

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第33卷 第11期

Vol.33 No.11

**2012**

中国科学院生态环境研究中心 主办  
科学出版社 出版



目次

京津冀与长三角区域大气 NO<sub>2</sub> 污染特征 ..... 王英, 李令军, 刘阳 (3685)

2008~2011年夏季京津冀区域背景大气污染变化分析 ..... 杨俊益, 辛金元, 吉东生, 朱彬 (3693)

沧州市大气污染特征观测研究 ..... 王永宏, 胡波, 王跃思, 刘伟, 张武 (3705)

华北工业城市降水中金属元素污染特征及来源 ..... 李月梅, 潘月鹏, 王跃思, 王英锋, 李杏茹 (3712)

广州市交通主干道空气中苯系物的测量 ..... 叶丛雷, 谢品华, 秦敏, 凌六一, 郑尼娜, 刘文彬, 黄祖照 (3718)

基于实时交通信息的道路机动车动态排放清单模拟研究 ..... 黄成, 刘娟, 陈长虹, 张健, 刘登国, 朱景瑜, 黄伟明, 巢渊 (3725)

柴油轿车燃用煤基 F-T 合成油的排放特性 ..... 胡志远, 程亮, 谭丕强, 楼狄明 (3733)

九龙江口滨海湿地生源要素空间分布特征 ..... 余小青, 杨军, 刘乐冕, 田原, 余正, 王昌付 (3739)

南四湖水体氮、磷营养盐时空分布特征及营养状态评价 ..... 舒凤月, 刘玉配, 赵颖, 吴艳鹏, 李爱华 (3748)

天目湖流域湿地对氮磷输出影响研究 ..... 李兆富, 刘红玉, 李恒鹏 (3753)

北京市新建城区不透水地表径流 N、P 输出形态特征研究 ..... 李立青, 吕书丛, 朱仁肖, 刘泽权, 单保庆 (3760)

云阳宗海湖的分布与来源 ..... 张玉玺, 向小平, 张英, 陈玺, 刘景涛, 王金翠, 张媛静, 孙继朝 (3768)

南方某城市地表水体中粪源性污染指示微生物的分布特征研究 ..... 孙傅, 沙婧, 刘彦华 (3778)

三峡库区大宁河藻细胞昼夜垂直迁移研究 ..... 张永生, 郑丙辉, 姜霞, 郑浩, 钟娜, 陈春宵 (3787)

江淮农村生态型排水系统构建及截污作用研究 ..... 单保庆, 李楠, 唐文忠 (3797)

人工湿地植物床-沟壕系统水质净化效果 ..... 汪仲琼, 张荣斌, 陈庆华, 魏宏斌, 王为东 (3804)

潜流人工湿地演变对废水中有机物、氮及磷去除的影响 ..... 魏泽军, 谢建平, 黄玉明 (3812)

人工湿地处理含盐生活污水的特性研究 ..... 高峰, 杨朝晖, 李晨, 金卫红, 邓一兵 (3820)

催化湿式氧化法降解水中的  $\beta$ -萘酚 ..... 刘杰, 于超英, 赵培庆, 陈革新 (3826)

ZVI/EDDS/Air 体系降解水中 2,4-二氯酚的研究 ..... 孙倩, 周海燕, 曹梦华, 吴琳娜, 王琳玲, 陈静, 陆晓华 (3833)

微波改性 MWNTs/TiO<sub>2</sub> 复合材料对 1,2,3-三氯苯的光催化降解研究 ..... 施周, 张茜, 张伟, 徐舜开, 张骅 (3840)

腐殖酸对生物炭去除水中 Cr(VI) 的影响机制研究 ..... 丁文川, 田秀美, 王定勇, 曾晓岚, 徐茜, 陈健康, 艾小雨 (3847)

臭氧氧化-活性污泥法处理含 PVA 工业废水的试验研究 ..... 邢晓琼, 黄程兰, 刘敏, 陈滢 (3854)

复合底物对颗粒化 EBPR 系统除磷特性的影响及优化试验研究 ..... 徐少娟, 孙培德, 郑雄柳, 董毅 (3859)

进水比例对水解反应器出水水质的影响研究 ..... 梁康强, 熊娅, 戚茂荣, 林秀军, 朱民, 宋英豪 (3868)

厌氧-准好氧联合型生物反应器填埋场渗滤液水质水量变化规律的研究 ..... 韩智勇, 刘丹, 李启彬, 陈馨 (3873)

我国城市污水处理回用调查研究 ..... 郭宇杰, 王学超, 周振民 (3881)

快雌醇和壬基酚在土壤中的吸附-解吸特征 ..... 姜鲁, 王继华, 李建忠, 辛佳, 李森, 刘翔 (3885)

黄土丘陵区刺槐林深层土壤有机碳矿化特征初探 ..... 马昕昕, 许明祥, 杨凯 (3893)

半干旱黄土丘陵区土壤结皮的地表水文效应 ..... 卫伟, 温智, 陈利顶, 陈瑾, 吴东平 (3901)

广西大石围巨型漏斗土壤中多环芳烃与环境因素 ..... 孔祥胜, 祁士华, 蒋忠诚, 黄保健 (3905)

酸性条件下黄铁矿氧化机制的研究 ..... 王楠, 易筱筠, 党志, 刘云 (3916)

淋洗条件下砂土和粉土水盐运移过程的监测研究 ..... 付腾飞, 贾永刚, 郭磊, 刘晓磊 (3922)

空气注射修复苯污染地下水模拟研究 ..... 樊艳玲, 姜林, 张丹, 钟茂生, 贾晓洋 (3927)

不同终点检测 5 种双酚 A 类化合物对 MCF-7 的细胞毒性 ..... 张帅帅, 刘堰, 刘树深, 朱祥伟 (3935)

上海世博园后滩湿地糙足类群落特征及其对环境因子的响应 ..... 陈立婧, 吴艳芳, 景钰湘, 王聪, 张饮江 (3941)

耐盐石油烃降解菌的筛选鉴定及其特性研究 ..... 吴涛, 谢文军, 依艳丽, 李小彬, 王君, 胡相明 (3949)

高效降酚菌株 *Ochrobactrum* sp. CH10 生长动力学和苯酚降解特性的研究 ..... 陈晓华, 魏刚, 刘思远, 孙江曼, 王芳芳, 李昊源, 刘宇军 (3956)

四溴双酚 A 好氧降解菌的筛选及其降解特性研究 ..... 钱艳园, 刘莉莉, 于晓娟, 丁丛, 王志平, 施玉衡, 李晨君 (3962)

长期施用有机和无机肥对黑土 *nirS* 型反硝化菌种群结构和丰度的影响 ..... 尹昌, 范分良, 李兆君, 宋阿琳, 朱平, 彭畅, 梁永超 (3967)

三氯乙烯在不同土壤中的吸附特性及其影响因素研究 ..... 何龙, 邱兆富, 吕树光, 逯志昌, 王治立, 隋倩, 林匡飞, 刘勇弟 (3976)

多菌灵在农田土壤中的降解及其影响因子研究 ..... 肖文丹, 杨肖娥, 李廷强 (3983)

硫化物对垃圾焚烧污泥焚烧飞灰高温过程中重金属挥发的影响 ..... 刘敬勇, 孙水裕 (3990)

关于医疗垃圾飞灰中二噁英在惰性气氛下的低温热脱附研究 ..... 纪莎莎, 李晓东, 徐旭, 陈彤 (3999)

第七届环境模拟与污染控制学术研讨会论文

稻田气溶胶 NH<sub>3</sub> 和气体 NO<sub>x</sub> 排放在线测定研究 ..... 龚巍巍, 栾胜基 (4006)

一种可同时检测挥发性氯代烷烃和氯代烯烃的电子鼻的研制 ..... 文晓刚, 刘锐, 蔡强, 万梅, 汤灵容, 陈吕军 (4012)

基于被动采样技术的垃圾焚烧厂及周边大气中 PAHs 分布研究 ..... 孙少艾, 李洋, 周轶, 王海蛟, 孙英 (4018)

涪江流域农业非点源污染空间分布及污染源识别 ..... 丁晓雯, 沈珍瑶 (4025)

人工湿地不同区域基质磷含量的差异分析 ..... 曹雪莹, 种云霄, 余光伟, 仲海涛 (4033)

基于 RT-qPCR 选择性检测水中活性病原菌 ..... 林怡雯, 李丹, 吴舒旭, 何苗, 杨天 (4040)

消毒副产物生成的温度影响和动力学模型 ..... 张小璐, 杨宏伟, 王小任, 付静, 解跃峰 (4046)

一种厌氧微定量研究新方法 ..... 张仲良, 吴静, 蒋剑凯, 姜洁, 李怀志 (4052)

梧桐树叶作为反硝化碳源的研究 ..... 熊剑锋, 徐华, 阎宁, 张永明 (4057)

降解嗜盐菌 AD-3 的筛选、降解特性及加氧酶基因的研究 ..... 崔长征, 冯天才, 于亚琦, 董斐, 杨昕梅, 冯耀宇, 刘勇弟, 林汉平 (4062)

《环境科学》征订启事 (3711) 《环境科学》征稿简则 (3767) 信息 (3998, 4039, 4045, 4056) 专辑征稿通知 (4051)

# 上海世博园后滩湿地桡足类群落特征及其对环境因子的响应

陈立婧<sup>1</sup>, 吴艳芳<sup>1</sup>, 景钰湘<sup>1</sup>, 王聪<sup>2</sup>, 张饮江<sup>2\*</sup>

(1. 上海海洋大学水产与生命学院, 省部共建水产种质资源发掘与利用教育部重点实验室, 上海 201306; 2. 上海海洋大学水产与生命学院, 水域环境生态上海高校工程研究中心, 上海 201306)

**摘要:** 上海世博园后滩湿地是中国 2010 年上海世界博览会规划区的重点项目。于 2009 年 9 月 ~ 2010 年 8 月研究了桡足类群落结构的时空变化特征。运用 SPSS 18.0 软件进行相关统计分析, 并利用 CANOCO 4.5 软件对桡足类数据和环境因子数据进行典范对应分析(CCA)。全年共鉴定出桡足类 23 种, 隶属于 6 科 11 属。优势种为锯缘真剑水蚤(*Eucyclops serrulatus*)、台湾温剑水蚤(*Thermocyclops taihokuensis*)、广布中剑水蚤(*Mesocyclops leuckarti*)、短尾温剑水蚤(*T. brevifurcatus*)和跨立小剑水蚤(*Microcyclops varicans*)。桡足类年均密度和生物量分别为  $(8.6 \pm 16.6) \text{ ind} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $(0.0836 \pm 0.1431) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。现存量主高峰均出现在 7 月, 次高峰均出现在 10 月, 1 月达到最低。1 号站点的营养水平最高, 沿着水流方向逐渐下降, 直至 10 号站点降至最低。桡足类的 Margelf 指数呈现夏秋季高, 秋冬季低的变化格局。通过典范对应分析表明, 水温、pH、硝态氮、总氮、总磷和溶解氧是影响世博园后滩湿地桡足类群落结构时空变化的主要环境因子。

**关键词:** 上海世博园后滩湿地; 桡足类; 群落特征; 时空变化; 典范对应分析

中图分类号: X174 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2012)11-3941-08

## Response of Copepod Community Characteristics to Environmental Factors in the Backshore Wetland of Expo Garden, Shanghai

CHEN Li-jing<sup>1</sup>, WU Yan-fang<sup>1</sup>, JING Yu-xiang<sup>1</sup>, WANG Cong<sup>2</sup>, ZHANG Yin-jiang<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory of Exploration and Utilization of Aquatic Genetic Resources, Ministry of Education, Fisheries and Life Science, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 2. Water Environment & Ecology Engineering Research Center of Shanghai Institution of Higher Education, Fisheries and Life Science, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China)

**Abstract:** The Backshore Wetland of Expo Garden was the emphasis of the World Expo construction project in Shanghai in 2010, China programming district. We carried out studies on the community structure and spatial-temporal variation of copepod from September 2009 to August 2010. Statistical Product and Service Solutions (SPSS) was used for relevant statistical analysis between physicochemical parameters and copepod standing crop. Canonical correspondence analysis (CCA) was applied to further explore the correlation between copepod species and environmental parameters using CANOCO 4.5. A total of 23 copepod species in 11 genera, 6 families were identified. 5 dominant species of copepod were recorded during the survey period. They were *Eucyclops serrulatus*, *Thermocyclops taihokuensis*, *Mesocyclops leuckarti*, *Thermocyclops brevifurcatus* and *Microcyclops varicans*. The annual mean density of copepod was  $(8.6 \pm 16.6) \text{ ind} \cdot \text{L}^{-1}$  and the biomass was  $(0.0836 \pm 0.1431) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ . The standing crop of copepod had its first peak in July, the second in October and the bottom in January. The highest trophic level was measured at Site 1, decreasing along the flowing direction of the water current, and the lowest level was found at Site 10. The Margelf index remained low in winter and spring, but was increased in summer and autumn. The community structure of copepod was analyzed in relation to water quality parameters by canonical correspondence analysis (CCA). Water temperature, pH, nitrate nitrogen, nitrite nitrogen, TN, TP and dissolved oxygen were strongly correlated with the copepod community structure.

**Key words:** the Backshore Wetland of Expo Garden; copepod; community characteristics; spatial-temporal variation; canonical correspondence analysis (CCA)

上海世博园后滩湿地位于世博园西南部 ( $31^{\circ}11'N$ ,  $121^{\circ}28'E$ , 海拔 6 m), 是黄浦江沿岸仅有的天然湿地, 面积为  $14.2 \text{ hm}^2$ , 岸线长约为 1.7 km。由于其独特的城市天然性和对城市生态安全的作用而备受瞩目, 是中国 2010 年上海世界博览会规划区的重点建设项目。湿地具有调节径流、降解污染、美化环境和保护物种多样性等多种功能与效

应, 与人类的生存、繁衍、发展息息相关<sup>[1]</sup>。桡足类是水库和河流等天然水体浮游动物的重要组成部分

收稿日期: 2012-02-22; 修订日期: 2012-05-16

基金项目: 国家科委科技攻关世博专项(2005ba908b23); 上海市科委世博专项(05dz05823); 上海市教委水生生物重点学科基金项目(S30701)

作者简介: 陈立婧(1971~), 女, 博士研究生, 副教授, 主要研究方向为浮游生物生态学, E-mail: ljchen@shou.edu.cn

\* 通讯联系人, E-mail: yjzhang@shou.edu.cn

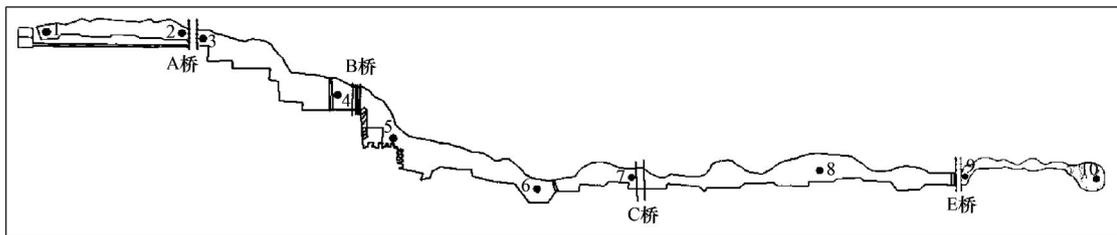
分,其在物质转换、能量流动和信息传递等生态过程中起着至关重要的作用,是水生态研究的重要内容<sup>[2-4]</sup>. 桡足类的多样性也是水域生态系统服务功能的重要评价指标之一,其种类组成和现存量的变动能及时准确地反映水域环境质量的优劣<sup>[5,6]</sup>. 至今未见关于后滩湿地桡足类群落结构的报道,为了探索世博园后滩湿地桡足类群落结构特征及其对生态系统变化的响应,本研究对后滩湿地桡足类的群落结构特征及其与理化因子的相关性作了初步分析,以期对世博园后滩湿地生态修复、湿地资源的合理利用和保护、实现水体生态系统良性循环提供

科学依据.

## 1 材料与方法

### 1.1 站点的设置与采样时间

后滩湿地水系是由引入黄浦江水 and 天然降水的原水通过基质过滤、吸附、沉淀、氮磷去除、重金属吸附、湿地净化等综合作用而形成的. 根据其水文规划特性,结合地形、地貌、水岸立地条件以及河流形态等特征共设 10 个采样站点(见图 1). 于 2009 年 9 月~2010 年 8 月中旬逐月进行采样分析.



1. 入水口(N31°10.753',E121°27.777'); 2. A桥左侧(N31°10.872',E121°27.818'); 3. A桥右侧(N31°10.877',E121°27.821'); 4. B桥左侧(N31°10.941',E121°27.872'); 5. 阶梯结合处(N31°10.955',E121°27.914'); 6. 阶梯和C桥中间点(N31°11.027',E121°27.968'); 7. C桥左侧(N31°11.041',E121°27.983'); 8. C桥和E桥的中间点(N31°11.158',E121°28.144'); 9. E桥右侧(N31°11.188',E121°28.196'); 10. 出水口(N31°11.250',E121°28.346')

图 1 上海世博园后滩湿地桡足类采样站点分布示意

Fig. 1 Sampling sites of copepod in the Backshore Wetland of Expo Garden in Shanghai

### 1.2 采样与分析方法

桡足类的采样和计数按文献[7]进行,定性定量样品均在 100 × Olympus-cx21 光学显微镜下镜检,桡足类的种类按文献[8]中的淡水桡足类鉴定,生物量(湿重)按体长-体重回归方程式计算<sup>[9]</sup>.

按照文献[10]现场测定水温(WT)、透明度(SD)、溶解氧(DO)、pH值;用柱状采水器采集水样1 000 mL,带回实验室,在 24 h 内按照文献[11]进行测定总磷(TP)、总氮(TN)、硝酸盐(NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N)、亚硝酸盐(NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N)、和叶绿素 a(Chl-a).

### 1.3 数据处理与分析

生物多样性指数采用 Margalef 丰富度指数  $D = (S - 1) / \ln N$ . 优势度<sup>[12]</sup>采用  $Y = (n_i / N) \times f_i$ ,把  $Y > 0.02$  的桡足类定为优势种. 式中, $n_i$  为第  $i$  种的个体数, $N$  为所有种类总个体数, $S$  为物种数. $f_i$  为

第  $i$  种出现的频率. 水体的营养状态评价利用综合营养状态指数法(TLI)<sup>[13]</sup>.

采用 SPSS 18.0 和 CANOCO 4.5 软件包进行数据统计分析. 不同站点间生物密度、生物量的比较均采用单因素方差分析(One-Way ANOVA). 桡足类物种数、现存量与环境因子的关系运用 Pearson 相关分析和典范对应分析(canonical correspondence analysis, CCA)<sup>[14,15]</sup>. 采用桡足类密度指标来反映桡足类种类与环境的关系,将桡足类密度值和环境数据进行  $\lg(x + 1)$  转换处理,应用 CANOCO4.5 软件分析并作出物种与环境因子的双序图.

## 2 结果与分析

### 2.1 上海世博园后滩湿地主要理化因子指标

上海世博园后滩湿地主要理化因子指标见表 1.

表 1 上海世博园后滩湿地水体水质指标

Table 1 Water quality indices of the Backshore Wetland of Expo Garden in Shanghai

参数	WT /°C	pH	DO /mg·L <sup>-1</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N /mg·L <sup>-1</sup>	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> -N /mg·L <sup>-1</sup>	TN /mg·L <sup>-1</sup>	TP /mg·L <sup>-1</sup>	Chl-a /mg·L <sup>-1</sup>
均值	20.0 ± 8.9	8.36 ± 0.96	6.61 ± 1.78	1.58 ± 0.78	0.22 ± 0.10	2.84 ± 1.00	0.08 ± 0.05	5.45 ± 6.03
范围	6.8 ~ 33.5	6.38 ~ 9.55	2.18 ~ 9.06	0.16 ~ 3.23	0.05 ~ 0.50	0.35 ~ 4.73	0.01 ~ 0.24	1.00 ~ 59.72

## 2.2 上海世博园后滩湿地桡足类物种组成与数量分布

### 2.2.1 桡足类的物种组成

全年共鉴定出桡足类 23 种, 约占全国淡水桡足类已知总种数 206 种<sup>[5]</sup> 的 11.17%, 隶属于 3 门 6 科 11 属。其中温剑水蚤属 (*Thermocyclops*) 种类最多 (5 种), 占全年总种类数的 21.74%; 其次是真剑水蚤属 (*Eucyclops*) (4 种), 占总种类数的 17.39%; 刺剑水蚤属 (*Acanthocyclops*) (3 种), 占 13.04%; 许水蚤属 (*Schmackeria*)、剑水蚤属 (*Cyclops*) 和中剑水蚤属 (*Mesocyclops*) 均为 2 种, 分别占 8.70%; 其余 5 属各检出 1 种, 各占 4.35%。

从种类数的季节变化来看, 桡足类的种类组成具有一定的差异性, 春秋季物种最为丰富, 均为 13 种, 各占全年总种类数的 56.52%; 夏季次之, 9 种, 占 39.13%; 冬季种类数最少, 仅为 7 种, 占 30.43%。

### 2.2.2 桡足类的优势种及其季节变动

根据年均密度和生物量, 桡足类优势种为锯缘真剑水蚤、台湾温剑水蚤、广布中剑水蚤、短尾温剑水蚤和跨立小剑水蚤。它们的密度主要分布在夏秋季节, 除了锯缘真剑水蚤高峰出现在春季外, 其余 4 种的密度高峰均出现在夏季 (图 2)。它们数量的变动左右了桡足类群落周年的消长。

锯缘真剑水蚤在 4~11 月均有分布, 主要高峰出现在春季 5 月, 密度为  $0.7 \text{ ind}\cdot\text{L}^{-1}$ ; 此外夏秋两季各自有一个小的高峰, 峰值分别为  $0.5 \text{ ind}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $0.3 \text{ ind}\cdot\text{L}^{-1}$ , 年均密度为  $0.2 \text{ ind}\cdot\text{L}^{-1}$ 。台湾温剑水蚤主要分布在夏季 6~7 月和秋季 9~11 月, 高峰出现在 7 月, 密度为  $3.0 \text{ ind}\cdot\text{L}^{-1}$ , 年均密度为  $0.3 \text{ ind}\cdot\text{L}^{-1}$ 。该种桡足类出现时间短, 数量大。广布中剑水蚤在 4~11 月均有分布, 主要出现在夏季, 高

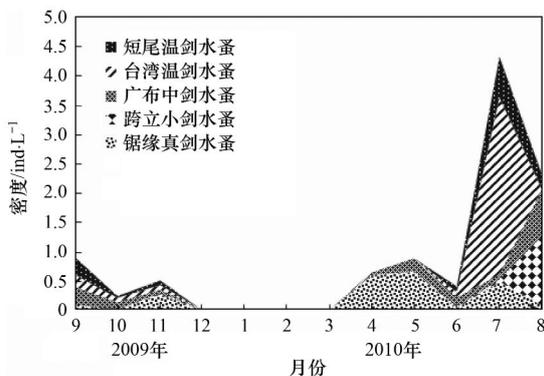


图 2 上海世博园后滩湿地桡足类优势种平均密度的月变化  
Fig. 2 Monthly variation in average densities of dominant species of copepod in the Backshore Wetland of Expo Garden in Shanghai

峰在 8 月, 密度为  $0.8 \text{ ind}\cdot\text{L}^{-1}$ , 年均密度为  $0.2 \text{ ind}\cdot\text{L}^{-1}$ 。短尾温剑水蚤主要分布在夏季 6~8 月和秋季 9~11 月, 高峰出现在 7 月, 密度为  $0.7 \text{ ind}\cdot\text{L}^{-1}$ , 年均密度为  $0.1 \text{ ind}\cdot\text{L}^{-1}$ 。跨立小剑水蚤主要分布在秋冬交替的 11~12 月和夏季 6~8 月, 高峰出现在 8 月, 密度为  $1.2 \text{ ind}\cdot\text{L}^{-1}$ , 年均密度为  $0.1 \text{ ind}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

### 2.2.3 桡足类现存量的时空变化

后滩湿地桡足类密度和生物量具有一致的季节变化趋势 (图 3), 变动范围分别为  $0 \sim 41.0 \text{ ind}\cdot\text{L}^{-1}$  和  $0.0003 \sim 0.3975 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 其年均值分别为  $(8.6 \pm 16.6) \text{ ind}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $(0.0836 \pm 0.1431) \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。密度和生物量的变动曲线均呈现夏秋季两个高峰, 冬季为低值期。春季随着水温的逐渐升高, 其现存量也开始上升。于 7 月达到全年最高峰, 密度和生物量分别为  $(41.0 \pm 18.2) \text{ ind}\cdot\text{L}^{-1}$  和  $(0.3975 \pm 0.2306) \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。此后, 现存量骤降, 于 8 月降至  $(4.2 \pm 3.7) \text{ ind}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $(0.0605 \pm 0.0586) \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  的较低水平。秋季桡足类的现存量又有所回升, 10 月达到全年次高峰  $(33.6 \pm 27.7) \text{ ind}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $(0.2022 \pm 0.1415) \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。现存量最低谷出现在冬季, 月平均值只有  $(0.2 \pm 0.6) \text{ ind}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $(0.0061 \pm 0.0204) \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

桡足类密度主要由幼体 (含无节幼体和桡足幼体) 组成, 其在全年均有分布, 且与桡足类的密度高峰相一致, 分别占总生物密度的 60.95% 和 27.18%。桡足类生物量主高峰主要由优势种群和幼体组成, 次高峰则主要是由幼体构成的。桡足类无节幼体和桡足幼体的全年出现, 既维持桡足类的繁衍, 同时为以桡足类幼体为食的鱼类和底栖动物提供充足的饵料。由此可见, 幼体对桡足类密度和生物量的贡献较大。据方差分析表明, 桡足类密度

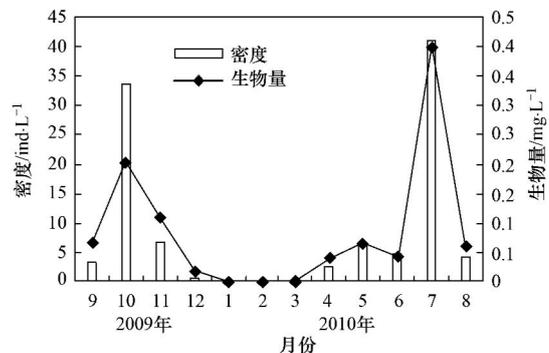


图 3 上海世博园后滩湿地桡足类平均密度和生物量的月变化  
Fig. 3 Monthly dynamics in average density and biomass of copepod in the Backshore Wetland of Expo Garden in Shanghai

在各月份之间达到极显著差异 ( $F = 16.42, P < 0.01$ ).

上海世博园后滩湿地桡足类的现存量在各站点间的动态分布见图 4. 桡足类密度在 3 号站点达到最大, 为  $(11.8 \pm 27.9) \text{ ind} \cdot \text{L}^{-1}$ , 在 10 号站点达到最小, 仅为  $(6.0 \pm 13.9) \text{ ind} \cdot \text{L}^{-1}$ . 3 号站点生物密度约为 10 号站点的 2 倍. 生物量在各站点间的分布与生物密度表现出非一致性, 生物量在 4 号站点达到最大, 为  $(0.1250 \pm 0.2212) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ; 其次为 6 号站点, 达到  $(0.1213 \pm 0.2101) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 然后出现在 1 号站点, 为  $(0.0915 \pm 0.0782) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ . 生物量从 6 号点骤降到 7 号点, 10 号站点的生物量最小, 仅为  $(0.0401 \pm 0.0780) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ . 4 号站点生物量约为 10 号站点的 3.1 倍.

据统计, 世博园后滩湿地桡足类的密度和生物量在各站点间的差异不显著 ( $F = 0.169, P > 0.05$ ;  $F = 0.377, P > 0.05$ ).

### 2.3 桡足类丰富度指数的月变化

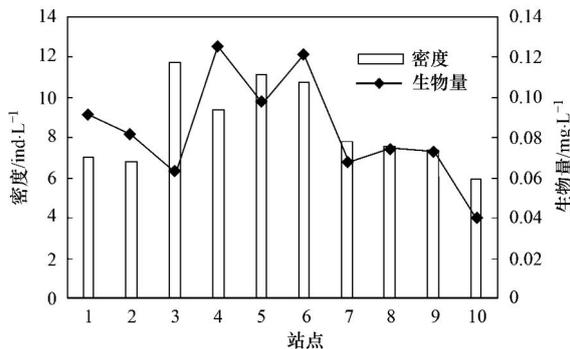


图 4 上海世博园后滩湿地桡足类平均密度和生物量的水平分布  
Fig. 4 Horizontal distribution of average density and biomass of copepod in the Backshore Wetland of Expo Garden in Shanghai

表 2 理化参数与桡足类物种数、密度、生物量的相关性分析<sup>1)</sup>

Table 2 Regression analysis of physicochemical parameters with species numbers, density and biomass

项目	WT	pH	DO	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> -N	TN	Chl-a	高锰酸盐指数
桡足类 S	0.683 **	-0.447 **	-0.532 **	0.251 **	-0.452 **	0.252 **	0.242 *	-0.202 *
桡足类 D	0.346 **	-0.268 **	-0.185	0.147	-0.063	0.303 **	-0.037	-0.095
桡足类 B	0.398 **	-0.323 **	-0.272 **	0.16	-0.155	0.363 **	0.037	-0.127

1) S:物种数; D:密度; B:生物量; \* \* 表示  $P < 0.01$ ; \* 表示  $P < 0.05$

### 2.5 桡足类群落结构与环境因子的关系

典范对应分析 (CCA) 是通过属种与环境指标数据的分析 (表 3), 并将环境指标作为矢量, 在双轴图中 (第一和第二指标轴) 直观地反映出桡足类与环境指标的关系 (图 6). 图 6 中前两个排序轴的特征值分别为 0.574 和 0.407 (表 4), 种类和环境因子排序轴的相关系数高达 0.889 和 0.827, 说明这

后滩湿地桡足类丰富度指数  $D$  变动于 0 ~ 4.28, 具明显的季节变化, 表现为夏秋季高冬季低的基本格局 (图 5). 以秋季最高, 均值为  $3.69 \pm 0.42$ ; 夏季位居第二, 均值为  $2.56 \pm 1.03$ , 春季较低, 均值为  $1.70 \pm 0.53$ , 冬季最低, 仅为  $1.59 \pm 1.13$ . 可见夏秋季种类较多, 组成复杂, 致使多样性较高; 冬春季种类较少, 组成简单, 则多样性较低.

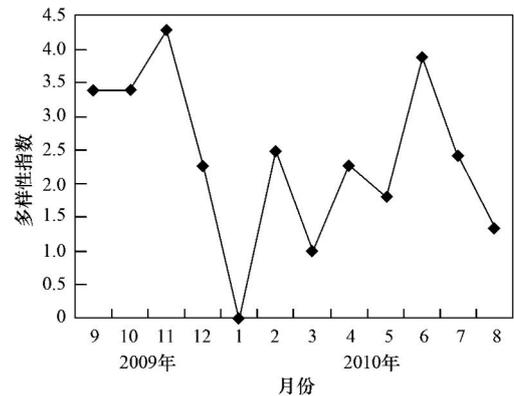


图 5 上海世博园后滩湿地桡足类丰富度指数的月变化  
Fig. 5 Monthly variation in Margelf index of copepod in the Backshore Wetland of Expo Garden in Shanghai

### 2.4 上海世博园后滩湿地桡足类物种群落特征与理化因子、叶绿素 a 的相关关系

表 2 显示了多项理化参数和叶绿素 a 与桡足类的物种数和现存量之间的相关关系. 桡足类物种数均与水温、硝态氮、总氮呈极显著正相关, 与叶绿素 a 呈显著正相关; 而与 pH、溶解氧、亚硝态氮呈极显著的负相关性, 与化学需氧量呈显著负相关. 现存量均与水温、总氮存在极显著正相关, 而与 pH 达到极显著负相关. 另外, 生物量还与溶解氧呈极显著负相关.

两个排序轴的排序图能够反映世博园后滩湿地桡足类物种与环境因子的关系. 水温、pH 和磷酸盐为 CCA 轴 1 的重要影响因子, 排序轴 2 则以硝态氮、总氮、化学需氧量、溶解氧、总磷为主要驱动因子. 种组 I 包括跨立小剑水蚤、广布中剑水蚤、北碚中剑水蚤 (*Mesocyclops pehpeiensis*)、台湾温剑水蚤、短尾温剑水蚤、粗壮温剑水蚤 (*Thermocyclops*

表 3 上海世博园后滩湿地桡足类群落结构 CCA 分析的统计信息

Table 3 Summary statistics for the first two axes of CCA performed on copepod in the Backshore Wetland of Expo Garden in Shanghai

项目	轴 1	轴 2	轴 3	轴 4
特征值	0.574	0.407	0.349	0.233
百分比/%	36.72	26.04	22.33	14.91
累计百分比/%	36.72	62.76	85.09	100.00
种类与环境因子的相关性	0.889	0.827	0.730	0.659
全部特征值总和	8.229			
全部典范特征值总和	1.860			

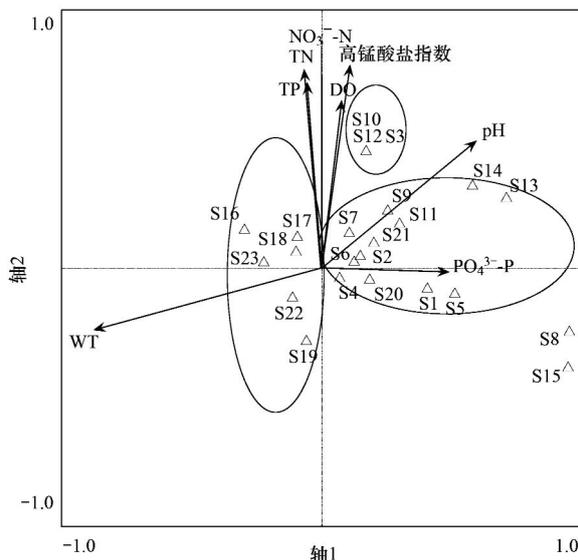
*dybowskii*), 对水温的敏感性明显高于其它种类, 与水温呈正相关, 其出现频率和相对密度在夏季较高; 种组 II 包括绝大部分种类, 如汤匙华哲水蚤 (*Sinocalanus dorrii*)、球状许水蚤 (*Schmackeria forbesi*)、右突新镖水蚤 (*Neodiaptomus schmackeri*)、湖泊美丽猛水蚤 (*Nitocra lacustris*)、中华窄腹剑水

蚤 (*Limnoithona sinensis*)、矮小刺剑水蚤 (*Acanthocyclops vernalis*)、棘尾刺剑水蚤 (*Acanthocyclops bicuspidatus*) 等均与 pH 和磷酸盐具有较高的相关性; 种组 III 包括指状许水蚤 (*Schmackeria inopinus*)、锯齿真剑水蚤 (*Eucyclops macruroides denticulatus*) 和近邻剑水蚤 (*Cyclops vicinus*)。它们的出现与硝态氮、TN、TP、溶解氧以及化学需氧量密切相关。

表 4 前两个排序轴和环境因子间的相关系数

Table 4 Correlation coefficients of environmental factors with the first two axes of CCA

环境因子	轴 1	轴 2
WT/°C	-0.772 6	-0.196 7
pH	0.530 1	0.411 0
DO/mg·L <sup>-1</sup>	0.070 2	0.540 0
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N/mg·L <sup>-1</sup>	-0.0020	0.700 5
TN/mg·L <sup>-1</sup>	-0.062 0	0.636 9
TP/mg·L <sup>-1</sup>	-0.053 1	0.596 1
PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -P/mg·L <sup>-1</sup>	0.432 0	-0.007 8
高锰酸盐指数/mg·L <sup>-1</sup>	0.097 8	0.649 5



S1: 汤匙华哲水蚤 *Sinocalanus dorrii*; S2: 球状许水蚤 *Schmackeria forbesi*; S3: 指状许水蚤 *S. inopinus*; S4: 右突新镖水蚤 *Neodiaptomus schmackeri*; S5: 湖泊美丽猛水蚤 *Nitocra lacustris*; S6: 中华窄腹剑水蚤 *Limnoithona sinensis*; S7: 锯齿真剑水蚤 *Eucyclops serrulatus*; S8: 如愿真剑水蚤 *E. speraius*; S9: 大尾真剑水蚤 *E. macruroides*; S10: 锯齿真剑水蚤 *E. macruroides denticulatus*; S11: 英勇剑水蚤 *Cyclops strenuous*; S12: 近邻剑水蚤 *C. vicinus*; S13: 矮小刺剑水蚤 *Acanthocyclops vernalis*; S14: 棘尾刺剑水蚤 *A. bicuspidatus*; S15: 角突刺剑水蚤 *A. thomasi*; S16: 跨立小剑水蚤 *Microcyclops varicans*; S17: 广布中剑水蚤 *Mesocyclops leuckarti*; S18: 北碚中剑水蚤 *M. pehpeiensis*; S19: 台湾温剑水蚤 *Thermocyclops taihokuensis*; S20: 蒙古温剑水蚤 *T. mongolicus*; S21: 虫宿温剑水蚤 *T. vermifer*; S22: 短尾温剑水蚤 *T. brevifurcatus*; S23: 粗壮温剑水蚤 *T. dybowskii*

图 6 上海世博园后滩湿地桡足类物种和环境因子的 CCA 二维排序图

Fig. 6 CCA biplot of species-environment of copepod's community in the Backshore Wetland of Expo Garden in Shanghai

### 3 讨论

#### 3.1 上海世博园后滩湿地桡足类群落结构的动态特征

由于上海世博园后滩湿地独特的环境条件, 桡足类群落在种类和数量组成上具有其相应的特点。经调查研究发现, 后滩湿地共鉴定出桡足类 23 种, 远较上海邻近其他水域丰富, 且优势种群的成分也与其他水域不尽相同。如淀山湖 (2 年共鉴定 15 种)<sup>[16]</sup>、滴水湖 (10 种)<sup>[17]</sup>、上海中心城区河道 (6 种)<sup>[18]</sup>、黄浦江倪家浜口 (5 种)<sup>[19]</sup>。如右突新镖水蚤、跨立小剑水蚤、美丽猛水蚤等在上海中心城区河道、黄浦江倪家浜口均未采集到。究其原因, 首先与世博园后滩湿地自身建设特点有关。世博园后滩湿地摒弃了传统的水处理方法, 运用湿地生态工程集成技术, 构建了完善的水生态系统。即利用系统中基质-水生植物-微生物的物理、化学、生物的重重协同作用, 并通过机制过滤、吸附、沉淀、离子

交换、植物吸附和微生物分解等生态过程来实现高效净化水质的目的<sup>[20]</sup>。同时后滩湿地海拔较低、两岸平坦、河床宽阔、水流平缓,为桡足类的生长、繁殖提供了良好的水域环境。其次与桡足类物种生态习性密切相关。本调查发现桡足类中绝大部分为广温性世界种,如汤匙华哲水蚤、球状许水蚤、指状许水蚤、右突新镖水蚤、台湾温剑水蚤、蒙古温剑水蚤(*Thermocyclops mongolicus*)、锯缘真剑水蚤、锯齿真剑水蚤、大尾真剑水蚤等,它们不仅分布广泛而且对温度变化的耐受力较强,故生存的温度范围较广。再次,从物种的环境适应性来看,后滩湿地桡足类类群大多为喜居草丛生境的类群,如许水蚤属、中剑水蚤属、跨立小剑水蚤、大尾真剑水蚤、如愿真剑水蚤等一些种类。这就与后滩湿地种植较多的水生植物如轮叶黑藻(*Hydrilla verticillata*)、苦草(*Vallisneria natans*)、眼子菜(*Potamogeton distinctus*)、聚草(*Myriophyllum spicatum*)、菹草(*Potamogeton crispus*)、金鱼藻(*Ceratophyllum demersum*)、伊乐藻(*Elodea canadensis*)<sup>[21]</sup>等有关。这些植被是根据上海地区以及水系水土的生态特征,结合水生植物种类的生态生理特性和生态效应人工种植,充分考虑其配置结构、营养结构以及自屏效应,为桡足类创造了良好的生存条件。水生高等植物除了能够快速吸收水体和沉积物中的营养盐,改变影响桡足类分布的一些理化环境因子如扰动、pH、透明度等,还可通过克藻效应来影响作为桡足类重要食物来源的浮游藻类密度<sup>[22]</sup>,同时降低了桡足类被滤食性鱼类捕食的机率,从而为桡足类提供了庇护场所<sup>[23]</sup>。因此从多方面影响到桡足类的生境,是影响桡足类的种类组成、密度和多样性的重要因素之一<sup>[24,25]</sup>。另外,可能在食物密度相对较少的清水态的水域中,大型浮游动物桡足类更具有竞争优势。

上海世博园后滩湿地桡足类在各站点间的差异虽未达到显著水平,但其种类数、密度和生物量都有一定的变化趋势。无论是种类数还是现存量均以10号站点最少,种类数以1号站点最多。究其原因可能与营养盐和饵料质量有关。据相关性分析表明,桡足类物种数均与硝态氮、总氮及叶绿素a呈显著正相关( $r$ 为0.251、0.252,  $P < 0.01$ ;  $r = 0.242, P < 0.05$ )。即随着营养盐N浓度的增加,其物种数相应增多。而1号站点位于后滩湿地源头,其综合营养状态指数最高(TLI=57.29),营养盐N、P含量较其他站点要高,并且浮游藻类的密度在此

站点最高,年均值为 $(1\,971.29 \pm 2\,496.92) \text{ ind} \cdot \text{L}^{-1}$ ,故其栖息的种类较多。为何现存量在此站点没有达到峰值?这就与食物质量密切相关。由于1号站点以蓝绿藻占优势(其中蓝藻占60.64%),而蓝藻通常不含浮游动物食物中必需的重要生物化学组分——不饱和脂肪酸二十碳五烯酸(EPA)<sup>[26,27]</sup>,作为桡足类主要食物来源的藻类食物质量就会大大降低,从而影响到藻类和桡足类之间的能量传递,桡足类的生长就会受到抑制,最后导致现存量的下降。密度以3号站点最高,主要是由于无节幼体大量繁殖引起的。生物量在4号站点达到最高峰是由鲜重较大的台湾温剑水蚤、桡足幼体所贡献。10号站点为后滩湿地生态水系的出水口,经水生植物随水流方向对水质的层层净化作用,其营养水平较低,其综合营养状态指数也最低(TLI=36.56),作为饵料的藻类密度也最低,仅有 $(306.09 \pm 283.84) \text{ ind} \cdot \text{L}^{-1}$ ,其中硅藻所占比率较高,为38.02%,而高密度的硅藻不仅对桡足类的孵化率有显著的影响,而且对桡足类的亲体也有一定的毒害作用<sup>[28]</sup>。故其物种数、密度、生物量都是最低的。

### 3.2 生态因子对桡足类群落结构的影响

不同水域环境,影响桡足类群落结构的主导生态因子是不一样的。Hann等<sup>[29]</sup>对草原沿海湿地沿岸带小型浮游甲壳动物(枝角类、桡足类)季节丰度和群落结构的研究指出浊度、浮游植物生物量和可溶性磷浓度是影响草原沿海湿地Crescent Pond水体和Blind Channel水体桡足类群落结构的主导因子;Frisch等<sup>[30]</sup>通过对西班牙西南部Donana 5个湿地区域枝角类、桡足类物种丰度和分布的相关研究表明,水体的导电率、表面积和大型水生植物覆盖率是影响枝角类和桡足类物种组成的重要因素。有研究表明,温度是影响桡足类生命活动的重要环境因子之一,尤其是对其生长、发育、繁殖的影响极为显著<sup>[31]</sup>。经相关性分析表明,世博园后滩湿地桡足类物种数、密度和生物量均与水温呈极显著正相关( $r$ 分别为0.683、0.346、0.398,  $P < 0.01$ )。本研究表明,后滩湿地桡足类密度和生物量具有明显的季节交替现象,7月达到最高峰,10月出现次峰值,春季相对较低,而冬季最低的变化趋势。主要是因为上海世博园后滩湿地夏秋季水温较高 $(31.21 \pm 1.29)^\circ\text{C}$ 、 $(21.20 \pm 5.04)^\circ\text{C}$ ,适宜大多数桡足类的生长<sup>[32]</sup>,且作为饵料生物的浮游藻类(叶绿素a值)在这两个季节密度也较高;而在冬季,温度较低 $(8.66 \pm 1.44)^\circ\text{C}$ ,不利于桡足类的繁殖。虽然春季

温度适宜( $18.75 \pm 5.32$ ) $^{\circ}\text{C}$ ,但并未形成密度高峰,这就与枝角类的竞争密切相关<sup>[33]</sup>.大型枝角类如蚤状溞(*Daphnia pulex*)、大型溞(*Daphnia magna*)在春季大量繁殖并形成优势种群,在一定程度上抑制了桡足类的发展.从 CCA 也可以看出优势种群均与水温呈正相关,这是后滩湿地桡足类在夏秋季出现高峰的重要原因之一.另外,作为现存量重要贡献者的无节幼体和桡足幼体也与水温呈正相关,虽在四季均有分布,但幼体密度在夏秋季要高于冬春季.这可能是由于桡足类从卵孵化发育到成熟个体所需时间长于轮虫和枝角类,一般要经过卵、无节幼体、桡足幼体、成体几个阶段,温度与各阶段的发育时间呈负相关性.温度越低,发育时间越长;温度较高,则其生长繁殖活跃,数量增加<sup>[34]</sup>.这与 Maier<sup>[35]</sup>研究的 5 种剑水蚤的无节幼体和桡足幼体随温度升高、发育时间越短相一致.无节幼体被认为是桡足类生长过程中的瓶颈,由于其主要以滤食细菌为主,且滤食效率低,从而对食物资源的多寡比较敏感<sup>[36,37]</sup>.本调查中后滩湿地无节幼体在 7 月出现较高的数量可能与水温变化相关,主要是由于 7 月平均水温较高为  $31.41^{\circ}\text{C}$ ,有利于细菌大量繁殖,于是作为无节幼体主要的食物来源也就最丰富,为无节幼体的生长提供有利条件.

营养盐主要通过直接影响水体浮游藻类的生长来间接影响浮游动物的多样性和数量分布.本次调查中,后滩湿地 N、P 等营养盐与桡足类数量相关性显著,并对桡足类群落的分布有一定的贡献作用,说明后滩湿地水体营养盐也是影响桡足类群落的重要因素之一.桡足类物种数与  $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 、TN 呈极显著正相关,生物密度和生物量均与 TN 呈极显著的正相关( $r$  为 0.303、0.363;  $P < 0.01$ ); TP 与桡足幼体密度有显著的负相关系( $r = -0.279$ ;  $P < 0.05$ ).磷是淡水生态系统中营养的主要限制因子,磷浓度与浮游藻类生物量的代表参数——叶绿素 a 呈极显著正相关( $r = 0.422$ ,  $P < 0.01$ ),推测原因是磷的增加促进了水体中藻类和水生植物的增长,它们的大量繁殖消耗了水体中的氮,改变了水体中的 N/P,从而使桡足类的分布发生了变化.

世博园后滩湿地养有肉食性鳊鱼(*Siniperca chuatsi*)、滤食性鲢鱼(*Hypophthalmichthys molitrix*)、杂食性鳊鱼(*Parabramis pekinensis*)、河蚌(*Anodonta woodiana*)、螺蛳(*Margarya* sp.)等<sup>[21]</sup>,在一定程度上对枝角类的选择捕食力度较大,因此在夏秋季枝角类数量被控制在相对较低

的水平,而在捕食压力减小的冬春季则迅速增长.枝角类的抑制意味着桡足类竞争压力的减小,这可能是夏秋季桡足类数量居高的原因,而冬春季桡足类密度的下降可能在一定程度上决定于枝角类数量增长所带来的竞争压力.

#### 4 结论

(1)上海世博园后滩湿地桡足类物种较邻近其他水域丰富得多,在调查期间共鉴定出桡足类 23 种,隶属于 6 科 11 属.其中温剑水蚤属种类最多(5 种),真剑水蚤属种类次之(4 种).从种类组成的季节变化来看,春秋两季物种最为丰富(均为 13 种),冬季种类数最少,仅为 7 种.从生态属性来看,后滩湿地桡足类以广温性世界种为主.

(2)后滩湿地桡足类密度的年波动范围在  $0 \sim 41.0 \text{ ind} \cdot \text{L}^{-1}$  之间,平均值为  $8.6 \text{ ind} \cdot \text{L}^{-1}$ .桡足类现存量具有明显的季节变化,均在 7 月和 10 月出现明显的峰值.在水平分布上,各站点间虽不存在显著性差异,但具有一定的变化趋势,无论物种数、密度还是生物量,均以 10 号站点为最低.

(3)由环境因子与桡足类的典范对应分析表明,水温、pH、硝态氮、总氮、总磷和溶解氧是影响上海世博园后滩湿地桡足类群落时空分布的主要驱动因子.后滩湿地桡足类的月份更替明显,生物月份更替现象的存在,是生物长期适应环境的结果,它对于桡足类类群整体的生存有利.

(4)上海世博园后滩湿地是在系统深入探明其生态环境因子特征的基础上,运用湿地生态工程集成技术和生物操纵等方法,构建完善的水域生态系统,实现了水体生态景观功能化,并维持物种多样性以及在恢复水体自净能力方面取得了一定的成效.有效改善其水质,全面提升环境质量,对一些富营养型水域的生态修复和环境治理具有一定的指导意义,尤其对城市景观水体的改善提供一定理论依据.

致谢:上海海洋大学水产与生命学院蒋琰、梅榛、张维、朱骅等同学参加了部分野外调查及室内试验,特此致谢!

#### 参考文献:

- [1] 雷昆,张明祥.中国的湿地资源及其保护建议[J].湿地科学,2005,3(2):81-86.
- [2] Matsumura-Tundisi T, Tundisi J G. Calanoida (Copepoda) species composition changes in the reservoirs of São Paulo State (Brazil) in the last twenty years[J]. Hydrobiologia, 2003, 504 (1-3): 215-222.
- [3] Burger D F, Hogg I D, Green J D. Distribution and abundance

- of zooplankton in the Waikato River, New Zealand [J]. *Hydrobiologia*, 2002, **479**(1-3): 31-38.
- [4] 颜庆云, 余育和, 冯伟松. 洞庭湖浮游生物群落 DNA 指纹拓扑结构与物种组成对应关系[J]. *生态学报*, 2005, **25**(9): 2221-2226.
- [5] Echaniz S A, Vignatti A M, Paggi De S J, *et al.* Zooplankton seasonal abundance of South American Saline shallow lakes[J]. *International Review of Hydrobiology*, 2006, **91**(1): 86-100.
- [6] 纪焕红, 叶属峰, 刘星, 等. 南麂列岛海洋自然保护区浮游动物的物种组成及其多样性[J]. *生物多样性*, 2006, **14**(3): 206-215.
- [7] 章宗涉, 黄祥飞. 淡水浮游生物研究方法[M]. 北京: 科学出版社, 1991. 358-362.
- [8] 中国科学院动物研究所甲壳动物研究组. 中国动物志节肢动物门甲壳纲淡水桡足类[M]. 北京: 科学出版社, 1979.
- [9] 陈雪梅. 淡水桡足类生物量的测算[J]. *水生生物学集刊*, 1981, **7**(3): 397-408.
- [10] 金相灿, 屠清瑛. 湖泊富营养化调查规范[M]. (第二版) 北京: 中国环境科学出版社, 1990.
- [11] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. (第四版) 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [12] Danilov R, Ekelund N G A. The efficiency of seven diversity and one similarity indices based on phytoplankton data for assessing the lever of eutrophication in lakes in central Sweden[J]. *The Science of the Total Environment*, 1999, **234**(1-3): 15-23.
- [13] 王明翠, 刘雪芹, 张建辉. 湖泊富营养化评价方法及分级标准[J]. *中国环境监测*, 2002, **18**(5): 47-49.
- [14] Braak C J F T. Canonical correspondence analysis: a new eigenvector technique for multivariate direct gradient analysis[J]. *Ecology*, 1986, **67**(5): 1167-1179.
- [15] Lepš J, Šmilauer P. Multivariate analysis of ecological data using canoco[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2003: 168-250.
- [16] 郑小燕, 王丽卿, 盖建军, 等. 淀山湖浮游动物的群落结构及动态[J]. *动物学杂志*, 2009, **44**(5): 78-85.
- [17] 王延洋, 李晓波, 吴波, 等. 上海滴水湖浮游动物研究初报[J]. *上海师范大学学报(自然科学版)*, 2008, **37**(2): 167-172.
- [18] 刘一, 禹娜, 冯德祥, 等. 上海市中心城区河道浮游动物群落结构的周年变化[J]. *生态学杂志*, 2010, **29**(2): 370-376.
- [19] 张饮江, 罗思婷, 徐晶, 等. 上海黄浦江倪家浜口浮游生物调查与水质评价[J]. *水生态学杂志*, 2010, **3**(4): 8-15.
- [20] Drizo A, Frost C A, Grace J, *et al.* Physico-chemical screening of phosphate-removing substrates for use in constructed wetland systems[J]. *Water Research*, 1999, **33**(17): 3595-3602.
- [21] 张饮江, 董悦, 金晶. 世博园后滩水域生态修复与景观设计[J]. *园林*, 2010, (8): 18-21.
- [22] Lauridsen T L, Lodge D M. Avoidance by *Daphnia magna* of fish and macrophytes: chemical cues and predator-mediated use of macrophyte habitat[J]. *Limnology and Oceanography*, 1996, **41**(4): 794-798.
- [23] Timms R M, Moss B. Prevention of growth of potentially dense phytoplankton populations by zooplankton grazing, in the presence of zooplanktivorous fish, in a shallow wetland ecosystem[J]. *Limnology and Oceanography*, 1984, **29**(3): 472-486.
- [24] Venugopal M N, Winfield I J. The distribution of juvenile fishes in a hypereutrophic pond: Can macrophytes potentially offer a refuge for zooplankton? [J]. *Journal of Freshwater Ecology*, 1993, **8**(4): 389-396.
- [25] Schriver P, Bøgestrand J, Jeppesen E, *et al.* Impact of submerged macrophytes on fish-zooplankton-phytoplankton interactions: large-scale enclosure experiments in a shallow eutrophic lake[J]. *Freshwater Biology*, 1995, **33**(2): 255-270.
- [26] 游江涛, 董丽华, 韩博平. 热带富营养化湖泊中浮游植物的脂肪酸组成与分布[J]. *湖泊科学*, 2005, **17**(1): 69-74.
- [27] Brett M, Müller-Navarra D. The role of highly unsaturated fatty acids in aquatic foodweb processes [J]. *Freshwater Biology*, 1997, **38**(3): 483-499.
- [28] 张光涛, 孙松. 硅藻对桡足类生长和生殖的作用[J]. *自然科学进展*, 2003, **13**(8): 818-824.
- [29] Hann B J, Zrum L. Littoral microcrustaceans (Cladocera, Copepoda) in a prairie coastal wetland: seasonal abundance and community structure[J]. *Hydrobiologia*, 1997, **357**(1-3): 37-52.
- [30] Frisch D, Moreno-Ostos E, Green A J. Species richness and distribution of copepods and cladocerans and their relation to hydroperiod and other environmental variables in Donana, southwest Spain[J]. *Hydrobiologia*, 2006, **556**(1): 327-340.
- [31] Dussart B H, Fernando C H, Matsumura-Tundisi T, *et al.* A review of systematics, distribution and ecology of tropical freshwater zooplankton[J]. *Hydrobiologia*, 1984, **113**(1): 77-91.
- [32] 沈嘉瑞. 中国动物志节肢动物门甲壳纲淡水桡足类[M]. 北京: 科学出版社, 1979.
- [33] 李纯厚, 黄祥飞. 略论武汉东湖枝角类种类演替及其生态因子的关系[J]. *水生生物学报*, 1992, **16**(2): 101-112.
- [34] 崔福义, 林涛, 马放, 等. 水源中水蚤类浮游动物的孳生与生态控制研究[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2002, **34**(3): 399-403.
- [35] Maier G. The effect of temperature on the development times of eggs, naupliar and copepodite stages of five species of cyclopoid copepods[J]. *Hydrobiologia*, 1989, **184**(1-2): 79-88.
- [36] Hopp U, Maier G. Survival and development of five species of cyclopoid copepods in relation to food supply: experiments with algal food in a flow-through system [J]. *Freshwater Biology*, 2005, **50**(9): 1454-1463.
- [37] Sherr E B, Sherr B F. High rates of consumption of bacteria by pelagic ciliates[J]. *Nature*, 1987, **325**(6106): 710-711.

## CONTENTS

Characteristics of Atmospheric NO <sub>2</sub> in the Beijing-Tianjin-Hebei Region and the Yangtze River Delta Analyzed by Satellite and Ground Observations	WANG Ying, LI Ling-jun, LIU Yang (3685)
Variation Analysis of Background Atmospheric Pollutants in North China During the Summer of 2008 to 2011	YANG Jun-yi, XIN Jin-yuan, JI Dong-sheng, <i>et al.</i> (3693)
Characteristics of Atmospheric Pollutants in Cangzhou	WANG Yong-hong, HU Bo, WANG Yue-si, <i>et al.</i> (3705)
Chemical Characteristics and Sources of Trace Metals in Precipitation Collected from a Typical Industrial City in Northern China	LI Yue-mei, PAN Yue-peng, WANG Yue-si, <i>et al.</i> (3712)
BTX Monitoring Nearby Main Road Traffic in Guangzhou	YE Cong-lei, XIE Pin-hua, QIN Min, <i>et al.</i> (3718)
Dynamic Road Vehicle Emission Inventory Simulation Study Based on Real Time Traffic Information	HUANG Cheng, LIU Juan, CHEN Chang-hong, <i>et al.</i> (3725)
Emission Characteristics of a Diesel Car Fueled with Coal Based Fischer-Tropsch (F-T) Diesel and Fossil Diesel Blends	HU Zhi-yuan, CHENG Liang, TAN Pi-qiang, <i>et al.</i> (3733)
Spatial Variations of Biogenic Elements in Coastal Wetland Sediments of the Jiulong River Estuary	YU Xiao-qing, YANG Jun, LIU Le-mian, <i>et al.</i> (3739)
Spatio-Temporal Distribution of TN and TP in Water and Evaluation of Eutrophic State of Lake Nansi	SHU Feng-yue, LIU Yu-pei, ZHAO Ying, <i>et al.</i> (3748)
Impact on Nitrogen and Phosphorous Export of Wetlands in Tianmu Lake Watershed	LI Zhao-fu, LIU Hong-yu, LI Heng-peng (3753)
Nitrogen and Phosphorus Composition in Urban Runoff from the New Development Area in Beijing	LI Li-qing, LÜ Shu-cong, ZHU Ren-xiao, <i>et al.</i> (3760)
Distribution and Sources of Arsenic in Yangzonghai Lake, China	ZHANG Yu-xi, XIANG Xiao-ping, ZHANG Ying, <i>et al.</i> (3768)
Occurrence of Fecal Indicator Bacteria in Urban Surface Water: A Case Study in Southern China	SUN Fu, SHA Jing, LIU Yan-hua (3778)
Vertical Migration of Algal Cells in the Daning River Bay of the Three Gorges Reservoir	ZHANG Yong-sheng, ZHENG Bing-hui, JIANG Xia, <i>et al.</i> (3787)
Construct of Yangtze-Huai River Rural Areas Ecological Drainage System and Its Retention Effect on Pollutants	SHAN Bao-qing, LI Nan, TANG Wen-zhong (3797)
Water Treatment Efficiency of Constructed Wetland Plant-Bed/Ditch Systems	WANG Zhong-qiong, ZHANG Rong-bin, CHEN Qing-hua, <i>et al.</i> (3804)
Effect of the Subsurface Constructed Wetland Evolution into Free Surface Flow Constructed Wetland on the Removal of Organic Matter, Nitrogen, and Phosphorus in Wastewater	WEI Ze-jun, XIE Jian-ping, HUANG Yu-ming (3812)
Treatment Characteristics of Saline Domestic Wastewater by Constructed Wetland	GAO Feng, YANG Zhao-hui, LI Chen, <i>et al.</i> (3820)
Degradation of $\beta$ -Naphthol by Catalytic Wet Air Oxidation	LIU Jie, YU Chao-ying, ZHAO Pei-qing, <i>et al.</i> (3826)
Degradation of 2,4-Dichlorophenol in Aqueous Solution by ZVI/EDDS/Air System	SUN Qian, ZHOU Hai-yan, CAO Meng-hua, <i>et al.</i> (3833)
Study on Photocatalytic Degradation of 1,2,3-Trichlorobenzene Using the Microwaved MWNTs/TiO <sub>2</sub> Composite	SHI Zhou, ZHANG Qian, ZHANG Wei, <i>et al.</i> (3840)
Mechanism of Cr(VI) Removal from Aqueous Solution Using Biochar Promoted by Humic Acid	DING Wen-chuan, TIAN Xiu-mei, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (3847)
Research on the Treatment of Wastewater Containing PVA by Ozonation-Activated Sludge Process	XING Xiao-qiong, HUANG Cheng-lan, LIU Min, <i>et al.</i> (3854)
Effects of Composite Substrates on the Phosphorus Removal in Granule-based EBPR System and Its Optimization Experiment	XU Shao-juan, SUN Pei-de, ZHENG Xiong-liu, <i>et al.</i> (3859)
Research of Input Water Ratio's Impact on the Quality of Effluent Water from Hydrolysis Reactor	LIANG Kang-qiang, XIONG Ya, QI Mao-rong, <i>et al.</i> (3868)
Evolution of Leachate Quantity and Quality in the Anaerobic-semiaerobic Bioreactor Landfill	HAN Zhi-yong, LIU Dan, LI Qi-bin, <i>et al.</i> (3873)
National Survey of Urban Sewage Reuse in China	GUO Yu-jie, WANG Xue-chao, ZHOU Zhen-min (3881)
Sorption and Desorption of 17 $\alpha$ -Ethinyl Estradiol and 4-n-Nonylphenol in Soil	JIANG Lu, WANG Ji-hua, LI Jian-zhong, <i>et al.</i> (3885)
Soil Organic Carbon Mineralization of Black Locust Forest in the Deep Soil Layer of the Hilly Region of the Loess Plateau, China	MA Xin-xin, XU Ming-xiang, YANG Kai (3893)
Effects of Soil Crusts on Surface Hydrology in the Semiarid Loess Hilly Area	WEI Wei, WEN Zhi, CHEN Li-ding, <i>et al.</i> (3901)
Environmental Factors on Distribution of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Soils from Dashiwei Karst Giant Doline (Tiankeng) in Guangxi, China	KONG Xiang-sheng, QI Shi-hua, JIANG Zhong-cheng, <i>et al.</i> (3905)
Investigation on Mechanism of Pyrite Oxidation in Acidic Solutions	WANG Nan, YI Xiao-yun, DANG Zhi, <i>et al.</i> (3916)
Monitoring of Water and Salt Transport in Silt and Sandy Soil During the Leaching Process	FU Teng-fei, JIA Yong-gang, GUO Lei, <i>et al.</i> (3922)
Simulation on Remediation of Benzene Contaminated Groundwater by Air Sparging	FAN Yan-ling, JIANG Lin, ZHANG Dan, <i>et al.</i> (3927)
Detecting the Cytotoxicities of Five Bisphenol A Analogues to the MCF-7 Human Breast Carcinoma Cell Line Through Different Endpoints	ZHANG Shuai-shuai, LIU Yan, LIU Shu-shen, <i>et al.</i> (3935)
Response of Copepod Community Characteristics to Environmental Factors in the Backshore Wetland of Expo Garden, Shanghai	CHEN Li-jing, WU Yan-fang, JING Yu-xiang, <i>et al.</i> (3941)
Isolation, Identification and Characterization of Halotolerant Petroleum-degrading Bacteria	WU Tao, XIE Wen-jun, YI Yan-li, <i>et al.</i> (3949)
Growth Kinetics and Phenol Degradation of Highly Efficient Phenol-degrading <i>Ochrobactrum</i> sp. CH10	CHEN Xiao-hua, WEI Gang, LIU Si-yuan, <i>et al.</i> (3956)
Isolation of Aerobic Degrading Strains for TBBPA and the Properties of Biodegradation	QIAN Yan-yuan, LIU Li-li, YU Xiao-juan, <i>et al.</i> (3962)
Influences of Long-term Application of Organic and Inorganic Fertilizers on the Composition and Abundance of <i>nirS</i> -type Denitrifiers in Black Soil	YIN Chang, FAN Fen-liang, LI Zhao-jun, <i>et al.</i> (3967)
Characteristics and Influencing Factors of Trichloroethylene Adsorption in Different Soil Types	HE Long, QIU Zhao-fu, LÜ Shu-guang, <i>et al.</i> (3976)
Degradation of Carbazim in Paddy Soil and the Influencing Factors	XIAO Wen-dan, YANG Xiao-e, LI Ting-qiang (3983)
Effects of Sulphur Compounds on the Volatile Characteristics of Heavy Metals in Fly Ash from the MSW and Sewage Sludge Co-combustion Plant During the Disposal Process with Higher Temperature	LIU Jing-yong, SUN Shui-yu (3990)
Low-temperature Thermal Treatment of Dioxin in Medical Waste Fly Ash Under Inert Atmosphere	JI Sha-sha, LI Xiao-dong, XU-Xu, <i>et al.</i> (3999)
Hourly Measurement on Aerosol NH <sub>3</sub> and Gas NO <sub>x</sub> Emission in the Rice Field	GONG Wei-wei, LUAN Sheng-ji (4006)
Implementation of an Electronic Nose for Rapid Detection of Volatile Chloroalkane and Chloroalkene	WEN Xiao-gang, LIU Rui, CAI Qiang, <i>et al.</i> (4012)
Pilot Study on PAHs of the Atmosphere Around the Refuse Incineration Plant Based on the Technology of Passive Sampling	SUN Shao-ai, LI Yang, ZHOU Yi, <i>et al.</i> (4018)
Spatial Distribution and Pollution Source Identification of Agricultural Non-Point Source Pollution in Fujiang Watershed	DING Xiao-wen, SHEN Zhen-yao (4025)
Difference of P Content in Different Area Substrate of Constructed Wetland	CAO Xue-ying, CHONG Yun-xiao, YU Guang-wei, <i>et al.</i> (4033)
Selective Detection of Viable Pathogenic Bacteria in Water Using Reverse Transcription Quantitative PCR	LIN Yi-wen, LI Dan, WU Shu-xu, <i>et al.</i> (4040)
Formation of Disinfection By-products; Temperature Effect and Kinetic Modeling	ZHANG Xiao-lu, YANG Hong-wei, WANG Xiao-mao, <i>et al.</i> (4046)
A Novel Quantitative Approach to Study Dynamic Anaerobic Process at Micro Scale	ZHANG Zhong-liang, WU Jing, JIANG Jian-kai, <i>et al.</i> (4052)
Leaves of <i>Platanus orientalis</i> as the Carbon Source for Denitrification	XIONG Jian-feng, XU Hua, YAN Ning, <i>et al.</i> (4057)
Isolation, Characterization of an Anthracene Degrading Bacterium <i>Marteella</i> sp. AD-3 and Cloning of Dioxygenase Gene	CUI Chang-zheng, FENG Tian-cai, YU Ya-qi, <i>et al.</i> (4062)

# 《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)

2012年11月15日 33卷 第11期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 33 No. 11 Nov. 15, 2012

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. sciencecp. com	Distributed	by	Science Press Tel: 010-64017032 E-mail: journal@mail. sciencecp. com
订 购 处	全国各地邮局	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: 70.00 元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行人