

ISSN 1000-0933  
CN 11-2031/Q

# 生态学报

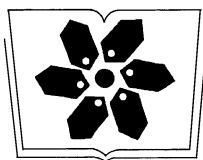
## Acta Ecologica Sinica



第 32 卷 第 23 期 Vol.32 No.23 **2012**

中国生态学学会  
中国科学院生态环境研究中心  
科学出版社

主办  
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

# 生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 32 卷 第 23 期

2012 年 12 月 (半月刊)

## 目 次

|                                         |                       |
|-----------------------------------------|-----------------------|
| 中国石龙子母体孕期调温诱导幼体表型:母体操纵假说的实验检测 .....     | 李 宏,周宗师,吴延庆,等 (7255)  |
| 同种或异种干扰对花鼠分散贮藏点选择的影响 .....              | 申 圳,董 钟,曹令立,等 (7264)  |
| 曝气充氧条件下污染河道氨挥发特性模拟 .....                | 刘 波,王文林,凌 芬,等 (7270)  |
| 贵州草海越冬斑头雁日间行为模式及环境因素对行为的影响 .....        | 杨延峰,张国钢,陆 军,等 (7280)  |
| 青藏高原多年冻土区积雪对沼泽、草甸浅层土壤水热过程的影响 .....      | 常 娟,王根绪,高永恒,等 (7289)  |
| 长沙城市斑块湿地资源的时空演变 .....                   | 恭映璧,靖 磊,彭 磊,等 (7302)  |
| 基于模型数据融合的干烟洲亚热带人工林碳水通量模拟 .....          | 任小丽,何洪林,刘 敏,等 (7313)  |
| 农田氮素非点源污染控制的生态补偿标准——以江苏省宜兴市为例 .....     | 张 印,周羽辰,孙 华 (7327)    |
| 用 PFU 微型生物群落监测技术评价化工废水的静态毒性 .....       | 李朝霞,张玉国,梁慧星 (7336)    |
| 京郊农业生物循环系统生态经济能值评估——以密云尖岩村为例 .....      | 周连第,胡艳霞,王亚芝,等 (7346)  |
| 基于遥感的夏季西安城市公园“冷效应”研究 .....              | 冯晓刚,石 辉 (7355)        |
| 海南岛主要森林类型时空动态及关键驱动因子 .....              | 王树东,欧阳志云,张翠萍,等 (7364) |
| 不同播种时间对吉林省西部玉米绿水足迹的影响 .....             | 秦丽杰,靳英华,段佩利 (7375)    |
| 黄土塬区不同品种玉米间作群体生长特征的动态变化 .....           | 王小林,张岁岐,王淑庆,等 (7383)  |
| 密植条件下种植方式对夏玉米群体根冠特性及产量的影响 .....         | 李宗新,陈源泉,王庆成,等 (7391)  |
| 沙地不同发育阶段的人工生物结皮对重金属的富集作用 .....          | 徐 杰,敖艳青,张璟霞,等 (7402)  |
| 增强 UV-B 辐射和氮对谷子叶光合色素及非酶促保护物质的影响 .....   | 方 兴,钟章成 (7411)        |
| 不同产地披针叶茴香光合特性对水分胁迫和复水的响应 .....          | 曹永慧,周本智,陈双林,等 (7421)  |
| 芦芽山林线华北落叶松径向变化季节特征 .....                | 董满宇,江 源,王明昌,等 (7430)  |
| 地形对植被生物量遥感反演的影响——以广州市为例 .....           | 宋巍巍,管东生,王 刚 (7440)    |
| 指数施肥对楸树无性系生物量分配和根系形态的影响 .....           | 王力朋,晏紫伊,李吉跃,等 (7452)  |
| 火烧伤害对兴安落叶松树干径向生长的影响 .....               | 王晓春,鲁永现 (7463)        |
| 山地梨枣树耗水特征及模型 .....                      | 辛小桂,吴普特,汪有科,等 (7473)  |
| 两种常绿阔叶植物越冬光系统功能转变的特异性 .....             | 钟传飞,张运涛,武晓颖,等 (7483)  |
| 干旱胁迫对银杏叶片光合系统 II 荧光特性的影响 .....          | 魏晓东,陈国祥,施大伟,等 (7492)  |
| 神农架川金丝猴栖息地森林群落的数量分类与排序 .....            | 李广良,丛 静,卢 慧,等 (7501)  |
| 碱性土壤盐化过程中阴离子对土壤中镉有效态和植物吸收镉的影响 .....     | 王祖伟,弋良朋,高文燕,等 (7512)  |
| 两种绣线菊耐弱光能力的光合适应性 .....                  | 刘慧民,马艳丽,王柏臣,等 (7519)  |
| 闽楠人工林细根寿命及其影响因素 .....                   | 郑金兴,黄锦学,王珍珍,等 (7532)  |
| 旅游交通碳排放的空间结构与情景分析 .....                 | 肖 潇,张 捷,卢俊宇,等 (7540)  |
| 北京市妫水河流域人类活动的水文响应 .....                 | 刘玉明,张 静,武鹏飞,等 (7549)  |
| 膜下滴灌技术生态-经济与可持续性分析——以新疆玛纳斯河流域棉花为例 ..... | 范文波,吴普特,马枫梅 (7559)    |
| 高温胁迫及其持续时间对棉蚜死亡和繁殖的影响 .....             | 高桂珍,吕昭智,夏德萍,等 (7568)  |
| 桉树枝瘿姬小蜂虫瘿解剖特征与寄主叶片生理指标的变化 .....         | 吴耀军,常明山,盛 双,等 (7576)  |
| 西南桦纯林与西南桦×红椎混交林碳贮量比较 .....              | 何友均,覃 林,李智勇,等 (7586)  |
| 长沙城市森林土壤 7 种重金属含量特征及其潜在生态风险 .....       | 方 晰,唐志娟,田大伦,等 (7595)  |
| <b>专论与综述</b>                            |                       |
| 城乡结合部人-环境系统关系研究综述 .....                 | 黄宝荣,张慧智 (7607)        |
| 陆地生态系统碳水通量贡献区评价综述 .....                 | 张 慧,申双和,温学发,等 (7622)  |



**封面图说:** 麋鹿群在过河——麋鹿属于鹿科,是中国的特有动物。历史上麋鹿曾经广布于东亚地区,到 19 世纪时,只剩下在北京南海子皇家猎苑内一群。1900 年,八国联军攻陷北京,麋鹿被抢劫一空。1901 年,英国的贝福特公爵用重金从法、德、荷、比四国收买了世界上仅有的 18 头麋鹿,以半野生的方式集中放养在乌邦寺庄园内,麋鹿这才免于绝灭。在世界动物保护组织的协调下,1985 年起麋鹿从英国分批回归家乡,放养到北京大兴南海子、江苏省大丰等地。这是在江苏省大丰麋鹿国家级自然保护区放养的麋鹿群正在过河。

彩图提供: 陈建伟教授 北京林业大学 E-mail: cites.chenjw@163.com

期刊基本参数: CN 11-2031/Q \* 1981 \* m \* 16 \* 380 \* zh \* P \* ¥ 70.00 \* 1510 \* 38 \* 2012-12

DOI: 10.5846/stxb201202020138

李朝霞, 张玉国, 梁慧星. 用 PFU 微型生物群落监测技术评价化工废水的静态毒性. 生态学报, 2012, 32(23): 7336-7345.

Li Z X, Zhang Y G, Liang H X. Static toxicity evaluation of chemical wastewater by PFU microbial communities method. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(23): 7336-7345.

## 用 PFU 微型生物群落监测技术评价化工 废水的静态毒性

李朝霞<sup>1,\*</sup>, 张玉国<sup>2</sup>, 梁慧星<sup>1</sup>

(1. 盐城工学院化学与生物工程学院, 盐城 224051; 2. 盐城市环境监察局, 盐城 224003)

**摘要:** 化工废水的排放是导致水环境毒物污染的重要来源, 以原生动物为靶生物的微型生物群落监测——PFU 法因能快速而真实地评价水体受污染程度而被广泛应用。盐城沿海化工园区是至今江苏省环保部门批准建设的苏北地区规模最大的以发展精细化工和医药化工为主导的专业园区, 以该园区附近清洁水源中的原生动物为种源, 用 PFU 法评价该园区化工废水的静态毒性。结果表明, 原生动物群落对化工废水效应浓度 ( $EC$ ) 变化非常敏感。在低的化工废水  $EC$  下, 原生动物群落群集的物种多样性指数和群集种类均随毒性时间的延长而快速增加, 群集速度也较快; 随着化工废水  $EC$  的增加, 原生动物群落群集的物种多样性指数随毒性时间的延长而增加缓慢甚至下降, 群集种类则明显减少, 群集速度也减缓, 说明化工废水  $EC$  有较强的生物胁迫效应。在反映原生动物群集过程的 3 个参数  $S_{eq}$ 、 $G$  和  $T_{90\%}$  中,  $S_{eq}$  与化工废水  $EC$  均呈负相关, 而  $G$  随化工废水  $EC$  增加先呈负相关后呈正相关。根据其回归方程  $S_{eq} = -0.141 EC + 19.05$  ( $R^2 = 0.941, P < 0.01$ ) 推算出该化工废水的效应浓度  $EC_5$ 、 $EC_{20}$  和  $EC_{50}$  分别为 7.1%、27.3% 和 67.7%。最终确定盐城沿海化工园区化工废水对其附近清洁水源原生动物群落的安全浓度为 7.1%, 最大允许浓度为 27.3%。盐城沿海化工园区化工废水必须处理至其毒性削减 72.7% 以上才能排放。

**关键词:** 原生动物群落; PFU 法; 盐城沿海化工园区; 静态毒性

## Static toxicity evaluation of chemical wastewater by PFU microbial communities method

LI Zhaoxia<sup>1,\*</sup>, ZHANG Yuguo<sup>2</sup>, LIANG Huixing<sup>1</sup>

1 School of Chemical and Biological Engineering, Yancheng Institute of Technology, Yancheng 224051, China

2 Yancheng Environment Supervision Bureau, Yancheng 224003, China

**Abstract:** Protozoa are ideal biological indicators of pollution and toxicity. The microbial communities monitor method, or Polyurethane Foam Unit (PFU), is widely used to assess the extent of water pollution due to its rapidity and accuracy. The Yancheng coastal chemical industrial zone, located in northern Jiangsu Province, is the largest special park approved for construction by the environmental administration of Jiangsu Province. This sector primarily oversees the development of pharmaceutical and chemical products. Wastewater discharged as part of such chemical manufacturing processes is an important source of water pollution and can potentially devastate water environments. Using the protozoan communities in the clear water near the industrial zone as source species, the static toxicity of the chemical wastewater was evaluated by PFU. Results showed that protozoan communities are very sensitive to effective concentration ( $EC$ ) variations in the chemical wastewater. Under prolonged exposure to toxin at lower  $EC$ , rapid increases in protozoan species diversity and

**基金项目:** 科技部科技型中小企业技术创新基金项目 (09C26213203714); 江苏省科技发展项目 (BS2005035); 2010 年度江苏省高校“青蓝工程”科技创新项目支持

收稿日期: 2012-02-02; 修订日期: 2012-08-29

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: lzxdc@163.com

colonized species indices, as well as colonization rate, were observed. At higher  $EC$ , the protozoan species diversity index increased slowly (or even decreased) while the colonized species index and colonization rate were reduced, indicating that high chemical wastewater  $EC$  exerts strong biological stress on water-inhabiting protozoa. Microbial communities exposed to low toxic stress from chemical wastewater eventually adapt and reach maturity. To characterize the protozoan colonization process, the number of protozoan species required to achieve balance  $S_{eq}$ , the colonization rate  $G$  and the time required to achieve 90%  $S_{eq}$  were studied in-depth. Among these three functional parameters ( $S_{eq}$ ,  $G$  and  $T_{90\%}$ ),  $S_{eq}$  was found to negatively correlate with the chemical wastewater  $EC$ , while  $G$  first negatively and later positively correlated with the chemical wastewater  $EC$ . The regression equation is  $S_{eq} = -0.141 EC + 19.05$  ( $R^2 = 0.941, P < 0.01$ ). The  $EC_5$ ,  $EC_{20}$  and  $EC_{50}$ , determined from the above regression equation, were 7.1%, 27.3%, and 67.7%, respectively. Therefore, the relative safe concentration and maximum acceptable toxicant concentration (MATC) of the wastewater for the protozoan communities are 7.1% and 27.3%, respectively. To safely discharge this wastewater, more than 72.7% of the toxins must be removed by further processing. Our data may aid further research regarding the effects of toxic chemical wastewater effluent on water environmental indicators, and may guide the supervision and control of chemical wastewater pollution within the Yancheng coastal chemical industrial zone.

**Key Words:** protozoan communities; PFU Method; Yancheng coastal chemical industrial zone; static toxicity

化工生产废水(化工废水)的排放是导致水环境毒物污染的重要来源,其中有毒化学组分复杂,现有的化学分析既不能阐明各种污染物的毒性,又无法预测其联合毒性作用<sup>[1]</sup>。PFU(聚氨酯泡沫塑料块)微型生物群落监测方法<sup>[2]</sup>从群落水平评价水质,比种和种群水平更具有环境真实性<sup>[3]</sup>。从种类的多样性、结构上的特殊性及分布特点看,原生动物可作为污染评价理想的指示生物<sup>[4]</sup>和生物毒性试验对象<sup>[5]</sup>。自沈韞芬<sup>[6]</sup>第一次把 PFU 微型生物监测方法引入中国以来,许多专家学者利用 PFU 法分析原生动物群落结构与功能变化特征来监测评价河流、湖泊、水库和近海岸带等自然水体受污染程度<sup>[7-14]</sup>。但是,在实验室静态条件下利用 PFU 微型生物群落监测技术评价化工废水的毒性研究在国内还较少开展。

江苏省盐城市滨海县滨淮镇境内的盐城沿海化工园区以发展精细化工和医药化工为主导,是至今江苏省环保部门批准建设的苏北地区规模最大的专业园区。本试验以该园区附近较清洁水源为 PFU 种源,参照《水质——微型生物群落监测——PFU 法》(GB/T12290-91)<sup>[6]</sup>对盐城沿海化工园区的化工废水进行静态毒性试验,以确定其安全排放浓度,并探索用 PFU 原生动物群落评价化工园区工业废水的可能性,以期为该化工园区化工废水污染监管和控制提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料

#### 1.1.1 污水来源

污水于 2010 年 4 月份采自江苏省盐城沿海化工园区化工废水。

#### 1.1.2 稀释水及化工废水的稀释

采用曝气自来水做稀释水,将化工废水稀释至各试验浓度。试验前将稀释水和化工废水分别加热至 60 ℃,维持 20 min,以便杀死水中的生物。冷却过程中自然曝气,备用。

#### 1.1.3 仪器设备

7202-B 型可见分光光度计(Unico 公司),SW-CJ-2FD 型双人单面净化工作台(苏州净化设备有限公司),Cs101-2 鼓风干燥箱(重庆万达仪器公司)、XS-212-201 显微镜(济南胜利科学器材有限公司)、LRH-250A 型生化培养箱(广东省医疗器械厂),BCD-130HTB 冰箱(青岛海尔电器集团公司)。

### 1.2 方法

#### 1.2.1 PFU 种源的采集

以放置盐城沿海化工园区附近较清洁水源 20 d、群集了接近平衡期的、未成熟的 PFU 微型生物群落为种

源,毒性试验 0 d,镜检种源 PFU,并测定种源采集水域的水质状况<sup>[1]</sup>。

### 1.2.2 PFU 及静态毒性试验的布局

参照文献<sup>[2,6,12]</sup>方法,采用 PFU 规格均为 5 cm×6.5 cm×7.5 cm,实验盘采用规格为长 43 cm,宽 31 cm,高 13 cm 的塑料盘,盘中央挂放种源 PFU,两端各绑 5 块与种源 PFU 距离相等的空白 PFU,并使 PFU 吸满受试水。化工废水采用 0.5 稀释因子得到废水效应浓度(EC)分别为 100%,50%,25%,12.5%,6.25%,0% 等组,每组设两个试验盘。每个试验盘里放入实验用水 7.5 L,试验盘置于 25 ℃生化培养箱中,40W 日光灯保持光强为 1500 lx 左右,光照周期为光照 12L:12D。

### 1.2.3 采样与镜检

分别于第 1、3、7、11、15 天随机采样。小心地从试验盘中解下 PFU,装入无菌塑料袋中挤出溶液作为水样后,仍小心地放回原处绑好,并做好标记。试验结束后对各盘中种源 PFU 中的原生动物进行镜检。

对采集的水样,在 48 h 内用活体镜检法<sup>[2,6]</sup>观察与鉴别原生动物的种类,用目镜测微尺和镜台测微尺<sup>[15]</sup>测量细胞大小。另取一部分水样定容至 100 mL,立即加入鲁哥试剂(体积分数为 1:10)固定并沉淀 48 h,用虹吸管吸去上层水,最后浓缩定容至 10 mL。浓缩后的水样摇匀后用血细胞计数板<sup>[15]</sup>对原生动物进行显微镜直接计数,原生动物个体总数  $N$ <sup>[16-17]</sup>按下式计算:  $N = (V_s \times n) / (V \times V_a)$ ,式中  $N$  为 1 L 水中原生动物的个体总数(个/L), $V$  为计数用水样体积(100 mL), $V_s$  为浓缩体积(10 mL), $V_a$  为计数体积(0.1 mL), $n$  为计数所得的个体数。

### 1.2.4 原生动物群落的物种多样性指数计算

原生动物群落的物种多样性指数根据 Margalef 公式<sup>[18]</sup>求出:  $D = (S - 1) / \ln(N)$ ,式中  $N$  同 1.2.4; $S$  为样品中生物种属总数。 $D$  值越大,说明物种越丰富,水体受污染程度越小。

### 1.2.5 原生动物群集参数计算

原生动物群落的群集参数根据 MacArthur-wilson 岛屿区系平衡模型修订公式<sup>[2,6]</sup>求出:  $S_t = S_{eq} (1 - e^{-Gt}) / (1 + H e^{-Gt})$ ,式中  $S_t$  为  $t$  时 PFU 内的种数,等同于 1.2.4 中  $S$ ;  $S_{eq}$  为原生动物群落达到平衡时的种数; $G$  为群集速度常数(群集曲线的斜率); $T_{90\%}$  为达到 90%  $S_{eq}$  所需时间, $T_{90\%}$  根据公式<sup>[6]</sup>求出:  $T_{90\%} = \frac{\ln(10 + 9H)}{G}$ ;  $H$  为污染强度。

$H$  根据 Shannon-Wiener 公式<sup>[3,6,19]</sup>计算:  $H = - \sum_{i=1}^S \frac{n_i}{N} \log_2 \frac{n_i}{N}$ ,式中  $S$  和  $N$  同 1.2.4; $n_i$  为样品中某种生物的个体总体。 $H$  值:0—1 为多污带;1—2 为  $\alpha$ -中污带;2—3 为  $\beta$ -中污带;>3 为寡污带。

### 1.2.6 数据处理

本试验中所有数据均为多次平行测定结果的平均值,每次结果差异不超过 10%—15%。使用 Excel 2007、Mathlab 7.11 和 SPSS 11.0 软件进行数据处理与统计。

## 2 结果与分析

### 2.1 化工废水及 PFU 种源采集水域的水质

按文献方法<sup>[1]</sup>所测得的各项水质理化参数见表 1。与中华人民共和国污水综合排放标准(GB 8978—1996)相比,化工废水的固体悬浮物(suspended,SS)、化学需氧量(chemical oxygen demand,COD<sub>Cr</sub>)、总磷(total phosphorus,TP)含量、氨氮(NH<sub>3</sub>-N)含量和酸碱度(potential of hydrogen,pH)值未超过Ⅱ级排放标准。而 PFU 种源采集水域的各项水质指标均达到清洁水源标准,适宜作种源。

### 2.2 种源 PFU 中的原生动物种类

按 1.2.1 方法放置和采集种源 PFU,于毒性试验 0 d 开始镜检。结果表明,种源 PFU 中原生动物种类和数量均较多,共有 24 种,其个体总数  $N$  为  $2.21 \times 10^4$  个/L。其中鞭毛虫有 3 种,分别为卵形单领鞭虫(*Monosiga ovata*)、张口管领鞭虫(*Salpingoeca ringens*)和眼杯鞭虫(*Bicoeca oculata*)。肉足虫有 2 种,分别为囊

毛变形虫 (*Trichamoeba osseosaccus*) 和剑钻变形虫 (*Subulamoeba saphirina*)。其余 19 种则均属纤毛虫, 分别为扭曲管叶虫 (*Trachelophyllumi sigmoides*)、明显长颈虫 (*Dileptus conspicuus*)、钩钟虫 (*Vorticella similis*)、杯钟虫 (*Vorticella cupifera*)、放射尾滴虫 (*Cercomonas radiatus*)、浸渍锤吸管虫 (*Tokophrya infusionum*)、变色前管虫 (*Prorodon discolor*)、凹扁拟斜管虫 (*Chilodontopsis depressa*)、尾斜管虫 (*Chilodonella caudata*)、银灰膜袋虫 (*Cyclidium glaucoma*)、僧帽肾形虫 (*Colpoda cucullus*)、光明舟形虫 (*Lembadion luceens*)、薄漫游虫 (*Litonotus lamella*)、非游斜管虫 (*Chilodonella aplanata*)、肋半眉虫 (*Hemiophrys pleurosigma*)、尾草履虫 (*Paramecium caudatum*)、膜状急纤虫 (*Tachysoma pellionella*)、水蚤间隙虫 (*Intranstylum asellicola*) 和环杯居虫 (*Pyxicola annulata*)。相应的生物多样性指数为 2.299。说明种源 PFU 上聚集的原生动物均有一定的丰度和代表性, 可以作为试验用监测种源。

表 1 化工废水及 PFU 种源水的水质参数

Table 1 Parameters of water quality in the chemical wastewater and species source water

| 检测项目<br>Detection program | 固体悬浮物<br>Suspended solid(SS)<br>/(mg/L) | 化学需氧量<br>Chemical oxygen demand (COD <sub>Cr</sub> )<br>/(mg/L) | 总磷<br>Total phosphorus (TP)<br>/(mg/L) | 总氮<br>Total nitrogen (TN)<br>/(mg/L) | 氨氮<br>NH <sub>3</sub> -N/<br>(mg/L) | 酸碱度<br>Potential of hydrogen(pH) |
|---------------------------|-----------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|----------------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------------|----------------------------------|
| 化工废水 Chemical wastewater  | 192                                     | 284.6                                                           | 1.65                                   | 35.2                                 | 16.14                               | 6.8                              |
| 种源水 Species source water  | 12.4                                    | 54.7                                                            | 0.19                                   | 1.73                                 | 0.07                                | 7.2                              |

### 2.3 化工废水对种源 PFU 的静态毒性试验

按 1.2.2 方法进行静态毒性试验, 各试验组的原生动物种类组成和个体总数见表 2。

由表 2 绘制的原生动物群落的物种多样性指数曲线见图 1。由图 1 可知, 原生动物群落的  $D$  值在化工废水  $EC$  为 0%、6.25% 和 12.5% 组较多, 且随毒性时间的延长而增加; 而在化工废水  $EC$  为 25% 和 50% 组则明显减少, 且随毒性时间的延长而缓慢增长; 至化工废水  $EC$  为 100% 组则更少, 且随毒性时间的延长而出现先略有增加后下降的趋势, 尤其是在未加稀释的  $EC$  为 100% 的化工废水中, 原生动物群落的种类和密度均从刚开始适应生长至最终毒害消亡。在各毒性时段, 化工废水  $EC$  为 0% 时  $D$  值均最大。这说明在无化工废水污染时, 原生动物群落的物种最丰富。在化工废水  $EC$  为 25% 及以下时, 原生动物群落能适应生长, 而 50% 及以上化工废水  $EC$  则会对原生动物群落的种类和密度均产生较大的毒害。

由表 2 绘制的原生动物群落群集曲线见图 2。由图 2 可知, 原生动物群落的群集种类在化工废水  $EC$  为 0% 和 6.25% 组均较多, 其群集速度也均较快; 随着化工废水  $EC$  的增加, 其群集种类明显减少, 群集速度明显减缓; 至  $EC$  为 100% 时, 群集种类和群集速度则降至最低。这说明原生动物群落对环境条件的变化非常敏感, 其群集过程也明显反映出化工废水对原生动物群落所产生的胁迫效应。

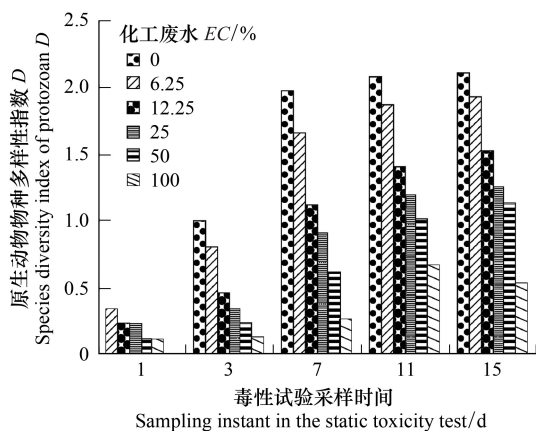


图 1 原生动物在不同化工废水静态毒性试验时的物种多样性  
Fig.1 Species diversity of protozoan in the static toxicity test of the chemical wastewater

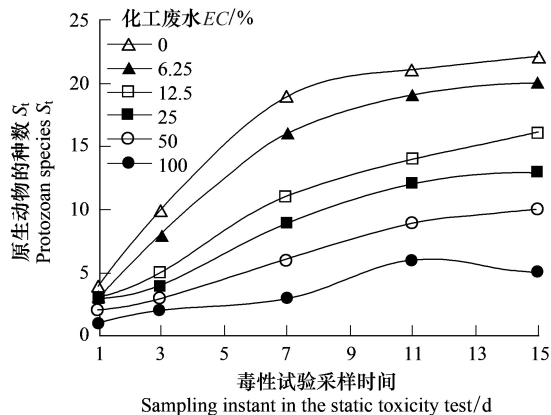


图 2 原生动物在不同化工废水静态毒性试验时的群集过程  
Fig.2 Protozoan colonization in the static toxicity test of the chemical wastewater

表 2 不同化工废水静态毒性试验时种源 PFU 中的原生动物种类和个体总数

| Table 2 Species and total number of individuals of protozoan in the static toxicity test of the chemical wastewater |                              |                                                                                    |      |       |      |       |       |      |       |      |       |      |      |      |       |       |       |       |        |     |       |       |      |  |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|------|-------|------|-------|-------|------|-------|------|-------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|--------|-----|-------|-------|------|--|
| 化工废水效应浓度<br>Effective concentration<br>of the chemical<br>wastewater/%                                              | 毒性时间<br>Toxicity time<br>t/d | 原生动物种类和每种生物的个体总数 species and total number of individuals of protozoan $n_i$ /(个/L) |      |       |      |       |       |      |       |      |       |      |      |      |       |       |       |       |        |     |       |       |      |  |
|                                                                                                                     |                              | 杯钟虫                                                                                | 尾斜管虫 | 僧帽肾形虫 | 薄游虫  | 水蚤间隙虫 | 非游斜管虫 | 浸渍管虫 | 光明舟形虫 | 眼杯鞭虫 | 明显长颈虫 | 尾草履虫 | 扭曲管虫 | 银灰膜虫 | 变色前管虫 | 卵形单鞭虫 | 张口管鞭虫 | 囊毛变形虫 | 凹扁拟斜管虫 | 钩钟虫 | 放射尾滴虫 | 膜状急纤虫 | 环杯居虫 |  |
| 0                                                                                                                   | 1                            | 3300                                                                               | 1560 | 800   | 1040 |       |       |      |       |      |       |      |      |      |       |       |       |       |        |     |       |       |      |  |
|                                                                                                                     | 3                            | 3080                                                                               | 1440 | 880   | 1120 | 420   | 300   | 360  | 40    | 80   | 80    |      |      |      |       |       |       |       |        |     |       |       |      |  |
|                                                                                                                     | 7                            | 2480                                                                               | 1240 | 840   | 920  | 600   | 440   | 480  | 120   | 280  | 320   | 240  | 80   | 120  | 120   | 80    | 160   | 40    | 120    | 80  |       |       |      |  |
|                                                                                                                     | 11                           | 2240                                                                               | 1360 | 720   | 1280 | 1040  | 780   | 680  | 560   | 480  | 600   | 560  | 280  | 560  | 420   | 280   | 440   | 280   | 780    | 460 | 420   | 580   |      |  |
|                                                                                                                     | 15                           | 2360                                                                               | 1520 | 680   | 1640 | 1360  | 1000  | 1180 | 1020  | 680  | 920   | 840  | 440  | 880  | 920   | 580   | 880   | 580   | 1040   | 860 | 960   | 780   | 480  |  |
| 6.25                                                                                                                | 1                            | 2560                                                                               | 1320 |       | 1120 |       |       |      |       |      |       |      |      |      |       |       |       |       |        |     |       |       |      |  |
|                                                                                                                     | 3                            | 2480                                                                               | 1140 | 160   | 980  | 240   | 240   |      | 120   |      |       | 120  |      |      |       |       |       |       |        |     |       |       |      |  |
|                                                                                                                     | 7                            | 2320                                                                               | 1200 | 360   | 1240 | 480   | 400   | 120  | 240   | 120  | 80    | 560  | 320  | 840  | 80    | 120   | 120   |       |        |     |       |       |      |  |
|                                                                                                                     | 11                           | 2280                                                                               | 1480 | 800   | 1480 | 1040  | 800   | 320  | 520   | 360  | 440   | 920  | 720  | 1240 | 360   | 520   | 560   | 480   | 600    | 480 |       |       |      |  |
|                                                                                                                     | 15                           | 2240                                                                               | 1520 | 960   | 1640 | 1160  | 920   | 440  | 560   | 480  | 720   | 1120 | 680  | 1320 | 600   | 880   | 880   | 680   | 840    | 600 | 360   |       |      |  |
| 12.5                                                                                                                | 1                            | 3080                                                                               | 680  |       | 440  |       |       |      |       |      |       |      |      |      |       |       |       |       |        |     |       |       |      |  |
|                                                                                                                     | 3                            | 2520                                                                               | 1040 |       | 800  | 560   | 320   |      |       |      |       |      |      |      |       |       |       |       |        |     |       |       |      |  |
|                                                                                                                     | 7                            | 2400                                                                               | 1240 | 160   | 920  | 680   | 480   | 480  | 280   | 80   |       | 360  | 120  |      |       |       |       |       |        |     |       |       |      |  |
|                                                                                                                     | 11                           | 2240                                                                               | 1200 | 480   | 880  | 720   | 560   | 840  | 600   | 320  | 640   | 680  | 440  | 560  |       |       | 440   |       |        |     |       |       |      |  |
|                                                                                                                     | 15                           | 2160                                                                               | 1160 | 720   | 960  | 920   | 1000  | 1440 | 1560  | 880  | 1320  | 1520 | 960  | 1280 |       |       | 920   |       | 720    | 280 |       |       |      |  |
| 25                                                                                                                  | 1                            | 2320                                                                               | 840  |       | 640  |       |       |      |       |      |       |      |      |      |       |       |       |       |        |     |       |       |      |  |
|                                                                                                                     | 3                            | 2280                                                                               | 1080 |       | 880  |       | 960   |      |       |      |       |      |      |      |       |       |       |       |        |     |       |       |      |  |
|                                                                                                                     | 7                            | 2200                                                                               | 960  | 200   | 920  | 480   | 840   |      | 480   | 320  |       | 280  |      |      |       |       |       |       |        |     |       |       |      |  |
|                                                                                                                     | 11                           | 2160                                                                               | 920  | 680   | 840  | 1040  | 920   | 400  | 920   | 680  |       | 720  | 440  | 280  |       |       |       |       |        |     |       |       |      |  |
|                                                                                                                     | 15                           | 2040                                                                               | 880  | 1320  | 920  | 1440  | 1080  | 720  | 1360  | 1040 | 240   | 1320 | 760  | 480  |       |       |       |       |        |     |       |       |      |  |
| 50                                                                                                                  | 1                            |                                                                                    | 2080 |       |      |       |       |      |       | 750  |       |      |      |      |       |       |       |       |        |     |       |       |      |  |
|                                                                                                                     | 3                            |                                                                                    | 1960 |       |      |       |       |      |       | 860  |       | 560  |      |      |       |       |       |       |        |     |       |       |      |  |
|                                                                                                                     | 7                            |                                                                                    | 1280 | 120   |      |       |       |      | 80    | 920  | 80    | 320  |      |      |       |       |       |       |        |     |       |       |      |  |
|                                                                                                                     | 11                           |                                                                                    | 880  | 160   |      |       |       | 80   | 120   | 800  | 120   | 240  | 80   | 40   |       |       |       |       |        |     |       |       |      |  |
|                                                                                                                     | 15                           |                                                                                    | 720  | 320   |      |       | 200   | 80   | 240   | 640  | 240   | 280  | 40   | 40   |       |       |       |       |        |     |       |       |      |  |
| 100                                                                                                                 | 1                            |                                                                                    |      |       |      |       |       |      |       | 1200 |       |      |      |      |       |       |       |       |        |     |       |       |      |  |
|                                                                                                                     | 3                            |                                                                                    |      |       |      |       |       |      |       | 1080 |       | 280  |      |      |       |       |       |       |        |     |       |       |      |  |
|                                                                                                                     | 7                            |                                                                                    |      |       |      |       |       |      |       | 920  | 240   | 440  |      |      |       |       |       |       |        |     |       |       |      |  |
|                                                                                                                     | 11                           |                                                                                    | 120  |       |      |       |       |      | 80    | 880  | 320   | 360  |      | 40   |       |       |       |       |        |     |       |       |      |  |
|                                                                                                                     | 15                           |                                                                                    | 360  |       |      |       |       |      | 200   | 720  |       | 200  |      | 40   |       |       |       |       |        |     |       |       |      |  |

按 1.2.5 方法由表 2 拟合的  $H$  随毒性时间的变化曲线如图 3 所示。由图 3 可知,在化工废水  $EC$  为 0—25% 时,  $H$  随毒性时间的延长均明显增加,所指示的污染级别经历从多污带→ $\alpha$ -中污带→ $\beta$ -中污带→寡污带的变化过程;在化工废水  $EC$  为 50% 和 100% 时,  $H$  随毒性时间的延长则增加缓慢甚至下降,所指示的污染级别分别经历从多污带→ $\alpha$ -中污带→ $\beta$ -中污带和多污带→ $\alpha$ -中污带的变化过程。这说明在原生动物群集过程中,  $H$  值是不断变化的,并最终趋于稳定。只有较长毒性时间下的  $H$  值才能有效地评价水体受污染程度。

由图 2 和图 3 拟合出的  $S_t$  和  $H$  随  $t$  变化的回归方程分别记作  $S_t-t$  和  $H-t$ ,由  $S_t-t$  可以拟合出接近平衡时的毒性时间  $T'$ ,在  $T'$  两侧附近取不同的毒性时间  $t'$ ,可拟合出接近平衡时  $S_t$  随  $t$  变化的回归方程,记作  $S'_{t'-t}$ ,  $S'_{t'-t}$  的斜率即为  $G$ 。  $S_t-t$ 、 $H-t$ 、 $T'$  和  $S'_{t'-t}$  均列于表 3。

将  $G$ 、 $t'$ 、由  $S_t-t$  和  $H-t$  计算的  $t'$  时刻的  $S_t$  和  $H$  代入公式  $S_t = S_{eq}(1 - e^{-Gt})/(1 + He^{-Gt})$  中,计算出不同  $t'$  时的  $S_{eq}$ ,如图 4 所示。取  $S_t$  和  $S_{eq}$  十分接近时的毒性时间作为平衡时的  $T$ ,根据  $H-t$  可计算出平衡时的  $H$ 。将平衡时的  $H$  和  $G$  代入公式  $T_{90\%} = \frac{\ln(10 + 9H)}{G}$  中,计算出  $T_{90\%}$ 。对图 4 中各曲线所示  $S_{eq}$  的算术平均值取整即得平衡时的  $S_{eq}$ 。平衡时的  $T$ 、 $H$ 、 $S_{eq}$ 、 $G$  和  $T_{90\%}$  列于表 4。由表 4 可知,按照化工废水  $EC$  从低到高顺序,原生动物  $S_{eq}$  逐渐下降,说明化工废水毒性依次增强。 $G$  值以 0% 组最大,在化工废水  $EC$  达 50% 之前,  $G$  值随着化工废水  $EC$  的增加而降低,也反映出化工废水的毒性作用。在化工废水  $EC$  达 50% 之后,  $G$  值随着化工废水  $EC$  的增加反而增加,主要因为化工废水的毒性过强导致原生动物达平衡时的种数迅速且大幅度降低所致。

$T_{90\%}$  值与  $G$  值成反比关系:  $G$  值越大,  $T_{90\%}$  越小,原生动物群落达到平衡越快;反之,原生动物群落达到平衡越慢。由原生动物平衡时的  $H$  可知,化工废水  $EC$  为 0—25% 对种源水的污染级别为寡污带,而化工废水  $EC$  达 50% 后对种源水的污染级别为  $\alpha$ -中污带,这与图 3 所示结果相一致。

对  $S_{eq}$  和废水  $EC$  进行线性回归,回归方程为  $S_{eq} = -0.141 EC + 19.05$  ( $R^2 = 0.941$ ,  $P < 0.01$ )。据此公式获得  $EC_5$  (指原生动物种数损失 5% 的废水浓度)、 $EC_{20}$ 、 $EC_{50}$  的效应浓度  $EC$  分别为 7.1%、27.3% 和 67.7%。在自然水域中,微型生物群落有 5% 的种类波动是正常的,因此,将  $EC_5$  作为安全浓度,此时废水浓度为 7.1%。将 20% 的原生动物种类受到损伤而消失的浓度作为最大允许浓度 (MATC),此时废水浓度为 27.3%。50% 原生动物种类损伤的废水浓度为 67.7%。

### 3 结论与讨论

在整个静态毒性试验时间内,在 0% 组的空白 PFU 上群集到了除种源 PFU 上的剑钻变形虫和肋半眉虫外的其余 22 种原生动物,群集的原生动物个体总数达  $2.16 \times 10^4$  个/L,占种源 PFU 原生动物个体总数的

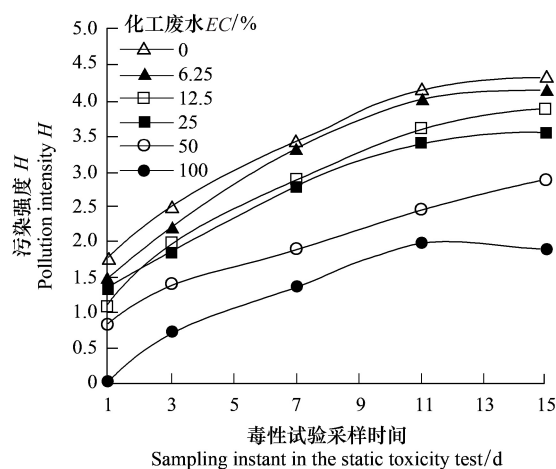


图 3 不同化工废水在静态毒性试验时对原生动物的污染强度  
Fig. 3 Pollution intensity of the chemical wastewater on protozoan communities in the static toxicity test

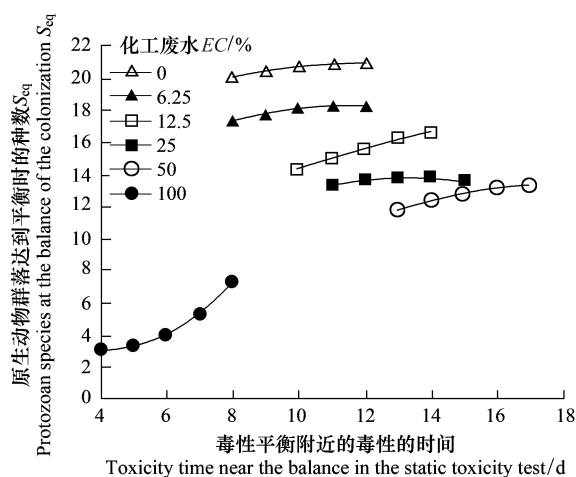


图 4 在毒性平衡时间附近不同化工废水的  $S_{eq}$   
Fig. 4  $S_{eq}$  of the chemical wastewater near the balance time in the static toxicity test



表 4 不同化工废水静态毒性试验时原生动物群集过程参数

Table 4 Parameters of protozoan colonization in the static toxicity test of the chemical wastewater

| 化工废水效应浓度<br>Effective concentration of the<br>chemical wastewater/% | $T$   | $H$  | $S_{eq}$ | $G$   | $T_{90\%}$ |
|---------------------------------------------------------------------|-------|------|----------|-------|------------|
| 0                                                                   | 10.37 | 4.04 | 21       | 0.603 | 6.36       |
| 6.25                                                                | 10.62 | 4.01 | 18       | 0.548 | 6.99       |
| 12.5                                                                | 12.19 | 3.80 | 16       | 0.485 | 7.79       |
| 25                                                                  | 14.01 | 3.72 | 14       | 0.374 | 10.09      |
| 50                                                                  | 14.81 | 1.31 | 13       | 0.404 | 7.63       |
| 100                                                                 | 6.77  | 1.46 | 5        | 0.512 | 6.14       |

96.4%,说明 PFU 能真实反映水体的生物状态。在化工废水 EC 为 6.25%—25% 时,在空白 PFU 中群集的原生动物的种类较多,数量也很大,说明在此浓度下化工废水的生物毒性较弱。原生动物以纤毛虫中的杯钟虫、尾斜管虫和薄漫游虫等寡污纤毛虫为主优势种,但其数量随着化工废水 EC 的增加而逐渐减少。水蚤间隙虫、非游斜管虫、光明舟形虫、僧帽肾形虫、扭曲管叶虫和尾草履虫等耐污纤毛虫逐渐形成次优势种,眼杯鞭虫、张口管领鞭虫和卵形单领鞭虫和囊毛变形虫均在化工废水 EC 为 6.25% 毒性中期或中后期出现并累积,而在化工废水 EC 为 12.5% 毒性中期或中后期仅有眼杯鞭虫和张口管领鞭虫出现并累积,在化工废水 EC 为 25% 毒性中期则仅有眼杯鞭虫出现并迅速形成主优势种。在化工废水 EC 达 50% 后,在空白 PFU 中群集的原生动物的种类和数量则迅速且大幅度地降低,说明此浓度化工废水的生物毒性较强。多数的寡污和耐污纤毛虫均被毒杀,能够群集的原生动物仅有眼杯鞭虫、尾草履虫、光明舟形虫和明显长颈虫等少数耐污种,尾斜管虫在 50% 的化工废水 EC 中仍能长期存活,说明它较其它寡污纤毛虫草具有更强耐污性。

不同 EC 的化工废水对种源 PFU 的毒性存在一定的规律性:刚开始时,微型生物群落的生物多样性指数  $D$  和污染强度  $H$  都较低,这可能是由于种源 PFU 中的原生动物还没有完全适应废水水质,没有扩散到实验盘四周的空白 PFU 中去,导致空白 PFU 的生物种类和数量均较小。几天后,各个浓度废水中的微型生物群落  $D$  和  $H$  开始快速上升,并最终到达最大值(EC100% 废水除外,其  $D$  和  $H$  达到最大值后又开始缓慢下降)。这说明微型生物群落不同浓度化工废水中均存在从开始适应至最终达到成熟的过程。 $D$  和  $H$  可以作为静态毒性试验中生物群落结构和水体或土壤受污染程度的评价指标,这与目前大多数 PFU 法动态试验<sup>[3-5,7-13,16-19]</sup>评价水质相一致。但在静态毒性试验中,只有较长毒性时间下的  $D$  和(或)  $H$  值才能有效地评价水体受污染程度。

目前生物毒性检验<sup>[13,20]</sup>已成为评价环境污染的必需手段之一。Bulich A. 等<sup>[21]</sup>首先报道了采用 *Photobacterium phosphoreum* 菌株进行废水毒性商业化检测的可能性,Biesinger K. 等<sup>[22]</sup>研究了 *Daphnia magna* 在不同金属作用下的生态效应。随后国内外许多学者以不同的指示生物对水体或土壤<sup>[13,23-24]</sup>等环境污染进行了生物毒性检验和评价,但我国目前仍缺乏规范的工业废水毒性鉴定和评价体系<sup>[25]</sup>。PFU 法作为一种国标方法,能从微型生物群落水平快速而综合地反映水体水质情况,是一种值得推广的预测废水毒性强度的方法。

本试验所采用的盐城沿海化工园区化工废水虽未超过国家 II 级排污标准,但对其附近清洁水源仍存在较高的毒性风险。在反映原生动物群集过程的 3 个参数  $S_{eq}$ 、 $G$  和  $T_{90\%}$  中, $S_{eq}$  与化工废水 EC 均呈负相关,而  $G$  随化工废水 EC 增加先呈负相关后呈正相关。盐城沿海化工园区化工废水对该园区附近清洁水源的无效应浓度为 7.1%,该园区附近清洁水源对该园区化工废水的最大可接受浓度为 27.3%,因此,盐城沿海化工园区化工废水必须经过进一步处理,将毒性削减 73% 以上才能排放。

## References:

- [1] Yang Y, Yu H X, Cui Y X, Jin H J, Tang S L, Zhou C H. Toxicity identification evaluation on efficiency of chemical effluent treatment. Chinese

- Journal of Applied Ecology, 2003, 14(1): 105-109.
- [2] The Second Newsroom of China Standard Press. Compilation of Environmental Protection Standards of Water Quality Analysis Method in China. Beijing: China Standard Press, 2001: 284-448.
- [3] Xie Z P, Li L, Geng X J, Wang J. Hei river by protozoa evaluation of the quality of Zhangye. Environmental Monitoring in China, 2009, 25(2): 35-38.
- [4] Xu M Q. Ecological basis and application of PFU protozoan community in bio-monitoring with relation to water quality. Acta Ecologica Sinica, 2004, 24(7): 1540-1547.
- [5] Huang W H, Zhao T Z, Zhao L Q, Wang L, Lu X H. Biological toxicity of hexachlorobenzene to the protozoa tetrahymena thermophila BF5. Environmental Science and Technology, 2006, 29(12): 11-13.
- [6] Shen Y F, Zhang Z S, Gong X J, Gu M R, Shi Z X, Wei Y X. New Technology of Microbiological Monitoring. Beijing: China Building Industry Press, 1990: 1-524.
- [7] Woods J A, O'Leary K A, McCarthy R P, O'Brien N M. Preservation of comet assay slides: comparison with fresh slides. Mutation Research/Fundamental and Molecular Mechanisms of Mutagenesis, 1999, 429(2): 181-187.
- [8] Xu K D, Choi J K, Yang E J, Lee K C, Lei Y L. Biomonitoring of coastal pollution status using protozoan communities with a modified PFU method. Marine Pollution Bulletin, 2002, 44(9): 877-886.
- [9] Kahle J, Zauke G P. Bioaccumulation of trace metals in the calanoid copepod *Metridia gerlachei* from the Weddell Sea (Antarctica). Science of the Total Environment, 2002, 295(1/3): 1-16.
- [10] Chen T, Huang J R, Chen S P, Qiu W Z, Lin T H, Zheng Z J, Wen S M, Xu R L. PFU protozoan community colonization process and its indication of water quality in Guangzhou urban artificial lakes. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2004, 10(3): 310-314.
- [11] Wang X H, Lu X H, Shen Y F. Partitioning of organic chloride pollutants in different phases of water in Donghu Lake by microbial community, PFU method. Acta Hydrobiologica Sinica, 2005, 29(1): 65-69.
- [12] Li F C, Fong W S, Wang J X, Wang H W, Guan Y Q, Shen Y F. Ecotoxicity of industrial wastewater from Baoding city to microbial communities in the Baiyangdian Lake. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2005, 11(3): 315-318.
- [13] Liao Q Y, Zhang J H, Li M, Lu Y, Wei H H, Xu R L. Structure and distribution of soil protozoa at Dongzhaigang mangrove in Hainan island. Ecology and Environment, 2008, 17(3): 1077-1081.
- [14] Tian G, Gong D J, Yan L, Qi Z H. Function and application of protozoa in bio-monitoring. Bulletin of Biology 2009, 44(10): 11-13.
- [15] Zhou Q Y, Gao T Y. Environmental Engineering Microbiology. Beijing: Higher Education Press, 2000: 292-293.
- [16] Li F C, Zhao Y J, Zhang Q, Zhang Y, Li L. Preliminary study on the diversity and community structure of Rotifer in Baiyangdian Lake. Sichuan Journal of Zoology, 2011, 30(5): 734-736.
- [17] Zheng X Y, Wang L Q. Species composition and abundance variation of protozoa in Dianshan Lake. Chinese Journal of Ecology, 2009, 28(1): 51-57.
- [18] Chen L J, Gu J, Hu Z J, Peng Z R, Liu Q G. The research of protozoa community structure in Mingzhu Lake of Chongming Island, Shanghai. Journal of Fisheries of China, 2010, 34(9): 1404-1413.
- [19] Liu C Q, Xing X G, Wang J X, Zhang Y J. Characteristics of rotifera community structure in the Baiyangdian Lake. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(18): 4948-4959.
- [20] Zhao F Y, Sun G X. Development of biotoxicity testing on industrial wastewater. Industrial Water Treatment, 2010, 30(4): 22-25.
- [21] Bulich A A, Isenberg D L. Use of the luminescent bacterial system for the rapid assessment of aquatic toxicity. ISA Transactions, 1981, 20(1): 29-33.
- [22] Biesinger K E, Christensen G M. Effects of various metals on survival, growth, reproduction, and metabolism of *Daphnia magna*. Journal of the Fisheries Research Board of Canada, 1972, 29(12): 1691-1700.
- [23] Chen X Y, Liu M Q, Hu F, Mao X F, Li H X. Contributions of soil micro-fauna (protozoa and nematodes) to rhizosphere ecological functions. Acta Ecologica Sinica, 2007, 27(8): 1332-1034.
- [24] Zhao F, Xu K D. Methodological advances in soil protozoa research. Chinese Journal of Ecology 2010, 29(5): 1028-1034.
- [25] Zhao J L, Fang Y X, Ying G G. Toxicity identification and evaluation methodology proposed for various industrial effluents and its practical application. Ecology and Environmental Sciences, 2011, 20(3): 549-559.

## 参考文献:

- [1] 杨怡, 于红霞, 崔玉霞, 金洪钧, 唐松林, 周春宏. 以毒性鉴别评价法评价化工废水处理效果的研究. 应用生态学报, 2003, 14(1): 105-109.
- [2] 中国标准出版社第二编辑室. 中国环境保护标准汇编 水质分析方法. 北京: 中国标准出版社, 2001: 284-448.
- [3] 谢宗平, 李莉, 耿晓杰, 王娟. 用原生动物评价黑河张掖段水质. 中国环境监测, 2009, 25(2): 35-38.
- [4] 许木启. PFU 原生动物群落生物监测的生态学原理与应用. 生态学报, 2004, 24(7): 1540-1547.
- [5] 黄卫红, 赵天珍, 赵柳青, 王力, 陆晓华. 六氯苯对原生动物四膜虫的生物毒性实验室研究. 环境科学与技术, 2006, 29(12): 11-13.
- [6] 沈韞芬, 章宗涉, 龚循矩, 顾曼如, 施之新, 魏印心. 微型生物监测新技术. 北京: 中国建筑工业出版社, 1990: 1-524.
- [10] 陈廷, 黄建荣, 陈晟平, 邱文智, 林铁豪, 郑则俊, 温少明, 徐润林. 广州市区人工湖泊 PFU 原生动物群落群集过程及其对水质差异的指示作用. 应用与环境生物学报, 2004, 10(3): 310-314.
- [11] 王新华, 陆晓华, 沈韞芬. PFU 微型生物群落采样法研究有机氯污染物在水中相间分布. 水生生物学报, 2005, 29(1): 65-69.
- [12] 李凤超, 冯伟松, 王军霞, 王宏伟, 管越强, 沈韞芬. 保定市工业废水对白洋淀微型生物群落的生态毒性. 应用与环境生物学报, 2005, 11(3): 315-318.
- [13] 廖庆玉, 章金鸿, 李玫, 卢彦, 魏鸿辉, 徐润林. 海南东寨港红树林土壤原生动物的群落结构特征. 生态环境, 2008, 17(3): 1077-1081.
- [14] 田果, 龚大洁, 闫礼, 漆朝辉. 原生动物在生物监测中的作用与应用. 生物学通报, 2009, 44(10): 11-13.
- [15] 周群英, 高廷耀. 环境工程微生物学. 北京: 高等教育出版社, 2000: 292-293.
- [16] 李凤超, 赵玉娟, 张强, 张彦, 李丽. 白洋淀轮虫多样性及群落结构的初步研究. 四川动物, 2011, 30(5): 734-736.
- [17] 郑小燕, 王丽卿. 淀山湖原生动物种类组成及数量变动. 生态学杂志, 2009, 28(1): 51-57.
- [18] 陈立婧, 顾静, 胡忠军, 彭自然, 刘其根. 上海崇明明珠湖原生动物的群落结构. 水产学报, 2010, 34(9): 1404-1413.
- [19] 刘存歧, 邢晓光, 王军霞, 张亚娟. 白洋淀轮虫群落结构特征. 生态学报, 2010, 30(18): 4948-4959.
- [20] 赵风云, 孙根行. 工业废水生物毒性的研究进展. 工业水处理, 2010, 30(4): 22-25.
- [23] 陈小云, 刘满强, 胡锋, 毛小芳, 李辉信. 根际微型土壤动物——原生动物和线虫的生态功能. 生态学报, 2007, 27(8): 3132-3134.
- [24] 赵峰, 徐奎栋. 土壤原生动物研究方法. 生态学杂志, 2010, 29(5): 1028-1034.
- [25] 赵建亮, 方怡向, 应光国. 工业废水毒性鉴定评价方法体系的建议及其应用示例. 生态环境学报, 2011, 20(3): 549-559.

# ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 32, No. 23 December, 2012 (Semimonthly)

## CONTENTS

|                                                                                                                                                                                        |                                                          |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|
| Maternal thermoregulation during gestation affects the phenotype of hatchling Chinese skinks ( <i>Eumeces chinensis</i> ): testing the maternal manipulation hypothesis .....          | LI Hong, ZHOU Zongshi, WU Yanqing, et al (7255)          |
| Effects of conspecific and interspecific interference competitions on cache site selection of Siberian chipmunks ( <i>Tamias sibiricus</i> ) ... ..                                    | SHEN Zhen, DONG Zhong, CAO Lingli, et al (7264)          |
| Characterization of ammonia volatilization from polluted river under aeration conditions: a simulation study .....                                                                     | LIU Bo, WANG Wenlin, LING Fen, et al (7270)              |
| Diurnal activity patterns and environmental factors on behaviors of Bar-headed Geese <i>Anser indicus</i> wintering at Caohai Lake of Guizhou, China .....                             | YANG Yanfeng, ZHANG Guogang, LU Jun, et al (7280)        |
| Impacts of snow cover change on soil water-heat processes of swamp and meadow in Permafrost Region, Qinghai-Tibetan Plateau .....                                                      | CHANG Juan, WANG Gengxu, GAO Yongheng, et al (7289)      |
| Spatial-temporal changes of urban patch wetlands in Changsha, China .....                                                                                                              | GONG Yingbi, JING Lei, PENG Lei, et al (7302)            |
| Modeling of carbon and water fluxes of Qianyanzhou subtropical coniferous plantation using model-data fusion approach .....                                                            | REN Xiaoli, HE Honglin, LIU Min, et al (7313)            |
| Ecological compensation standard for controlling nitrogen non-point pollution from farmland: a case study of Yixing City in Jiang Su Province .....                                    | ZHANG Yin, ZHOU Yuchen, SUN Hua (7327)                   |
| Static toxicity evaluation of chemical wastewater by PFU microbial communities method .....                                                                                            | LI Zhaoxia, ZHANG Yuguo, LIANG Huixing (7336)            |
| Emergy evaluation of an agro-circulation system in Beijing suburb: take Jianyan village as a case study .....                                                                          | ZHOU Liandi, HU Yanxia, WANG Yazhi, et al (7346)         |
| Research on the cooling effect of Xi'an parks in summer based on remote sensing .....                                                                                                  | FENG Xiaogang, SHI Hui (7355)                            |
| The dynamics of spatial and temporal changes to forested land and key factors driving change on Hainan Island .....                                                                    | WANG Shudong, OUYANG Zhiyun, ZHANG Cuiping, et al (7364) |
| Impact of different sowing dates on green water footprint of maize in western Jilin Province .....                                                                                     | QIN Lijie, JIN Yinghua, DUAN Peili (7375)                |
| The dynamic variation of maize ( <i>Setaria mays</i> L.) population growth characteristics under cultivars-intercropped on the Loess Plateau ... ..                                    | WANG Xiaolin, ZHANG Suiqi, WANG Shuqing, et al (7383)    |
| Effect of different planting methods on root-shoot characteristics and grain yield of summer maize under high densities .....                                                          | LI Zongxin, CHEN Yuanquan, WANG Qingcheng, et al (7391)  |
| Heavy metal contaminant in development process of artificial biological Soil Crusts in sand-land .....                                                                                 | XU Jie, AO Yanqing, ZHANG Jingxia, et al (7402)          |
| Effects of enhanced UV-B radiation and nitrogen on photosynthetic pigments and non-enzymatic protection system in leaves of foxtail millet ( <i>Setaria italica</i> (L.) Beauv.) ..... | FANG Xing, ZHONG Zhangcheng (7411)                       |
| Photosynthetic response of different ecotype of <i>Illicium lanceolatum</i> seedlings to drought stress and rewating .....                                                             | CAO Yonghui, ZHOU Benzhi, CHEN Shuanglin, et al (7421)   |
| Seasonal variations in the stems of <i>Larix principis-rupprechtii</i> at the treeline of the Luya Mountains .....                                                                     | DONG Manyu, JIANG Yuan, WANG Mingchang, et al (7430)     |
| Influence of terrain on plant biomass estimates by remote sensing: a case study of Guangzhou City, China .....                                                                         | SONG Weiwei, GUAN Dongsheng, WANG Gang (7440)            |
| Effects of exponential fertilization on biomass allocation and root morphology of <i>Catalpa bungei</i> clones .....                                                                   | WANG Lipeng, YAN Ziyi, LI Jiyue, et al (7452)            |
| Effects of fire damages on <i>Larix gmelinii</i> radial growth at Tahe in Daxing'an Mountains, China .....                                                                             | WANG Xiaochun, LU Yongxian (7463)                        |
| A model for water consumption by mountain jujube pear-like .....                                                                                                                       | XIN Xiaogui, WU Pute, WANG Youke, et al (7473)           |
| Specificity of photosystems function change of two kinds of overwintering broadleaf evergreen plants .....                                                                             | ZHONG Chuanfei, ZHANG Yuntao, WU Xiaoying, et al (7483)  |

- Effects of drought on fluorescence characteristics of photosystem II in leaves of *Ginkgo biloba* ..... WEI Xiaodong, CHEN Guoxiang, SHI Dawei, et al (7492)
- Numerical classification and ordination of forest communities in habitat of Sichuan Snub-nosed Monkey in Hubei Shennongjia National Nature Reserve ..... LI Guangliang, CONG Jing, LU Hui, et al (7501)
- Impact of inorganic anions on the cadmium effective fraction in soil and its phytoavailability during salinization in alkaline soils ..... WANG Zuwei, YI Liangpeng, GAO Wenyan, et al (7512)
- Photosynthetic adaptability of the resistance ability to weak light of 2 species *Spiraea* L. .... LIU Huimin, MA Yanli, WANG Baichen, et al (7519)
- Fine root longevity and controlling factors in a *Phoebe Bournei* plantation ..... ZHENG Jinxing, HUANG Jinxue, WANG Zhenzhen, et al (7532)
- Analysis on spatial structure and scenarios of carbon dioxide emissions from tourism transportation ..... XIAO Xiao, ZHANG Jie, LU Junyu, et al (7540)
- The hydrological response to human activities in Guishui River Basin, Beijing ..... LIU Yuming, ZHANG Jing, WU Pengfei, et al (7549)
- Socio-economic impacts of under-film drip irrigation technology and sustainable assessment: a case in the Manas River Basin, Xinjiang, China ..... FAN Wenbo, WU Pute, MA Fengmei (7559)
- Effects of pattern and timing of high temperature exposure on the mortality and fecundity of *Aphis gossypii* Glover on cotton ..... GAO Guizhen, LÜ Zhaozhi, XIA Deping, et al (7568)
- Physiological responses of *Eucalyptus* trees to infestation of *Leptocybe invasa* Fisher & La Salle ..... WU Yaojun, CHANG Mingshan, SHENG Shuang, et al (7576)
- Carbon storage capacity of a *Betula alnoides* stand and a mixed *Betula alnoides* × *Castanopsis hystrix* stand in Southern Subtropical China: a comparison study ..... HE Youjun, QIN Lin, LI Zhiyong, et al (7586)
- Distribution and ecological risk assessment of 7 heavy metals in urban forest soils in Changsha City ..... FANG Xi, TANG Zhijuan, TIAN Dalun, et al (7595)
- Review and Monograph**
- The relationship between humans and the environment at the urban-rural interface: research progress and prospects ..... HUANG Baorong, ZHANG Huizhi (7607)
- Flux footprint of carbon dioxide and vapor exchange over the terrestrial ecosystem: a review ..... ZHANG Hui, SHEN Shuanghe, WEN Xuefa, et al (7622)

# 《生态学报》2013 年征订启事

《生态学报》是中国生态学学会主办的生态学专业性高级学术期刊,创刊于 1981 年。主要报道生态学研究原始创新性科研成果,特别欢迎能反映现代生态学发展方向的优秀综述性文章;研究简报;生态学新理论、新方法、新技术介绍;新书评介和学术、科研动态及开放实验室介绍等。

《生态学报》为半月刊,大 16 开本,300 页,国内定价 90 元/册,全年定价 2160 元。

国内邮发代号:82-7,国外邮发代号:M670

标准刊号:ISSN 1000-0933 CN 11-2031/Q

全国各地邮局均可订阅,也可直接与编辑部联系购买。欢迎广大科技工作者、科研单位、高等院校、图书馆等订阅。

通讯地址:100085 北京海淀区双清路 18 号 电 话:(010)62941099; 62843362

E-mail: shengtaixuebao@rcees.ac.cn 网 址: www.ecologica.cn

编辑部主任 孔红梅 执行编辑 刘天星 段 靖

生 态 学 报

(SHENGTAI XUEBAO)

(半月刊 1981 年 3 月创刊)

第 32 卷 第 23 期 (2012 年 12 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 32 No. 23 (December, 2012)

|               |                                                                                                                    |                 |                                                                                                                                                                                 |
|---------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 编 辑           | 《生态学报》编辑部<br>地址:北京海淀区双清路 18 号<br>邮政编码:100085<br>电话:(010)62941099<br>www.ecologica.cn<br>shengtaixuebao@rcees.ac.cn | Edited by       | Editorial board of<br>ACTA ECOLOGICA SINICA<br>Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China<br>Tel:(010)62941099<br>www.ecologica.cn<br>Shengtaixuebao@rcees.ac.cn |
| 主 编           | 冯宗炜                                                                                                                | Editor-in-chief | FENG Zong-Wei                                                                                                                                                                   |
| 主 管           | 中国科学技术协会                                                                                                           | Supervised by   | China Association for Science and Technology                                                                                                                                    |
| 主 办           | 中国生态学学会<br>中国科学院生态环境研究中心<br>地址:北京海淀区双清路 18 号<br>邮政编码:100085                                                        | Sponsored by    | Ecological Society of China<br>Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS<br>Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China                                 |
| 出 版           | 科 学 出 版 社<br>地址:北京东黄城根北街 16 号<br>邮政编码:1000717                                                                      | Published by    | Science Press<br>Add:16 Donghuangchenggen North Street,<br>Beijing 100717, China                                                                                                |
| 印 刷           | 北京北林印刷厂                                                                                                            | Printed by      | Beijing Bei Lin Printing House,<br>Beijing 100083, China                                                                                                                        |
| 发 行           | 科 学 出 版 社<br>地址:东黄城根北街 16 号<br>邮政编码:100717<br>电话:(010)64034563<br>E-mail:journal@cspg.net                          | Distributed by  | Science Press<br>Add:16 Donghuangchenggen North<br>Street, Beijing 100717, China<br>Tel:(010)64034563<br>E-mail:journal@cspg.net                                                |
| 订 购           | 全国各地邮局                                                                                                             | Domestic        | All Local Post Offices in China                                                                                                                                                 |
| 国外发行          | 中国国际图书贸易总公司<br>地址:北京 399 信箱<br>邮政编码:100044                                                                         | Foreign         | China International Book Trading<br>Corporation<br>Add:P. O. Box 399 Beijing 100044, China                                                                                      |
| 广告经营<br>许 可 证 | 京海工商广字第 8013 号                                                                                                     |                 |                                                                                                                                                                                 |



ISSN 1000-0933  
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 70.00 元