

ISSN 1000-0933  
CN 11-2031/Q

# 生态学报

## Acta Ecologica Sinica



第32卷 第13期 Vol.32 No.13 **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



# 生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

中国科学院科学出版基金资助出版

第 32 卷 第 13 期 2012 年 7 月 (半月刊)

## 目 次

|                                                               |                         |
|---------------------------------------------------------------|-------------------------|
| 砂质潮间带自由生活海洋线虫对缺氧的响应——微型受控生态系研究.....                           | 华 尔, 李 佳, 董 洁, 等 (3975) |
| 植物种群自疏过程中构件生物量与密度的关系 .....                                    | 黎 磊, 周道玮, 盛连喜 (3987)    |
| 基于景观感知敏感度的生态旅游地观光线路自动选址.....                                  | 李继峰, 李仁杰 (3998)         |
| 基于能值的沼气农业生态系统可持续发展水平综合评价——以恭城县为例.....                         | 杨 谨, 陈 彬, 刘耕源 (4007)    |
| 内蒙古荒漠草原植被盖度的空间异质性动态分析.....                                    | 颜 亮, 周广胜, 张 峰, 等 (4017) |
| 典型草地的土壤保持价值流量过程比较.....                                        | 裴 厦, 谢高地, 李士美, 等 (4025) |
| 长沙市区马尾松人工林生态系统碳储量及其空间分布.....                                  | 巫 涛, 彭重华, 田大伦, 等 (4034) |
| 厦门市七种药用植物根围 AM 真菌的侵染率和多样性 .....                               | 姜 攀, 王明元 (4043)         |
| Cd、低 Pb/Cd 下冬小麦幼苗根系分泌物酚酸、糖类及与根际土壤微生物活性的关系 .....               | 贾 夏, 董岁明, 周春娟 (4052)    |
| 凉水保护区土壤产类漆酶-多铜氧化酶细菌群落结构 .....                                 | 赵 丹, 谷惠琦, 崔岱宗, 等 (4062) |
| 盐渍化土壤根际微生物群落及土壤因子对 AM 真菌的影响.....                              | 卢鑫萍, 杜 茜, 闫永利, 等 (4071) |
| 菌丝室接种解磷细菌 <i>Bacillus megaterium</i> C4 对土壤有机磷矿化和植物吸收的影响..... | 张 林, 丁效东, 王 菲, 等 (4079) |
| 闽江河口不同河段芦苇湿地土壤碳氮磷生态化学计量学特征.....                               | 王维奇, 王 纯, 曾从盛, 等 (4087) |
| 高山森林三种细根分解初期微生物生物量动态.....                                     | 武志超, 吴福忠, 杨万勤, 等 (4094) |
| 模拟降水对古尔班通古特沙漠生物结皮表观土壤碳通量的影响 .....                             | 吴 林, 苏延桂, 张元明 (4103)    |
| 铁皮石斛组培苗移栽驯化过程中叶片光合特性、超微结构及根系活力的变化 .....                       | 濮晓珍, 尹春英, 周晓波, 等 (4114) |
| 不同产量水平旱地冬小麦品种干物质累积和转移的差异分析.....                               | 周 玲, 王朝辉, 李富翠, 等 (4123) |
| 基于作物模型的低温冷害对我国东北三省玉米产量影响评估.....                               | 张建平, 王春乙, 赵艳霞, 等 (4132) |
| 黄土高原 1961—2009 年参考作物蒸散量的时空变异.....                             | 李 志 (4139)              |
| 莫莫格湿地芦苇对水盐变化的生理生态响应.....                                      | 邓春暖, 章光新, 李红艳, 等 (4146) |
| 不同蚯蚓采样方法对比研究.....                                             | 范如芹, 张晓平, 梁爱珍, 等 (4154) |
| 亚洲玉米螟成虫寿命与繁殖力的地理差异.....                                       | 涂小云, 陈元生, 夏勤雯, 等 (4160) |
| 黑河上游天然草地蝗虫空间异质性与分布格局.....                                     | 赵成章, 李丽丽, 王大为, 等 (4166) |
| 苦瓜叶乙酸乙酯提取物对斜纹夜蛾实验种群的抑制作用.....                                 | 骆 颖, 凌 冰, 谢杰峰, 等 (4173) |
| 长江口中国花鲈食性分析.....                                              | 洪巧巧, 庄 平, 杨 刚, 等 (4181) |
| 基于线粒体控制区序列的黄河上游厚唇裸重唇鱼种群遗传结构.....                              | 苏军虎, 张艳萍, 娄忠玉, 等 (4191) |
| 镉暴露对黑斑蛙精巢 ROS 的诱导及其蛋白质氧化损伤作用机理 .....                          | 曹 慧, 施蔡雷, 贾秀英 (4199)    |
| 北方草地牛粪中金龟子的多样性.....                                           | 樊三龙, 方 红, 高传部, 等 (4207) |
| 合肥秋冬季茶园天敌对假眼小绿叶蝉和茶蚜的空间跟随关系.....                               | 杨 林, 郭 骅, 毕守东, 等 (4215) |
| 植被、海拔、人为干扰对大中型野生动物分布的影响——以九寨沟自然保护区为例.....                     | 张 跃, 雷开明, 张语克, 等 (4228) |
| 基于社会网络分析法的生态工业园典型案例研究.....                                    | 杨丽花, 佟连军 (4236)         |
| 基于生命周期的户用沼气系统可用能核算——以广西恭城瑶族自治县为例.....                         | 齐 静, 陈 彬, 戴 婧, 等 (4246) |
| <b>专论与综述</b>                                                  |                         |
| 水文情势与盐分变化对湿地植被的影响研究综述 .....                                   | 章光新 (4254)              |
| 松嫩碱化草甸土壤种子库格局、动态研究进展 .....                                    | 马红媛, 梁正伟, 吕丙盛, 等 (4261) |
| 一种新的景观扩张指数的定义与实现 .....                                        | 武鹏飞, 周德民, 官辉力 (4270)    |
| <b>研究简报</b>                                                   |                         |
| 华山新麦草光合特性对干旱胁迫的响应.....                                        | 李 倩, 王 明, 王雯雯, 等 (4278) |
| 美丽海绵提取物防污损作用.....                                             | 曹文浩, 严 涛, 刘永宏, 等 (4285) |

期刊基本参数: CN 11-2031/Q \* 1981 \* m \* 16 \* 306 \* zh \* P \* ¥ 70.00 \* 1510 \* 37 \* 2012-07



封面图说: 涵养水源——在长白山南坡的峭壁上, 生长在坡面上的森林所涵养的水源还在汨汨地往下流个不停, 深红色的落叶掉在了苔藓上, 这里已经是长白山的深秋了。虽然雨季已经过去了很久, 但是林下厚厚的枯枝落叶层、腐殖质层、苔藓草本层所涵养的水分还在不间断地流淌, 细细的水线在壁下汇成了溪、汇成了河。涵养水源是森林的主要生态功能之一。

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

DOI: 10.5846/stxb201106080765

华尔, 李佳, 董洁, 徐风风, 张志南. 砂质潮间带自由生活海洋线虫对缺氧的响应——微型受控生态系研究. 生态学报, 2012, 32(13): 3975-3986.  
Hua E, Li J, Dong J, Xu F F, Zhang Z N. Responses of sandy beach nematodes to oxygen deficiency: microcosm experiments. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(13): 3975-3986.

## 砂质潮间带自由生活海洋线虫对缺氧的响应 ——微型受控生态系研究

华 尔<sup>1,\*</sup>, 李 佳<sup>1</sup>, 董 洁<sup>1,2</sup>, 徐风风<sup>1</sup>, 张志南<sup>1</sup>

(1. 中国海洋大学, 海洋生命学院, 青岛 266003; 2. 东营市海洋与渔业局, 东营 257091)

**摘要:**以青岛砂质潮间带自由生活海洋线虫为研究对象, 建立微型受控生态系, 研究缺氧对海洋线虫群落结构和垂直分布的影响, 以及环境复氧后海洋线虫群落的恢复能力。研究结果显示, 海洋线虫是耐低氧的小型底栖动物类群, 可通过垂直迁移来耐受缺氧造成的不利条件。但是, 海洋线虫通过主动迁出而耐受缺氧条件的特性具有种的区别。研究中 *Pseudosteiniera* sp1、*Rhynchonema* sp1 等海洋线虫通过向有氧环境的主动迁移耐受缺氧条件; *Thalassironus* sp1 却可通过自身耐受机制抵御缺氧条件, 在缺氧生境中仍能保持较高的丰度。此外, 研究结果显示, 当表层海洋线虫暴露于缺氧环境时, 其总丰度显著降低, 种类组成发生改变。 *Pseudosteiniera* sp1 对缺氧环境较为敏感, 可暂时性地离开沉积物进入水层; 而沉积物溶解氧恢复正常后, 该种可以重新回到沉积物中。 *Daptonema* sp1 成熟个体及其幼龄个体对缺氧均具有较高的耐受性, 是缺氧群落的绝对优势种。 *D.* sp3 则表现出对缺氧环境较高的敏感性。环境恢复正常, 线虫群落丰度及多样性增加, *Neochromadora* sp1 和 *Spilophorella* sp1 等具有机会种的特点, 首先表现出丰度和繁殖能力的增加。但是线虫群落种类组成在受测时间内并未能完全恢复, 群落结构的恢复需要更长的时间。

**关键词:** 缺氧; 自由生活海洋线虫; 微型受控生态系; 群落结构; 垂直分布

## Responses of sandy beach nematodes to oxygen deficiency: microcosm experiments

HUA Er<sup>1,\*</sup>, LI Jia<sup>1</sup>, DONG Jie<sup>2</sup>, XU Fengfeng<sup>1</sup>, ZHANG Zhinan<sup>1</sup>

1 College of Marine Life Science, Ocean University of China, Qingdao 266003, China

2 Dongying City Ocean and Fishery Bureau, Dongying 257091, China

**Abstract:** The community structure and vertical distribution of the nematode fauna in relation to oxygen deficiency, and their ability for recovery after re-establishment of normal oxygen conditions, were investigated in laboratory microcosms. Perspex cores of sediment (i. d 2.9cm) were collected to a depth of 5 cm from the sandy beach in the Huiquan Bay, Qingdao (China) in November 2009, and incubated in laboratory microcosms. The vertical distribution of nematodes was examined in response to sediment inversion in these cores with the presence of an air-flushed silicone tube introducing oxygen to the sediment layer (laboratory microcosm I). Three cores were directly filled with fresh sea water and continuously aerated. This was the control treatment. In three other cores, the sediment was first turned upside down, imposing anoxic conditions on the original surface sediment (referred to as the upside down treatment). Following an incubation of 1 week, peak densities of nematodes were recorded in the surface sediment in cores with oxygenation. This suggests that oxidized sediments provided favorable conditions for nematodes and indicated that these nematodes may migrate

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(40906063, 40730847); 国家海洋局近岸海域生态环境重点实验室基金资助(200804)

**收稿日期:** 2011-06-08; **修订日期:** 2011-11-10

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: huaer@ouc.edu.cn

in the sediment as a response to low oxygen conditions. Observations on the species level suggested that vertical migrations of nematodes are in some cases species-specific. *Pseudosteinaria* sp1 and *Rhynchonema* sp1 might avoid low oxygen condition by migrating into the oxidized sediment, while *Thalassironus* sp1 could survive the reduced oxygen conditions and was found in high density in the bottom sediments with low oxygen. In laboratory microcosm II, community structure of nematodes was examined in response to anoxic conditions without the presence of an air-flushed silicone tube introducing oxygen to the sediment layer. Surface (0—2 cm) sediments were collected on March 2010 from the studied site at low tide and these layers of sediment were incubated in perspex jars (i. d. 11.5 cm; height 8.5 cm). All jars were directly filled with fresh sea water and sealed tightly. The controls were flushed with air and the anoxic treatments were not flushed throughout the incubation. All treatments were incubated for 14 days. In another treatment, four jars were made anoxic for 14 days and subsequently reoxygenated with air for 10 days to examine the nematodes ability for recovery when normal oxygen conditions were re-established. The final densities of nematodes and of the dominant species were assessed. After anoxic incubation, nematode density and biodiversity was reduced and community structure changed. Survival in anoxic conditions was species-specific. *Pseudosteinaria* sp1 was sensitive to anoxic conditions and might emerge into the water column and colonize sediments after re-establishment of normal oxygen conditions. *Daptonema* sp3 was quite sensitive while *Daptonema* sp1, both adults and juveniles, was more tolerant to anoxic conditions, with its density increasing in anoxic conditions and becoming the most dominant species. Nematode density and biodiversity increased after reoxygenation of anoxic sediment. The densities and reproduction of *Neochromadora* sp1 and *Spilophorella* sp1 increased quickly after oxygen restoration in anoxic incubations. This suggests that these 2 species might act as opportunistic species. However, nematode community structure was not restored and such restoration may need a longer time.

**Key Words:** oxygen deficiency; free living nematodes; microcosm; community structure; vertical distribution

沉积物溶解氧是影响底栖动物分布的主要因素之一。沉积物溶解氧含量低会对小型底栖动物群落产生影响<sup>[1-4]</sup>。各国学者在全球不同的海岸、海湾、河口、大陆架甚至在深海,如东太平洋、阿拉伯海、东大西洋上升流高生产力区的最低氧含量区(Oxygen minimum zone, OMZ),开展的研究结果显示,缺氧/无氧条件下小型底栖动物的丰度、物种多样性均降低,而自由生活海洋线虫(以下简称海洋线虫)的相对优势度却增加<sup>[5-9]</sup>。海洋线虫是小型底栖动物类群中最耐缺氧及无氧生境的生物类群之一,被普遍认为是缺氧、无氧及硫化底栖生态系的重要组成成分<sup>[2,8,10]</sup>。近年来,学者们十分关注海洋线虫对缺氧生境的生态响应机制的揭示<sup>[3,11-13]</sup>,研究方法也日趋成熟,成为耐缺氧机制研究的重要组成部分。由于大多数海洋线虫的生活周期短,在自然条件下存在着世代重叠,仅靠野外调查很难得到答案。因此,微型受控生态系(Microcosms,以下简称受控生态系)是实验室内进行机制研究的主要手段,可以有效地弥补野外研究中的不足。

在我国,以砂质潮间带、陆架潮下带等自然生态环境中海洋线虫为研究对象,开展了群落生态、生物多样性、粒径谱、种群动态、实验室培养、摄食和生活史的研究<sup>[14-25]</sup>。但是,有关底栖动物对缺氧响应机制的研究很少<sup>[26-27]</sup>,有关海洋线虫对缺氧响应机制的研究几乎为空白。在研究方法上,实验室模拟研究一直是我国底栖动物生态学研究需要深入的环节之一。

本研究以青岛砂质潮间带海洋线虫为研究对象建立室内受控生态系,研究目的是:(1)了解缺氧环境对海洋线虫群落结构和垂直分布的影响;(2)了解环境复氧后海洋线虫群落的恢复能力。

## 1 研究方法

### 1.1 受控生态系设计和研究方法

#### 1.1.1 受控生态系 I——缺氧对海洋线虫群落垂直分布的影响

2009年11月低潮时,在青岛汇泉湾第一海水浴场潮间带,利用2.9 cm直径采样管(由60 mL注射器改造)采集砂质底新鲜沉积物表层(0—5 cm)样品9管。3管现场分层(0—1、1—2、2—3、3—4、4—5 cm),装瓶、

5% 福尔马林溶液固定,作为野外平行对照样(标记为 F)。其他 6 管样品,将采样管上下封闭带回实验室,其中 3 管正置,上覆海水至顶,由管的顶部连续充气,作为对照组(标记为 C)。另 3 管倒置,上覆海水至顶,并由管的顶部连续充气(标记为 U),受控生态系 I 见图 1。将受控系置于 WMK-08 型温度控制器内恒温暗培养(16℃),1 周后实验结束,利用 YSI-52 溶解氧仪测定沉积物溶解氧浓度,将实验沉积物按 1 cm 分层装瓶,用 5% 福尔马林溶液固定小型底栖动物样品。本受控实验系统是在 Steyaert 等<sup>[12]</sup>的受控试验方法的基础上改进而来。

### 1.1.2 受控生态系 II——缺氧对海洋线虫群落结构的影响

2010 年 3 月低潮时,在青岛汇泉湾第一海水浴场潮间带,利用 2.9 cm 直径有机玻璃取样管采集潮间带砂质底新鲜沉积物表层(0—2 cm)样品。每 6 管实验材料转入 550 mL 封口瓶中,其中 4 瓶为野外对照样(标记为 T<sub>0</sub>)。其他样品带回实验室上覆海水至顶部,建立相对封闭的生态系 II(图 1)。根据是否供氧控制水体溶氧量,构建缺氧和正常 2 个受控生态系:其一为缺氧处理不充气(标记为 A);另一处理则始终充气,为供氧对照(标记为 O),利用 YSI-52 溶解氧仪测定沉积物溶解氧为 8—10 mg/L;每个处理设 4 个重复,即 4 瓶。将受控系置于 WMK-08 型温度控制器内恒温暗培养(16℃),14 d 后试验结束,用 5% 的福尔马林溶液固定小型底栖动物样品。本受控实验系统是在 Modig<sup>[3]</sup>、Mahmoudi<sup>[11]</sup>和 Steyaert 等<sup>[13]</sup>的受控试验方法的基础上改进而来。

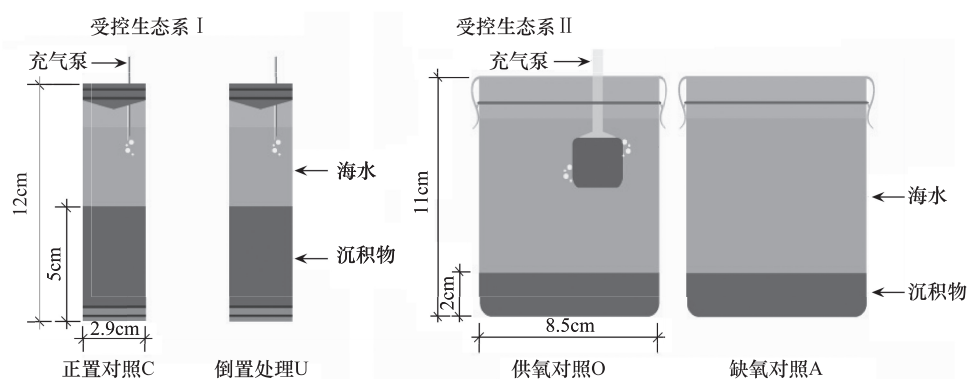


图 1 受控生态系示意图

Fig. 1 Schematic of the experimental set-up

为研究海洋线虫群落结构在复氧后的恢复能力,在受控系 II 中另设 4 瓶缺氧处理(标记为 R),在缺氧恒温培养 14 d 后,恢复充氧,继续恒温培养 10 d 后再进行固定、分选、群落分析。

### 1.2 室内分选及鉴定

将采集的小型底栖动物样品用虎红荧光染液(0.1 g 虎红染料溶于 100 mL 5% 的海水福尔马林中)染色 24 h 后,采用倒上清液水淘洗法分离小型底栖动物<sup>[15,28-30]</sup>。

获得海洋线虫标本进行制片,利用微分干涉差显微镜进行属、种的鉴定<sup>[31-34]</sup>。

### 1.3 数据的处理和统计检验

为了解对照组与实验组间生物数据的差异,本研究应用 SPSS17.0 软件对获得生物数据进行 ANOVA 差异检验。在分析前对数据进行 Levene 检验,当检验显示数据的方差不齐时,对原数据进行对数转换( $\ln(x+1)$ ),并再次进行 Levene 检验至方差齐性。

另外,采用大型多元统计软件(Plymouth: PRIMER5.0)对实验数据进行多变量分析,包括等级聚类(Cluster)、相似性百分比分析(SIMPER)等。

## 2 研究结果

### 2.1 缺氧对自由生活海洋线虫群落垂直分布的影响

在受控生态系 I 研究中,共分选小型底栖动物 13 个类群,海洋线虫为最优势类群,占小型底栖动物丰度

92.5%—96.9%。野外对照 (F) 小型底栖动物丰度为  $(814.42 \pm 171.74)$  个/ $10\text{cm}^2$ ; 正置对照 (C) 丰度为  $(680.62 \pm 126.64)$  个/ $10\text{cm}^2$ ; 倒置上充气处理 (U) 丰度为  $(1121.40 \pm 574.24)$  个/ $10\text{cm}^2$  (表 1)。野外对照 F 和受控生态系的正置对照组 C 之间, 小型底栖动物总丰度没有显著的差异 (图 2, ANOVA,  $P>0.05$ ), 表明受控生态系培育条件基本模拟了野外条件。倒置上充气小型底栖动物丰度与对照组相比, 虽然有所增加, 但差异并不显著的 (ANOVA,  $P>0.05$ )。表明, 实验处理对小型底栖动物总丰度的影响不显著。

表 1 小型底栖动物各类群及其丰度/(个/ $10\text{cm}^2$ )

Table 1 Abundance of main meiofauna groups

|                   | 野外对照 F<br>Field situation |        | 正置对照 C<br>Control treatment |        | 倒置上充气 U<br>Upside down treatment |        |
|-------------------|---------------------------|--------|-----------------------------|--------|----------------------------------|--------|
|                   | 平均 Mean                   | STDEV  | 平均 Mean                     | STDEV  | 平均 Mean                          | STDEV  |
| 线虫 Nematoda       | 780.08                    | 162.16 | 629.62                      | 111.23 | 1083.03                          | 523.59 |
| 桡足类 Copepoda      | 6.56                      | 2.31   | 13.13                       | 7.77   | 14.14                            | 14.07  |
| 多毛类 Polychaeta    | 0.50                      | 0.87   | 0.50                        | 0.87   | 2.02                             | 2.31   |
| 双壳类 Bivalvia      | 0.00                      | 0.00   | 0.00                        | 0.00   | 2.02                             | 2.31   |
| 介形类 Ostracoda     | 0.00                      | 0.00   | 8.08                        | 6.31   | 7.07                             | 8.61   |
| 端足类 Amphipoda     | 1.01                      | 0.87   | 0.50                        | 0.87   | 0.00                             | 0.00   |
| 涟虫 Cumacea        | 0.00                      | 0.00   | 1.01                        | 1.75   | 0.00                             | 0.00   |
| 涡虫 Turbellaria    | 0.50                      | 0.87   | 1.01                        | 0.87   | 1.01                             | 0.87   |
| 腹毛虫 Gastrotricha  | 0.00                      | 0.00   | 0.00                        | 0.00   | 0.00                             | 0.00   |
| 枝角类 Cladocera     | 7.57                      | 1.51   | 4.54                        | 4.01   | 4.04                             | 5.73   |
| 缓步动物 Tardigrada   | 1.51                      | 1.51   | 0.00                        | 0.00   | 0.50                             | 0.87   |
| 其他类群 Other groups | 16.66                     | 12.12  | 22.22                       | 6.83   | 7.57                             | 6.61   |
| 小型底栖动物 Meiofauna  | 814.42                    | 171.74 | 680.62                      | 126.64 | 1121.40                          | 547.24 |

小型底栖动物垂直分布结果表明, 受控生态系正置对照组 C 小型底栖动物在 0—1 cm 和 1—2 cm 分布最多, 丰度随深度的增加而减少。其分布特点与野外对照组小型底栖动物的分布特征无显著差异 (ANOVA,  $P>0.05$ ; 图 3)。倒置处理组 U 小型底栖动物垂直分布与对照组相似 ( $P>0.05$ )。但是, 值得注意的是 U 处理 0—1 cm 层 (实验开始前的 4—5 cm) 小型底栖动物总丰度和海洋线虫丰度均显著高于对照组 (ANOVA, 均  $P<0.05$ ); 其他小型底栖动物 (除线虫外) 丰度并未显著增加 ( $P>0.05$ )。其他各层小型底栖动物及海洋线虫丰度在 U 组与 C 组间的差异均不显著 ( $P>0.05$ )。

小型底栖动物类群组成的垂直分布结果表明, 野外对照 (F) 和受控生态系对照组 (C), 0—1 cm 层小型底栖动物类群最丰富, 随深度增加呈现类群数量减少的趋势 (图 4)。而倒置处理组 (U) 小型底栖动物类群在 4—5 cm 层 (实验开始前的 0—1 cm 层) 最为丰富。

针对沉积物 0—1 cm 和 4—5 cm 层海洋线虫进行种类组成分析。表 2 列出了 F、C 和 U 处理组沉积物 0—1 cm 和 4—5 cm 层海洋线虫群落中的数量优势种。F 组表层 (0—1 cm) 和 4—5 cm 层线虫优势种差异较大; 4—5 cm 层线虫多样性低, 仅检出 *Metadesmolaimus* sp1 和 *Microlaimus* sp1。而在表层, 线虫多样较高, *Pseudosteineria* sp1 和 *Metachromadora* sp1 成为最优势种。受控实验结果显示, 表层和 4—5 cm 层线虫优势种及多样性指数差异不显著 (表 2)。U 组, *Pseudosteineria* sp1、*Metadesmolaimus* sp1 与 *Rhynchonema* sp1 是表层 (实验开始前的 4—5 cm 层) 最主要的优势种。*Pseudosteineria* sp1、*Rhynchonema* sp1 实为对照组表层的优势

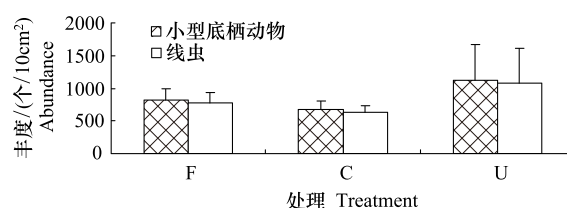


图 2 受控生态系 I 野外对照组 F、正置对照组 C 和倒置处理组 U 小型底栖动物丰度

Fig. 2 Total meiofauna abundance for the field situation (F), the control treatment (C) and the upside down treatment (U) in Laboratory microcosms I (mean values  $\pm$  s. e.)

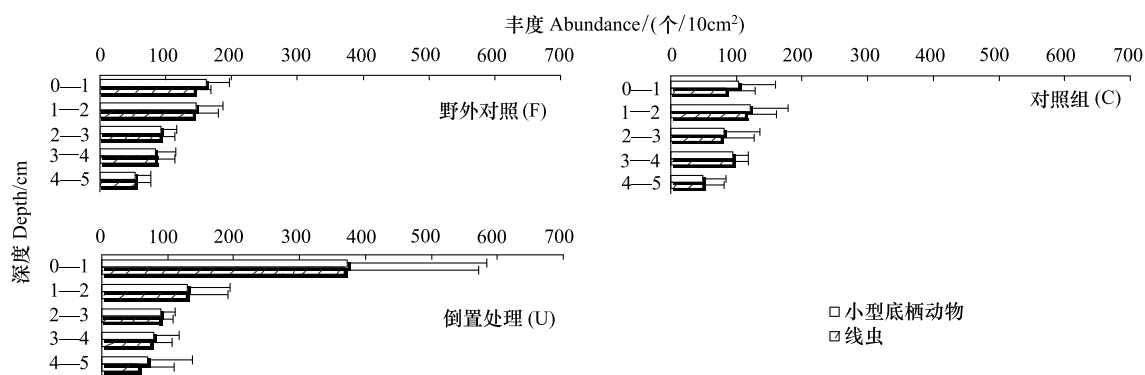


图3 小型底栖动物丰度垂直分布

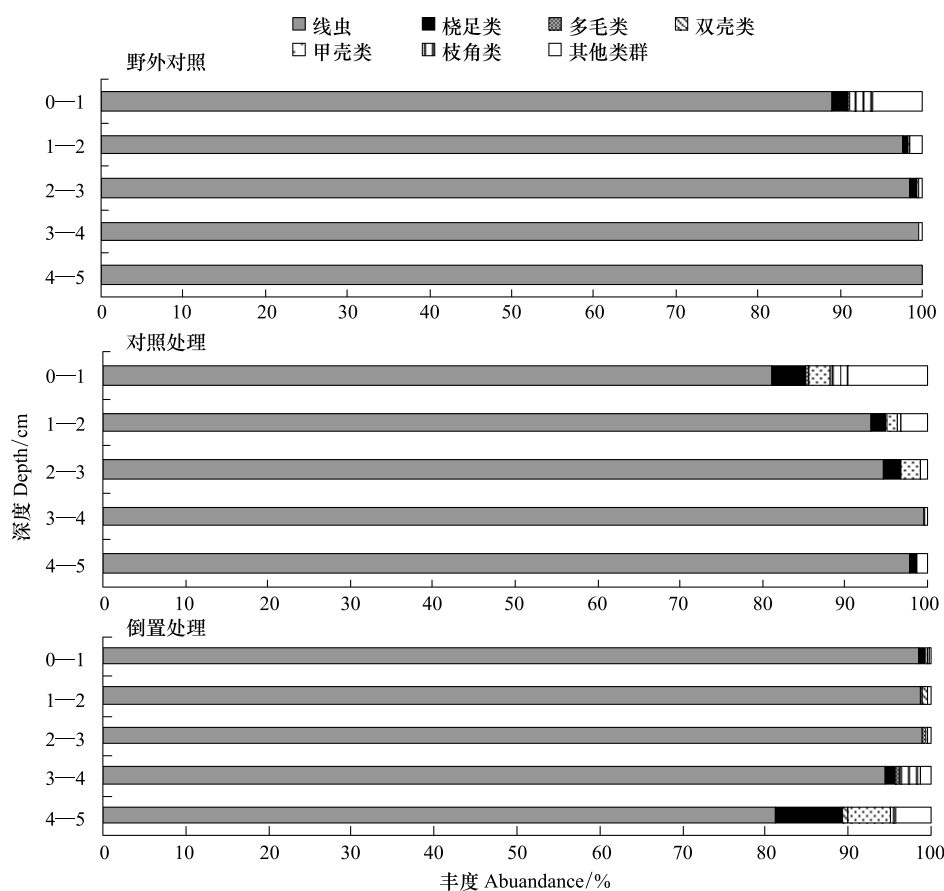
Fig. 3 Vertical distribution of meiofauna abundance (mean values  $\pm$  s. e.)

图4 小型底栖动物类群丰度百分比垂直分布

Fig. 4 Vertical distribution of main groups of meiofauna abundance

种。对照组的4—5 cm层优势种 *Thalassironus* sp1 在U组4—5 cm层(实验开始前的表层)仍具较大优势(优势度为20%)。

## 2.2 缺氧对自由生活海洋线虫群落结构的影响

在受控生态系Ⅱ的研究中,共分选小型底栖动物9个类群,海洋线虫为最优势类群,平均占小型底栖动物总丰度的99%。野外对照组( $T_0$ )小型底栖动物总丰度为( $407.97 \pm 212.96$ ) 个/10cm<sup>2</sup>;供氧对照组(O)丰度为( $394.59 \pm 127.71$ ) 个/10cm<sup>2</sup>;复氧处理组(R)丰度为( $443.18 \pm 18.74$ ) 个/10cm<sup>2</sup>;缺氧处理组(A)丰度最

低,为(240.59 ± 4.99) 个/10cm<sup>2</sup>(图 5)。T<sub>0</sub> 海洋线虫丰度为(405.53 ± 211.58) 个/10cm<sup>2</sup>;O 对照丰度为(390.38 ± 124.08) 个/10cm<sup>2</sup>;R 处理丰度为(437.63 ± 20.53) 个/10cm<sup>2</sup>;A 处理丰度最低,为(237.05 ± 8.22) 个/10cm<sup>2</sup>(图 5)。

表 2 受控实验 I 海洋线虫相对丰度(%)及多样性的比较(列海洋线虫相对丰度>5%)

|                                   | 野外对照 F          |       | 正置对照 C            |       | 倒置上充气 U               |       |
|-----------------------------------|-----------------|-------|-------------------|-------|-----------------------|-------|
|                                   | Field situation |       | Control treatment |       | Upside down treatment |       |
|                                   | 0—1cm           | 4—5cm | 0—1cm             | 4—5cm | 0—1cm                 | 4—5cm |
| <i>Metadesmolaimus</i> sp1        | 0.0             | 87.5  | 39.5              | 22.5  | 21.8                  | 10.0  |
| <i>Rhynchonema</i> sp1            | 0.0             | 0.0   | 11.6              | 7.5   | 19.0                  | 5.0   |
| <i>Chromadorita</i> sp1           | 0.0             | 0.0   | 9.3               | 0.0   | 0.0                   | 0.0   |
| <i>Pseudosteiniera</i> sp1        | 39.6            | 0.0   | 9.3               | 5.0   | 23.4                  | 15.0  |
| <i>Viscosia</i> sp1               | 0.0             | 0.0   | 9.3               | 17.5  | 0.0                   | 5.0   |
| <i>Bathylaimus</i> sp1            | 0.0             | 0.0   | 7.0               | 7.5   | 7.3                   | 0.0   |
| <i>Trichotheistis</i> sp1         | 0.0             | 0.0   | 7.0               | 0.0   | 7.7                   | 15.0  |
| <i>Microaimus</i> sp1             | 8.3             | 12.5  | 4.7               | 0.0   | 6.9                   | 5.0   |
| <i>Thalassironus</i> sp1          | 0.0             | 0.0   | 0.0               | 27.5  | 0.0                   | 20.0  |
| <i>Chaetonema</i> sp2             | 0.0             | 0.0   | 0.0               | 5.0   | 0.0                   | 0.0   |
| <i>Metachromadora</i> sp1         | 14.6            | 0.0   | 0.0               | 5.0   | 0.0                   | 0.0   |
| <i>Oncholaimus</i> sp1            | 6.3             | 0.0   | 0.0               | 0.0   | 0.0                   | 0.0   |
| <i>Spilophorella</i> sp1          | 6.3             | 0.0   | 0.0               | 0.0   | 0.0                   | 10.0  |
| <i>Neochromadora</i> sp1          | 0.0             | 0.0   | 2.3               | 0.0   | 5.6                   | 0.0   |
| <i>Cobbia</i> sp1                 | 0.0             | 0.0   | 0.0               | 0.0   | 0.0                   | 10.0  |
| <i>Promonhystera</i> sp1          | 0.0             | 0.0   | 0.0               | 0.0   | 0.0                   | 5.0   |
| 种数 Total number of species        | 14              | 2     | 9                 | 9     | 17                    | 10    |
| 多样性指数 H'                          | 2.08            | 0.38  | 1.88              | 1.93  | 2.11                  | 2.18  |
| Shannon-Wiener diversity index H' |                 |       |                   |       |                       |       |

野外对照 T<sub>0</sub> 和受控生态系供氧对照处理 O 组间,小型底栖动物和海洋线虫丰度没有显著的差异(ANOVA,  $P>0.05$ ),表明室内生态系培育条件基本模拟了野外条件。缺氧处理 A 小型底栖动物和海洋线虫丰度显著低于供氧对照组 O 和 T<sub>0</sub>(ANOVA,  $P<0.05$ )。在复氧处理 R 中,小型底栖动物及海洋线虫丰度增加,与 T<sub>0</sub> 和供氧对照 O 差异不显著(ANOVA,  $P>0.05$ )。

本研究共鉴定海洋线虫 23 个种或分类实体单元。其中,T<sub>0</sub> 和供氧对照 O 中鉴定线虫 17 和 16 种,缺氧处理 A 和复氧处理 R 均为 15 种。T<sub>0</sub> 和供氧对照 O 线虫群落多样性较高,优势种相似(表 3)。缺氧处理 A 海洋线虫多样性最低,*Daptonema* sp1 的优势非常明显(53.6%)。复氧后,海洋线虫多样性增加,除 *Daptonema* sp1 外,*Spilophorella* sp1,*Paramonhystera* sp1 等成为最主要的优势种。对线虫群落在种水平上进行 Cluster 分析,树状聚类图清晰地显示,缺氧处理和复氧处理线虫群落相似性达 76.89%,与 T<sub>0</sub> 和供氧对照相似性较低(图 6)。

相似性百分比分析(SIMPER)结果表明,缺氧 A、复氧 R 处理与供氧对照 C 组间的差异主要是由个别优势线虫引起,其中 *Daptonema* sp1、*Spilophorella* sp1、*Neochromadora* sp1 在缺氧、复氧处理中的丰度显著高于供

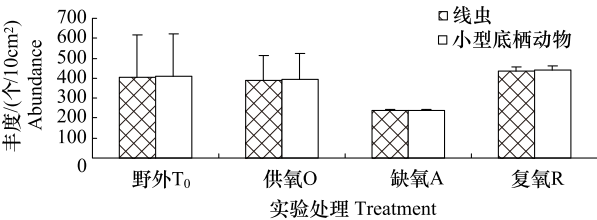


图 5 野外对照及受控生态系小型底栖动物丰度

Fig.5 Total nematode and meiofauna abundance for the field situation T<sub>0</sub>, the oxygenated control (O), the anoxic treatment (A) and the reoxygenated treatment (R) (mean values ± s. e.)

氧对照组;而 *Pseudosteiniera* sp1 和 *Daptonema* sp3 丰度在供氧对照组高(表 4)。

表 3 受控实验 II 海洋线虫相对丰度(%)比较(列海洋线虫相对丰度>5%)

Table 3 List of nematode species >5% for the field situation T<sub>0</sub>, the oxygenated control (O), the anoxic treatment (A) and the reoxygenated treatment (R)

|                                   | 野外 T <sub>0</sub><br>Field situation | 对照 O<br>Oxygenated control | 缺氧 A<br>Anoxic treatment | 复氧 R<br>Reoxygenated treatment |
|-----------------------------------|--------------------------------------|----------------------------|--------------------------|--------------------------------|
| <i>Chromadorita</i> sp1           |                                      |                            | 6.3                      |                                |
| <i>Daptonema</i> sp1              | 6.0                                  | 10.3                       | 53.6                     | 28.6                           |
| <i>Daptonema</i> sp3              |                                      | 14.5                       |                          |                                |
| <i>Metadesmolaimus</i> sp1        | 12.5                                 | 9.0                        |                          | 5.6                            |
| <i>Neochromadora</i> sp1          |                                      |                            |                          | 8.3                            |
| <i>Paramonhystera</i> sp1         | 10.1                                 | 18.6                       | 10.9                     | 12.7                           |
| <i>Pseudosteiniera</i> sp1        | 21.4                                 | 15.2                       |                          | 8.7                            |
| <i>Rhynchonema</i> sp1            | 6.5                                  | 12.4                       |                          | 6.0                            |
| <i>Spilophorella</i> sp1          | 12.5                                 | 7.6                        | 9.4                      | 17.5                           |
| <i>Theristus</i> sp1              | 6.5                                  |                            |                          |                                |
| <i>Trichotheristus</i> sp1        | 13.1                                 |                            |                          |                                |
| 种数 Total number of species        | 17                                   | 16                         | 15                       | 15                             |
| 多样性指数 H'                          | 2.35                                 | 2.25                       | 1.70                     | 2.17                           |
| Shannon-Wiener diversity index H' |                                      |                            |                          |                                |

表 4 海洋线虫 SIMPER 优势种个体数分析结果(截取 90%)

Table 4 Summary of nematode community SIMPER results (a cut-off of 90% was used)

| 种名 Species                 | 供氧对照 O<br>Oxygenated | 缺氧处理 A<br>Anoxic | 贡献率%<br>Contribution% | 供氧对照 O<br>Oxygenated | 复氧处理 R<br>Reoxygenated | 贡献率%<br>Contribution% |
|----------------------------|----------------------|------------------|-----------------------|----------------------|------------------------|-----------------------|
| 平均差异度%                     | 49                   | 49               |                       | 37                   | 37                     |                       |
| Average dissimilarity%     |                      |                  |                       |                      |                        |                       |
| <i>Daptonema</i> sp1       | 15                   | 103              | 53.33                 | 15                   | 72                     | 39.31                 |
| <i>Pseudosteiniera</i> sp1 | 22                   | 3                | 11.52                 |                      |                        |                       |
| <i>Daptonema</i> sp3       | 21                   | 9                | 7.27                  | 21                   | 8                      | 8.97                  |
| <i>Rhynchonema</i> sp1     | 18                   | 7                | 6.67                  |                      |                        |                       |
| <i>Spilophorella</i> sp1   | 11                   | 18               | 4.24                  | 11                   | 44                     | 22.76                 |
| <i>Paramonhystera</i> sp1  | 27                   | 21               | 3.64                  | 27                   | 32                     | 3.45                  |
| <i>Chromadorita</i> sp1    | 6                    | 12               | 3.64                  |                      |                        |                       |
| <i>Bathylaimus</i> sp1     |                      |                  |                       | 0                    | 4                      | 2.76                  |
| <i>Microaimus</i> sp1      |                      |                  |                       | 2                    | 5                      | 2.07                  |
| <i>Neochromadora</i> sp1   |                      |                  |                       | 5                    | 21                     | 11.03                 |

以 *Daptonema* sp1、*Spilophorella* sp1、*Neochromadora* sp1、*Pseudosteiniera* sp1 和 *Daptonema* sp3 等 5 种线虫的丰度进行不同处理及对照组间的差异分析。与线虫群落总丰度相比,其差异更为明显(图 7)。缺氧 A 和复氧 R 处理 *Daptonema* sp1 丰度显著高于 T<sub>0</sub> 和供氧对照 O; *Daptonema* sp3 丰度在供氧对照中较高;*Neochromadora* sp1 和 *Spilophorella* sp1 在各实验组中丰度均较低,但在复氧后丰度显著增加;*Pseudosteiniera* sp1 在 T<sub>0</sub> 和供氧对照组中丰度极高,但在缺氧处理中丰度极低,复氧后其丰度有所增加。

为了说明线虫群落的年龄结构对缺氧的响应,将线虫分为幼龄个体、成熟的雄性个体(以具交接器和生殖

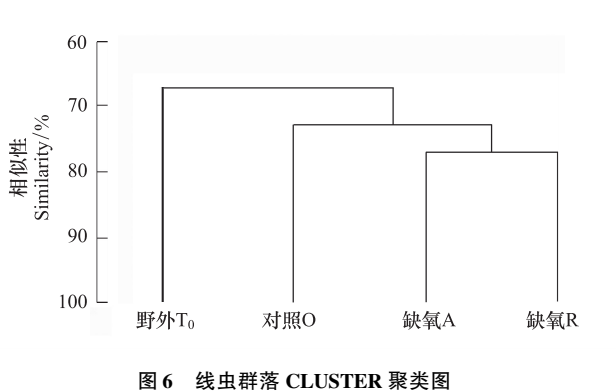


图 6 线虫群落 CLUSTER 聚类图  
Fig. 6 Cluster analysis of nematode community for the field situation T<sub>0</sub>, the oxygenated control (O), the anoxic treatment (A) and the reoxygenated treatment (R)

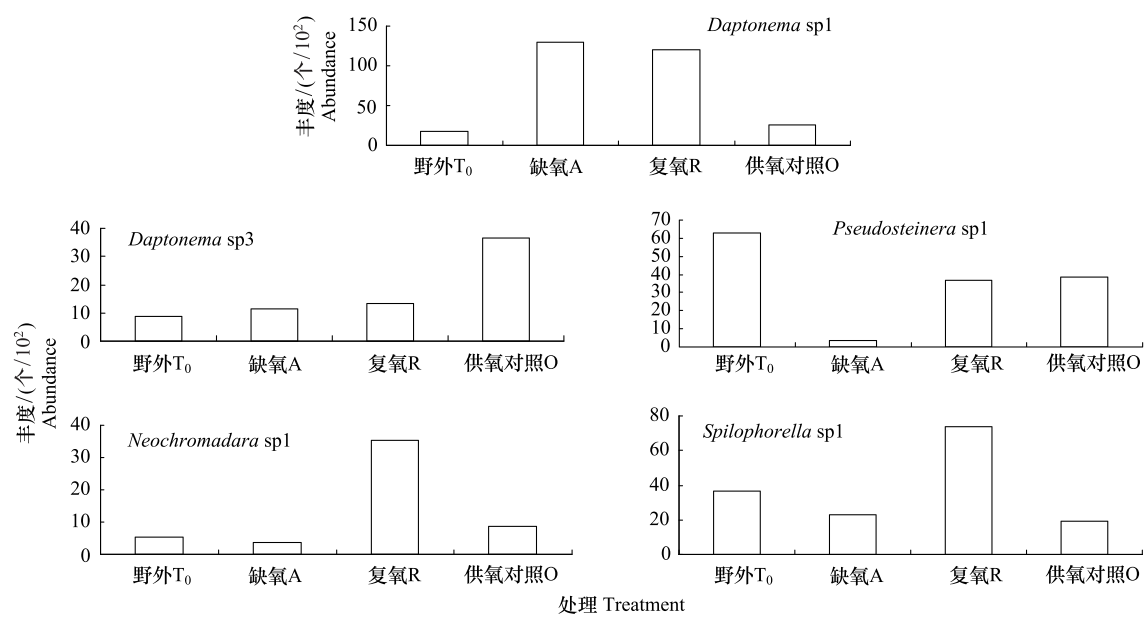


图7 不同处理及对照组5种线虫丰度

Fig. 7 Nematode species abundance for the field situation  $T_0$ , the oxygenated control (O), the anoxic treatment (A) and the reoxygenated treatment (R)

腺为准)和成熟的雌性个体(以怀卵或具发育好的卵巢为准),计算其幼龄个体比例(%),结果见表5。由表5可知,野外对照组线虫群落平均幼龄个体比例最低,仅为23.2%,缺氧、复氧处理幼龄个体比例最高,分别达73.4%和61.9%。在缺氧处理中,*Daptonema* sp1 幼龄个体比例较高,其他4种线虫比例均较低。复氧后,5种线虫幼龄个体比例增加,均高于野外对照和供氧处理。

表5 不同处理及对照组5种线虫平均幼龄个体比例/%

Table 5 Average juvenile/adult ratio for the five nematode species

|                           | 野外 $T_0$<br>Field situation | 缺氧 A<br>Anoxic | 复氧 R<br>Reoxygenated | 供氧对照 O<br>Oxygenated |
|---------------------------|-----------------------------|----------------|----------------------|----------------------|
| <i>Daptonema</i> sp1      | 50                          | 96.1           | 97.2                 | 93.3                 |
| <i>Daptonema</i> sp3      | 0                           | 0              | 12.5                 | 0                    |
| <i>Neochromadora</i> sp1  | 0                           | 0              | 14.3                 | 20                   |
| <i>Pseudosteinera</i> sp1 | 0                           | 0              | 27.3                 | 27.3                 |
| <i>Spilophorella</i> sp1  | 0                           | 5.56           | 15.9                 | 9.09                 |
| 海洋线虫群落 Nematode community | 23.2                        | 73.4           | 61.9                 | 44.9                 |

3 讨论

本研究以青岛潮间带海洋线虫为研究对象建立室内受控生态系,了解缺氧环境对海洋线虫群落结构和垂直分布的影响;了解环境复氧后海洋线虫群落的恢复能力。研究结果显示,2个受控实验中,受控系对照组海洋线虫群落丰度及分布与野外对照组的研究结果基本相同,线虫群落结构的相似性分别为60%和70%,表明受控生态系培育条件基本模拟了野外条件。受控生态系研究可以提供研究海洋线虫(或其他小型底栖动物类群)对各种环境变化响应的多重复、可控制、可复制的研究方法。不可否认的是,受控系海洋线虫群落与野外研究有所差异。在受控条件下,部分海洋线虫,特别是Chromadorida目的海洋线虫丰度会减少。本研究中,受控系Chromadorida目海洋线虫相对丰度减少近4%左右。Chromadorida目海洋线虫多为刮食者或硅藻捕食者<sup>[35]</sup>,以底栖硅藻为食。而在本受控实验进行过程中始终是不添加食物黑暗培养。因此,Chromadorida目海洋线虫食物来源匮乏导致其相对丰度降低<sup>[36]</sup>。

### 3.1 海洋线虫群落垂直分布对缺氧的响应

缺氧对海洋线虫群落垂直分布影响的结果显示,受控生态系及野外对照组中海洋线虫在 0—1 cm 和 1—2 cm 分布最多,丰度随深度的增加而减少,表明海洋线虫群落倾向于聚集分布在氧气充足的表层沉积环境。因此,倒置处理 1 周后,表层(实验开始前的 4—5 cm)海洋线虫丰度增加,表现出与对照组一致的垂直分布格局,海洋线虫通过垂直向上迁移,进入氧气充足的表层分布。已有研究指出海洋线虫可以通过迁移应对各种环境变化<sup>[8,12,36-38]</sup>。Steyaert 等的受控实验研究显示,暴露于缺氧及无氧环境时,海洋线虫可以通过垂直迁移来躲避不利条件,而其迁移方向并非单向,取决于沉积环境溶解氧的含量<sup>[12]</sup>。除海洋线虫外的其他小型底栖动物类群的垂直分布与海洋线虫的分布格局相似,即在表层和次表层最丰富,随深度增加类群组成减少。但是,倒置处理后,小型底栖动物类群组成的垂直分布与对照组和野外组相反,表明其他小型底栖动物类群没有垂直向上层迁移的现象。从群落行为而言,海洋线虫可通过迁移来躲避缺氧条件,而其他小型底栖动物缺乏这种能力。此外,本研究结果显示,与野外对照组和受控系对照组相比,倒置处理后表层海洋线虫和小型底栖动物丰度增加了 155%—340%。除表层外其他各层海洋线虫丰度和小型底栖动物丰度与对照组的相应各层丰度值无显著变化。这种表层线虫丰度的迅速增加说明了海洋线虫由深层向氧气充足的表层快速迁移及迁入该层的线虫群落的快速繁殖能力。已有研究报道,海洋线虫可以在 1 周内完成新环境中的定植<sup>[39]</sup>。

针对沉积物 0—1 cm 和 4—5 cm 层海洋线虫群落结构分析结果显示,倒置处理后表层和底层线虫群落结构与受控系对照组有较大差异。尽管所有出现在倒置处理组底层的海洋线虫均表现出对短时间缺氧的耐受特性,但是,个别优势种的数量变化却表明了海洋线虫耐受缺氧的行为机制种的差异,即海洋线虫通过主动迁出而耐受缺氧条件的特性具有种的区别。本研究中 *Pseudosteinaria* sp1、*Rhynchonema* sp1 等海洋线虫通过向有氧环境的主动迁移耐受缺氧条件;*Thalassironus* sp1 却可留在缺氧条件,通过自身耐受机制抵御缺氧条件。

### 3.2 海洋线虫群落结构对缺氧的响应及其恢复能力

本研究针对表层沉积物(0—2 cm)缺氧对海洋线虫群落结构影响的研究结果显示,海洋线虫暴露于缺氧环境时,总丰度显著降低,多样性降低,种类组成也发生明显的改变,线虫群落优势种对缺氧条件的响应各不相同。

本研究中,优势种 *Pseudosteinaria* sp1 对缺氧环境较为敏感,在缺氧培养 2 周后其数量显著减少,恢复充氧后,其丰度逐渐增加至正常对照水平。沉积物表层生活的生物通常对缺氧/无氧的敏感性较高,可以通过迁移至有氧沉积物中或暂时离开沉积物进入水层来躲避不利条件<sup>[13,40]</sup>。Wetzel 等墨西哥湾季节性缺氧研究结果显示,在严重缺氧时,有 19 个属的线虫(分属于 13 个科)在沉积物以上 1 m 的水层中丰度极高,而在沉积物中并未出现<sup>[41]</sup>。当沉积环境恢复正常有氧条件时,许多曾在水层中大量出现的线虫重新回到了沉积物中。本研究受控生态系 I 结果曾显示 *P.* sp1 具有向有氧环境主动迁移的特性。因此,可以认为当表层沉积物缺氧时,*P.* sp1 可以暂时性地离开沉积物进入水层;而沉积物溶解氧恢复正常后,该种可以重新回到沉积物中。

另一优势种 *Daptonema* sp1 在缺氧处理中丰度骤增,成为线虫群落中的绝对优势种。同时,缺氧条件下其幼龄个体比例较高。正如 Jensen 的研究中 *Theristus anoxybioticus* 的幼龄个体对缺氧及无氧环境的极高耐受性<sup>[42]</sup>,本研究结果预示 *D.* sp1 幼龄个体对缺氧也具有较高的耐受性。*Daptonema* 属线虫具有极高的物种多样性,生境类型庞杂,在泥质、砂质沉积物中均有分布<sup>[34]</sup>,对不同生境的耐受性也有差异。Steyaert 等的研究中报道,表层栖息种 *D. setosum* 和 *D. tenuispiculum* 对缺氧极其敏感,在缺氧环境中完全消失<sup>[13]</sup>。本研究结果显示,该属的另一种 *D.* sp3 丰度在缺氧处理及复氧后均显著低于对照组,表现出对缺氧环境较高的敏感性。

针对表层沉积物(0—2 cm)复氧后海洋线虫群落恢复能力的研究结果显示,环境恢复充氧后,海洋线虫总丰度迅速增加,线虫多样性也增加,10 d 后已基本恢复至对照水平。但是种类组成却明显不同于对照组,与缺氧处理的线虫群落更相似(相似性 75%)。*Neochromadora* sp1 和 *Spilophorella* sp1 等对照/野外丰度较低的种首先表现出丰度变化,其幼龄个体比例也逐渐增加。因此,可认为 *N.* sp1 和 *S.* sp1 在线虫群落恢复过程中具有机会种的特点。复氧后,线虫群落丰度及多样性虽然增加,却属于过渡群落,线虫群落种类组成在受测

时间内并未能恢复,群落恢复需要更长的时间。

#### 4 结论

(1)海洋线虫是耐低氧的小型底栖动物类群,可通过主动迁移来耐受缺氧造成的不利条件。但是,海洋线虫群落耐受缺氧的行为机制具有种的差异。*Pseudosteinera* sp1、*Rhynchonema* sp1 等海洋线虫通过向有氧环境的主动迁移耐受缺氧条件;*Thalassironus* sp1 却可通过自身耐受机制抵御缺氧条件,在缺氧生境中仍能保持较高的丰度。

(2)表层海洋线虫暴露于缺氧环境时,总丰度显著降低,种类组成发生改变。*Pseudosteinera* sp1 对缺氧环境较为敏感,可暂时性地离开沉积物进入水层;而沉积物溶解氧恢复正常后,该种可以重新回到沉积物中。*Daptonema* sp1 成熟个体及其幼龄个体对缺氧均具有较高的耐受性,是缺氧群落的绝对优势种。*D.* sp3 表现出对缺氧环境较高的敏感性。

(3)环境恢复正常,线虫群落丰度及多样性增加,但线虫群落种类组成在受测时间内并未能恢复,群落恢复需要更长的时间。复氧后,*Neochromadora* sp1 和 *Spilophorella* sp1 等具有机会种的特点,首先表现出丰度和繁殖能力的增加。

#### References:

- [ 1 ] Diaz R J, Rosenberg R. Marine benthic hypoxia: a review of its ecological effects and the behavioural responses of benthic macrofauna. *Oceanography and Marine Biology*, 1995, 33: 245-303.
- [ 2 ] Moodley L, van der Zwaan G L, Herman P M J, Kempers L, van Breugel P. Differential response of benthic meiofauna to anoxia with special reference to foraminifera (Protista: Sarcodina). *Marine Ecology Progress Series*, 1997, 158: 151-163.
- [ 3 ] Modig H, Ólafsson E. Responses of Baltic benthic invertebrates to hypoxic events. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 1998, 229 (1): 133-148.
- [ 4 ] Rosenberg R, Agrenius S, Hellman B, Nilsson H C, Norling K. Recovery of marine benthic habitats and fauna in a Swedish fjord following improved oxygen conditions. *Marine Ecology Progress Series*, 2002, 234: 43-53.
- [ 5 ] Coull B C. Hydrographic control of meiobenthos in Bermuda. *Limnology and Oceanography*, 1969, 14(6): 953-957.
- [ 6 ] Josefson A B, Widbom B. Differential response of benthic macrofauna and meiofauna to hypoxia in the Gullmar Fjord basin. *Marine Biology*, 1988, 100(1): 31-40.
- [ 7 ] Murrell M C, Fleeger J W. Meiofauna abundance on the Gulf of Mexico continental shelf affected by hypoxia. *Continental Shelf Research*, 1989, 9 (12): 1049-1062.
- [ 8 ] Hendelberg M, Jensen P. Vertical distribution of the nematode fauna in a coastal sediment influenced by seasonal hypoxia in the bottom water. *Ophelia*, 1993, 37(2): 83-94.
- [ 9 ] Hua E, Zhang Z N, Zhang Y. Meiofauna distributions at the oxygen minimum zone in Changjiang (Yangtze) River Estuary waters. *Acta Oceanologica Sinica*, 2006, 25(5): 120-134.
- [ 10 ] Levin L A, Huggett C L, Wishner K F. Control of deep-sea benthic community structure by oxygen and organic-matter gradients in the eastern Pacific Ocean. *Journal of Marine Research*, 1991, 49(4): 763-800.
- [ 11 ] Mahmoudi E, Essid N, Beyrem H, Hedif A, Boufahja F, Vitiello P, Aissa P. Effects of hydrocarbon contamination on a free living marine nematode community: results from microcosm experiments. *Marine Pollution Bulletin*, 2005, 50(11): 1197-1204.
- [ 12 ] Steyaert M, Moodley L, Vanaverbeke J, Vandewiele S, Vincx M. Laboratory experiments on the infaunal activity of intertidal nematodes. *Hydrobiologia*, 2005, 540(1/3): 217-223.
- [ 13 ] Steyaert M, Moodley L, Nadong T, Moens T, Soetaert K, Vincx M. Responses of intertidal nematodes to short-term anoxic events. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 2007, 345(2): 175-184.
- [ 14 ] Zhang Z N, Gu F, Yu Z S. A study on spatial pattern of marine nematodes in the subaqueous delta of the Huanghe River. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 1990, 21(1): 11-19.
- [ 15 ] Zhang Z N. A study on the abundance of freeliving marine nematodes on four intertidal sandy beach at the Qing Huang Dao Bay, North China. *Journal of Ocean University of Qingdao*, 1991, 21(1): 63-75.

- [16] Zhang Z N. Some progress of the study on the ecosystem dynamics for benthic-pelagic coupling. *Journal of Ocean University of Qingdao*, 2000, 30(1): 115-122.
- [17] Zhang Z N, Zhou H, Mu F H. Biodiversity and neutral model analyses on nematode community in Bohai Sea, China. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, 21(11): 1808-1814.
- [18] Zhang Z N, Zhou H, Guo Y Q, Mu F H. Comparative study on the nematode community structure in the submarine delta of Huanghe River estuary and its adjacent waters. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2001, 32(4): 436-444.
- [19] Zhang Z N, Zhou H. Some progress on the study of Meiofauna. *Periodical of Ocean University of China*, 2004, 34(5): 799-806.
- [20] Zhang Z N, Lin K X, Zhou H, Han J, Wang R Z, Tian S Y. Abundance and biomass of meiobenthos in autumn and spring in the East China Sea and the Yellow Sea. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(5): 997-1005.
- [21] Wang S H, Zhang Z N. Experimental culture and life cycle of marine nematodes from prawn cultivation pond. *Journal of Ocean University of Qingdao*, 1994, 24(Sup): 206-213.
- [22] Ji R B, Zhang Z N. Grazing of meiobenthos on benthic diatom in a prawn mariculture pond using  $^{14}\text{C}$ -labelling technique. *Journal of Ocean University of Qingdao*, 1994, 24(Sup): 199-205.
- [23] Deng K, Zhang Z N, Huang Y, Yu Z S. Application of benthic biomass size spectra of macro-and microfauna at typical stations in the Southern Yellow Sea, China. *Periodical of Ocean University of China*, 2005, 35(6): 1005-1010.
- [24] Hua E, Zhang Z N, Zhang Y. Abundance and biomass of meiobenthos in the Changjiang (Yangtze River) estuary and its adjacent waters. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(9): 2234-2242.
- [25] Liu H B, Zhang Z N, Fan S L, Hua E, Deng K. Seasonal variability in free-living marine nematode community structure in a sandy beach of the Taiping Bay of Qingdao, China. *Acta Oceanologica Sinica*, 2008, 27(2): 102-115.
- [26] Wu R S S, Lam P K S. Glucose-6-phosphate dehydrogenase and lactate dehydrogenase in the green-lipped muscle (*Perna viridis*): possible biomarkers for hypoxia in the marine environment. *Water Research*, 1997, 31(11): 2797-2801.
- [27] Wu R S S. Hypoxia: from molecular responses to ecosystem responses. *Marine Pollution Bulletin*, 2002, 45(1/12): 35-45.
- [28] Higgins R P, Thiel H. Introduction to the Study of Meiofauna. Washington DC: Smithsonian Institution Press, 1988: 488-488.
- [29] Fan S L, Liu H B, Zhang Z N, Deng K, Yuan W. Study on the abundance and biomass of meiofauna in the sandy beach of Taiping Bay, Qingdao. *Periodical of Ocean University of China*, 2006, 36(Z1): 98-104.
- [30] Hua E, Lin J N, Feng S, Wang N, Li G F, Li H L, Zhang Z N. Trampling effects on sandy beach meiofauna: preliminary results of field experiments. *Periodical of Ocean University of China*, 2010, 40(10): 63-68.
- [31] Gerlach S A, Riemann F. The bremerhaven checklist of aquatic nematodes. Veröffentlichungen des Instituts für Meeresforschung in Bremerhaven, Part 1 (1973) and Part 2 (1974). Bremen: Kommissionsverlag Franz Leuwer, 1973-1974: 1-736.
- [32] Platt H M, Warwick R M. Free-Living Marine Nematodes, Part I: British Enoplids. Cambridge: Cambridge University Press, 1983.
- [33] Platt H M, Warwick R M. Free-Living Marine Nematodes, Part II: British Chromadorids. New York, Leiden: E J Brill/Dr W Backhuys, 1988.
- [34] Warwick M R, Platt M H, Somerfield J P. Free-Living Marine Nematodes, Part III: Monhysterids. Synopses of the British Fauna (N S) 53. London: The Linnean Society of London and the Estuarine and Coastal Sciences Association, 1998.
- [35] Wieser W. Die Beziehung zwischen Mundhöhlengestalt, Ernährungsweise und Vorkommen bei freilebenden marinen Nematoden. *Arkiv für Zoologie*, 1953, 4(2): 439-484.
- [36] Schratzberger M, Rees H L, Boyd S E. Effects of simulated deposition of dredged material on structure of nematode assemblages-the role of burial. *Marine Biology*, 2000, 136(3): 519-530.
- [37] Meyers M B, Fossing H, Powell E N. Microdistribution of interstitial meiofauna, oxygen and sulfide gradients, and the tubes of macro-infauna. *Marine Ecological Progress Series*, 1987, 35: 223-241.
- [38] Meyers M B, Powell E N, Fossing H. Movement of oxybiotic and thiobiotic meiofauna in response to changes in pore-water oxygen and sulfide gradients around macro-infaunal tubes. *Marine Biology*, 1988, 98(3): 395-414.
- [39] Schratzberger M, Bolam S, Whomersley P, Warr K. Differential response of nematode colonist communities to the intertidal placement of dredged material. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 2006, 334(2): 244-255.
- [40] Wetzel M A, Weber A, Giere O. Re-colonization of anoxic/sulfidic sediments by marine nematodes after experimental removal of macroalgal cover. *Marine Biology*, 2002, 141(4): 679-689.
- [41] Wetzel M A, Fleeger J W, Powers S. Effects of hypoxia and anoxia on meiofauna: a review with new data from the Gulf of Mexico//Rabalais N N,

Turner R E, eds. Coastal Hypoxia: Consequences for Living Resources and Ecosystems. Washington DC: American Geophysical Union, 2001: 165-184.

- [42] Jensen P. Life history of the nematode *Theristus anoxybioticus* from sublittoral muddy sediment at methane seepages in the northern Kattegat, Denmark. *Marine Biology*, 1995, 123(1): 131-136.

#### 参考文献:

- [14] 张志南, 谷峰, 于子山. 黄河口水下三角洲海洋线虫空间分布的研究. *海洋与湖沼*, 1990, 21(1): 11-19.
- [15] 张志南. 秦皇岛沙滩海洋线虫的数量研究. *青岛海洋大学学报*, 1991, 21(1): 63-75.
- [16] 张志南. 水层-底栖耦合生态动力学研究的某些进展. *青岛海洋大学学报: 自然科学版*, 2000, 30(1): 115-122.
- [17] 张志南, 周红, 慕芳红. 渤海线虫群落的多样性及中性模型分析. *生态学报*, 2001, 21(11): 1808-1814.
- [18] 张志南, 周红, 郭玉清, 慕芳红. 黄河口水下三角洲及其邻近水域线虫群落结构的比较研究. *海洋与湖沼*, 2001, 32(4): 436-444.
- [19] 张志南, 周红. 国际小型底栖生物研究的某些进展. *中国海洋大学学报: 自然科学版*, 2004, 34(5): 799-806.
- [20] 张志南, 林岩旋, 周红, 韩洁, 王睿照, 田胜燕. 东、黄海春秋季小型底栖生物丰度和生物量研究. *生态学报*, 2004, 24(5): 997-1005.
- [21] 王诗红, 张志南. 养虾池海洋线虫的实验室培养及生活史研究. *青岛海洋大学学报*, 1994, 24(增刊): 206-213.
- [22] 季如宝, 张志南.  $^{14}\text{C}$  示踪法测定养虾池小型底栖动物对底栖微藻的摄食. *青岛海洋大学学报*, 1994, 24(增刊): 199-205.
- [23] 邓可, 张志南, 黄勇, 于子山. 南黄海典型站位底栖动物粒径谱及其应用. *中国海洋大学学报: 自然科学版*, 2005, 35(6): 1005-1010.
- [24] 华尔, 张志南, 张艳. 长江口及邻近海域小型底栖生物丰度和生物量. *生态学报*, 2005, 25(9): 2234-2242.
- [29] 范士亮, 刘海滨, 张志南, 邓可, 袁伟. 青岛太平湾砂质潮间带小型底栖生物丰度和生物量的研究. *中国海洋大学学报: 自然科学版*, 2006, 36(Z1): 98-104.
- [30] 华尔, 林佳宁, 冯颂, 王楠, 李广福, 李华龙, 张志南. 踩踏对砂质滩小型底栖动物的影响——现场扰动实验初步结果. *中国海洋大学学报: 自然科学版*, 2010, 40(10): 63-68.

CONTENTS

|                                                                                                                                                                                                                      |                                                         |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|
| Responses of sandy beach nematodes to oxygen deficiency: microcosm experiments .....                                                                                                                                 | HUA Er, LI Jia, DONG Jie, et al (3975)                  |
| Allometric relationship between mean component biomass and density during the course of self-thinning for <i>Fagopyrum esculentum</i> populations .....                                                              | LI Lei, ZHOU Daowei, SHENG Lianxi (3987)                |
| Automatic site selection of sight-seeing route in ecotourism destinations based on landscape perception sensitivity .....                                                                                            | LI Jifeng, LI Renjie (3998)                             |
| Emergy evaluation for sustainability of Biogas-linked agriculture ecosystem: a case study of Gongcheng county .....                                                                                                  | YANG Jin, CHEN Bin, LIU Gengyuan (4007)                 |
| Spatial heterogeneity of vegetation coverage and its temporal dynamics in desert steppe, Inner Mongolia .....                                                                                                        | YAN Liang, ZHOU Guangsheng, ZHANG Feng, et al (4017)    |
| Soil conservation value flow processes of two typical grasslands .....                                                                                                                                               | PEI Sha, XIE Gadi, LI Shimei, et al (4025)              |
| Spatial distribution of carbon storage in a 13-year-old <i>Pinus massoniana</i> forest ecosystem in Changsha City, China .....                                                                                       | WU Tao, PENG Chonghua, TIAN Dalun, et al (4034)         |
| Colonization rate and diversity of AM fungi in the rhizosphere of seven medicinal plants in Xiamen .....                                                                                                             | JIANG Pan, WANG Mingyuan (4043)                         |
| Effects of Cd, Low Concentration Pb/Cd on the contents of phenolic acid and simple glucides exuding from winter wheat seedlings root and the relationship between them and rhizosphere soil microbial activity ..... | JIA Xia, DONG Suiming, ZHOU Chunjuan (4052)             |
| The community structure of laccase-like multicopper oxidase-producing bacteria in soil of Liangshui Nature Reserve .....                                                                                             | ZHAO Dan, GU Huiqi, CUI Daizong, et al (4062)           |
| Effects of soil rhizosphere microbial community and soil factors on arbuscular mycorrhizal fungi in different salinized soils .....                                                                                  | LU Xinping, DU Qian, YAN Yongli, et al (4071)           |
| The effects of inoculation with phosphate solubilizing bacteria <i>Bacillus megaterium</i> C4 in the AM fungal hyphosphere on soil organic phosphorus mineralization and plant uptake .....                          | ZHANG Lin, DING Xiaodong, WANG Fei, et al (4079)        |
| Soil carbon, nitrogen and phosphorus ecological stoichiometry of <i>Phragmites australis</i> wetlands in different reaches in Minjiang River estuary .....                                                           | WANG Weiqi, WANG Chun, ZENG Congsheng, et al (4087)     |
| Dynamics of soil microbial biomass during early fine roots decomposition of three species in alpine region .....                                                                                                     | WU Zhichao, WU Fuzhong, YANG Wanqin, et al (4094)       |
| Effects of simulated precipitation on apparent carbon flux of biologically crusted soils in the Gurbantunggut Desert in Xinjiang, Northwestern China .....                                                           | WU Lin, SU Yangui, ZHANG Yuanming (4103)                |
| Changes in photosynthetic properties, ultrastructure and root vigor of <i>Dendrobium candidum</i> tissue culture seedlings during transplantation .....                                                              | PU Xiaozhen, YIN Chunying, ZHOU Xiaobo, et al (4114)    |
| Analysis of dry matter accumulation and translocation for winter wheat cultivars with different yields on dryland .....                                                                                              | ZHOU Ling, WANG Zhaohui, LI Fucui, et al (4123)         |
| Impact evaluation of low temperature to yields of maize in Northeast China based on crop growth model .....                                                                                                          | ZHANG Jianping, WANG Chunyi, ZHAO Yanxia, et al (4132)  |
| Spatiotemporal variations in the reference crop evapotranspiration on the Loess Plateau during 1961—2009 .....                                                                                                       | LI Zhi (4139)                                           |
| Eco-physiological responses of <i>Phragmites australis</i> to different water-salt conditions in Momoge Wetland .....                                                                                                | DENG Chunnuan, ZHANG Guangxin, LI Hongyan, et al (4146) |
| Comparative study of different earthworm sampling methods .....                                                                                                                                                      | FAN Ruqin, ZHANG Xiaoping, LIANG Aizhen, et al (4154)   |
| Geographic variation in longevity and fecundity of the Asian corn borer, <i>Ostrinia furnacalis</i> Guenée (Lepidoptera: Crambidae) .....                                                                            | TU Xiaoyun, CHEN Yuansheng, XIA Qinwen, et al (4160)    |
| Analysis on grasshopper spatial heterogeneity and pattern of natural grass in upper reaches of Heihe .....                                                                                                           | ZHAO Chengzhang, LI Lili, WANG Dawei, et al (4166)      |
| Inhibition effects of ethyl acetate extracts of <i>Momordica charantia</i> leaves on the experimental population of <i>Spodoptera litura</i> .....                                                                   | LOU Ying, LING Bing, XIE Jiefeng, et al (4173)          |
| Feeding habits of <i>Lateolabrax maculatus</i> in Yangtze River estuary .....                                                                                                                                        | HONG Qiaoqiao, ZHUANG Ping, YANG Gang, et al (4181)     |
| Genetic structure of <i>Gymnodontichus pachycheilus</i> from the upper reaches of the Yellow River as inferred from mtDNA control region .....                                                                       | SU Junhu, ZHANG Yanping, LOU Zhongyu, et al (4191)      |
| Toxicity mechanism of Cadmium-induced reactive oxygen species and protein oxidation in testes of the frog <i>Rana nigromaculata</i> .....                                                                            | CAO Hui, SHI Cailei, JIA Xiuying (4199)                 |
| The diversity of scarab beetles in grassland cattle dung from North China .....                                                                                                                                      | FAN Sanlong, FANG Hong, GAO Chuanbu, et al (4207)       |
| Spatial relationships among <i>Empoasca vitis</i> (Gothé) and <i>Toxoptera aurantii</i> (Boyer) and natural enemies in tea gardens of autumn-winter season in Hefei suburban .....                                   | YANG Lin, GUO Hua, BI Shoudong, et al (4215)            |
| Effects of vegetation, elevation and human disturbance on the distribution of large- and medium-sized wildlife: a case study in Jiuzhaigou Nature Reserve .....                                                      | ZHANG Yue, LEI Kaiming, ZHANG Yuke, et al (4228)        |
| Research of typical EIPs based on the social network analysis .....                                                                                                                                                  | YANG Lihua, TONG Lianjun (4236)                         |
| Exergy-based life cycle accounting of household biogas system: a case study of Gongcheng, Guangxi .....                                                                                                              | QI Jing, CHEN Bin, DAI Jing, et al (4246)               |
| <b>Review and Monograph</b>                                                                                                                                                                                          |                                                         |
| The effects of changes in hydrological regimes and salinity on wetland vegetation: a review .....                                                                                                                    | ZHANG Guangxin (4254)                                   |
| Advances in research on the seed bank of a saline-alkali meadow in the Songnen Plain .....                                                                                                                           | MA Hongyuan, LIANG Zhengwei, LÜ Bingsheng, et al (4261) |
| A new landscape expansion index: definition and quantification .....                                                                                                                                                 | WU Pengfei, ZHOU Demin, GONG Huili (4270)               |
| <b>Scientific Note</b>                                                                                                                                                                                               |                                                         |
| Response of photosynthetic characteristics of <i>Psathyrostachys huashanica</i> Keng to drought stress .....                                                                                                         | LI Qian, WANG Ming, WANG Wenwen, et al (4278)           |
| The antifouling activities of <i>Callyspongia</i> sponge extracts .....                                                                                                                                              | CAO Wenhao, YAN Tao, LIU Yonghong, et al (4285)         |

# 《生态学报》2012 年征订启事

《生态学报》是中国生态学学会主办的自然科学高级学术期刊,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,280 页,国内定价 70 元/册,全年定价 1680 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 13 期 (2012 年 7 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 32 No. 13 (July, 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:100071                                                                       | 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@csbg.net                         | Distributed by  | Science Press<br>Add: 16 Donghuangchenggen North<br>Street, Beijing 100717, China<br>Tel: (010)64034563<br>E-mail: journal@csbg.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