

ISSN 1000-0933  
CN 11-2031/Q

# 生态学报

## Acta Ecologica Sinica



第 33 卷 第 21 期 Vol.33 No.21 **2013**

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 33 卷 第 21 期 2013 年 11 月 (半月刊)

## 目 次

### 前沿理论与学科综述

- 生态系统生产总值核算:概念、核算方法与案例研究..... 欧阳志云,朱春全,杨广斌,等 (6747)
- 气候变化对传染病爆发流行的影响研究进展..... 李国栋,张俊华,焦耿军,等 (6762)
- 好氧甲烷氧化菌生态学研究进展 ..... 负娟莉,王艳芬,张洪勋 (6774)
- 氮沉降强度和频率对羊草叶绿素含量的影响..... 张云海,何念鹏,张光明,等 (6786)
- 世界蜘蛛的分布格局及其多元相似性聚类分析..... 申效诚,张保石,张 锋,等 (6795)
- 风向因素对转基因抗虫棉花基因漂移效率的影响..... 朱家林,贺 娟,牛建群,等 (6803)

### 个体与基础生态

- 长江口及东海春季底栖硅藻、原生动物和小型底栖生物的生态特点 ..... 孟昭翠,徐奎栋 (6813)
- 长江口横沙东滩围垦潮滩内外大型底栖动物功能群研究..... 吕巍巍,马长安,余 骥,等 (6825)
- 沔阳沿岸土壤和优势植物重金属富集特征和潜在生态风险..... 杨 阳,周正朝,王欢欢,等 (6834)
- 盐分和底物对黄河三角洲区土壤有机碳分解与转化的影响..... 李 玲,仇少君,檀菲菲,等 (6844)
- 短期夜间低温胁迫对秋茄幼苗碳氮代谢及其相关酶活性的影响..... 郑春芳,刘伟成,陈少波,等 (6853)
- 32 个切花菊品种的耐低磷特性 ..... 刘 鹏,陈素梅,房伟民,等 (6863)
- 年龄和环境条件对泥蚶富集重金属镉和铜的影响..... 王召根,吴洪喜,陈肖肖,等 (6869)
- 角倍蚜虫瘿对盐肤木光合特性和总氮含量的影响..... 李 杨,杨子祥,陈晓鸣,等 (6876)
- 多噬伯克霍尔德氏菌 WS-FJ9 对草甘膦的降解特性 ..... 李冠喜,吴小芹,叶建仁 (6885)
- 金龟甲对蓖麻叶挥发物的触角电位和行为反应..... 李为争,杨 雷,申小卫,等 (6895)

### 种群、群落和生态系统

- 白洋淀生态系统健康评价..... 徐 菲,赵彦伟,杨志峰,等 (6904)
- 珠海鹤洲水道沿岸红树林湿地大型底栖动物群落特征 ..... 王 卉,钟 山,方展强 (6913)
- 典型森林和草地生态系统呼吸各组分间的相互关系..... 朱先进,于贵瑞,王秋凤,等 (6925)
- 抚育间伐对油松人工林下大型真菌的影响..... 陈 晓,白淑兰,刘 勇,等 (6935)
- 百山祖自然保护区植物群落 beta 多样性 ..... 谭珊珊,叶珍林,袁留斌,等 (6944)
- 土霉素对堆肥过程中酶活性和微生物群落代谢的影响..... 陈智学,谷 洁,高 华,等 (6957)

### 景观、区域和全球生态

- 兴安落叶松针叶解剖结构变化及其光合能力对气候变化的适应性 ..... 季子敬,全先奎,王传宽 (6967)
- 盐城海滨湿地景观演变关键土壤生态因子与阈值研究..... 张华兵,刘红玉,李玉凤,等 (6975)

半干旱区沙地芦苇对浅水位变化的生理生态响应 ..... 马赞花,张铜会,刘新平 (6984)

SWAT 模型融雪模块的改进 ..... 余文君,南卓铜,赵彦博,等 (6992)

科尔沁沙地湖泊消涨对气候变化的响应..... 常学礼,赵学勇,王 玮,等 (7002)

贝壳堤岛 3 种植被类型的土壤颗粒分形及水分生态特征..... 夏江宝,张淑勇,王荣荣,等 (7013)

三峡库区古夫河着生藻类叶绿素 a 的时空分布特征及其影响因素..... 吴述园,葛继稳,苗文杰,等 (7023)

资源与产业生态

煤炭开发对矿区植被扰动时空效应的图谱分析——以大同矿区为例..... 黄 翌,汪云甲,李效顺,等 (7035)

学术信息与动态

《中国当代生态学研究》新书推介 ..... 刘某承 (7044)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q \* 1981 \* m \* 16 \* 300 \* zh \* P \* ¥90.00 \* 1510 \* 30 \* 2013-11



**封面图说:** 百山祖保护区森林植物群落——百山祖国家级自然保护区位于浙西南闽浙交界处,由福建武夷山向东北伸展而成,主峰海拔 1856.7m,为浙江省第二高峰。其独特的地形和水文地理环境形成了中亚热带气候区中一个特殊的区域,保存着十分丰富的植物种质资源以及国家重点保护野生动植物种,尤其是 1987 年由国际物种保护委员会列为世界最濒危的 12 种植物之一的百山祖冷杉,是第四纪冰川的孑遗植物,素有“活化石”之称。随着海拔的升高,其植被为常绿阔叶林、常绿-落叶阔叶混交林、针阔混交林、针叶林、山地矮林和山地灌草丛。

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

DOI: 10.5846/stxb201207100969

吕巍巍, 马长安, 余骥, 田伟, 袁晓, 赵云龙. 长江口横沙东滩围垦潮滩内外大型底栖动物功能群研究. 生态学报, 2013, 33(21): 6825-6833.

Lv W W, Ma C A, Yu J, Tian W, Yuan X, Zhao Y L. Macrobenthic functional groups at the reclamation and natural tidal flats of Hengsha East Shoal, the Estuary of Changjiang River. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(21): 6825-6833.

# 长江口横沙东滩围垦潮滩内外大型底栖动物功能群研究

吕巍巍<sup>1</sup>, 马长安<sup>1</sup>, 余 骥<sup>1</sup>, 田 伟<sup>1</sup>, 袁 晓<sup>2</sup>, 赵云龙<sup>1,\*</sup>

(1. 华东师范大学生命科学学院, 上海 200062; 2. 上海市野生动植物保护管理站, 上海 200023)

**摘要:** 2011 年 4 月 (春季)、7 月 (夏季)、10 月 (秋季) 和 12 月 (冬季), 在横沙东滩的围垦潮滩和自然潮滩进行底栖动物的采样调查, 进行功能群划分及数量特征分析。在围垦潮滩和自然潮滩分别采集到底栖动物 19 种和 22 种。依据食性将其划分为浮游生物食者、植食者、肉食者、杂食者和碎屑食者 5 种功能群, 围垦潮滩各功能群物种数分别为 4, 5, 4, 3, 3; 自然潮滩分别为 6, 3, 5, 6, 2。围垦潮滩丰度由高到低依次为植食者>浮游生物食者>肉食者>杂食者>碎屑食者; 自然潮滩为浮游生物食者>杂食者>肉食者>碎屑食者>植食者。围垦潮滩季节间仅有浮游生物食者和植食者的物种数存在显著性差异, 潮位间仅有植食者的丰度存在显著性差异; 自然潮滩季节间仅有浮游生物食者的丰度存在显著性差异, 潮位间仅有植食者的物种数和丰度无显著性差异。围垦潮滩主导功能群在各潮位均为浮游生物食者和植食者; 自然潮滩主导功能群由高潮带到低潮带变化为浮游生物食者→浮游生物食者和杂食者→杂食者。围垦潮滩浮游生物食者和植食者的 Shannon-Wiener 多样性指数、Margalef 丰富度指数、Pielou 均匀度指数较高, 而杂食者相对较低; 自然潮滩杂食者和肉食者的 3 种多样性指数较高, 而植食者相对较低。以上结果表明: 围垦潮滩和自然潮滩底栖动物功能群的组成存在一定的差别; 各潮位底栖动物功能群组成的不同与生境密切相关; 围垦导致底栖动物群落以及功能群发生变化。

**关键词:** 大型底栖动物; 功能群; 围垦; 横沙东滩

## Macrobenthic functional groups at the reclamation and natural tidal flats of Hengsha East Shoal, the Estuary of Changjiang River

LV Weiwei<sup>1</sup>, MA Chang'an<sup>1</sup>, YU Ji<sup>1</sup>, TIAN Wei<sup>1</sup>, YUAN Xiao<sup>2</sup>, ZHAO Yunlong<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup> School of Life Science, East China Normal University, Shanghai 200062, China

<sup>2</sup> Shanghai Wildlife Conservation Management Station, Shanghai 200023, China

**Abstract:** Functional groups of macrobenthos are vital for the assessment of the changes of ecological functions of wetland driven by natural and human factors. In order to get a better understanding of the functional groups of macrobenthos, the surveys were conducted in the reclamation tidal and the natural tidal flats of Hengsha East Shoal in April, July, October and December 2011. The results demonstrated that 19 species and 22 species were found in and outside the dyke, respectively. Based on their food preferences, the macrobenthos were classified into 5 functional groups: Planktophagous group, Phytophagous group, Camivorous group, Omnivorous group and Detritivorous group. The number of species in each functional group was 4, 5, 4, 3, 3 in the reclamation tidal flat, and 6, 3, 5, 6, 2 in the natural tidal flat. The abundance of each functional group in proper order was Phytophagous > Planktophagous > Camivorous > Omnivorous > Detritivorous in

**基金项目:** 国家科技支撑计划资助项目 (2010BAK69B14); 上海市科委重大资助项目 (09DZ120010A, 10DZ1200700); 国家公益性行业 (农业) 科研专项资助项目 (201203065)

**收稿日期:** 2012-07-10; **修订日期:** 2013-06-21

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: ylzha@ bio.ecnu.edu.cn

the reclamation tidal flat, and Planktophagous > Omnivorous > Camivorous > Detritivorous > Phytophagous in the natural tidal flat. The species number and abundance of each functional group were analyzed by the two-way ANOVA method. For the reclamation tidal flat, there was no significant difference among seasons for all of the species number and abundance except for the species number of Planktophagous group and Phytophagous group. Similarly, no significant difference was found among the tidal flats for the species number and abundance of each functional group except for the abundance of Phytophagous group. For the natural tidal flat, the difference was significant for the species number of Planktophagous group among the seasons, but not for others. However, most of the functional groups had significant difference among the tidal flats except for the species number and abundance of Phytophagous group. The Planktophagous group and Phytophagous group were the dominant functional groups at three tidal flats of the reclamation tidal flat. The dominant functional groups of the natural tidal flat, however, were Planktophagous at high tidal flat, Planktophagous and Omnivorous at middle tidal flat, Omnivorous at low tidal flat, respectively. In the reclamation tidal flat, Planktophagous group and Phytophagous group had the higher diversity indices (Shannon-Wiener index, Margalef index, Pielou index), while Omnivorous group had the lower diversity indices. In the natural tidal flat, Camivorous group and Omnivorous group had the higher diversity indices, while Phytophagous group had the lower diversity indices.

In conclusion, the composition of functional groups between the reclamation tidal flat and the natural tidal flat was distinctly different. And the changes of the functional groups among the tidal flats were often associated with habitats. The reclamation had resulted in the variations of the communities and functional groups in macrobenthos.

**Key Words:** macrobenthos; functional groups; reclamation; Hengsha East Shoal

随着上海社会经济快速发展,人口数量不断增加,城建用地迅猛扩展,土地需求量与日俱增,人多地少成为制约上海市可持续发展的主要因素<sup>[1-2]</sup>。而横沙东滩作为上海湿地资源的重要组成部分,目前已在其周缘湿地进行了围垦造陆工程<sup>[3-4]</sup>。围垦能改变滩涂湿地的生态系统结构、过程与功能<sup>[5-6]</sup>。底栖动物是湿地生态系统的次级生产者,调节食物网中物质循环和能量流动,既可作为捕食者,摄食一些浮游生物、植物、碎屑等,又可作为被捕食者,为鸟类等高营养级动物提供食物<sup>[7]</sup>。相关研究表明,底栖动物对周围环境还起到一定的指示作用,但考虑到底栖动物的自由活动能力和对环境变化的敏感程度等因素,当时间和空间发生变化时,底栖动物物种的迁徙、更替或消失有时并不能真实反映该区域生态系统的变化。底栖动物功能群是具有相同生态功能的底栖动物的集合<sup>[8-9]</sup>,采用功能群方法来分析底栖动物群落结构,则可以简化其复杂的群落内部关系,弱化个别物种的作用,有利于整体把握生态系统的结构和功能<sup>[10]</sup>。

目前,国内外学者对底栖动物功能群已做了大量的研究<sup>[11-14]</sup>。而对横沙东滩底栖动物研究大多集中于物种数、丰度、生物量和多样性等基本群落特征<sup>[15-16]</sup>,没有涉及底栖动物功能群的研究。本文以底栖动物功能群为研究切入点,根据 2011 年 4 个季节的横沙东滩围垦潮滩和自然潮滩底栖动物的调查数据,探讨其功能群的特征以及围垦对横沙东滩底栖动物功能群的影响。

## 1 材料和方法

### 1.1 研究地概况

横沙东滩位于横沙岛最东端,地理位置为 121°52'—122°20'E, 31°10'—31°21'N。围垦潮滩位于横沙东滩南大堤以北,自然潮滩位于南大堤以南,2002 年至今促淤圈围工程已经完成了五期,累积施工面积约为 124.2 km<sup>2</sup>。围垦潮滩虽受自然潮水影响,但水动力环境与自然潮滩不同,围垦滩面水位较低,且涨落潮水流速较缓,有利于泥沙沉降,潮滩高程明显高于自然潮滩,内部盐沼植被呈规律分布且长势较好。自然潮滩为围垦保留的自然潮滩,南大堤的建立和长江深水航道的影响,使自然潮滩的高程较低,滩面较围垦潮滩要窄,且水流速较快,有稀疏分布的芦苇和海三棱藨草植被。

## 1.2 调查方法及数据处理

根据《海洋调查规范》(GB/T12763.9—2007)底栖动物调查方法及横沙东滩的具体生境状况,于2011年4月(春季)、7月(夏季)、10月(秋季)和12月(冬季)对横沙东滩围垦潮滩和自然潮滩的底栖动物进行调查。围垦潮滩一期、二期和四期工程各设1条样带(S1、S2、S3),自然潮滩设置3条对照样带(N1、N2、N3)。根据高程、植被分布的情况,每条样带分别设置高、中、低3个样点,每个样点定量取样重复4—8次,样方为25 cm×25 cm×30 cm,40目筛网筛洗后拣取底栖动物,同时在周围尽可能地获取定性样本。所获的底栖动物用75%的酒精固定,带回实验室进行鉴定、计数和称量。具体样点设置见图1。

采用 Shannon-Wiener 多样性指数( $H'$ )、Pielou 均匀度指数( $J'$ )、Margalef 丰富度指数( $d$ )进行大型底栖动物功能群多样性指数的分析:

$$H' = -\sum (n_i/N) \log_2 (n_i/N)$$

$$J' = H'/\log_2 S$$

$$d = (S-1)/\log_2 N$$

式中, $n_i$ 为样品中第*i*种的个体数; $N$ 为该水域所有个体总数之和; $S$ 为所采样品的种类总数。采用分析软件SPSS16.0对数据进行无重复双因素方差分析。

根据底栖动物食性将其划分为5个功能群,即浮游生物食者(Pl)、植食者(Ph)、肉食者(C)、杂食者(O)、碎屑食者(D)<sup>[17-19]</sup>。

## 2 结果

### 2.1 底栖动物的功能群组成

功能群的组成和数量见表1。围垦潮滩各功能群种类组成为植食者(5种)>浮游生物食者(4种)=肉食者(4种)>杂食者(3种)=碎屑食者(3种);自然潮滩则为浮游生物食者(6种)=杂食者(6种)>肉食者(5种)>植食者(3种)>碎屑食者(2种)。围垦潮滩各功能群数量占总数百分比为植食者(70.27%)>浮游生物食者(19.26%)>肉食者(3.87%)>杂食者(3.35%)>碎屑食者(3.25%);自然潮滩为浮游生物食者(43.77%)>杂食者(26.31%)>肉食者(13.76%)>碎屑食者(9.98%)>植食者(6.18%)。

表1 横沙东滩大型底栖动物的物种组成及其功能群

Table 1 Species composition and functional groups of macrobenthos in the Hengsha East Shoal

| 功能群<br>Function groups | 种类<br>Species                         | 围垦潮滩<br>Reclamation tidal flat |                  | 自然潮滩<br>Nature tidal flat |                  |
|------------------------|---------------------------------------|--------------------------------|------------------|---------------------------|------------------|
|                        |                                       | 数量<br>Number                   | 潮位<br>Tidal flat | 数量<br>Number              | 潮位<br>Tidal flat |
| 浮游生物食者 Pl              | 绯拟沼螺 <i>Assiminea latericea</i>       | ++                             | HML              | +                         | H                |
|                        | 矮拟帽贝 <i>Patelloida pygmaea</i>        | —                              | —                | +                         | M                |
|                        | 河蚬 <i>Corbicula fluminea</i>          | ++                             | ML               | +++                       | HML              |
|                        | 缢蛏 <i>Sinonovacula constricta</i>     | ++                             | HM               | +++                       | HM               |
|                        | 黑龙江河篮蛤 <i>Potamocorbula amurensis</i> | —                              | —                | ++                        | HML              |
|                        | 日本旋卷螺赢蛭 <i>Corophium volutator</i>    | +                              | HM               | +                         | HM               |
|                        | 光滑狭口螺 <i>Stenothyra glabra</i>        | ++                             | HM               | +                         | H                |
| 植食者 Ph                 | 拟沼螺 <i>Assiminea</i> sp.              | +++                            | HML              | ++                        | HM               |

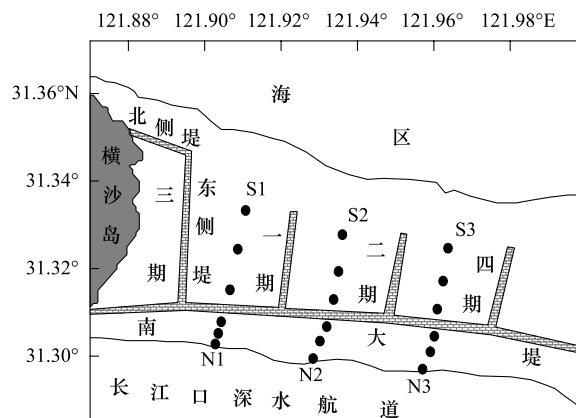


图1 横沙东滩采样断面示意图

Fig.1 Map of sampling section in Hengsha East Shoal

续表

| 功能群<br>Function groups | 种类<br>Species                           | 围垦潮滩<br>Reclamation tidal flat |            | 自然潮滩<br>Nature tidal flat |            |
|------------------------|-----------------------------------------|--------------------------------|------------|---------------------------|------------|
|                        |                                         | 数量                             | 潮位         | 数量                        | 潮位         |
|                        |                                         | Number                         | Tidal flat | Number                    | Tidal flat |
| 肉食者 C                  | 谭氏泥蟹 <i>Ilyoplax deschampsii</i>        | +++                            | HML        | +                         | H          |
|                        | 天津厚蟹 <i>Helice tientsinensis</i>        | ++                             | HML        | —                         | —          |
|                        | 无齿螳臂相手蟹 <i>Chiromantes dehaani</i>      | ++                             | HML        | —                         | —          |
|                        | 纽虫 <i>Cerebratulina</i> sp.             | +                              | H          | ++                        | HML        |
|                        | 疣吻沙蚕 <i>Tylorrhynchus heterochaetus</i> | ++                             | HM         | ++                        | M          |
|                        | 圆锯齿吻沙蚕 <i>Dentinephtys glabra</i>       | +                              | HML        | +                         | HM         |
|                        | 中华绒螯蟹 <i>Eriocheir sinensis</i>         | +                              | HML        | +                         | HM         |
| 杂食者 O                  | 狭额绒螯蟹 <i>Eriocheir leptognathus</i>     | —                              | —          | ++                        | ML         |
|                        | 泥螺 <i>Bullacta exarata</i>              | —                              | —          | ++                        | ML         |
|                        | 秀丽白虾 <i>Exopalaemon modestus</i>        | +                              | L          | +                         | L          |
|                        | 日本沼虾 <i>Macrobrachium nipponense</i>    | —                              | —          | +                         | L          |
|                        | 脊尾白虾 <i>Exopalaemon carinicauda</i>     | +                              | L          | +                         | L          |
|                        | 豆形拳蟹 <i>Philyra pismus</i>              | —                              | —          | ++                        | ML         |
|                        | 弹涂鱼 <i>Periophthalmus cantonensis</i>   | ++                             | H          | ++                        | ML         |
| 碎屑食者 D                 | 丝异蚓虫 <i>Heteromastus filiformis</i>     | ++                             | HML        | ++                        | HM         |
|                        | 小头虫 <i>Capitella capitata</i>           | +                              | HML        | +                         | HM         |
|                        | 背蚓虫 <i>Notomastus latericeus</i>        | ++                             | HML        | —                         | —          |

Pl: Planktophagous group, Ph: Phytophagous group, C: Carnivorous group, O: Omnivorous group, D: Detritivorous group;+: 分别表示物种个体数<总个体数的 1%; ++: 占总个体数 1%—10%; +++:>总个体数的 10%,—: 定量取样未获得;H: 高潮带; M: 中潮带; L: 低潮带

2.2 底栖动物功能群的时空变化

5 种功能群在横沙东滩围垦潮滩和自然潮滩的分布各不相同。围垦潮滩的主导功能群为植食者和浮游生物食者,其功能群之和占围垦潮滩全部物种种类和丰度的 47.37%和 89.34%;而自然潮滩的主导功能群为浮游生物食者和杂食者,其功能群之和占自然潮滩全部物种种类和丰度的 54.55%和 70.27%。各功能群的物种数和丰度沿高程分布各不相同。具体结果见表 2。

表 2 横沙东滩 3 个潮位大型底栖动物各功能群的物种数和栖息丰度(平均值±标准差)

| Table 2 Species number and abundance of macrobenthos as 5 functional groups in the 3 tidal zones at the Hengsha East Shoal (mean±SD.) |                          |                          |                                         |                          |                                         |                          |                                         |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------|--------------------------|-----------------------------------------|--------------------------|-----------------------------------------|--------------------------|-----------------------------------------|
| 区域<br>Area                                                                                                                            | 功能群<br>Functional groups | 高潮带 High tidal flat      |                                         | 中潮带 Middle tidal flat    |                                         | 低潮带 Low tidal flat       |                                         |
|                                                                                                                                       |                          | 物种数<br>Number of species | 丰度<br>Abundance<br>/(个/m <sup>2</sup> ) | 物种数<br>Number of species | 丰度<br>Abundance<br>/(个/m <sup>2</sup> ) | 物种数<br>Number of species | 丰度<br>Abundance<br>/(个/m <sup>2</sup> ) |
| 围垦潮滩<br>Reclamation tidal flat                                                                                                        | 浮游生物食者 Pl                | 2.50±0.58                | 32.75±30.02                             | 2.50±0.58                | 21.25±12.84                             | 1.50±0.58                | 14.25±8.50                              |
|                                                                                                                                       | 植食者 Ph                   | 4.25±0.96                | 134.50±135.22                           | 2.00±0.00                | 78.50±72.30                             | 1.75±0.50                | 31.75±35.70                             |
|                                                                                                                                       | 肉食者 C                    | 1.75±0.50                | 7.75±2.87                               | 0.75±0.96                | 3.50±2.18                               | 0.50±0.58                | 2.75±1.60                               |
|                                                                                                                                       | 杂食者 O                    | 1.00±0.00                | 5.75±5.68                               | 0.00±0.00                | 0.00±0.00                               | 1.00±1.16                | 6.25±8.50                               |
|                                                                                                                                       | 碎屑食者 D                   | 1.00±0.00                | 5.50±1.74                               | 1.25±0.50                | 5.00±4.24                               | 0.50±0.58                | 1.75±2.36                               |
| 自然潮滩<br>Nature tidal flat                                                                                                             | 浮游生物食者 Pl                | 3.50±0.58                | 29.25±14.50                             | 3.75±0.50                | 36.25±14.66                             | 1.75±0.50                | 10.75±6.68                              |
|                                                                                                                                       | 植食者 Ph                   | 0.75±0.50                | 9.75±9.92                               | 0.25±0.50                | 1.00±2.00                               | 0.00±0.00                | 0.00±0.00                               |
|                                                                                                                                       | 肉食者 C                    | 0.75±0.50                | 6.75±5.32                               | 1.25±0.50                | 6.75±3.10                               | 1.75±0.50                | 10.50±7.60                              |
|                                                                                                                                       | 杂食者 O                    | 0.00±0.00                | 0.00±0.00                               | 2.25±0.96                | 22.50±13.92                             | 4.75±0.96                | 23.00±11.22                             |
|                                                                                                                                       | 碎屑食者 D                   | 1.50±0.58                | 11.00±8.48                              | 1.25±0.50                | 6.00±3.46                               | 0.00±0.00                | 0.00±0.00                               |

围垦潮滩和自然潮滩底栖动物功能群的物种数和丰度分别进行季节-潮位无重复双因素方差分析。季节因素来看,围垦潮滩除了浮游生物食者( $F_{3,6}=5.68,P<0.05$ )和植食者( $F_{3,6}=5.56,P<0.05$ )的丰度在 4 个季节

之间存在显著性差异外,其余无显著性差异,自然潮滩也只有浮游生物食者的丰度( $F_{3,6}=4.81, P<0.05$ )在各季节间存在显著性差异,而围垦潮滩和自然潮滩各功能群的物种数在各季节间均无显著性差异。潮位因素来看,围垦潮滩仅有植食者的物种数( $F_{2,6}=30.33, P<0.01$ )在不同潮位之间存在极显著性差异,而各功能群的丰度在围垦潮滩不同潮位之间无显著性差异;自然潮滩与围垦潮滩不同,除了植食者的丰度( $F_{2,6}=4.13, P>0.05$ )和物种数( $F_{2,6}=4.20, P>0.05$ )无显著性差异外,其它各功能群的丰度和物种数在各潮位之间具有显著或极显著性差异。具体结果见表 3。

自然潮滩和围垦潮滩的主导功能群在各潮位之间呈现不同特点。自然潮滩高潮带的主导功能群为浮游生物食者,中潮带的主导功能群为浮游生物食者和杂食者,而低潮带的主导功能群为杂食者,各潮位主导功能群占有物种种类和丰度的百分比为:高潮带,40.00%和 51.54%;中潮带,61.54%和 81.03%;低潮带,60.00%和 51.98%。围垦潮滩植食者和浮游生物食者是 3 个潮位的主导功能群,其功能群之和占每个潮位物种种类和丰度的百分比为:高潮带,53.33%和 89.79%;中潮带,57.14%和 92.15%;低潮带,50.00%和 81.06%。

表 3 各功能群的季节潮位无重复双因素方差分析

Table 3 The Two-way ANOVA analyze on 5 functional groups

| 项目<br>Case               | 功能群<br>Functional Groups | 围垦潮滩 Reclamation tidal flat |            |               |               | 自然潮滩 Nature tidal flat |            |               |               |
|--------------------------|--------------------------|-----------------------------|------------|---------------|---------------|------------------------|------------|---------------|---------------|
|                          |                          | 季节 Season                   |            | 潮位 Tidal flat |               | 季节 Season              |            | 潮位 Tidal flat |               |
|                          |                          | $F_{3,6}$                   | $P$        | $F_{2,6}$     | $P$           | $F_{3,6}$              | $P$        | $F_{2,6}$     | $P$           |
| 丰度 Abundance             | 浮游生物食者 Pl                | 5.68                        | $P<0.05^*$ | 2.34          | $P>0.05$      | 4.81                   | $P<0.05^*$ | 11.96         | $P<0.01^{**}$ |
|                          | 植食者 Ph                   | 5.56                        | $P<0.05^*$ | 3.17          | $P>0.05$      | 1.59                   | $P>0.05$   | 4.13          | $P>0.05$      |
|                          | 肉食者 C                    | 4.47                        | $P>0.05$   | 3.48          | $P>0.05$      | 2.38                   | $P>0.05$   | 0.90          | $P<0.05^*$    |
|                          | 杂食者 O                    | 0.89                        | $P>0.05$   | 1.30          | $P>0.05$      | 3.65                   | $P>0.05$   | 12.21         | $P<0.01^{**}$ |
|                          | 碎屑食者 D                   | 3.60                        | $P>0.05$   | 2.86          | $P>0.05$      | 2.20                   | $P>0.05$   | 6.07          | $P<0.05^*$    |
| 种类数<br>Number of Species | 浮游生物食者 Pl                | 0.25                        | $P>0.05$   | 3.00          | $P>0.05$      | 0.00                   | $P>0.05$   | 11.40         | $P<0.01^{**}$ |
|                          | 植食者 Ph                   | 2.67                        | $P>0.05$   | 30.33         | $P<0.01^{**}$ | 1.60                   | $P>0.05$   | 4.20          | $P>0.05$      |
|                          | 肉食者 C                    | 2.44                        | $P>0.05$   | 2.74          | $P>0.05$      | 4.75                   | $P>0.05$   | 9.00          | $P<0.05^*$    |
|                          | 杂食者 O                    | 1.00                        | $P>0.05$   | 3.00          | $P>0.05$      | 1.14                   | $P>0.05$   | 38.71         | $P<0.01^{**}$ |
|                          | 碎屑食者 D                   | 2.20                        | $P>0.05$   | 4.20          | $P>0.05$      | 2.20                   | $P>0.05$   | 18.60         | $P<0.01^{**}$ |

\* : 差异显著,  $P<0.05$ ; \*\* : 差异极显著,  $P<0.01$

### 2.3 底栖动物功能群的多样性特征

围垦潮滩和自然潮滩多样性指数变化趋势不同。围垦潮滩浮游生物食者和植食者的 Shannon-Wiener 多样性指数、Margalef 丰富度指数、Pielou 均匀度指数较高,而杂食者相对较低;自然潮滩杂食者和肉食者的 3 种多样性指数较高,而植食者相对较低。

底栖动物各功能群在不同区域呈现出不同的多样性特征。围垦潮滩中植食者和肉食者多样性指数在高潮带最高;浮游生物食者和碎屑食者多样性指数在中潮带最高;杂食者在高潮带和中潮带分别采到 1 种和 0 种,而在低潮带多样性指数相对较高。自然潮滩中浮游生物食者和碎屑食者的多样性指数在中潮带最高;肉食者和杂食者在低潮带多样性指数相对较高;植食者在高潮带和中潮带都仅采到 1 个物种,多样性指数都为 0,并且在低潮带无分布。杂食者和碎屑食者也分别在高潮带和低潮带没有物种分布。具体见表 4。

## 3 讨论

### 3.1 自然潮滩底栖动物功能群分布的时空差异及人为干扰的影响

由于盐度、温度、沉积物类型和水动力条件等环境因子在河口生态系统中呈现一定的梯度变化,使得底栖动物功能群的分布存在时空上的差异<sup>[20]</sup>。一些研究表明,在潮间带,影响底栖动物功能群时空变化的两个最主要的因素是季节和潮位<sup>[21]</sup>。从本文的研究结果来看,自然潮滩仅有浮游生物食者的丰度存在季节性的显著性差异,而各功能群的物种数在季节之间无显著性差异。由于高程的改变,导致自然潮滩主导功能群从高潮带到低潮带发生明显的变化为:浮游生物食者→浮游生物食者和杂食者→杂食者,且各功能群中除了植食

者的物种数和丰度在各潮位无显著性差异外,另外几种功能群均存在显著性差异。因此,可以判断各潮位生境的不同是导致横沙东滩自然潮滩底栖动物功能群物种数和丰度变化的主导因素。河口潮间带生境的空间异质性直接影响底栖动物功能群分布的区域性特征,沿着高程梯度,自然潮滩生境表现出明显的空间生态系列格局:中潮带属于潮滩湿地演替的高级阶段<sup>[22]</sup>,其底栖动物功能群的物种数、丰度和多样性指数均是自然潮滩最高;低潮带海陆交汇最频繁,较强的潮汐频率使底栖动物栖息环境变得很不稳定,所以功能群的物种数、丰度和多样性指数较中潮带要低,属于潮滩湿地演替的初级阶段;高潮带大部分芦苇和海三棱藨草滩已经被围垦,保留的潮滩仅为高潮带的下缘部分,滩面宽度变得很狭窄,这些因素可能是导致底栖动物功能群的物种数、丰度和多样性指数都为自然潮滩最低的原因。

表 4 横沙东滩大型底栖动物功能群的多样性指数(平均值±标准差)

Table 4 Diversity of macrobenthos as 5 functional groups in the Hengsha East Shoal (mean±SD.)

| 区域<br>Area                     | 功能群<br>Functional groups | 高潮带 High tidal flat |           |           | 中潮带 Middle tidal flat |           |           | 低潮带 Low tidal flat |           |           |
|--------------------------------|--------------------------|---------------------|-----------|-----------|-----------------------|-----------|-----------|--------------------|-----------|-----------|
|                                |                          | <i>H'</i>           | <i>J'</i> | <i>d</i>  | <i>H'</i>             | <i>J'</i> | <i>d</i>  | <i>H'</i>          | <i>J'</i> | <i>d</i>  |
| 围垦潮滩<br>Reclamation tidal flat | 浮游生物食者 PI                | 1.01±0.24           | 0.88±0.08 | 0.29±0.12 | 1.23±0.30             | 0.95±0.04 | 0.35±0.10 | 0.44±0.50          | 0.44±0.50 | 0.15±0.18 |
|                                | 植食者 Ph                   | 1.38±0.66           | 0.66±0.26 | 0.52±0.20 | 0.71±0.32             | 0.61±0.16 | 0.25±0.16 | 0.67±0.60          | 0.54±0.44 | 0.24±0.26 |
|                                | 肉食者 C                    | 0.84±0.64           | 0.69±0.48 | 0.30±0.22 | 0.18±0.36             | 0.18±0.32 | 0.08±0.16 | 0.00±0.00          | —         | 0.00±0.00 |
|                                | 杂食者 O                    | 0.00±0.00           | —         | 0.00±0.00 | —                     | —         | —         | 0.44±0.50          | 0.44±0.50 | 0.15±0.18 |
|                                | 碎屑食者 D                   | 0.00±0.00           | —         | 0.00±0.00 | 0.25±0.50             | 0.25±0.50 | 0.07±0.14 | 0.00±0.00          | —         | 0.00±0.00 |
| 自然潮滩<br>Nature tidal flat      | 浮游生物食者 PI                | 1.56±0.32           | 0.87±0.06 | 0.53±0.14 | 1.61±0.28             | 0.89±0.08 | 0.50±0.12 | 0.69±0.48          | 0.69±0.48 | 0.27±0.22 |
|                                | 植食者 Ph                   | 0.00±0.00           | —         | 0.00±0.00 | 0.00±0.00             | —         | 0.00±0.00 | —                  | —         | —         |
|                                | 肉食者 C                    | 0.00±0.00           | —         | 0.00±0.00 | 0.21±0.42             | 0.21±0.42 | 0.09±0.18 | 0.72±0.48          | 0.72±0.48 | 0.27±0.24 |
|                                | 杂食者 O                    | —                   | —         | —         | 0.74±0.50             | 0.55±0.40 | 0.27±0.18 | 1.56±0.48          | 0.77±0.14 | 0.65±0.32 |
|                                | 碎屑食者 D                   | 0.46±0.54           | 0.46±0.54 | 0.14±0.16 | 0.25±0.50             | 0.25±0.50 | 0.14±0.16 | —                  | —         | —         |

—: 无数据; *H'*: Shannon-Wiener 多样性指数 Shannon-Wiener diversity index; *J'*: Pielou 均匀度指数 Pielou evenness index; *d*: Margalef 丰富度指数 Margalef richness index

当生态系统的功能受到损害的时候,功能群的组成和类型也会发生相应的变化<sup>[23]</sup>。本研究结果表明,高潮带和中潮带主导功能群主要由浮游生物食者和杂食者构成,植食者的物种数和丰度却较少,这与其他学者对长江口的研究结果不同<sup>[24]</sup>。可能的原因是横沙东滩形成时间较晚,围垦建设的南大堤将高潮带大部分框围入围垦潮滩,保留的潮间带滩面最宽处也仅有两公里左右,为底栖动物提供的栖息空间很有限,底栖动物功能群的构成与绵延数公里、植被呈明显带状分布的崇明东滩相比更为简单<sup>[25]</sup>。同时,围垦保留的盐沼植被也较为稀疏,导致植食者相对较少。通常在长江口实施的围垦工程初期,对淤积岸段潮滩的框围会加快堤前滩地的淤积<sup>[26]</sup>,但横沙东滩植被覆盖率低,较强的风和浪,流域来沙量减少以及长江深水航道工程都可能影响泥沙沉降,导致自然潮滩高程升高缓慢。潮滩高程直接影响盐沼植被,尤其是海三棱藨草的生活史状况,据相关研究表明,海三棱藨草在高程较低时常采取无性繁殖,不利于种群的快速扩散<sup>[27]</sup>。因此,这有可能导致横沙东滩自然潮滩的初级生产力较低,且这种状况会持续很长时间,不利于底栖动物功能群的构成和恢复。

### 3.2 围垦滩涂对底栖动物功能群的影响

滩涂湿地围垦之后,受到一些生物因素和非生物因素的影响,底栖动物功能群的构成会发生相应的变化。围垦潮滩和自然潮滩均有 5 个功能群,但围垦潮滩主导功能群为浮游生物食者和植食者,且在各潮位之间无变化,而自然潮滩则由高潮带的浮游生物食者向低潮带的杂食者演变。方差分析来看,围垦潮滩仅有植食者的丰度存在显著性差异,而自然潮滩大部分功能群的物种数和丰度都在潮位之间存在显著性差异。这说明围垦导致底栖动物功能群在潮位之间趋同。横沙东滩围垦多年,滩面宽度大约是自然潮滩的 2—3 倍,这就为底栖动物提供了更多的生存空间。但长时间的促淤使得围垦潮滩的高程逐年升高,各潮位之间高程差异已不明显,盐度、潮汐动力等环境因素的改变使区内底栖动物功能群的分布格局较自然潮滩发生明显的变化,尤其是潮水流速减慢以及围垦后盐沼植被迅速扩张,为底上活动的植食者以及滤食性的浮游生物食者提供了丰富的

食物来源和稳定的生存环境,使这两种功能群的丰度和多样性在围垦潮滩均处于较高水平。潮滩围垦之后,原本为光滩的低潮带也开始有芦苇和海三棱藨草植被呈斑块状出现,同时一些植食者由于种群扩张的速度较快,导致高中潮带的生存空间不足而下迁到低潮带,浮游生物食者和植食者比例的增加,必然导致其余几种功能群比例的减少,尤其是低潮带原主导功能群杂食者的生态位已经逐渐被植食者取代。

湿地生态系统食物网构成较为复杂,作为主要的消费者,底栖动物功能群的多样性直接影响着潮间带食物网的结构和功能<sup>[28]</sup>。自然潮滩虽然受到筑堤工程的影响,但底栖动物功能群的分布较围垦潮滩更具长江口潮间带的特征,尤其是杂食者和肉食者的丰度和多样性要明显高于围垦潮滩;而促淤之后的围垦潮滩仅有植食者的多样性高于自然潮滩,其丰度也达到总丰度的 70.27%。这说明围垦导致原始潮滩的生境功能发生改变,更适宜于植食者的生存。根据相关研究,底栖动物内部的物质和能量流动可以简单的归纳为 3 条路线,即植物→植食者→捕食者;浮游生物→浮游生物食者→捕食者;碎屑→碎屑食者→捕食者<sup>[29]</sup>。而湿地生态系统中广泛存在着营养级联效应,这种下行效应的强度影响着湿地生态系统食物链中各营养级的变化,进而决定着底栖动物各功能群的发展状况<sup>[30]</sup>。围垦潮滩一些杂食性和肉食性底栖动物由于环境的改变数量下降直至消失,而捕食者的减少使得植食者数量相对增加,这种营养级联效应也会间接作用于潮间带的初级生产者,最终可能导致围垦潮滩初级生产力不断下降。因此,围垦滩涂生态功能的不平衡,人为的生态修复干预十分必要。

### 3.3 生态修复

底栖动物构成了湿地生态系统中的底栖亚系统,其功能群可作为生态系统受损时的压力指标来反映生态系统的基本动态<sup>[31]</sup>。研究湿地生态系统中底栖动物功能群的构成对生态修复有重要的意义。根据横沙东滩的实际情况,增加消费者特别是食物链中等级较高的消费者的多样性有利于控制围垦潮滩中植食者的数量,避免单一主导功能群造成群落结构的不平衡,使围垦潮滩的初级生产力保持在一个较高的水平。同时,适当降低围垦高程的幅度,恢复低潮带光滩原貌,重新投放泥螺等低潮带经济物种,使狭额绒螯蟹等活动能力较强的低潮带常见物种迁移返回重新利用新的沉积环境。综上所述,湿地围垦对底栖动物功能群的影响是十分明显的,在进行湿地开发的同时,注重对底栖动物特别是生态经济价值较高的物种的保护,做到经济发展与维持生态环境永续相结合,这是需要长期进行研究的课题。

### References:

- [ 1 ] Ma C A, Xu L L, Tian W, Lv W W, Zhao Y L. The influence of a reclamation project on the macrobenthos of an East Nanhui tidal flat. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(4): 1007-1015.
- [ 2 ] Zhang B, Yuan X, Pei E L, Niu J Y, Heng N N, Wang T H. Change of waterbird community structure after the intertidal mudflat reclamation in the Yangtze River Mouth: a case study of Nanhui Dongtan area. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(16): 4599-4608.
- [ 3 ] Sang Y Y, Yu Z Y, Jin L. Natural evolvement and effect of project in the Hengsha East Shoal of the Changjiang River estuarine. *Donghai Marine Science*, 2003, 21(3): 14-23.
- [ 4 ] Du J L, Jiang L P, Yang S L. GIS analysis of the natural evolvement of the Hengsha East Shoal of the Yangtze River and the infects of projects in the last thirty years. *Marine Science Bulletin*, 2007, 26(5): 43-48.
- [ 5 ] Niu J Y, Heng N N, Zhang B, Yuan X, Wang T H. Waterbird habitat-selection during winter and spring in reclaimed coastal wetlands in Nanhui Dongtan, Shanghai. *Zoological Research*, 2011, 32(6): 624-630.
- [ 6 ] Ge B M, Bao Y X, Zheng X. Structure of macrobenthic communities in different habitats at the diked tidal flat in winter. *Zoological Research*, 2005, 26(1): 47-54.
- [ 7 ] Zhang C L, Xu B D, Ren Y P, Xue Y, Ji Y P. The spatio-temporal change in the secondary production of macrozoobenthos in the intertidal zone of Jiaozhou Bay. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(17): 5071-5080.
- [ 8 ] Li Y, Li G Y, Mu J P, Sun S C. Effects of consumer diversity on food web structure and ecosystem functioning: current knowledge and perspectives. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(1): 388-398.
- [ 9 ] Jeanette L S, Mike A K, Anthony J S H, John I S. Can functional groups be used to indicate estuarine ecological status? *Hydrobiologia*, 2007, 588(1): 45-58.

- [10] Ge B M, Bao Y X, Cheng H Y, Li H H, Hu Z Y. The trophic functional groups and trophic levels of the macrobenthic community at the east tidal flat of Lingkun Island. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(10): 4796-4804.
- [11] Mucha A P, Costa M H. Macrozoobenthic community structure in two Portuguese estuaries; relationship with organic enrichment and nutrient gradients. *Acta Oecologica*, 1999, 20(4): 363-376.
- [12] Talley T S, Dayton P K, Ibarra-Obando S E. Tidal flat macrofaunal communities and their associated environments in estuaries of southern California and northern Baja California, Mexico. *Estuaries and Coasts*, 2000, 23(1): 97-114.
- [13] Xin J H, Ren Y P, Xu B D, Zhang C L, Xue Y, Ji Y P. Macrozoobenthos functional groups in intertidal flat of northwest Jiaozhou Bay. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, 22(7): 1885-1892.
- [14] Bao Y X, Hu Z Y, Li H H, Ge B M, Cheng H Y. Seasonal variation and functional groups of macrobenthic communities at diked and natural tidal flat, Lingkun Island, China. *Acta Zoologica Sinica*, 2008, 54(3): 416-427.
- [15] Yuan X Z, Lu J J. Studies on zoobenthos resources in the islands of the Changjiang Estuary. *Journal of Natural Resources*, 2001, 16(1): 37-41.
- [16] Tao S R, Jiang L F, Wu J H, Zhao B, Li B. Community characteristics and seasonal changes of macrozoobenthos in intertidal zones of Hengsha and Changxing islands at Yangtze River Estuary. *Chinese Journal of Ecology*, 2009, 28(7): 1345-1350.
- [17] Yuan X Z, Lu J J, Liu H. Distribution pattern and variation in the functional groups of zoobenthos in the Changjiang Estuary. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22(12): 2054-2062.
- [18] Steneck R S, Watling L. Feeding capabilities and limitation of herbivorous molluscs; a functional group approach. *Marine Biology*, 1982, 68(3): 299-319.
- [19] Fauchald K, Jumars P A. The diet of worms; a study of polychaete feeding guilds. *Oceanography and Marine Biology, An Annual Review*, 1979, 17: 193-284.
- [20] Xu H F, Zhao Y L. The Report of Scientific Survey of the Chongming Dong Tan Migratory Bird Nature Reserve of Shanghai. Beijing: China Forestry Publishing House, 2005: 75-115.
- [21] You Z J, Tao L, Jiao H F, Shi H X, Lou D. A survey of macrobenthos in the Xiangshan Bay. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2011, 42(3): 431-435.
- [22] Li H H, Bao Y X, Hu Z Y, Ge B M. Seasonal dynamics of macrobenthic functional groups and trophic levels in the bridge construction zone at the South Bank of Hangzhou Bay, China. *Acta Zoologica Sinica*, 2007, 53(6): 1011-1023.
- [23] Tilman D, Knops J, Wedin D, Reich P, Ritchie M, Siemann E. The influence of functional diversity and composition on ecosystem processes. *Science*, 1997, 277(5330): 1300-1302.
- [24] Zhu X J, Lu J J. Functional groups of zoobenthos in the intertidal zone of Jiuduansha, the Yangtze River Estuary. *Zoological Research*, 2003, 24(5): 355-361.
- [25] An C G, Zhao Y L, Lin L, Li J Y, Cui L L, Ma C Y. The biodiversity of macrobenthos of intertidal zone on Chongming Island in summer. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(2): 577-586.
- [26] Chen C J. Changes in mud flat after tideland being enclosed. *Marine Science Bulletin*, 1990, 9(3): 69-74.
- [27] Sun S C, Cai Y L, Liu H. Biomass allocation of *Scirpus mariqueter* along an elevational gradient in a salt marsh of the Yangtze River Estuary. *Acta Botanica Sinica*, 2001, 43(2): 178-185.
- [28] Simanonok M P, Anderson C B, Pastur G M, Lencinas M V, Kennedy J H. A comparison of impacts from silviculture practices and North American beaver invasion on stream benthic macroinvertebrate community structure and function in *Nothofagus* forests of Tierra del Fuego. *Forest Ecology and Management*, 2011, 262(2): 263-269.
- [29] Zhang Q T, Hu G K, Ni R, Hu Y, Guo C. A preliminary study on the trophic structure of macrobenthos in the Tanggu littoral zone. *Transactions of Oceanology and Limnology*, 2005, 17(3): 73-78.
- [30] Halpern B S, Borer E T, Seabloom E W, Shurin J B. Predator effects on herbivore and plant stability. *Ecology Letters*, 2005, 8(2): 189-194.
- [31] Mouquet N, Moore J L, Loreau M. Plant species richness and community productivity: why the mechanism that promotes coexistence matters. *Ecology Letters*, 2002, 5(1): 56-65.

#### 参考文献:

- [1] 马长安, 徐霖林, 田伟, 吕巍巍, 赵云龙. 围垦对南汇东滩湿地大型底栖动物的影响. *生态学报*, 2012, 32(4): 1007-1015.
- [2] 张斌, 袁晓, 裴恩乐, 牛俊英, 衡楠楠, 王天厚. 长江口滩涂围垦后水鸟群落结构的变化——以南汇东滩为例. *生态学报*, 2011, 31(16): 4599-4608.
- [3] 桑永尧, 虞志英, 金寥. 长江河口横沙东滩自然演变及工程影响. *东海海洋*, 2003, 21(3): 14-23.
- [4] 杜景龙, 姜俐平, 杨世伦. 长江口横沙东滩近 30 年来自然演变及工程影响的 GIS 分析. *海洋通报*, 2007, 26(5): 43-48.

- [5] 牛俊英, 衡楠楠, 张斌, 袁晓, 王天厚. 上海市南汇东滩围垦后海岸带湿地冬春季水鸟生境选择. 动物学研究, 2011, 32(6): 624-630.
- [6] 葛宝明, 鲍毅新, 郑祥. 围垦滩涂不同生境冬季大型底栖动物群落结构. 动物学研究, 2005, 26(1): 47-54.
- [7] 张崇良, 徐宾铎, 任一平, 薛莹, 纪毓鹏. 胶州湾潮间带大型底栖动物次级生产力的时空变化. 生态学报, 2011, 31(17): 5071-5080.
- [8] 李妍, 李国勇, 慕军鹏, 孙书存. 消费者多样性对食物网结构和生态系统功能的影响. 生态学报, 2008, 28(1): 388-398.
- [10] 葛宝明, 鲍毅新, 程宏毅, 李欢欢, 胡知渊. 灵昆岛东滩潮间带大型底栖动物功能群及营养等级构成. 生态学报, 2008, 28(10): 4796-4804.
- [13] 辛俊宏, 任一平, 徐宾铎, 张崇良, 薛莹, 纪毓鹏. 胶州湾西北部潮滩湿地大型底栖动物功能群. 应用生态学报, 2011, 22(7): 1885-1892.
- [14] 鲍毅新, 胡知渊, 李欢欢, 葛宝明, 程宏毅. 灵昆东滩围垦区内外大型底栖动物季节变化和功能群的比较. 动物学报, 2008, 54(3): 416-427.
- [15] 袁兴中, 陆健健. 长江口岛屿湿地的底栖动物资源研究. 自然资源学报, 2001, 16(1): 37-41.
- [16] 陶世如, 姜丽芬, 吴纪华, 赵斌, 李博. 长江口横沙岛、长兴岛潮间带大型底栖动物群落特征及其季节变化. 生态学杂志, 2009, 28(7): 1345-1350.
- [17] 袁兴中, 陆健健, 刘红. 长江口底栖动物功能群分布格局及其变化. 生态学报, 2002, 22(12): 2054-2062.
- [20] 徐宏发, 赵云龙. 上海市崇明东滩鸟类自然保护区科学考察集. 北京: 中国林业出版社, 2005: 75-115.
- [21] 尤仲杰, 陶磊, 焦海峰, 施慧雄, 楼丹. 象山港大型底栖动物功能群研究. 海洋与湖沼, 2011, 42(3): 431-435.
- [22] 李欢欢, 鲍毅新, 胡知渊, 葛宝明. 杭州湾南岸大桥建设区域潮间带大型底栖动物功能群及营养等级的季节动态. 动物学报, 2007, 53(6): 1011-1023.
- [24] 朱晓君, 陆健健. 长江口九段沙潮间带底栖动物的功能群. 动物学研究, 2003, 24(5): 355-361.
- [25] 安传光, 赵云龙, 林凌, 李嘉尧, 崔丽丽, 马春艳. 崇明岛潮间带夏季大型底栖动物多样性. 生态学报, 2008, 28(2): 577-586.
- [26] 陈才俊. 围滩造田与淤泥质潮滩的发育. 海洋通报, 1990, 9(3): 69-74.
- [27] 孙书存, 蔡永立, 刘红. 长江口盐沼海三棱藨草在高程梯度上的生物量分配. 植物学报, 2001, 43(2): 178-185.
- [29] 张青田, 胡桂坤, 倪蕊, 胡洋, 郭宠. 塘沽潮间带大型底栖动物营养结构的初步分析. 海洋湖沼通报, 2005, 17(3): 73-78.

# ACTA ECOLOGICA SINICA Vol.33, No.21 Nov., 2013 (Semimonthly)

## CONTENTS

### Frontiers and Comprehensive Review

- Gross ecosystem product: theory framework and case study ..... OUYANG Zhiyun, ZHU Chunquan, YANG Guangbin, et al (6747)
- Advances in impacts of climate change on infectious diseases outbreak ..... LI Guodong, ZHANG Junhua, JIAO Gengjun, et al (6762)
- Ecology of aerobic methane oxidizing bacteria (methanotrophs) ..... YUN Juanli, WANG Yanfen, ZHANG Hongxun (6774)
- Nitrogen deposition and *Leymus chinensis* leaf chlorophyll content in Inner Mongolian grassland .....  
..... ZHANG Yunhai, HE Nianpeng, ZHANG Guangming, et al (6786)
- Worldwide distribution and multivariate similarity clustering analysis of spiders .....  
..... SHEN Xiaocheng, ZHANG Baoshi, ZHANG Feng, et al (6795)
- The influence of wind direction on pollen-mediated gene flow in transgenic insect-resistant cotton .....  
..... ZHU Jialin, HE Juan, NIU Jianqun, et al (6803)

### Autecology & Fundamentals

- Ecological characteristics of benthic diatoms, protozoa and meiobenthos in the sediments of the Changjiang Estuary and East China  
Sea in spring ..... MENG Zhaoxui, XU Kuidong (6813)
- Macrobenthic functional groups at the reclamation and natural tidal flats of Hengsha East Shoal, the Estuary of Changjiang River .....  
..... LV Weiwei, MA Chang'an, YU Ji, et al (6825)
- Enrichment and ecological risk of heavy metal in soils and dominant plants in the riparian of the Fenghe River .....  
..... YANG Yang, ZHOU Zhengchao, WANG Huanhuan, et al (6834)
- Effects of salinity and exogenous substrates on the decomposition and transformation of soil organic carbon in the Yellow River  
Delta ..... LI Ling, QIU Shaojun, TAN Feifei, et al (6844)
- Effects of short-term dark chilling on leaves carbon and nitrogen metabolism and involved activities of enzymes in mangrove *Kandelia  
obovata* seedling ..... ZHENG Chunfang, LIU Weicheng, CHEN Shaobo, et al (6853)
- Preliminary evaluation on tolerance to phosphorous deficiency of 32 cultivars of cut chrysanthemum .....  
..... LIU Peng, CHEN Sumei, FANG Weimin, et al (6863)
- Effects of age and environmental conditions on accumulation of heavy-metals Cd and Cu in *Tegillarca granosa* .....  
..... WANG Zhaogen, WU Hongxi, CHEN Xiaoxiao, et al (6869)
- Effects of Chinese gallnut on photosynthetic characteristics and total nitrogen content of *Rhus chinensis* .....  
..... LI Yang, YANG Zixiang, CHEN Xiaoming, et al (6876)
- The characterization of glyphosate degradation by *Burkholderia multivorans* WS-FJ9 ..... LI Guanxi, WU Xiaoqin, YE Jianren (6885)
- Electroantennographic and behavioural responses of scarab beetles to *Ricinus communis* leaf volatiles .....  
..... LI Weizheng, YANG Lei, SHEN Xiaowei, et al (6895)

### Population, Community and Ecosystem

- Ecosystem health assessment in Baiyangdian Lake ..... XU Fei, ZHAO Yanwei, YANG Zhifeng, et al (6904)
- Characteristics of macrobenthic communities in mangrove wetlands along the waterways of North Hezhou, Zhuhai, South China .....  
..... WANG Hui, ZHONG Shan, FANG Zhanqiang (6913)
- The interaction between components of ecosystem respiration in typical forest and grassland ecosystems .....  
..... ZHU Xianjin, YU Guirui, WANG Qiufeng, et al (6925)
- Effects of thinning on macro fungi and their relationship with litter decomposition in *Pinus tabulaeformis* plantations .....  
..... CHEN Xiao, BAI Shulan, LIU Yong, et al (6935)

- Beta diversity of plant communities in Baishanzu Nature Reserve ..... TAN Shanshan, YE Zhenlin, YUAN Liubin, et al (6944)
- Effect of Oxytetracycline (OTC) on the activities of enzyme and microbial community metabolic profiles in composting .....  
..... CHEN Zhixue, GU Jie, GAO Hua, et al (6957)

### Landscape, Regional and Global Ecology

- Variations in leaf anatomy of *Larix gmelinii* reflect adaptation of its photosynthetic capacity to climate changes .....  
..... JI Zijing, QUAN Xiankui, WANG Chuankuan (6967)
- The studying of key ecological factors and threshold of landscape evolution in Yancheng Coastal wetland .....  
..... ZHANG Huabing, LIU Hongyu, LI Yufeng, et al (6975)
- Eco-physiological response of *Phragmites communis* to water table changes in the Horqin Sand Land .....  
..... MA Yunhua, ZHANG Tonghui, LIU Xinping (6984)
- Improvement of snowmelt implementation in the SWAT hydrologic model ... YU Wenjun, NAN Zhuotong, ZHAO Yanbo, et al (6992)
- Responses of lake fluctuation to climate change in Horqin Sandy Land .....  
..... CHANG Xueli, ZHAO Xueyong, WANG Wei, et al (7002)
- Water ecology and fractal characteristics of soil particle size distribution of three typical vegetations in Shell Island .....  
..... XIA Jiangbao, ZHANG Shuyong, WANG Rongrong, et al (7013)
- Spatio-temporal distribution of epilithic algal chlorophyll a in relation to the physico-chemical factors of Gufu River in Three Gorges Reservoir ..... WU Shuyuan, GE Jiwen, MIAO Wenjie, et al (7023)

### Resource and Industrial Ecology

- Graphic analysis of spatio-temporal effect for vegetation disturbance caused by coal mining: a case of Datong Coal Mine Area .....  
..... HUANG Yi, WANG Yunjia, LI Xiaoshun, et al (7035)

# 《生态学报》2014 年征订启事

《生态学报》是由中国科学技术协会主管,中国生态学学会、中国科学院生态环境研究中心主办的生态学高级专业学术期刊,创刊于 1981 年,报道生态学领域前沿理论和原始创新性研究成果。坚持“百花齐放,百家争鸣”的方针,依靠和团结广大生态学科工作者,探索生态学奥秘,为生态学基础理论研究搭建交流平台,促进生态学研究深入发展,为我国培养和造就生态学科人才和知识创新服务、为国民经济建设和发展服务。

《生态学报》主要报道生态学及各分支学科的重要基础理论和应用研究的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;新书评价和学术、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 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

本期责任副主编 余新晓

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 33 卷 第 21 期 (2013 年 11 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 33 No. 21 (November, 2013)

|               |                                                                                                                    |                 |                                                                                                                                                                                   |
|---------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 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           | 王如松                                                                                                                | Editor-in-chief | WANG Rusong                                                                                                                                                                       |
| 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:100717                                                                       | 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 90.00 元