

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第9期

Vol.35 No.9

**2014**

中国科学院生态环境研究中心 主办  
科学出版社 出版



目次

长江三角洲地区霾判别方法的对比分析 ..... 刘晓慧,朱彬,高晋徽,张恩红,王红磊,陈焯鑫,王姝 (3239)

1980~2012年江苏省城市霾日的时空分布及成因分析 ..... 刘端阳,魏建苏,严文莲,吕军,孙燕 (3247)

瓦里关大气二氧化碳和甲烷时间变化特征 ..... 刘鹏,张国庆,王剑琼,吴昊,李宝鑫,王宁章 (3256)

上海城区PM<sub>2.5</sub>中有机碳和元素碳变化特征及来源分析 ..... 张懿华,王东方,赵倩彪,崔虎雄,李娟,段玉森,伏晴艳 (3263)

亚青会期间南京市气溶胶中OC和EC的粒径分布 ..... 王红磊,朱彬,安俊琳,段卿,邹嘉南,沈利娟 (3271)

无锡市冬季典型天气PM<sub>2.5</sub>中碳组分的污染特征 ..... 云龙,陆钊,张天舒,伍德侠,盛世杰,陆亦怀,刘建国 (3280)

高炉炼铁工艺细颗粒物PM<sub>2.5</sub>排放特性分析 ..... 范真真,赵亚丽,赵浩宁,梁兴印,孙静雯,王保贵,王亚军 (3287)

重庆市北碚城区大气中VOCs组成特征研究 ..... 祁心,郝庆菊,吉东生,张军科,刘子锐,胡波,王跃思,江长胜 (3293)

双组分VOCs的催化氧化及动力学分析 ..... 卜龙利,杨力,孙剑宇,梁欣欣,虎雪姣,孟海龙 (3302)

汽车排放超细颗粒物浓度及粒径谱特征的实验研究 ..... 陆叶强,陈秋方,孙在,蔡志良,杨文俊 (3309)

疏勒河上游地表水水化学主离子特征及其控制因素 ..... 周嘉欣,丁永建,曾国雄,吴锦奎,秦甲 (3315)

河流库区沉积物-水界面营养盐及气态氮的释放过程和通量 ..... 陈朱虹,陈能汪,吴殷琪,莫琼利,周兴鹏,鲁婷,田蕴 (3325)

大辽河感潮段及其近海河口重金属空间分布及污染评价 ..... 张雷,秦延文,马迎群,赵艳民,时瑶 (3336)

雅鲁藏布江中段表层沉积物重金属形态分布及风险评价 ..... 柏建坤,李潮流,康世昌,陈鹏飞,王建力 (3346)

北京奥林匹克公园地表颗粒物粒度特征分析 ..... 李海燕,石安邦,瞿杨晨,岳靖淋 (3352)

黄河表层沉积物中类二噁英多氯联苯水平分布 ..... 李光耀,金军,何畅,王英,马召辉,李明园 (3358)

合肥城郊典型源头溪流不同渠道形态的氮磷滞留特征 ..... 李如忠,杨继伟,钱靖,董玉红,唐文坤 (3365)

基于水资源调度的平原河网区城市河道氮迁移转化研究 ..... 刘波,盛明,朱强,杨霜,檀炳超,范冉,南旭军,何茂阳,王国祥 (3373)

杭州湾潮滩湿地植物不同分解过程及其磷素动态 ..... 邵学新,梁新强,吴明,叶小齐,蒋科毅 (3381)

基于数据同化的太湖叶绿素多模型协同反演 ..... 李渊,李云梅,吕恒,朱利,吴传庆,杜成功,王帅 (3389)

天然日光辐照下两江交汇处溶解性有机质(DOM)光漂白过程:以涪江-嘉陵江为例 ..... 高洁,江韬,闫金龙,魏世强,王定勇,卢松,李璐璐 (3397)

利用紫外-可见吸收光谱估算三峡库区消落带水体、土壤和沉积物溶解性有机质(DOM)浓度 ..... 李璐璐,江韬,卢松,闫金龙,高洁,魏世强,王定勇,郭念,赵铮 (3408)

Cu<sub>2</sub>O-Ag-AgBr/MA可见光催化剂的制备及其降解2-氯苯酚的研究 ..... 王冉,周雪峰,胡学香,胡春 (3417)

不同粒径零价铁活化过硫酸钠氧化降解酸性橙7的影响及动力学研究 ..... 李欢旋,王金泉,马邕文,黄明智,王艳,陈杨梅 (3422)

还原脱氯-生物联合降解2,4-二氯苯氧乙酸 ..... 周红艺,曾思思,梁思,韩鉴 (3430)

多介质土壤滤层系统(MSL)与潜流式人工湿地技术处理海水养殖废水的效能比较 ..... 宋颖,黄玉婷,葛川,张浩,陈昕,张志剑,罗安程 (3436)

不同碳源在污水处理过程中的变化规律研究 ..... 金鹏康,常晋,王先宝,刘柯君,王晓昌 (3443)

气升装置对厌氧氨氧化反应器脱氮效能的影响 ..... 李祥,张大林,黄勇,陈宗炬,袁怡 (3449)

微波及其组合工艺强化污泥厌氧消化研究 ..... 刘吉宝,倪晓棠,魏源送,佟娟,王亚炜 (3455)

“热水解-高温厌氧消化”工艺处理高含固率剩余污泥的中试研究 ..... 吴静,王广启,曹知平,李中华,胡玉瑛,王凯军,左剑恶 (3461)

温度对ABR-MBR复合工艺处理生活污水的影响及其微生物群落分析 ..... 吴鹏,陆爽君,徐乐中,刘捷,沈耀良 (3466)

污水处理厂尾水细菌群落结构分析 ..... 徐爱玲,任杰,宋志文,吴等等,夏岩 (3473)

沼液养殖钝顶螺旋藻的中试研究 ..... 国青青,刘锐,罗金飞,王根荣,陈吕军,刘笑 (3480)

内源呼吸过程溶解性代谢产物的光谱特性分析 ..... 李志华,张芹,白旭丽,刘毅 (3487)

基于呼吸图谱的自养菌与异养菌内源呼吸过程分析 ..... 李志华,白旭丽,张芹,刘毅,贺春博 (3492)

S-异丙甲草胺与镉对斜生栅藻光合作用的影响 ..... 陈彩东,胡晓娜,章小强,刘惠君 (3498)

影响浑太河流域鱼类群落结构的不同尺度环境因子分析 ..... 李艳利,李艳粉,徐宗学 (3504)

河口区新建河道轮虫群落演替及与水环境的关系 ..... 马文华,张玮,顾琬雯,张瑞雷,王丽卿 (3513)

*Fontibacter* sp. SgZ-2厌氧腐殖质/Fe(III)还原特性及电子传递机制研究 ..... 马晨,杨贵芹,陆琴,周顺桂 (3522)

基于UNMIX模型的夹皮沟金矿区土壤重金属源解析 ..... 艾建超,王宁,杨净 (3530)

石河子市土壤环境磁学特征及空间分布研究 ..... 杨涵,熊黑钢,陈学刚 (3537)

不同施磷量(KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>)作用对Cu、Zn在红壤中的迁移转化 ..... 郭亮,李忠武,黄斌,王艳,张艳 (3546)

硫素对水稻吸收砷的生物有效性及其在土壤中的形态影响 ..... 杨世杰,唐冰培,王代长,饶伟,张亚楠,王丹,朱云集 (3553)

硫对土壤中硒形态变化及油菜硒吸收的影响 ..... 刘新伟,段碧辉,夏全杰,矫威,郭再华,胡承孝,赵竹青 (3564)

再生水灌溉对土壤化学性质及可培养微生物的影响 ..... 龚雪,王继华,关键飞,杨雪辰,陈黛慈 (3572)

西南喀斯特山区寿竹林地土壤微生物量与酶活性在不同坡位和剖面层次的分布特征 ..... 秦华军,何丙辉,赵旋池,李源,毛文韬,曾清平 (3580)

黔中喀斯特石漠化区不同土壤类型对常见植物叶片δ<sup>13</sup>C值的影响 ..... 杜雪莲,王世杰,罗绪强 (3587)

碳底物含量对厌氧条件下水稻土N<sub>2</sub>、N<sub>2</sub>O、NO、CO<sub>2</sub>和CH<sub>4</sub>排放的影响 ..... 陈诺,廖婷婷,王睿,郑循华,胡荣桂, Klaus Butterbach-Bahl (3595)

北京市典型绿化灌木阻滞吸附PM<sub>2.5</sub>能力研究 ..... 梁丹,王彬,王云琦,张会兰,杨松楠,李昂 (3605)

污泥焚烧过程中氯化物对Cd迁移行为的影响 ..... 刘敬勇,卓钟旭,孙水裕,罗光前,李晓明,谢武明,王玉洁,杨佐毅,赵素莹 (3612)

京津冀区域生产和消费CO<sub>2</sub>排放的时空特点分析 ..... 汪浩,陈操操,潘涛,刘春兰,陈龙,孙莉 (3619)

水泥工业大气污染物排放控制水平确立研究 ..... 任春,江梅,邹兰,李晓倩,魏玉霞,赵国华,张国宁 (3632)

《环境科学》征稿简则(3279) 《环境科学》征订启事(3545) 信息(3364,3486,3552,3563)

# 河口区新建河道轮虫群落演替及与水环境的关系

马文华<sup>1</sup>, 张玮<sup>1,2</sup>, 顾琬雯<sup>1</sup>, 张瑞雷<sup>1</sup>, 王丽卿<sup>1\*</sup>

(1. 上海海洋大学水产与生命学院, 上海 201306; 2. 上海水生环境工程有限公司, 上海 200090)

**摘要:** 于2011年12月~2012年11月对上海—河口性新建河道(临港新城B港河道)的轮虫群落结构进行为期1a的调查研究, 结果表明, 调查期间该水体共检出轮虫23种, 其中污染指示种19种; 轮虫的种类数随河道建成时间的延长呈逐月上升趋势, 从2种增加到13种; 优势种在时间尺度上的演替明显, 由开始的单一优势种螺形龟甲轮虫(*Keratella cochlearis*)向多种轮虫共同占优势转变, 新建成的B港水体中的轮虫群落结构与外河水体(芦潮引河)存在明显的差异. 相关性分析表明, B港水体中轮虫总密度与温度、叶绿素a显著正相关( $P < 0.05$ ), 但与盐度无显著相关性; 除螺形龟甲轮虫外, 其他主要种类的密度均与营养盐浓度、盐度呈负相关关系( $P < 0.05$ ). 临港B港河道轮虫各月间的相似性指数较低, 说明临港B港河道水体生态系统尚未稳定, 仍处于不断变化中; 但是轮虫的丰富度 Margalef 指数、多样性指数 Shannon-Wiener 指数逐月增大、E/O 值逐渐下降.

**关键词:** 临港B港河道; 轮虫; 群落结构; 演替; 生态学评价

中图分类号: X171 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)09-3513-09 DOI: 10.13227/j.hjks.2014.09.038

## Succession of Rotifer Community and Its Relationship with Environmental Factors in a New Estuarial Landscape River, Shanghai

MA Wen-hua<sup>1</sup>, ZHANG Wei<sup>1,2</sup>, GU Wan-wen<sup>1</sup>, ZHANG Rui-lei<sup>1</sup>, WANG Li-qing<sup>1</sup>

(1. College of Fisheries and Life Science, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 2. Shanghai Aquatic Environmental Engineering Corporation Limited, Shanghai 200090, China)

**Abstract:** The community structures of rotifers were surveyed in Lin'gang B Gang River, a new estuarial river in Shanghai, from December 2011 to November 2012. A total of 23 rotifer species were identified, of which 19 species were the indicator of environmental pollution. Rotifer species' number rose monthly from 2 to 13. A conspicuous succession of dominant species was observed from a single dominant species (*Keratella cochlearis*) to several species. The rotifer community structure of Lin'gang B Gang River differs with that of the outer water body (Lu Chaoyin River). Pearson analysis showed that the rotifers' density had a significant correlation with water temperature and chlorophyll-a ( $P < 0.05$ ), but had no significant correlation with salinity; the densities of dominant species (except *Keratella cochlearis*) presented negatively correlations with concentration of nutrients and salinity ( $P < 0.05$ ). The low species similarity index between every month demonstrated that aquatic ecosystem of Lin'gang B Gang River was in the unstable state. However, the increase of Margalef index and Shannon-Wiener index of rotifers and the decline of E/O value monthly showed the water environment of Lin'gang B Gang River was improved.

**Key words:** Lin'gang B Gang River; rotifer; community structure; succession; ecological assessment

轮虫是水体中常见的一类后生浮游动物, 具有数量大、种类多、发育时间短、周转快、生产量高等特点, 它们对维持水生态系统结构稳定性和功能完整性方面具有重要意义<sup>[1,2]</sup>. 同时, 轮虫对环境变化反应灵敏, 其群落结构能够及时地反映水体的环境状况, 是良好的环境指示生物<sup>[3-9]</sup>. 因此, 从生态学角度而言, 对不同水体中轮虫群落结构及其与水环境因子的相互关系进行研究具有十分重要的意义. 目前关于轮虫的研究, 以湖泊、水库、池塘等水体为对象的占大部分<sup>[10,11]</sup>, 而关于河流、溪流的报道较少, 尤其关于河口性新建成的水体中轮虫群落次生演替的研究鲜少报道.

上海临港新城B港河道(于2010年12月人工

开挖)位于上海临港新城东南沿海滩涂之中, 外连芦潮引河和秋涟河, 毗邻杭州湾, 属于典型的河口性河道. 本研究于2011年12月~2012年11月逐月对临港B港河道轮虫和其他环境因子进行调查研究, 分析了该新建河道轮虫群落结构的动态变化和其与环境因子的相互关系, 通过摸清新建河口性河道轮虫群落的次生演替规律, 以期为新建成河口区河道的水质保护和生态治理提供科学依据.

收稿日期: 2014-01-02; 修订日期: 2014-04-29

基金项目: 上海市水务局“十二五”项目(沪水科2011-07)

作者简介: 马文华(1987~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为浮游动物生态学, E-mail: mawh87@126.com

\* 通讯联系人, E-mail: lqwang@shou.edu.cn

## 1 材料与方法

### 1.1 临港 B 港河道概况

上海临港 B 港河道于 2011 年 2 月初开挖完成,河道水体总面积约 109 070 m<sup>2</sup>,河口宽 30 ~ 200 m,排涝最高水位 3.5 m,正常控制水位 2.5 ~ 2.7 m,河底标高 0.00 m,河道承载着区域 400 万 km<sup>2</sup> 的蓄洪排涝、雨水收集以及景观生态服务功能. 该河道在 2011 年 7 月下旬至 9 月期间实施了水生植被生态恢复工程,在此期间种植了睡莲 (*Nymphaea alba*)、黄菖蒲 (*Liris pseudacorus*)、苦草 (*Vallisneria natans*)、穗花狐尾藻 (*Myriophyllum spicatum*)、再力花 (*Thalia dealbata*)、梭鱼草 (*Pontederia cordata*) 等 20 种水生植物,植被恢复面积约为 25 000 m<sup>2</sup>,由于临港 B 港河道刚刚建成,水体未完全开放,水流速度为 0 m·s<sup>-1</sup>.

根据临港 B 港河道形态及水文特征,在河道内设置 4 个采样点(见表 1 和图 1),S1 为 B 港(靠近水闸内侧),S2 为靠近 HY-8 路,S3 为靠近 HY-12 路,S4 为秋涟河附近;另外,在 B 港的外河水系芦潮引河(水闸外侧)设置一个对照采样点 S0,在杭州湾(水闸内侧)设置一个对照采样点 S0'. 于 2011 年 12 月~2012 年 11 月,逐月采样监测临港 B 港河道轮虫及其水质状况(2 月、10 月由于天气原因未采样),对照点 S0' 主要在春季和夏季(3~6 月)进行了采样.

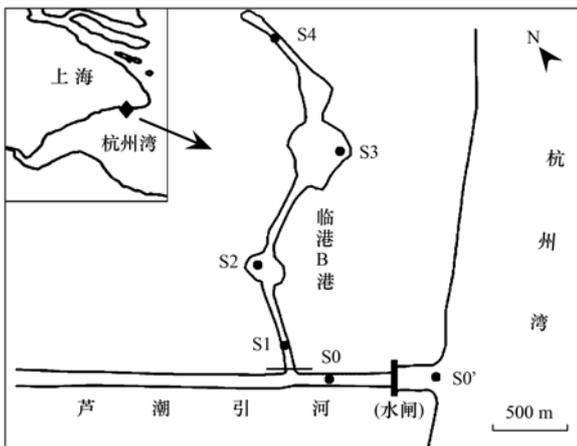


图 1 临港 B 港河道采样点设置示意

Fig. 1 Sampling sites in the Lin'gang B Gang River

### 1.2 样品采集与处理

轮虫定性样品:用 10 μm 浮游生物网采集,装入两个 50 mL 的样品瓶中,一瓶用 4% 福尔马林溶液固定,另一瓶用于活体观察;某些轮虫的鉴定,应

用 5% 的 NaOH 溶液对轮虫进行消化,以观察其咀嚼器的形态特征<sup>[12~16]</sup>.

轮虫定量样品:用 5L 有机玻璃采水器采集距表层 0.5 m 和距水底 0.5 m 的水样,经混匀后,取 1 L 混合水样装入聚乙烯瓶,经 4% 的福尔马林溶液固定后,浓缩至 50 mL;定量计数时,取 1 mL 于计数框中在 10 × 10 倍显微镜下全片计数轮虫密度(3 次平行). 轮虫种类的鉴定参考文献<sup>[12~16]</sup>.

浮游植物、原生动物、枝角类和桡足类的采集与鉴定参考文献<sup>[17~22]</sup>.

水质测定:现场用 YSI-Professional Plus 多功能水质分析仪测量水温、盐度;同时取一定量的混合水样带回实验室当天测定水化指标:总氮(TN)采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法测定、总磷(TP)采用钼锑抗分光光度法测定、叶绿素 a 采用丙酮提取分光光度法测定<sup>[23]</sup>.

### 1.3 数据分析

运用优势度( $Y$ )、丰富度指数 Margalef 指数( $D$ )、多样性指数 Shannon-Wiener 指数( $H'$ )、物种均匀度指数 Pielou 指数( $J$ )、杰卡特(Jaccard)群落相似性系数( $C_j$ )对轮虫群落结构进行分析,分别按下列公式计算<sup>[24,25]</sup>.

优势度:

$$Y = \frac{N_i}{N} \times f_i$$

丰富度:

$$D = \frac{(S - 1)}{\ln N}$$

Shannon-Wiener 多样性:

$$H' = 3.3219 \left( \lg N - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^S n_i \lg n_i \right)$$

均匀度:

$$J = \frac{H'}{H'_{\max}} = \frac{H'}{\lg S}$$

杰卡特(Jaccard)群落相似性系数:

$$C_j = \frac{j}{a - b - j}$$

式中, $S$  为群落中所用物种数目; $N$  为群落中所有个体数量; $n_i$  为群落中第  $i$  个中的个体数量; $j$  为群落 A 与 B 的共有种数; $a$  为群落 A 含有的全部种数; $b$  为群落 B 含有的全部种数. 取优势度大于 0.02 的种为优势种.

采用 Origin 8.0 软件进行作图. 应用 SPSS 18.0 软件对轮虫的密度与环境因子等水质数据进行相关性分析, $P < 0.05$  表示显著相关, $P < 0.01$  表示极显

著性相关.

## 2 结果与分析

### 2.1 环境因子的变化

#### 2.1.1 非生物环境因子

自 2011 年 12 月~2012 年 4 月,总磷浓度变幅较小,在  $0.21 \sim 0.29 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  之间变化;总氮在试验初期变化剧烈,自 5 月开始,变化较为平缓, $0.7 \sim 4.24 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ . 2011 年 12 月水温为  $10.4^\circ\text{C}$ ,自 2012 年 1~8 月,水温从  $6.1^\circ\text{C}$  上升至  $33.2^\circ\text{C}$ ,而后下降至  $18.7^\circ\text{C}$ . 盐度为  $0.87 \sim 2.73$  (见图 2).

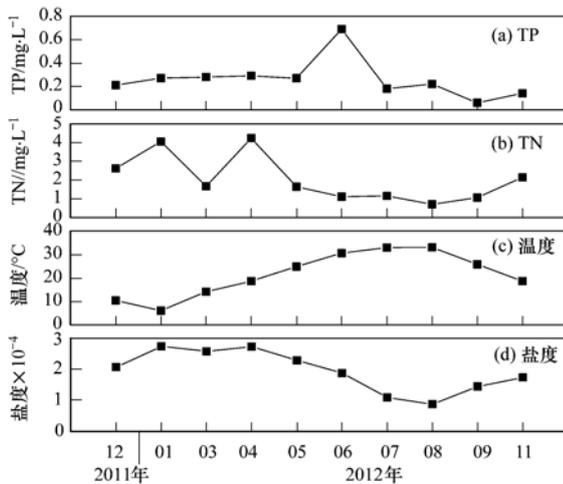


图 2 临港 B 港河道非生物环境因子的变化

Fig. 2 Monthly variation of abiotic environmental factors in the Lin'gang B Gang River

#### 2.1.2 生物环境因子

2011 年 12 月临港 B 港河道的叶绿素 a 的含量最高,达  $40.96 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ,1 月较低. 原生动物纤毛虫在 2012 年 3 月达到高峰,密度为  $9300 \text{ ind}\cdot\text{L}^{-1}$ ,纤毛虫开始以急游虫 (*Strombidium* spp.) 占优势,随着温度的升高,砂壳纤毛虫 (Tintinnid) 所占的比重越来越大(密度最大值为  $5875 \text{ ind}\cdot\text{L}^{-1}$ ),主要是筒壳虫 (*Tintinnus* spp.). 枝角类密度在 2012 年 5 月出现峰值,为  $5 \text{ ind}\cdot\text{L}^{-1}$ . 桡足类动物的密度在 2012 年 1 月达到最大值,其密度为  $24 \text{ ind}\cdot\text{L}^{-1}$ ,桡足类以无节幼体和桡足幼体为主,成熟的个体多为剑水蚤 (Cyclopoidea),哲水蚤只在部分月份出现且不会大量出现;剑水蚤密度 2011 年 12 月出现最大值,其值为  $1 \text{ ind}\cdot\text{L}^{-1}$  (图 3).

### 2.2 轮虫群落结构变化

#### 2.2.1 轮虫群落结构

在调查期间,临港 B 港河道共发现 6 科 15 属

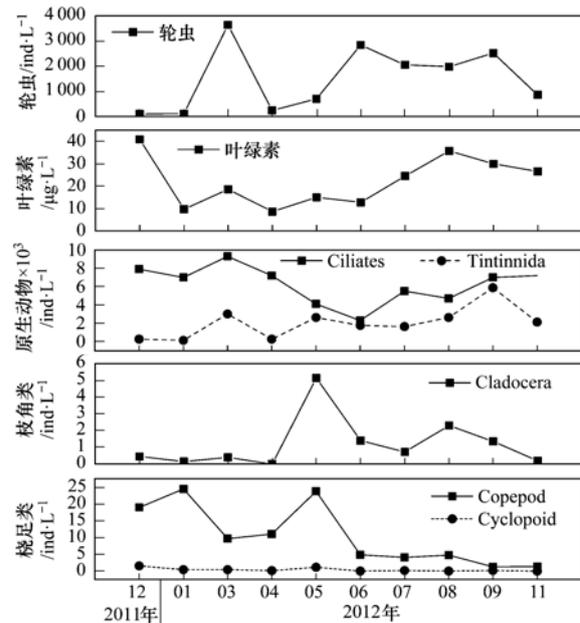


图 3 临港 B 港河道生物环境因子的变化

Fig. 3 Monthly variation of biological environmental factors in the Lin'gang B Gang River

23 种轮虫,污染指示种 19 种. 寡污性种类 5 种,占总污染指示种的 26.3%;寡污-β 中污性 4 种,占总污染指示种的 21.1%;β-中污性 9 种,占总污染指示种的 47.4%,β-α 中污性 1 种,占总污染指示种的 5.3% (表 1).

临港 B 港河道与芦潮引河轮虫的种类数与现存量变化见图 4;临港 B 港河道轮虫的种类数在 2~13 种之间变化,轮虫种类数总体处于上升状态,芦潮引河的轮虫种类数在 0~9 种之间变化,临港 B 港河道轮虫种类数除 2012 年 2 月外均高于芦潮引河. 临港 B 港河道和芦潮引河轮虫密度的变化均有一个主高峰和两个次高峰,临港 B 港河道分别是 3 月 ( $3637.5 \text{ ind}\cdot\text{L}^{-1}$ )、6 月 ( $2837.5 \text{ ind}\cdot\text{L}^{-1}$ ) 和 9 月 ( $2516.7 \text{ ind}\cdot\text{L}^{-1}$ ),最低值是 12 月仅有  $100 \text{ ind}\cdot\text{L}^{-1}$ ;芦潮引河轮虫密度主高峰出现在 6 月密度为  $2800 \text{ ind}\cdot\text{L}^{-1}$ ,第一个次高峰是 1 月 ( $2000 \text{ ind}\cdot\text{L}^{-1}$ ),第二个次高峰在 8 月 ( $2000 \text{ ind}\cdot\text{L}^{-1}$ ). 临港 B 港河道的轮虫生物量在  $0.01 \sim 3.21 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  之间变化,有一个明显的峰值在 9 月出现;芦潮引河的轮虫生物量的范围为  $0 \sim 1.96 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,最高值也是在 9 月出现,11 月盐度异常,未检出轮虫.

#### 2.2.2 临港 B 港河道轮虫优势种的变化

主要优势种及其数量动态见图 5. 螺形龟甲轮虫是 2012 年 3 月和 4 月的单一优势种,但 3 月的密度远远高于 4 月;6 月优势种为广布多肢轮虫、裂

表 1 临港 B 港河道轮虫种类组成及其分布<sup>1)</sup>

Table 1 Species of rotifer occurring in different sampling stations of Lin'gang B Gang River

种类		出现月份	污染指数
萼花臂尾轮虫	<i>Brachionus calyciflorus</i>	1、7、8、11	$\beta$ - $\alpha$
方形臂尾轮虫	<i>B. quadridentatus</i>	11	$\beta$
壶状臂尾轮虫	<i>B. urceus</i>	1	$\beta$
角突臂尾轮虫	<i>B. angularis</i>	12、4、5、7、8、9、11	$\beta$
裂足臂尾轮虫	<i>B. diuersicornis</i>	7、8	$\beta$
剪形臂尾轮虫	<i>B. forficula</i>	7、8	$\beta$
方块鬼轮虫	<i>Trichotria letractis</i>	11	o
螺形龟甲轮虫	<i>Keratella cochlearis</i>	3、4、5、11	o- $\beta$
曲腿龟甲轮虫	<i>K. valga</i>	3、4、5、6、7、8、9、11	$\beta$
裂痕龟纹轮虫	<i>Anuraeopsis fissa</i>	6、7、9	o
尖削叶轮虫	<i>Notholca acuminata</i>	3、9	o- $\beta$
叶状帆叶轮虫	<i>Argonotholca foliacea</i>	5、8	o
尖尾疣毛轮虫	<i>Synechta atylata</i>	9	o
梳状疣毛轮虫	<i>S. pectinata</i>	11	o- $\beta$
前节晶囊轮虫	<i>Aplanchna priodonta</i>	8、9、11	o
广布多肢轮虫	<i>Polyarthra vulgaris</i>	4、5、6、7、8、9、11	$\beta$
暗小异尾轮虫	<i>Trichocerca pusilla</i>	4、6、7、8、9、11	o
精致单趾轮虫	<i>Monostyla pyriformis</i>	11	
爪趾单趾轮虫	<i>M. unguitata</i>	11	
臂三肢轮虫	<i>Filinia brachiata</i>	11	o
长三肢轮虫	<i>F. longiseta</i>	1、8	$\beta$ - $\alpha$
奇异巨腕轮虫	<i>Pedalia mira</i>	7、8	$\beta$
沟痕泡轮虫	<i>Ponpholyx sulcata</i>	12、1、3	$\beta$

1) o:寡污性 Oligosaprobity; o- $\beta$  寡污- $\beta$  中污性 Oligo- $\beta$ -mesosaprobity;  $\beta$ : $\beta$ -中污性  $\beta$ -mesosaprobity;  $\beta$ - $\alpha$ : $\beta$ - $\alpha$  中污性  $\beta$ - $\alpha$ -mesosaprobity<sup>[4]</sup>

痕龟纹轮虫和暗小异尾轮虫; 7 月优势种比前月增加了角突臂尾轮虫; 8 月优势种主要为广布多肢轮虫、暗小异尾轮虫、角突臂尾轮虫、萼花臂尾轮虫、叶状帆叶轮虫和前节晶囊轮虫; 9 月优势种种类数量有所下降, 主要是广布多肢轮虫、暗小异尾轮虫、前节晶囊轮虫和裂痕龟纹轮虫; 11 月梳状疣毛轮虫和曲腿龟甲轮虫成为了新的优势种群。

表 2 每个月的 E/O 值

Table 2 E/O value of each month

月份	12	1	3	4	5	6	7	8	9	11
E	2	3	2	4	4	2	7	6	3	5
O	0	0	2	1	1	2	2	2	4	6
E/O 值	—	—	1	4	4	1	3.5	3	0.75	0.83

计算临港 B 港河道每月轮虫的群落相似性, 除 4 月与 5 月、7 月与 8 月外其他各月间的群落相似性皆  $<0.5$  (表 3), 表明临港 B 港河道各月间轮虫的群落结构有很大的差异。轮虫群落相似性, 从另外一方面也反映了临港 B 港河道各月间的生境不同。

### 2.3 临港 B 港河道轮虫与环境因子之间的关系

轮虫的密度及主要种类的轮虫密度与环境因子

### 2.2.3 临港 B 港河道轮虫多样性指数、群落相似性指数及 E/O 值变化

在临港 B 港河道调查研究中, 轮虫香农威尔指数 ( $H'$  值) 的范围为 0.236 ~ 2.151; 轮虫均匀度指示 ( $J$  值) 在 0.170 ~ 0.893 之间变化; 轮虫丰富度指数 ( $D$  值) 的变化范围为 1.443 ~ 4.678。 (图 6)。临港 B 港的 E/O 值的变幅为 0.75 ~ 4 (表 2)。

作 Pearson 相关分析, 结果表明: 轮虫总密度与温度、叶绿素 a 呈显著正相关; 暗小异尾轮虫与温度、叶绿素 a 呈极显著正相关, 与盐度、总氮、总磷呈极显著负相关; 广布多肢轮虫与温度、叶绿素 a 呈极显著正相关, 与盐度、总氮呈极显著负相关; 角突臂尾轮虫与温度呈极显著正相关, 与盐度、总氮呈极显著负相关; 螺形龟甲轮虫与盐度、与总氮呈极显著正相关 (表 4)。

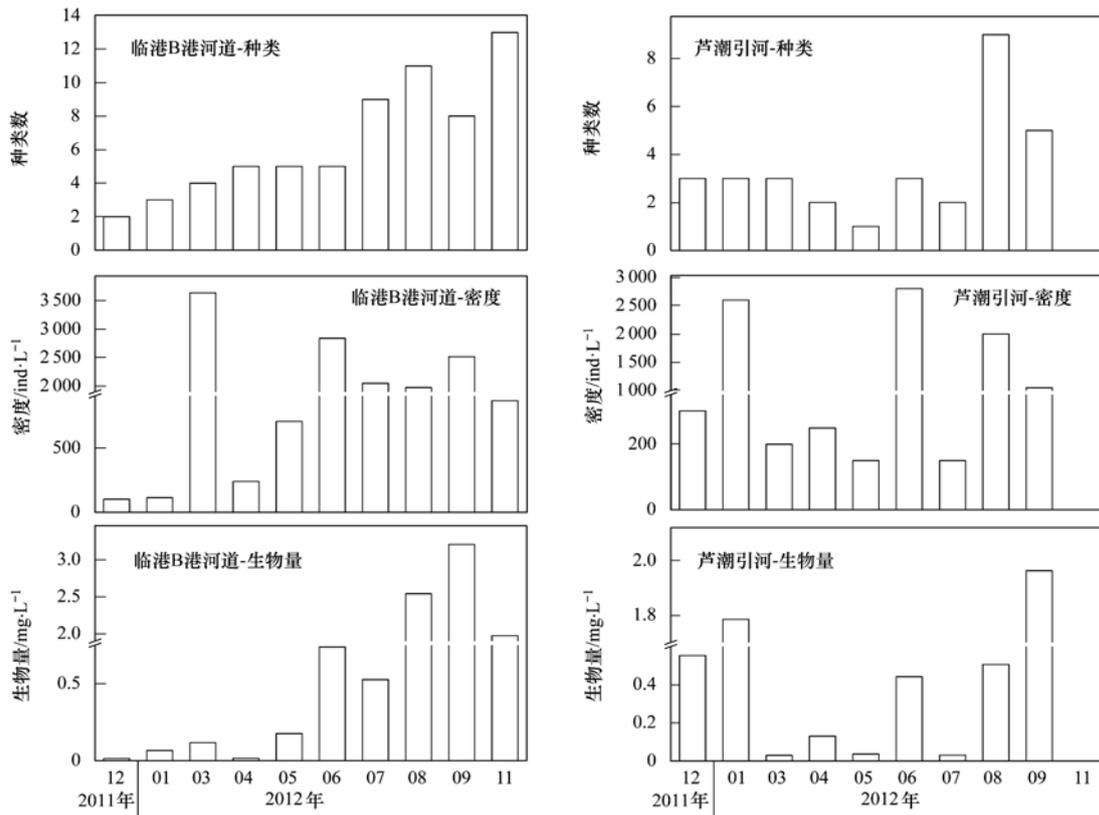


图 4 临港 B 港河道和芦潮引河轮虫种类和现存量(密度、生物量)月变化比较

Fig. 4 Monthly variation of species, density and biomass of rotifer in the Lin'gang B Gang River and Luchaoyin River

表 3 各月之间的相似性系数

Table 3 Similarity coefficient between months

	12 月	1 月	3 月	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	11 月
12 月		0.25	0.20	0.17	0.17	0.00	0.10	0.08	0.11	0.07
1 月			0.17	0.00	0.00	0.00	0.09	0.08	0.00	0.07
3 月				0.29	0.29	0.13	0.08	0.08	0.09	0.13
4 月					0.67	0.43	0.40	0.33	0.44	0.38
5 月						0.25	0.27	0.33	0.18	0.29
6 月							0.40	0.33	0.30	0.20
7 月								0.54	0.31	0.29
8 月									0.27	0.33
9 月										0.24
11 月										

表 4 轮虫密度与环境因子的相关分析<sup>1)</sup>

Table 4 Regression analysis of rotifer in the Lin'gang B Gang River with environmental factors

	温度	盐度	总氮	总磷	叶绿素 a
轮虫总密度	0.338 *	-0.260	-0.151	-0.177	0.402 *
暗小异尾轮虫	0.612 **	-0.565 **	-0.636 **	-0.484 **	0.340 *
广布多肢轮虫	0.493 **	-0.512 **	-0.505 **	-0.277	0.452 **
角突臂尾轮	0.435 **	-0.361 *	-0.431 **	-0.298	0.092
螺形龟甲轮虫	-0.199	0.320 *	0.444 **	0.175	0.041
曲腿龟甲轮虫	0.157	-0.103	-0.157	0.074	0.096

1) \* 为  $P < 0.05$ , \*\* 为  $P < 0.01$

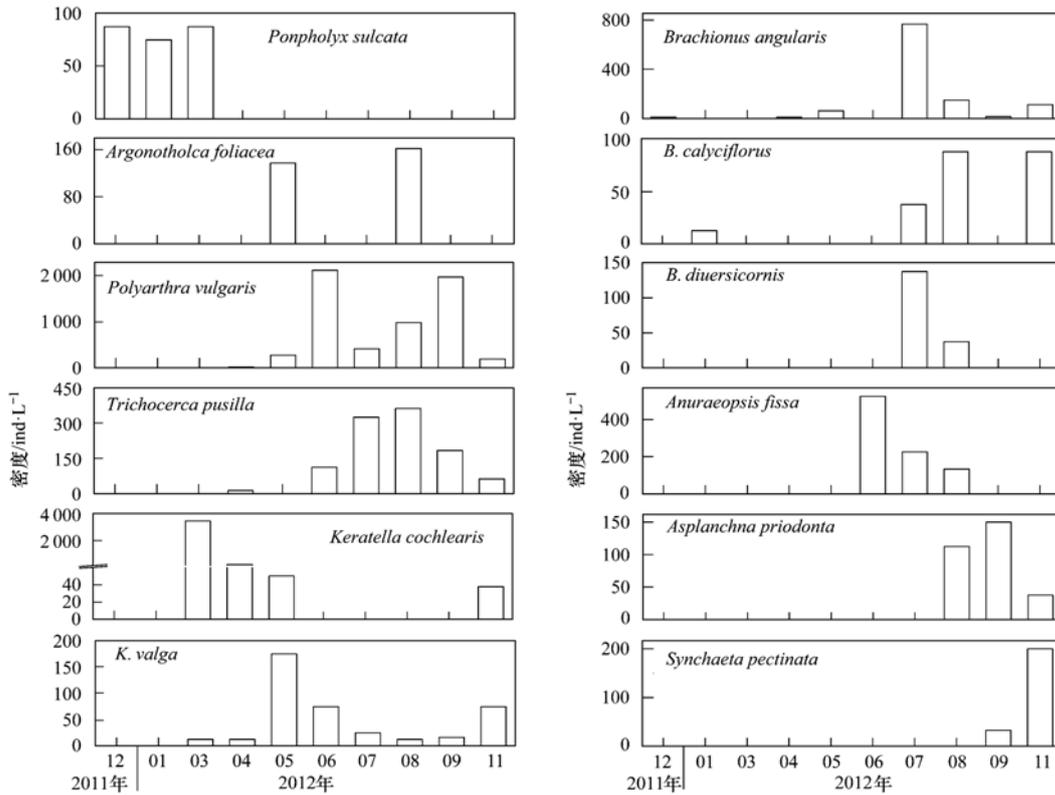


图 5 主要轮虫种类的密度变化

Fig. 5 Monthly variation of density of main rotifer types

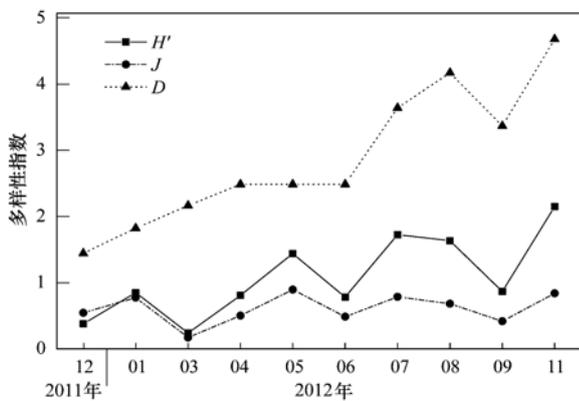


图 6 临港 B 港河道轮虫多样性指数

Fig. 6 Shannon-Wiener, species richness and evenness indexes of rotifer in the Lin'gang B Gang river

### 3 讨论

#### 3.1 临港 B 港河道环境因子轮虫群落特征的关系

温度是影响浮游动物生长发育的一个重要环境因子<sup>[26]</sup>,随着温度的上升,轮虫卵的发育时间缩短,在丰富的食物供给条件下,使种群周转加快,导致种群密度迅速增加,因此轮虫总数的高峰一般出现在 20℃ 以上<sup>[27]</sup>. 临港 B 港河道的温度在 3 月时开始回升,广温性种类螺形龟甲轮虫大量繁殖,轮虫密度

增大;萼花臂尾轮虫在温度高于 20℃ 时才大量繁殖,7 月叶绿素 a 的浓度开始升高,为萼花臂尾轮虫提供了适宜的生长繁殖条件,使之在 8 月时成为优势种;7、8 月水温高于 33℃,较高的温度反而抑制了轮虫的生长<sup>[28]</sup>;9 月温度下降,轮虫密度随着温度降低而回升.

营养盐浓度的变化也能够通过对浮游植物的“上行作用”间接影响轮虫密度. 但在本研究中,轮虫的总密度与营养盐浓度没有显著性关系,这可能是由于临港 B 港河道属于新开挖的河道,其生态系统还未稳定,营养盐的变化较大,研究后期因为种植水草等修复工程营养盐的浓度降低,而温度、叶绿素对轮虫密度升高的作用抵消了营养盐对轮虫的影响.

轮虫多以藻类和有机碎屑为食,但是不同种类的轮虫其自身的牧食特性不同<sup>[29]</sup>,食物利用性的竞争会引起优势种群的变化. 3 月和 4 月占优势的螺形龟甲轮虫属于小型滤食性轮虫,能够滤食一些体积较小的食物(个体大小在 1~12 μm 之间)<sup>[30]</sup>;本研究中,银灰平裂藻等小型藻类在 3 月和 4 月时数量较高,为螺形龟甲轮虫提供了较丰富的食物来源,而随着浮游藻类的优势种向个体较大的种类转变,

同样以藻类为食物的砂壳纤毛虫数量增多,螺形龟甲轮虫的食物受到限制,因此其密度从5月开始降低;广布多肢轮虫个体较螺形龟甲轮虫大,能够牧食藻类和碎屑的范围较后者宽,且其适应性较强,在变化较为剧烈的6月大量出现成为优势种。轮虫内部的一些杂食性(肉食性)轮虫可以通过直接捕食小型、柔软的轮虫<sup>[31]</sup>,而占据大部分资源。个体较大的前节晶囊轮虫的繁殖力高峰在春夏之交,在8月大量出现,能够摄食一些小型的轮虫<sup>[32~35]</sup>,例如螺形龟甲轮虫、裂痕龟纹轮虫等,因而在其大量出现时裂痕龟纹轮虫等小型轮虫的密度急剧下降。

轮虫总密度的改变与“下行效应”也有一定的关系<sup>[36]</sup>,在冬季桡足类的密度和其它一些捕食者能够限制轮虫的密度,同时轮虫本身在低温时生长繁殖速率较小也限制了其大量出现。本研究中,5月时,枝角类的密度较高,增大了与轮虫间食物竞争压力,轮虫的密度不是很高。自6月起,桡足类、纤毛虫和枝角类密度较小,变化也比较平稳,剑水蚤桡足类的摄食压力、与纤毛虫、枝角类等的竞争压力均减小,轮虫的密度上升,形成了峰值。

### 3.2 盐度对轮虫群落的影响

河口区是不同水文性质的水流交汇处,其环境既不同于海水,又不同于淡水,水中营养物质丰富,为原生动物、轮虫等小型浮游动物提供了重要的食

物来源,曾有研究指出<sup>[37]</sup>,河口浮游生物种类数随着盐度的降低,逐渐向江河方向减少,反之,愈近海洋,盐度愈高,种类也愈多。亦有研究<sup>[38]</sup>表明在淡水和盐度较低的水体中轮虫的物种丰富度没有太大的不同,但在低盐度水体中轮虫的丰富度与盐度有显著性正相关关系。与2012年3~6月在杭州湾调查结果相比,轮虫种类数:芦潮引河 < 临港 B 港河道 < 杭州湾,随着盐度的增加,轮虫的种类数增多;4月和6月;杭州湾的盐度超过10,轮虫种类数:临港 B 港河道 > 芦潮引河 > 杭州湾,较高的盐度限制了轮虫的种类数及其密度;5月:临港 B 港河道 > 杭州湾 > 芦潮引河(表5)。与南汇东滩湿地围垦水域内的浮游动物群落结构变化与外围水体的对比结果相似<sup>[39]</sup>。申屠青春等<sup>[40]</sup>在实验中发现当盐度在6.76时,轮虫的生物量和种类数会有明显下降的趋势。在本研究中,临港 B 港河道底质为河口海滩滩涂,其水体盐度为0~3,河道盐度较低,轮虫的密度没有明显变化;但一些主要的淡水轮虫类群如暗小异尾轮虫、广布多肢轮虫、角突臂尾轮虫等的数量与盐度表现出显著负相关关系,而螺形龟甲轮虫与盐度呈显著正相关,随着时间的推移盐度降低,并维持在一个相对稳定的较低水平。在临港 B 港水体的盐度条件下,轮虫的群落结构受盐度的影响较小。

表5 临港 B 港河道、芦潮引河和杭州湾轮虫数量及现存量之间的对比

Table 5 Different of Species, density and biomass of rotifer among Lin'gang B Gang river, Luchaoyin river and Hangzhou bay

月份	临港 B 港河道			芦潮引河			杭州湾		
	种类数	密度 /ind·L <sup>-1</sup>	生物量 /mg·L <sup>-1</sup>	种类数	密度 /ind·L <sup>-1</sup>	生物量 /mg·L <sup>-1</sup>	种类数	密度 /ind·L <sup>-1</sup>	生物量 /mg·L <sup>-1</sup>
3	4	3 637	0.12	3	200	0.03	6	2 900	1.33
4	5	237	0.02	2	250	0.13	0	0	0.00
5	5	700	0.18	1	150	0.04	2	100	0.03
6	5	2 837	0.74	3	2 800	0.44	2	450	0.12

### 3.3 临港 B 港河道水质的生态学评价

一般认为,湖泊处于中等营养水平时生物群落的结构复杂,物种多样性高;而在极端的贫营养或者超富营养条件下群落结构简单,物种多样性低<sup>[41]</sup>。也就是说,在一定范围内,水体富营养化使物种多样性下降<sup>[42]</sup>。在本研究中临港 B 港河道的轮虫物种多样性指数  $H'$  和丰富度指数  $D$  虽有波动,但总体上是上升的,这表明临港 B 港河道的水质状况有所好转。而对于临港 B 港河道水质状况有所好转的原因,可能与2011~2012年河道陆续进行了人工修复等措施有关。与物种多样性相关的轮虫种类数在临港 B 港河道逐月上升,这表明临港 B 港河道

的富营养化程度有所降低,钱方平等<sup>[42]</sup>和熊金林等<sup>[43]</sup>研究发现轮虫种类数与综合状态指数呈显著的负相关关系也证明了这一点。在调查初期,临港 B 港河道未发现寡营养型种类的轮虫,随着时间的推移,寡营养型种类的轮虫开始出现并逐渐增多,应用浮游动物中富营养型种(E)与寡营养型种(O)的种数比(E/O值)来评价水体营养类型,该比值在0.5以下为贫营养,0.5~1.0之间为中营养,0.5以上为富营养<sup>[44]</sup>,9月以前的E/O值均大于1,显示临港 B 港河道处于富营养状态,9月开始E/O值小于1,表明临港 B 港河道的营养状态好转。综合生物指数的分析认为临港 B 港河道的水环境有所

好转.

但是,根据临港 B 港河道水质因子的变化不能够证明水体状况的改善,生物指数的判断与理化因子的判断出现了矛盾,即生态位理论不能够全面地解释临港 B 港河道轮虫群落结构变化的规律.生态位理论能够很好地解释轮虫密度的变化,关于物种多样性等解释得不是很好,生态位忽视的某些方面,正是中性理论所包含的东西.中性理论能够通过物种扩散解释物种多样性和物种相对多度<sup>[45,46]</sup>,临港 B 港河道轮虫种类数随着时间的延长而增加,多样性指数逐月上升,这些都可以证明物种扩散在水体轮虫群落结构的演替中发挥着重要的作用.因而,应用生态位理论与中性理论相结合能够更好地解释临港 B 港河道轮虫群落的次生演替规律.

#### 4 结论

(1)临港 B 港河道作为一个新生的河口区河道,在建成 1 a 中,轮虫种类数整体呈增长趋势,由单一的螺形龟甲轮虫占优势向多种轮虫共同占优势的状态转变,轮虫的群落结构主要受温度和食物(藻类等)的影响.

(2)各月间的群落相似性指数低,这表明临港 B 港河道的轮虫群落结构还不稳定,处于变化的过程中.关于临港 B 港河道何时能够稳定,还有待更长时期的进一步研究.

(3)轮虫的多样性指数及污染指示种显示临港 B 港河道的水体正在明显好转,可达到轻污染、中营养状态.

(4)在河口区盐度为 0~3 的情况下,轮虫总密度受盐度影响不大,但是优势种随盐度变化有一定的影响.

#### 参考文献:

- [ 1 ] 郭凯, 赵文, 殷守仁, 等. 北京官厅水库轮虫群落结构与水体富营养化状况[J]. 湖泊科学, 2010, **22**(2): 256-264.
- [ 2 ] Chen L J, Liu Q, Peng Z R, *et al.* Rotifer community structure and assessment of water quality in Yangcheng Lake[J]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 2012, **30**(1): 47-58.
- [ 3 ] 周淑婵, 黄祥飞, 唐涛, 等. 香溪河库湾轮虫现状及水质评价初探[J]. 水生生物学报, 2006, **30**(1): 52-57.
- [ 4 ] Sládeček V. Rotifers as indicators of water quality [ J ]. Hydrobiologia, 1983, **100**(1): 169-201.
- [ 5 ] Angeler D G, Alvarez-Cobelas M, Sánchez-Carrillo S. Evaluating environmental conditions of a temporary pond complex using rotifer emergence from dry soils[J]. Ecological Indicators, 2010, **10**(2): 545-549.
- [ 6 ] Devetter M. Influence of environmental factors on the rotifer

assemblages in an artificial lake[J]. Hydrobiologia, 1998, **387-388**: 171-178.

- [ 7 ] Devetter M. Seasonal development of planktonic rotifers in Slapy Reservoir (Czech Republic)[J]. Biologia, 2011, **66**(4): 662-668.
- [ 8 ] Basińska A, Natalia Kuczyńska-Kippen N, Swidnicki K. The body size distribution of *Filinia longiseta* (Ehrenberg) in different types of small water bodies in the Wielkoposka region [J]. Limnetica, 2010, **29**(1): 171-182.
- [ 9 ] Barbiero R P, Warren G J. Rotifer communities in the Laurentian Great Lakes, 1983-2006 and factors affecting their composition[J]. Journal of Great Lakes Research, 2011, **37**(3): 528-540.
- [ 10 ] 陈立婧, 顾静, 彭自然, 等. 上海崇明岛明珠湖轮虫群落结构[J]. 应用生态学报, 2009, **20**(12): 3057-3062.
- [ 11 ] 杨桂军, 秦伯强 高光, 等. 太湖不同湖区轮虫群落结构季节变化的比较研究[J]. 环境科学, 2008, **29**(10): 2963-2969.
- [ 12 ] 韩茂森, 束蕴芳. 中国淡水生物图谱[M]. 北京: 海洋出版社, 1995.
- [ 13 ] 王家楫. 中国淡水轮虫志[M]. 北京: 科学出版社, 1961.
- [ 14 ] 诸葛燕. 中国典型地带轮虫的研究[D]. 武汉: 中国科学院水生生物研究所, 1997.
- [ 15 ] Walter Koste. ROTATORIA: Die Rädertiere Mitteleuropas. 2 vols [ M ]. Gebrüder Borntraeger. Berlin. Stuttgart. West Germany, 1978.
- [ 16 ] Wallace R L, Snell T W, Ricci C. Rotifera. 1. Biology, ecology and systematics[M]. Ghent: Kenobi Productions, 2006.
- [ 17 ] 胡鸿钧, 李尧英, 魏印心, 等. 中国淡水藻类[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1979.
- [ 18 ] 中国原生动物学会. 原生动物[M]. 北京: 科学出版社, 1999.
- [ 19 ] 张武昌, 丰美萍, 于莹, 等. 砂壳纤毛虫图谱[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- [ 20 ] 中国科学院动物研究所甲壳研究组. 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.
- [ 21 ] 张武昌, 赵楠, 陶振铨, 等. 中国海浮游桡足类图谱[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [ 22 ] 蒋燮治, 堵南山. 中国动物志·节肢动物门·甲壳纲·淡水枝角类[M]. 北京: 科学出版社, 1979.
- [ 23 ] 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.
- [ 24 ] 徐兆礼. 长江口北支水域浮游动物的研究[J]. 应用生态学报, 2005, **16**(7): 1341-1345.
- [ 25 ] 郑金秀, 胡菊香, 彭建华, 等. 长江口南北支浮游动物群落生态学研究[J]. 生态环境学报, 2011, **20**(6-7): 1102-1106.
- [ 26 ] 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.
- [ 27 ] 章宗涉, 黄祥飞. 淡水浮游生物的研究方法[M]. 北京: 科学出版社, 1991.

- [28] 王丽卿, 程婧蕾, 郑小燕, 等. 淀山湖轮虫多样性及生物量时空变化[J]. 水产学报, 2008, **32**(6): 906-914.
- [29] Holst H, Zimmermann H, Kausch H, *et al.* Temporal and spatial dynamics of planktonic rotifers in the Elbe Estuary during Spring[J]. Estuarine Coastal and Shelf Science, 1998, **47**(3): 261-273.
- [30] Bogdan K G, Gilbert J J. Quantitative comparison of food niches in some freshwater zooplankton[J]. Oecologia, 1987, **72**(3): 331-340.
- [31] Bertani I, Leonardi S, Rossetti G. Antipredator-induced trait changes in *Brachionus* and prey selectivity by *Asplanchna* in a large river under low-discharge conditions: evidence from a field study[J]. Hydrobiologia, 2013, **702**(1): 227-239.
- [32] Gilbert J J. The cost of predator-induced morphological defense in rotifers: experimental studies and synthesis [J]. Journal of Plankton Research, 2013, **35**(3): 461-472.
- [33] García C E, Nandini S, Sarma S S S. Demographic characteristics of the copepod *Acanthocyclops americanus* (Sars, 1863) (Copepoda: Cyclopoida) fed mixed algal (*Scenedesmus acutus*)-rotifer (*Brachionus havanaensis*) diet [J]. Hydrobiologia, 2011, **666**(1): 59-69.
- [34] Guo R X, Snell T W, Yang J X. Ecological strategy of rotifer (*Brachionus calyciflorus*) exposed to predator-and competitor-conditioned media [J]. Hydrobiologia, 2011, **658**(1): 163-171.
- [35] Oganjan K, Virro T, Lauringson V. Food spectrum of the omnivorous rotifer *Asplanchna priodonta* in two large northeastern European lakes of different trophic [J]. Oceanological and Hydrobiological Studies, 2013, **42**(3): 314-323.
- [36] Yoshida T, Urabe J, Elser J J. Assessment of 'top-down' and 'bottom-up' forces as determinants of rotifer distribution among lakes in Ontario, Canada [J]. Ecological Research, 2003, **18**(6): 639-650.
- [37] 郑重. 海洋浮游生物生态学文集[M]. 厦门: 厦门大学出版社, 1986.
- [38] Kaya M, Fontaneto D, Segers H, *et al.* Temperature and salinity as interacting drivers of species richness of planktonic rotifers in Turkish continental waters [J]. Journal of Limnology, 2010, **69**(2): 297-304.
- [39] 李强, 马长安, 吕巍巍, 等. 南汇东滩湿地围垦水域内浮游动物群落结构的变化 [J]. 应用生态学报, 2012, **23**(8): 2287-2294.
- [40] 申屠青春, 董双林, 赵文, 等. 盐度、碱度对浮游生物和水化因子的影响 [J]. 应用生态学报, 2000, **11**(3): 449-454.
- [41] 生态学丛书编委会. 环境和指示生物·水域分册[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1987.
- [42] 钱方平, 席贻龙, 温新利, 等. 湖泊富营养化对轮虫群落结构及物种多样性的影响 [J]. 生物多样性, 2007, **15**(4): 344-355.
- [43] 熊金林, 梅兴国, 胡传林, 等. 湖北四湖泊营养类型与轮虫群落的关系 [J]. 动物学杂志, 2003, **38**(6): 8-14.
- [44] 张觉民, 何志辉. 内陆水域渔业自然资源调查手册[M]. 北京: 农业出版社, 1991. 12-109.
- [45] 牛克昌, 刘怿宁, 沈泽昊, 等. 群落构建的中性理论和生态位理论 [J]. 生物多样性, 2009, **17**(6): 579-593.
- [46] 张立敏, 陈斌, 李正跃. 应用中性理论分析局域群落中的物种多样性及稳定性 [J]. 生态学报, 2010, **30**(6): 1556-1563.

## CONTENTS

Comparative Analysis Methods of Haze Distinction over Yangtze River Delta Region .....	LIU Xiao-hui, ZHU Bin, GAO Jin-hui, <i>et al.</i>	(3239)
Trends of Urban Haze in Jiangsu Province China over the Past 33 Years .....	LIU Duan-yang, WEI Jian-su, YAN Wen-lian, <i>et al.</i>	(3247)
Temporal Variation of Background Atmospheric CO <sub>2</sub> and CH <sub>4</sub> at Mount Waliguan, China .....	LIU Peng, ZHANG Guo-qing, WANG Jian-qiong, <i>et al.</i>	(3256)
Characteristics and Sources of Organic Carbon and Elemental Carbon in PM <sub>2.5</sub> in Shanghai Urban Area .....	ZHANG Yi-hua, WANG Dong-fang, ZHAO Qian-biao, <i>et al.</i>	(3263)
Size Distribution and Characterization of OC and EC in Atmospheric Aerosols During the Asian Youth Games of Nanjing, China .....	WANG Hong-lei, ZHU Bin, AN Jun-lin, <i>et al.</i>	(3271)
Pollution Characteristics of Carbonaceous Aerosols in PM <sub>2.5</sub> During Typical Winter Days in Wuxi City .....	YUN Long-long, LU Fan, ZHANG Tian-shu, <i>et al.</i>	(3280)
Emission Characteristics of PM <sub>2.5</sub> from Blast Furnace Iron Making .....	FAN Zhen-zhen, ZHAO Ya-li, ZHAO Hao-ning, <i>et al.</i>	(3287)
Composition Characteristics of Atmospheric Volatile Organic Compounds in the Urban Area of Beibei District, Chongqing .....	QI Xin, HAO Qing-ju, JI Dong-sheng, <i>et al.</i>	(3293)
Catalytic Oxidation of Two-component VOCs and Kinetic Analysis .....	BO Long-li, YANG Li, SUN Jian-yu, <i>et al.</i>	(3302)
Ultrafine Particle Number Concentration and Size Distribution of Vehicle Exhaust Ultrafine Particles .....	LU Ye-qiang, CHEN Qiu-fang, SUN Zai, <i>et al.</i>	(3309)
Major Ion Chemistry of Surface Water in the Upper Reach of Shule River Basin and the Possible Controls .....	ZHOU Jia-xin, DING Yong-jian, ZENG Guo-xiong, <i>et al.</i>	(3315)
Sediment-water Flux and Processes of Nutrients and Gaseous Nitrogen Release in a China River Reservoir .....	CHEN Zhu-hong, CHEN Neng-wang, WU Yin-qi, <i>et al.</i>	(3325)
Spatial Distribution and Pollution Assessment of Heavy Metals in the Tidal Reach and Its Adjacent Sea Estuary of Daliaohe Area, China .....	ZHANG Lei, QIN Yan-wen, MA Ying-qun, <i>et al.</i>	(3336)
Chemical Speciation and Risk Assessment of Heavy Metals in the Middle Part of Yarlung Zangbo Surface Sediments .....	BAI Jian-kun, LI Chao-liu, KANG Shi-chang, <i>et al.</i>	(3346)
Analysis of Particle Size Characteristics of Road Sediments in Beijing Olympic Park .....	LI Hai-yan, SHI An-bang, QU Yang-sheng, <i>et al.</i>	(3352)
Levels and Distribution of the Dioxin-Like Polychlorinated Biphenyls (PCBs) in the Surface Sediment of the Yellow River .....	LI Guang-yao, JIN Jun, HE Chang, <i>et al.</i>	(3358)
Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Retention in Two Different Channel Forms in a Typical Headwater Stream in the Suburb of Hefei City, China .....	LI Ru-zhong, YANG Ji-wei, QIAN Jing, <i>et al.</i>	(3365)
Migration and Transformation of Nitrogen in Urban Stream Located in Plain River-net Area Based on Water Resources Regulation .....	LIU Bo, SHENG Ming, ZHU Qiang, <i>et al.</i>	(3373)
Decomposition and Phosphorus Dynamics of the Litters in Standing and Litterbag of the Hangzhou Bay Coastal Wetland .....	SHAO Xue-xin, LIANG Xin-qiang, WU Ming, <i>et al.</i>	(3381)
Muti-model Collaborative Retrieval of Chlorophyll a in Taihu Lake Based on Data Assimilation .....	LI Yuan, LI Yun-mei, LÜ Heng, <i>et al.</i>	(3389)
Photobleaching of Dissolved Organic Matter (DOM) from Confluence of Two Rivers Under Natural Solar Radiation; A Case Study of Fujiang River-Jialingjiang River .....	GAO Jie, JIANG Tao, YAN Jin-long, <i>et al.</i>	(3397)
Using Ultraviolet-Visible (UV-Vis) Absorption Spectrum to Estimate the Dissolved Organic Matter (DOM) Concentration in Water, Soils and Sediments of Typical Water-Level Fluctuation Zones of the Three Gorges Reservoir Areas .....	LI Lu-lu, JIANG Tao, LU Song, <i>et al.</i>	(3408)
Synthesis of Cu <sub>2</sub> O-Ag-AgBr/MA Visible Photocatalyst and Its Performance in Degradation of 2-Chlorophenol .....	WANG Ran, ZHOU Xue-feng, HU Xue-xiang, <i>et al.</i>	(3417)
Effects of Particle Size of Zero-Valent Iron on the Reactivity of Activating Persulfate and Kinetics for the Degradation of Acid Orange 7 .....	LI Huan-xuan, WAN Jin-quan, MA Yong-wen, <i>et al.</i>	(3422)
Degradation of 2,4-D by Combined Catalytic Dechlorination and Biological Oxidation .....	ZHOU Hong-yi, ZENG Si-si, LIANG Si, <i>et al.</i>	(3430)
Treatment of Marine-Aquaculture Effluent by the Multi-Soil-Layer (MSL) System and Subsurface Flow Constructed Wetland .....	SONG Ying, HUANG Yu-ting, GE Chuan, <i>et al.</i>	(3436)
Variation of Different Carbon Sources in the Sewage Treatment Process .....	JIN Peng-kang, CHANG Jin, WANG Xian-bao, <i>et al.</i>	(3443)
Effect of Gas-lift Device on Nitrogen Removal Efficiency of ANAMMOX Reactor .....	LI Xiang, ZHANG Da-lin, HUANG Yong, <i>et al.</i>	(3449)
Enhancement for Anaerobic Digestion of Sewage Sludge Pretreated by Microwave and Its Combined Processes .....	LIU Ji-bao, NI Xiao-tang, WEI Yuan-song, <i>et al.</i>	(3455)
Pilot Study of Thermal Treatment/Thermophilic Anaerobic Digestion Process Treating Waste Activated Sludge of High Solid Content .....	WU Jing, WANG Guang-qi, CAO Zhi-ping, <i>et al.</i>	(3461)
Effects of Temperature on Combined Process of ABR and MBR for Domestic Sewage Treatment and Analysis of Microbial Community .....	WU Peng, LU Shuang-jun, XU Yue-zhong, <i>et al.</i>	(3466)
Microbial Community of Municipal Discharges in A Sewage Treatment Plant .....	XU Ai-ling, REN Jie, SONG Zhi-wen, <i>et al.</i>	(3473)
Pilot-Scale Cultivation of <i>Spirulina plantensis</i> with Digested Piggery Wastewater .....	GUO Qing-qing, LIU Rui, LUO Jin-fei, <i>et al.</i>	(3480)
Spectral Characteristics of Soluble Metabolites During Endogenous Respiration .....	LI Zhi-hua, ZHANG Qin, BAI Xu-li, <i>et al.</i>	(3487)
Endogenous Respiration Process Analysis of Heterotrophic Biomass and Autotrophic Biomass Based on Respiration Map .....	LI Zhi-hua, BAI Xu-li, ZHANG Qin, <i>et al.</i>	(3492)
Influence of S-Metolachlor and Cd <sup>2+</sup> on Photosynthesis of <i>Scenedesmus obliquus</i> .....	CHEN Cai-dong, HU Xiao-na, ZHANG Xiao-qiang, <i>et al.</i>	(3498)
Effect of Environmental Factors on Fish Community Structure in the Huntai River Basin at Multiple Scales .....	LI Yan-li, LI Yan-fen, XU Zong-xue, <i>et al.</i>	(3504)
Succession of Rotifer Community and Its Relationship with Environmental Factors in a New Estuarial Landscape River, Shanghai .....	MA Wen-hua, ZHANG Wei, GU Wan-wen, <i>et al.</i>	(3513)
Anaerobic Reduction of Humus/Fe(III) and Electron Transport Mechanism of <i>Fontibacter</i> sp. SgZ-2 .....	MA Chen, YANG Gui-qin, LU Qin, <i>et al.</i>	(3522)
Source Apportionment of Soil Heavy Metals in Jiapigou Goldmine Based on the UNMIX Model .....	AI Jian-chao, WANG Ning, YANG Jing, <i>et al.</i>	(3530)
Environmental Magnetic Properties and Their Spatial Variability of Topsoil in Shihezi City .....	YANG Han, XIONG Hei-gang, CHEN Xue-gang, <i>et al.</i>	(3537)
Effects of Different Amounts of Phosphate Fertilizers on Copper, Zinc Transfer in Red Soil Under the Application of KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> .....	GUO Liang, LI Zhong-wu, HUANG Bin, <i>et al.</i>	(3546)
Influence of Sulfur on the Bioavailability of Arsenic Uptake by Rice ( <i>Oryza sativa</i> L.) and Its Speciation in Soil .....	YANG Shi-jie, TANG Bing-pei, WANG Dai-chang, <i>et al.</i>	(3553)
Effects of Sulfur on Transformation of Selenium in Soil and Uptake of Selenium in Rape .....	LIU Xin-wei, DUAN Bi-hui, XIA Quan-jie, <i>et al.</i>	(3564)
Impact of Reclaimed Water Irrigation on Soil Chemical Properties and Culturable Microorganisms .....	GONG Xue, WANG Ji-hua, GUAN Jian-fei, <i>et al.</i>	(3572)
Influence of Different Slope Position and Profile in <i>Disporopsis pernyi</i> Forest Land on Soil Microbial Biomass and Enzyme Activity in Southwest Karst Mountain of China .....	QIN Hua-Jun, HE Bing-Hui, ZHAO Xuan-chi, <i>et al.</i>	(3580)
Effects of Different Soil Types on the Foliar δ <sup>13</sup> C Values of Common Local Plant Species in Karst Rocky Desertification Area in Central Guizhou Province .....	DU Xue-lian, WANG Shi-jie, LUO Xu-qiang, <i>et al.</i>	(3587)
Effect of Carbon Substrate Concentration on N <sub>2</sub> , N <sub>2</sub> O, NO, CO <sub>2</sub> and CH <sub>4</sub> Emissions from a Paddy Soil in Anaerobic Condition .....	CHEN Nuo, LIAO Ting-ting, WANG Rui, <i>et al.</i>	(3595)
Ability of Typical Greenery Shrubs of Beijing to Adsorb and Arrest PM <sub>2.5</sub> .....	LIANG Dan, WANG Bin, WANG Yun-qi, <i>et al.</i>	(3605)
Effects of Chlorides on Cd Transformation in a Simulated Grate Incinerator During Sludge Incineration Process .....	LIU Jing-yong, ZHUO Zhong-xu, SUN Shui-yu, <i>et al.</i>	(3612)
Spatial Temporal Differentiation of Product-based and Consumption-based CO <sub>2</sub> Emissions and Balance in the Beijing-Tianjin-Hebei Region; an Economic Input-Output Analysis .....	WANG Hao, CHEN Cao-cao, PAN Tao, <i>et al.</i>	(3619)
Study on Feasible Emission Control Level of Air Pollutions for Cement Industry .....	REN Chun, JIANG Mei, ZOU Lan, <i>et al.</i>	(3632)

# 《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)

2014年9月15日 第35卷 第9期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 9 Sep. 15, 2014

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@reeces. 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@reeces. 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