. The effects of power plant passage on zooplankton mortalities: Eight years of study at the Donald C. Cook nuclear plant [J]. *Water Research*, 1986, **20**(6): 725-734.
- [38] Stabeno P J, Kachel N B, Moore S E, *et al.* Comparison of warm and cold years on the southeastern Bering Sea shelf and some implications for the ecosystem [J]. *Deep-Sea Research II*, 2012, **65-70**: 31-45.
- [39] Lloyd P, Plagányi É E, Weeks S J, *et al.* Ocean warming alters species abundance patterns and increases species diversity in an African sub-tropical reef-fish community [J]. *Fisheries Oceanography*, 2012, **21**(1): 78-94.
- [40] 林昭进, 詹海刚. 大亚湾核电站温排水对邻近水域鱼卵、仔鱼的影响[J]. *热带海洋*, 2000, **19**(1): 44-51.
- [41] Soininen J. Species turnover along abiotic and biotic gradients: Patterns in space equal patterns in time? [J]. *BioScience*, 2010, **60**(6): 433-439.
- [42] Yvon-Durocher G, Montoya J M, Trimmer M, *et al.* Warming alters the size spectrum and shifts the distribution of biomass in freshwater ecosystems [J]. *Global Change Biology*, 2011, **17**(4): 1681-1694.
- [43] Pagano M, Champalbert G, Aka M, *et al.* Herbivorous and microbial grazing pathways of metazooplankton in the Senegal

River Estuary (West Africa) [J]. Estuarine , Coastal and Shelf Science , 2006 , 67 (3) : 369-381.

[44] 刘子琳, 蔡昱明, 宁修仁. 象山港中、西部秋季浮游植物粒径分级、叶绿素 a 和初级生产力 [J]. 东海海洋, 1998 , 16 (3) : 18-24.

[45] Nival P, Nival S. Particle retention efficiencies of an herbivorous copepod, *Acartia clausi* (adult and copepodite stages) : Effects on grazing [J]. Limnology and Oceanography, 1976 , 21 (1) : 24-38.

[46] 刘胜, 黄晖, 黄良民, 等. 大亚湾核电站对海湾浮游植物群落的生态效应 [J]. 海洋环境科学, 2006 , 25 (2) : 9-12, 25.

[47] 徐润林, 白庆笙. 大亚湾核电站邻近水域浮游纤毛虫群落结构 [J]. 中山大学学报 (自然科学版), 1998 , 37 (2) : 77-80.

[48] Durance I, Ormerod S J. Climate change effects on upland stream macroinvertebrates over a 25-year period [J]. Global Change Biology, 2007 , 13 (5) : 942-957.

《环境科学》多项引证指标名列前茅

2012 年 12 月 7 日,中国科学技术信息研究所在中国科技论文统计结果发布会上公布了 2011 年度中国科技论文统计结果. 统计结果显示 2011 年度《环境科学》多项引证指标位居环境科学技术、安全科学技术类科技期刊前列.

《环境科学》综合评价总分 81. 2,排名第一,总被引频次5 359,影响因子 0. 956.

综合评价总分是根据中国科技期刊综合评价指标体系,计算多项科学计量指标(总被引频次、影响因子、他引率、基金论文比、引文率等),采用层次分析法确定重要指标的权重,分学科对每种期刊进行综合评定,计算出每个期刊的综合评价总分. 这项指标屏蔽了各个学科之间总体指标背景值的差异,使科技期刊可以进行跨学科比较. 根据发布的统计结果,2011 年度《环境科学》综合评价总分 81. 2,在被统计的 1998 种核心期刊中名列第 41 位,在被统计的 37 种环境科学技术、安全科学技术类期刊中名列第一.

CONTENTS

Water-soluble Inorganic Salts in Ambient Aerosol Particles in Tangshan	MIAO Hong-yan, WEN Tian-xue, WANG Li, <i>et al.</i> (1225)
Characterization of Water-soluble ions in PM _{2.5} at Dinghu Mount	ZHAO Ya-nan, WANG Yue-si, WEN Tian-xue, <i>et al.</i> (1232)
Characteristics of Mass Size Distributions of Water-Soluble Inorganic Ions During Summer and Winter Haze Days of Beijing	HUANG Yi-min, LIU Zi-rui, CHEN Hong, <i>et al.</i> (1236)
Characterising Seasonal Variation and Spatial Distribution of PM _{2.5} Species in Shenzhen	YUN Hui, HE Ling-yan, HUANG Xiao-feng, <i>et al.</i> (1245)
Characteristics of PAHs in the Atmosphere in Winter and Summer in the Urban and Suburban of Fuzhou	YI Zhi-gang, HUANG Xing-ran, BI Jun-qi, <i>et al.</i> (1252)
Seasonal Variation and Spatial Distribution of Typical Organochlorine Pesticides in the Atmosphere of Hexi Corridor and Lanzhou, Northwest China	DING Zhong-yuan, MAO Xiao-xuan, MA Zi-long, <i>et al.</i> (1258)
Simulation of Air Pollution Characteristics and Estimates of Environmental Capacity in Zibo City	XUE Wen-bo, WANG Jin-nan, YANG Jin-tian, <i>et al.</i> (1264)
Diurnal Changes in Greenhouse Gases at Water-Air Interface of Xiangxi River in Autumn and Their Influencing Factors	HUANG Wen-min, ZHU Kong-xian, ZHAO Wei, <i>et al.</i> (1270)
Influence of Human Activities on Groundwater Environment Based on Coefficient Variation Method	ZHAO Wei, LIN Jian, WANG Shu-fang, <i>et al.</i> (1277)
Nitrogen Non-Point Source Pollution Identification Based on ArcSWAT in Changhe River	DENG Ou-ping, SUN Si-yang, LÜ Jun (1284)
Study on the Content and Carbon Isotopic Composition of Water Dissolved Inorganic Carbon from Rivers Around Xi'an City	GUO Wei, LI Xiang-zhong, LIU Wei-guo (1291)
First Flush Effects of Storm Events of Baoxiang River in Lake Dianchi Watershed	GUO Huai-cheng, XIANG Nan, ZHOU Feng, <i>et al.</i> (1298)
Estimation of Releasing Fluxes of Sediment Phosphorous in the Three Gorges Reservoir During Late Autumn and Early Winter	NIU Feng-xia, XIAO Shang-bin, WANG Yu-chun, <i>et al.</i> (1308)
Distributions and Pollution Status of Heavy Metals in the Suspended Particles of the Estuaries and Coastal Area of Eastern Hainan	XIN Cheng-lin, REN Jing-ling, ZHANG Gui-ling, <i>et al.</i> (1315)
Environmental Characteristics of Heavy Metals in Surface Sediments from the Huanghe Estuary	WU Bin, SONG Jin-ming, LI Xue-gang (1324)
Distribution and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments of Zhalong Wetland	YE Hua-xiang, ZANG Shu-ying, ZHANG Li-juan, <i>et al.</i> (1333)
Ecological Risk Evaluation of Heavy Metals of the Typical Dredged Mud in Shanghai	TANG Qing-li, CHENG Jin-ping, GAO Hao-min, <i>et al.</i> (1340)
Pollution Characteristics of Heavy Metals in Sludge from Wastewater Treatment Plants and Sludge Disposal in Chinese Coastal Areas	ZHANG Can, CHEN Hong, YU Yi-xuan, <i>et al.</i> (1345)
Comparison of the Estrogenic Activity of Organic Compounds in Source Water and Finished Water from the Yangtze River and Taihu Lake in Certain Areas of Jiangsu Province	JIN Tao, LÜ Xue-min, ZENG Yi-fan, <i>et al.</i> (1351)
Occurrence and Fate of Phthalates in Wastewater Treatment Plants in Beijing, China	ZHOU Yi-qi, LIU Yun-xia (1357)
Research on Sludge Toxicity Caused by DMF Biodegradation and Toxicity Spatial Distribution in Sludge Flocs	HU Yuan-yuan, YANG Na, DING Yi, <i>et al.</i> (1363)
Study on the Ecological Risk of Wild Veined Rapa Whelk (<i>Rapana venosa</i>) Exposed to Organotin Compounds in Bohai Bay, China	AN Li-hui, ZHANG Yan-qiang, SONG Shuang-shuang, <i>et al.</i> (1369)
Bioaccumulation of Mercury in <i>Crassostrea</i> sp. Exposed to Waste Seawater Discharged from a Coal-fired Power Plant Equipped with a Seawater Flue-gas Desulfurization System	LIU Xi-yao, YUAN Dong-xing, CHEN Yao-jin (1374)
Effects of Imidazolium Chloride Ionic Liquids on the Acute Toxicity and Weight of Earthworm	HUANG Ruo-nan, FAN Jun-jie, TU Hong-zhi, <i>et al.</i> (1380)
Influencing Factors and Mechanism of Arsenic Removal During the Aluminum Coagulation Process	CHEN Gui-xia, HU Cheng-zhi, ZHU Ling-feng, <i>et al.</i> (1386)
Removal of DON in Micro-polluted Raw Water by Coagulation and Adsorption Using Activated Carbon	LIU Bing, YU Guo-zhong, GU Li, <i>et al.</i> (1392)
Mechanism of Catalytic Ozonation for the Degradation of Paracetamol by Activated Carbon	WANG Jia-yu, DAI Qi-zhou, YU Jie, <i>et al.</i> (1402)
Reductive Degradation of Chlorophenols in Aqueous Solution by Gamma Irradiation	PENG Yun-xia, HE Shi-jun, GONG Wen-qi, <i>et al.</i> (1411)
Effect of C/N Ratio on Nitrite Accumulation During Denitrification Process	YUAN Yi, HUANG Yong, DENG Hui-ping, <i>et al.</i> (1416)
Nitrous Oxide Emission During Denitrification for Activated Sludge Acclimated with Methanol as the Organic Carbon	ZHAI Xiao-feng, JIANG Cheng-ai, WU Guang-xue, <i>et al.</i> (1421)
Comparison and Optimization of Cellulose Carbon Source for Denitrification Filter	LI Bin, HAO Rui-xia (1428)
A Novel Municipal Wastewater Treating Process for Energy Production and Autotrophic Nitrogen Removal Based on ANAMMOX	LU Jian-cong, GAO Da-wen, SUN Xue-ying (1435)
Modeling and Dynamic Simulation of the Multimode Anaerobic/Anoxic/Aerobic Wastewater Treatment Process	ZHOU Zhen, WU Zhi-chao, WANG Zhi-wei, <i>et al.</i> (1442)
Comparing Microbial Community of High Ammonia Wastewater and Municipal Sewage in a Partial Nitrification System	ZHAO Zhi-rui, MA Bin, ZHANG Shu-jun, <i>et al.</i> (1448)
Analysis of the Fractal Structure of Activated Sludge Flocs	RUAN Xiao-dong, LIU Jun-xin (1457)
Rapid Cultivation of Aerobic Nitrifying Granular Sludge with Alternate Loading Method	SHEN Na, YANG Chang-zhu, PU Wen-hong, <i>et al.</i> (1464)
Acceleration of the Formation of Aerobic Granules in SBR by Inoculating Different Proportions and Different Diameters of Mature Aerobic Granules	XIONG Guang-cheng, PU Wen-hong, YANG Chang-zhu (1472)
Mechanisms of the Improvement in Dewaterability of Alkaline Fermented Sludge by Simultaneous Ammonium and Phosphate Recovery	ZHANG Chao, CHEN Yin-guang, GU Guo-wei (1479)
Use of Flow Cytometric Sorting to Assess the Diversity of Eukaryotic Picophytoplankton of Lakes	XIE Wei-wei, GONG Yi, WANG Zhi-xue, <i>et al.</i> (1485)
Allelopathy Effects of Ferulic Acid and Coumarin on <i>Microcystis aeruginosa</i>	GUO Ya-li, FU Hai-yan, HUANG Guo-he, <i>et al.</i> (1492)
Spatiotemporal Characteristics of Zooplankton Community Structure and Diversity in the Strong Temperature Increment Seawaters near Guohua Power Plant in Xiangshan Bay	ZHU Yi-feng, HUANG Jian-yi, LIN Xia, <i>et al.</i> (1498)
Screening of Epoxy-degrading Halophiles and Their Application in High-salt Wastewater Treatment	WANG Jin, XU Zhen, PENG Shu-chuan, <i>et al.</i> (1510)
Biodegradation of Decabromodiphenyl Ether by Intracellular Enzyme Obtained from <i>Pseudomonas aeruginosa</i>	SHI Guang-yu, YIN Hua, YE Jin-shao, <i>et al.</i> (1517)
Influence of Yeast Extract on the Fermentation of Glucose by the Demulsifying Strain <i>Alcaligenes</i> sp. S-XJ-1	HUANG Xiang-feng, WANG Kai, LI Ming-xia, <i>et al.</i> (1524)
Phylogenetic Analysis of Methanogenic Corn Stalk Degrading Microbial Communities	QIAO Jiang-tao, GUO Rong-bo, YUAN Xian-zheng, <i>et al.</i> (1531)
Inhibition of Methanogenium by Erythromycin and Its Domestation	LIU Zi-xu, SUN Li-ping, LI Yu-you, <i>et al.</i> (1540)
Sand Box Study on Fingering Front Morphology for NAPLs Infiltrated in Homogeneous Porous Media	YANG Bin, LI Hui-ying, WU Bin, <i>et al.</i> (1545)
Vertical Distribution and Possible Sources of Polycyclic Aromatic Hydrocarbon in Sewage Area Soil	YAO Lin-lin, ZHANG Cai-xiang, LI Jia-le, <i>et al.</i> (1553)
Characteristic and Evaluation of Soil Pollution by Heavy Metal in Different Functional Zones of Hohhot	GUO Wei, SUN Wen-hui, ZHAO Ren-xin, <i>et al.</i> (1561)
Distribution Characteristics of Rice Photosynthesized Carbon in Soil Aggregates of Different Size and Density	LI Miao-miao, NIE San-an, CHEN Xiao-juan, <i>et al.</i> (1568)
Profile of Soil Microbial Biomass Carbon in Different Types of Subtropical Paddy Soils	SHENG Hao, ZHOU Ping, YUAN Hong, <i>et al.</i> (1576)
Effect of Composting Organic Fertilizer Supplies on Hexachlorobenzene Dechlorination in Paddy Soils	LIU Cui-ying, JIANG Xin (1583)
Remediation of Cu-Pb-Contaminated Loess Soil by Leaching with Chelating Agent and Biosurfactant	LIU Xia, WANG Jian-tao, ZHANG Meng, <i>et al.</i> (1590)
Effects of Different Temperatures Biochar on Adsorption of Pb(II) on Variable Charge Soils	JIANG Tian-yu, JIANG Jun, XU Ren-kou, <i>et al.</i> (1598)
Preparation and Performance Investigation of <i>Trichoderma viride</i> -Modified Corn Stalk as Sorbent Materials for Oil Spills	LAN Zhou-lin, PENG Dan, GUO Chu-ling, <i>et al.</i> (1605)
Removal of PO ₄ ³⁻ from Solution, Wastewater and Seawater by Modification and Granulation Magnesium and Aluminium Layered Double Hydroxide	XING Kun, WANG Hai-zeng (1611)
Influence of Carboxylic Carbon Nanotube Supported Platinum Catalyst on Cathode Oxygen Reduction Performance of MFC	TU Li-xing, ZHU Neng-wu, WU Ping-xiao, <i>et al.</i> (1617)
Flue Gas Desulfurization by a Novel Biomass Activated Carbon	LIU Jie-ling, TANG Zheng-guang, CHEN Jie, <i>et al.</i> (1623)
Method for Grading Industrial Sectors in Energy Consumption and Its Application	MAO Jian-su, MA Lan (1628)
Dynamics and Environmental Load of Food Carbon Consumption During Urbanization: A Case Study of Xiamen City, China	YAN Zhen, CUI Sheng-hui, LI Gui-lin, <i>et al.</i> (1636)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 汤鸿霄 陈吉宁 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2013年4月15日 34卷 第4期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 34 No. 4 Apr. 15, 2013

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行