

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

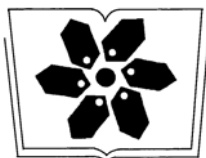
Acta Ecologica Sinica



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/stxb201207181017

王卉, 钟山, 方展强. 珠海鹤洲水道沿岸红树林湿地大型底栖动物群落特征. 生态学报, 2013, 33(21): 6913-6924.

Wang H, Zhong S, Fang Z Q. Characteristics of macrobenthic communities in mangrove wetlands along the waterways of North Hezhou, Zhuhai, South China. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(21): 6913-6924.

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*

(华南师范大学生命科学学院, 广东省高等学校生态与环境科学重点实验室, 广州 510631)

摘要:对珠海鹤洲水道沿岸围垦湿地的 4 个红树人工林(包括老鼠簕 *Acanthus ilicifolius*、木榄 *Bruguiera gymnorhiza*、秋茄 *Kandelia candel* 和无瓣海桑 *Sonneratia apetala*) 样地和 2 个挺水植被样地(短叶茳芏 *Cyperus malaccensis* var. *brevifolius* 和芦苇 *Phragmites australis*) 的大型底栖动物群落进行为期 1a 的生物调查。利用大型多元分析软件 Primer 5 的等级聚类分析 CLUSTER (基于 Bray-Curtis 相似性矩阵) 和非参数多变量标序 NMDS 分析大型底栖动物的群落结构, 鹤洲北围垦湿地 6 种生境下大型底栖动物在非相似度 55% 的条件下被划分为 3 组(组 1: 短叶茳芏-老鼠簕-木榄组合; 组 2: 无瓣海桑组合; 组 3: 秋茄-芦苇组合)。组 1 栖息地其大型底栖动物以谭氏泥蟹 (*Ilyrplax deschampsii*) 和多毛类为主, 其中老鼠簕样地大型底栖动物物种数目(19 种)、物种丰富度 ($d=1.93\pm0.11$) 和多样性指数 ($H'=1.51\pm0.13$) 均为全部 6 种生境最高; 短叶茳芏样地的栖息密度 ((254.67 ± 156.81) 个/ m^2) 在 6 种生境中最高。组 2 栖息地其大型底栖动物以攀援型螺类和无齿螳臂相手蟹 (*Chiromantes dehaani*) 为主, 生物量 ((32.06 ± 19.62) g/ m^2) 在 6 种生境中最高, 物种丰富度 ($d=1.28\pm0.45$) 和多样性指数 ($H'=1.04\pm0.27$) 居中。组 3 栖息地其大型底栖动物以麦氏碟尾虫 (*Discapseudes mackiei*) 和多毛类为主, 物种数、栖息密度、生物量和多样性指数均较低。SIMPER 相似性百分比分析显示对群落划分起重要作用的物种主要为各个生境的优势物种。使用典范对应分析 (CCA) 对大型底栖动物分布与盐度、深度和温度 3 个环境因子的关系进行深入分析, 并利用蒙特卡罗置换检验 (Monte Carlo Permutation Test) 鉴定环境因子的显著水平, 其中盐度 ($P<0.05$) 和深度 ($P<0.05$) 与大型底栖动物分布差异显著相关, 温度 ($P>0.05$) 无显著相关。研究结果表明: 不同生境大型底栖动物优势物种存在差异; 盐度和深度是影响鹤洲北围垦湿地大型底栖动物群落结构最重要的环境因子; 围垦区人工湿地与自然滩涂大型底栖动物群落结构差异显著。

关键词:大型底栖动物; 群落特征; 红树林湿地; 鹤洲水道; 珠海

Characteristics of macrobenthic communities in mangrove wetlands along the waterways of North Hezhou, Zhuhai, South China

WANG Hui, ZHONG Shan, FANG Zhanqiang*

Key Laboratory of Ecology and Environmental Science in Guangdong Higher Education, College of Life Sciences, South China Normal University, Guangzhou 510631, China

Abstract: Macrobenthic communities were sampled four times over a one year period between December 2010 and September 2011 at six different sites in North Hezhou, Zhuhai, China. The six sites comprised four restored mangrove forest habitats (each dominated by a different mangrove species: *Acanthus ilicifolius*, *Bruguiera gymnorhiza*, *Kandelia candel* and *Sonneratia apetala*) and two diked wetland habitats, one of which was composed of *Cyperus malaccensis* var. *brevifolius*, and the other *Phragmites australis*. In total, 35 macrobenthic species were recorded during the study. The dominant taxa recorded were crustaceans (10 taxa) and polychaetes (7 taxa). The number of species recorded at a single site varied from

基金项目:国家科技支撑计划项目(2009BADB2B401-02); 广东省科技计划项目(2009B030600006); 珠海市野生动植物保护管理所项目(珠海市珠江口湿地生态系统动植物监测)

收稿日期: 2012-07-18; 修订日期: 2013-03-04

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: fangzhq@scln.edu.cn

7 (*Kandelia candel* habitat) to 19 (*Acanthus ilicifolius* habitat). Hierarchical clustering (based on the Bray-Curtis similarity index) combined with non-metric multidimensional scaling (NMDS); implemented in PRIMER 5 under the condition of 55% non-similarity), was used to classify sampling sites into three groups based on their macrobenthic fauna. Group 1 comprised *Cyperus malaccensis* var. *brevifolius*, *Acanthus ilicifolius*, and *Bruguiera gymnorrhiza* habitats; Group 2 comprised the *Sonneratia apetala* habitat; while Group 3 comprised *Kandelia candel* and *Phragmites australis* habitat. However, species composition was similar across all three groups, because *Discapseudes mackiei* was abundant at all six habitats. The highest number of species (19), highest Margalef index ($d = 1.93 \pm 0.11$), and highest species diversity (Shannon-wiener index, $H' = 1.51 \pm 0.13$) were recorded at the *Acanthus ilicifolius* habitat, where crustaceans, mainly *Ilyrplax deschampsii*, were the dominant group recorded. Macrobenthos density was highest at the *Cyperus malaccensis* var. *brevifolius* habitat (254.67 ± 156.81) ind./m², while macrobenthos biomass was highest at the *Sonneratia apetala* habitat (32.06 ± 19.62) g/m². Interestingly, the faunal community structure at the *Sonneratia apetala* habitat differed significantly to the other habitats, as it was dominated by climbing species, such as *Chiromantes dehaani* and *Pythia cecillei*. *Discapseudes mackiei* and polychaetes were the dominant species within *Kandelia candel* and *Phragmites australis* habitats. Overall, macrobenthos species richness, density, biomass and species diversity were low within all six habitats. We also classified macrobenthic community structure based on functional feeding groups (FFGs) and life form analyses. Results showed that the omnivorous functional feeding group and below-surface life forms were abundant at all habitats within the North Hezhou tidal flat. Similarity percentages analysis (SIMPER) showed that the species that differentiated the macrobenthic communities of different habitats were the dominant species in each habitat. The results of a canonical correspondence analysis (CCA) revealed that macrobenthic communities changed significantly with depth (Monte Carlo permutation test: $P < 0.05$) and salinity ($P < 0.05$), but not with temperature ($P > 0.05$). The findings of this study suggest that macrobenthic communities differ structurally between the diked wetland habitats and the natural tidal flat habitats, with the highest densities and biomasses of macrobenthos occurring at habitats close to the tidal gate. Our results further reveal significant differences in the dominant species of macrobenthos occurring in different habitats. Furthermore, our results show that environmental variables, such as depth and salinity, are the most important factors affecting macrobenthic communities in the North Hezhou tidal flat.

Key Words: macrobenthos; community characteristics; mangrove wetland; the waterways of North Hezhou; Zhuhai

珠海市位于珠江出海口,海域内岸线长 15.8 km,海岛岸线长 601.2 km,滩涂宽阔,适合红树林生长的潮间带生境约有 171 km²[1]。但是随着围垦造田和工业的快速发展,珠海市红树林面积急剧缩小。剩余的红树林湿地生物多样性水平则低下并且生态功能不完整[2]。近年来,珠海市大力保护并开展人工恢复红树林,引种速生红树种类无瓣海桑(*Sonneratia apetala*),以达到恢复珠海红树林湿地生态系统的目的。

已有研究证明,大型底栖动物可以影响和调节红树林的结构和功能,并且可以通过掘穴、迁移、取食等活动,来介导潮汐流动、帮助冲刷沉积物中的有毒物质和降低红树植被间的种内竞争[3-4]。另外,大型底栖动物的群落结构能反映出湿地底质条件、水质状况、水温等非生物因子以及植被、物种间的影响、捕食压力等生物因子的情况[5]。因此,国内外许多研究都认为十分有必要将大型底栖动物作为一种可靠有效的指标来评估红树林的生态恢复状态[6-9]。

由于珠海鹤州北湿地围垦时间较短,而且围垦后大部分区域开发为农田和鱼虾养殖池塘,所以一直缺少相关的湿地生态研究;鹤州北围垦湿地人工红树林恢复过程中大型底栖动物群落结构如何及变化趋势是什么?影响大型底栖动物群落结构最重要的环境因子是什么?本研究旨在填补珠海鹤州北围垦湿地的大型底栖动物生态现状的空白并为围垦湿地的生态修复提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

研究区位于广东省珠海市鹤洲北鹤洲水道沿岸(东经 113°22'38"—113°24'52", 北纬 22°7'58"—22°9'36") 人工种植红树林区湿地,属于低纬度亚热带季风区,日照充足,年平均气温 22.4℃,最冷月 1 月 14.5℃,最热月 7 月 28.6℃;年平均降雨量 1700—2300 mm,东风为常向风,空气平均相对湿度为 79%。潮汐属不正规半日潮,平均高潮位 0.17 m,平均低潮位 -0.14 m,水质比较清洁;土壤属于滨海盐渍草甸沼泽土。

1.2 站位布设

在鹤洲水道沿岸围垦湿地共设置 6 个采样站位(图 1),红树植物属于人工林,种植时间 2a 左右。围垦区内有若干条狭窄潮沟,呈田字形排列,其中一条潮沟(大致南北走向)与围垦区堤坝闸口相通。6 个采样站位根据位于堤坝外侧临海自然滩涂(A)或是堤坝内侧临潮沟的围垦湿地(B)由西向东分别记为:短叶茳茳(*Cyperus malaccensis* var. *brevifolius*);老鼠簕(*Acanthus ilicifolius*);无瓣海桑(*Sonneratia apetala*);木榄(*Bruguiera gymnorhiza*);秋茄(*Kandelia candel*);芦苇(*Phragmites australis*)。

1.3 采样方法及样品处理

采样时间为 2010 年 12 月、2011 年 3 月、6 月和 9 月份,分别对应冬季、春季、夏季和秋季 4 个季节。每个研究样地从沿岸端向近海水端选择 4 个较为典型的地方布设站点,采用 25 cm × 25 cm 的定量样框,每个站点取 4 个样,总计 96 个样方。先捡出框内底表动物,再挖至 30 cm 深的沉积物,用 0.5 mm 孔径筛子分选出底内动物,所获动物标本用 5% 的甲醛溶液现场固定,于实验室内分析鉴定。同时另取 1 kg 左右的沉积物作为土壤样本。盐度使用质量法测定,取全年平均值。

1.4 大型底栖动物生活型及功能群的划分

依据本实验的实际情况并参考范航清等、杨泽华等和葛宝明等^[10-12]的划分,本文将捕获的大型底栖动物的生活型划分为:(1)面上生活型(GS),包括底上附着型[腹足纲所有种]和游泳底栖型[甲壳纲十足目所有种、鼠妇(*Armadillidium vulgare*)、黄纹丽龙虱(*Hydraticus vittatus*)及弹涂鱼(*Periophthalmus modestus*)];(2)面下生活群(GSB),包括底内型[多毛类、双壳纲所有种、纽虫、昆虫幼虫]和穴居型[甲壳纲蟹类、原足目、等足目、端足目]。

同时,本文主要依据大型底栖动物的食性,并参考朱晓君等和鲍毅新等^[12-14]的研究,将大型底栖动物划分为 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)和碎屑食者(D)。

1.5 数据处理

1.5.1 优势物种

$$Y = P_i \times f_i \quad (1)$$

式中, P_i 为物种 i 的个体数占全部物种个体数的比例, f_i 为物种 i 在各个站位出现的频率,当 $Y > 0.02$ 时,该物种为优势种。

1.5.2 栖息密度和生物量分析

使用 SPSS17.0 软件包对站位中大型底栖动物群落的平均栖息密度和平均生物量等进行以季节和站位为因素的无重复双因素方差分析。

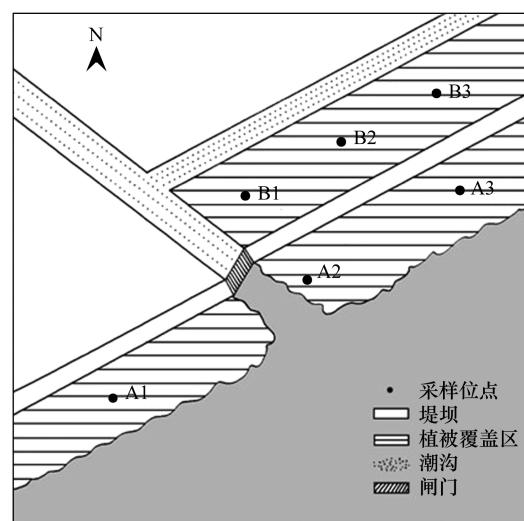


图 1 珠海鹤洲北水道沿岸滩涂采样位点设置

Fig.1 Map of the study area showing the sampling sites along the waterways in the tidal flat of North Hezhou, Zhuhai

1.5.3 多样性测度

采用 Margalef 物种丰富度指数(d)、Shannon-Wiener 多样性指数(H') 以及 Pielou 均匀度指数(J')。

$$\text{Margalef 物种丰富度指数} \quad d = (S-1)/\log_2 N \quad (2)$$

$$\text{Shannon-Wiener 指数} \quad H' = - \sum_{i=1}^s (P_i) (\ln P_i) \quad (3)$$

$$\text{Pielou 均匀度指数} \quad J' = H'/H'_{\max}; H'_{\max} = \ln S \quad (4)$$

式中, S 为总物种数, N 为总个体数, P_i 为物种 i 的个体数与全部物种个体数的比值。

1.5.4 大型底栖动物群落结构的分析

使用大型多元分析软件 PRIMER 5 对大型底栖动物群落结构进行分析。数据取各个站位全年平均栖息密度。为了减少机会种对群落结构的干扰,删除在总体中相对丰度<1%的种类,但保留其中任一站点相对丰度>3%的种类为非机会种,再将数据进行平方根处理后构建 Bray-Curtis 相似性矩阵,进行类平均法等级聚类 (CLUSTER) 和非参数多变量排序 (NMDS)。使用 SIMPER 相似性百分比分析来确定对各个站位动物群落划分起主要作用的物种。

1.5.5 动物群落与环境因子的关系

使用 CANOCO 4.5 for Windows 中的典范对应分析 (CCA) 方法分析大型底栖动物物种与环境因子的关系,找出对大型底栖动物群落结构影响起主要作用的环境因子,并利用蒙特卡罗置换检验鉴定环境因子的显著水平。取大型底栖动物非机会种作为分析物种,并且将大型底栖动物栖息密度和环境因子标准化以减少极端数值对典范对应分析的干扰。

2 结果与分析

2.1 不同生境大型底栖动物的种类组成

鹤州北 4 次采样共采集到大型底栖动物 35 种,隶属于 5 门 8 纲 30 科 (表 1),其中软体动物 10 种,占 29%;甲壳动物 10 种,占 29%;环节动物 7 种,占 20%;鱼类 1 种,其他无脊椎动物 7 种,占 22%。

表 1 鹤州北大型底栖动物的物种、生活型和功能型的组成和分布

Table 1 Composition and distribution of species, life forms and functional feeding groups of macrobenthos in North Hezhou

物种名称 Species	采样站位 Sampling sites						生活型 Life forms	功能群 FFG
	A1	A2	A3	B1	B2	B3		
纽形动物门 Nemertinea								
无刺纲 Anopla								
* 青纵沟纽虫 <i>Lineus fuscoviridis</i>		+		++			IN	C
环节动物门 Annelida								
多毛纲 Polychaeta								
* 羽须鳃沙蚕 <i>Dendronereis pinnaticirrus</i>	++	++		++	+++	+++	IN	D
* 疣吻沙蚕 <i>Tylorrhynchus heterochaetus</i>	++	++	+	++		+	IN	C
* 溪沙蚕 <i>Namalycastis abiuma</i>	++	++	++	++		++	IN	D
* 异足索沙蚕 <i>Lumbrineris heteropoda</i>					++		IN	D
* 中蚓虫 <i>Mediomastus</i> sp.				++	++	+	IN	D
* 孔雀缨鳃虫 <i>Sabella pavonina</i>		+	++	++	++	++	IN	Pl
丝异蚓虫 <i>Heteromastus filiformis</i>	++	++	+				IN	D
软体动物门 Mollusca								
双壳纲 Bivalvia								
红明樱蛤 <i>Moerella rutila</i>						++	IN	Pl
河蚬 <i>Corbicula fluminea</i>		+					IN	Pl
文蛤 <i>Meretrix meretrix</i>						+	IN	Pl
日本杓蛤 <i>Cuspidaria japonica</i>						++	IN	Pl

续表

物种名称 Species	采样站位 Sampling sites						生活型 Life forms	功能群 FFG
	A1	A2	A3	B1	B2	B3		
湖球蚬 <i>Sphaerium lacustre</i>						+	IN	Pl
腹足纲 Gastropoda								
紫游螺 <i>Neritina violacea</i>		+					AD	Ph
* 赛氏女教士螺 <i>Pythia cecillei</i>			++				AD	Ph
* 瘤蚘 <i>Tarebia granifera</i>		+	+++				AD	Ph
瘤拟黑螺 <i>Melanoides tuberculatus</i>		+	+	++			AD	Ph
铜锈环棱螺 <i>Bellamyia aeruginosa</i>			+				AD	Ph
节肢动物门 Arthropoda								
甲壳纲 Crustacea								
* 麦克碟尾虫 <i>Discapseudos mackiei</i>	+++	+++	+++	+++	+++	+++	CA	D
* 日本拟背尾水虱 <i>Paranthurus japonica</i>	+		+	++		++	CA	C
* 中华螺赢蜚 <i>Corophium sinensis</i>	++	+++	++	++			CA	Pl
鼠妇 <i>Armadillidium vulgare</i>		+					SW	O
脊尾白虾 <i>Exopalaemon carinicauda</i>			+				SW	O
刀额新对虾 <i>Metapenaeus ensis</i>	+						SW	O
* 谭氏泥蟹 <i>Ilyrplax deschampsii</i>	+++	+++	++	+++			CA	Ph
* 无齿螳臂相手蟹 <i>Chiromantes dehaani</i>	+	++	++				CA	Ph
平背蜆 <i>Gaetice depressus</i>	+	+	++		++	+	CA	Ph
凹背新尖额蟹 <i>Neorhynchoplax introversus</i>			+				CA	Ph
倍足纲 Diplopoda								
马陆 <i>Kronopolites svenhedini</i>			+	++		++	IN	O
昆虫纲 Insecta								
黄蜻(稚虫) <i>Pantala flavescens</i>	+						IN	O
管石蛾(幼虫) <i>Psychomyia</i> sp.			+				IN	O
水虻(幼虫) <i>Stratiomyia</i> sp.	++	+					IN	C
水蝇(幼虫) <i>Ephydry</i> sp.		+					IN	C
黄纹丽龙虱 <i>Hydaticus vittatus</i>				++			SW	C
脊索动物门 Chordata								
硬骨鱼纲 Osteichthyes								
* 弹涂鱼 <i>Periophthalmus cantonensis</i>		+			++		SW	O

+:个体数<总个体数的1%;++;占总个体数的1%—10%;+++:>总个体数的10%;生活型 IN:底内型;CA:穴居型;AD:底上附着型;SW:游泳底栖型;功能摄食类群 Pl:浮游生物食者;Ph:植食者;D:碎屑食者;C:肉食者;O:杂食者;*非机会物种

鹤州北围垦湿地大型底栖动物的动物类群季节分布见图2,春季采集的物种最多,为21种,主要类群为环节动物和甲壳动物;冬季为20种,主要类群为甲壳动物;秋季16种,主要为甲壳动物和环节动物;夏季最少,为14种,主要为环节动物和甲壳动物。

图3为鹤州北湿地6个站位中大型底栖动物类群的分布差异。从图中可以看出,鹤州北湿地大型底栖动物类群的种群数量差别很大,物种分布十分不均匀。其中甲壳动物的栖息密度最高,集中分布在短叶荇荳、老鼠簕两个站位,除秋茄站位分布很少外其他站位栖息密度居中;环节动物在芦苇(B3)站位分布最多,其余各站位栖息密度相差不大;而软体动物分布最不平衡,在无瓣海桑栖息密度最大,其余各站位则鲜有分布。

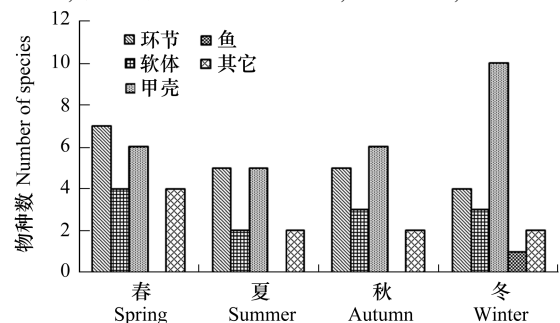


图2 大型底栖动物物种类群的季节分布

Fig.2 The distribution of macrobenthic assemblages in different seasons

2.2 优势物种

鹤州北围垦湿地不同采样站位大型底栖动物的优势物种见表 2。其中小型原足目动物麦克碟尾虫是本研究唯一在 6 个站位和 4 个季节均有分布的物种,且栖息密度很高。羽须鳃沙蚕除无瓣海桑站位未采集到外,其他站位均有分布,且芦苇站位的栖息密度最高。谭氏泥蟹和无齿螳臂相手蟹均为中小型蟹类,谭氏泥蟹在老鼠簕和短叶荳蔻站位栖息密度最高,秋茄和芦苇两个站位没有发现,无齿螳臂相手蟹在无瓣海桑站位栖息密度最高,在临潮沟的 3 个站位均未发现。赛氏女教士螺在 6 个站位中只在无瓣海桑站位发现,有大量成螺聚堆吸附在树干潮位线以上。

2.3 平均栖息密度和平均生物量

鹤州北湿地季节间和站位间栖息密度和生物量变化见图 4。以季节和站位为因素的栖息密度和生物量无重复双因素方差分析显示:栖息密度站位间无显著差异 ($F = 1.808, P > 0.05$), 季节间差异显著 ($F = 3.306, P < 0.05$);生物量站位间 ($F = 3.302, P < 0.05$) 差异显著, 季节间 ($F = 1.455, P > 0.05$) 不显著。秋季大型底栖动

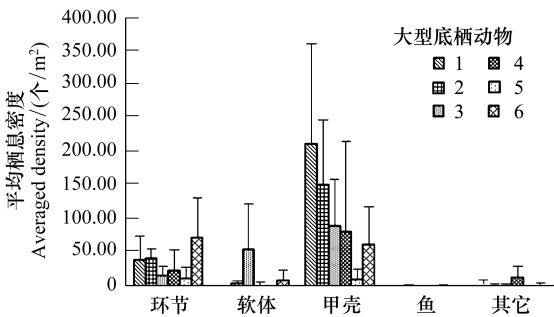


图 3 大型底栖动物种类群的站位组成

Fig.3 The composition of sampling sites at different macrobenthic assemblages

环节 Annelida; 软体 Mollusca; 甲壳 Crustacea; 鱼 Fish; 其他 Others; 1:短叶荳蔻 *Cyperus malaccensis* var. *brevifolius*; 2:老鼠簕 *Acanthus ilicifolius*; 3:无瓣海桑 *Sonneratia apetala*; 4:木榄 *Bruguiera gymnorhiza*; 5:秋茄 *Kandelia candel*; 6:芦苇 *Phragmites australis*

表 2 不同采样站位大型底栖动物优势物种

Table 2 Dominant species of macrobenthos in different sampling sites

项目 Items	取样站位 Sampling sites					
	A1	A2	A3	B1	B2	B3
优势物种 (Y)	谭氏泥蟹	谭氏泥蟹	麦克碟尾虫	麦克碟尾虫	麦克碟尾虫	麦克碟尾虫
Dominant species	(0.6175)	(0.5019)	(0.2592)	(0.1823)	(0.2083)	(0.4090)
	疣吻沙蚕	中华螺赢蜚	瘤螭	谭氏泥蟹	羽须鳃沙蚕	羽须鳃沙蚕
	(0.0334)	(0.1072)	(0.1255)	(0.0622)	(0.1250)	(0.3102)
	麦克碟尾虫	麦克碟尾虫	无齿螳臂相手蟹	羽须鳃沙蚕	孔雀缨鳃虫	
	(0.0327)	(0.0903)	(0.0575)	(0.0414)	(0.0417)	
		羽须鳃沙蚕	单叶沙蚕	青纵沟纽虫	中蚓虫	
		(0.0819)	(0.0524)	(0.0207)	(0.0208)	
		单叶沙蚕	赛氏女教士螺		异足索沙蚕	
		(0.0625)	(0.0206)		(0.0208)	
		疣吻沙蚕				
		(0.0519)				

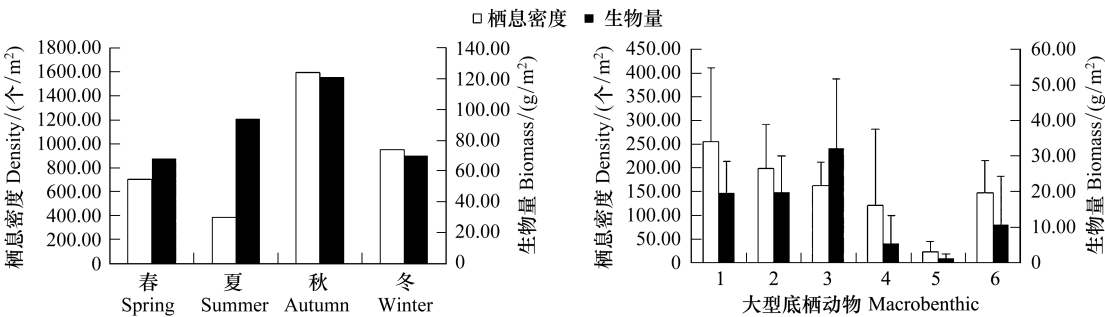


图 4 大型底栖动物栖息密度和生物量的变化

Fig.4 The changes of macrobenthic densities and biomass

1:短叶荳蔻 *Cyperus malaccensis* var. *brevifolius*; 2:老鼠簕 *Acanthus ilicifolius*; 3:无瓣海桑 *Sonneratia apetala*; 4:木榄 *Bruguiera gymnorhiza*; 5:秋茄 *Kandelia candel*; 6:芦苇 *Phragmites australis*

物的栖息密度和生物量均为 4 个季节中最大,主要是由于捕获的小型蟹类谭氏泥蟹最多,谭氏泥蟹秋季全部站位栖息密度为 732.00 个/ m^2 ,生物量为 71.58 g/ m^2 ;而由于夏季捕获质量较大而个数较少的赛氏女教士螺较多,造成夏季栖息密度最小,而生物量却偏大的现象。短叶茳茳站位栖息密度在 6 个站位中最大,主要是由于谭氏泥蟹栖息密度(4 季总栖息密度为 684.00 个/ m^2)很大所导致;无瓣海桑生物量最大是由于采到了较多的赛氏女教士螺。

2.4 物种生活型和功能群组成

鹤州北水道沿岸 6 个站位大型底栖动物生活型组成以及 GS/GSB 值见表 3。底内型共 18 种,占绝对优势。

表 3 不同采样站位大型底栖动物生活型及生活类群组成特征

Table 3 Life forms composition of macrobenthos in different sampling sites

生活型及比值 Life forms & ratio	采样站位 Sampling sites						总数 Total
	A1	A2	A3	B1	B2	B3	
游泳底栖型 swimming benthic type(SW)	1	2	1	1	1	0	5
底上附着型 benthic type(AD)	0	3	4	1	0	0	5
底内型 bottom type(IN)	6	9	6	7	4	10	18
穴居型 cave type(CA)	6	5	7	4	2	3	7
面上群 group of surface(GS)	1	5	5	2	1	0	10
面下群 group of surface below(GSB)	12	14	13	11	6	13	25
GS/GSB	0.08	0.36	0.38	0.18	0.17	0.00	0.40

图 5 为 6 个站位大型底栖动物功能群的物种组成百分比。5 种功能群类型的物种数量相差不大,其中肉食者 6 种(其中 3 种为昆虫幼虫)、杂食者 7 种,碎屑食者 6 种、植食者 9 种和浮游生物食者有 7 种。参照尤仲杰等^[15]在研究象山港大型底栖动物功能群时对功能群的营养级的分类得出,鹤州北垦区大型底栖动物功能群第二营养级(植食者、浮游生物食者和碎屑食者)共 22 种,第三营养级(杂食者)为 7 种,第四营养级(肉食者)为 6 种。

2.5 生物多样性

鹤州北围垦湿地不同采样站位生物多样性指数的变化见表 4。无重复双因素方差分析(以季节和站位为因素)表明,鹤州北湿地物种丰富度指数季节间差异不显著($F=1.490$, $P>0.05$),站位间差异显著($F=3.660$, $P<0.05$);均匀度季节间($F=1.317$, $P>0.05$)和站位间($F=3.023$, $P>0.05$)均无显著差异;香浓威纳指数季节间差异显著($F=3.519$, $P<0.05$),站位间差异不显著($F=2.081$, $P>0.05$)。物种丰富度指数以秋季和冬季的老鼠簕站位最高(分别为 $d=2.05$ 和 $d=2.02$),其次是冬季的无瓣海桑站位($d=1.95$);香浓威纳指数为秋季的木榄站位($H'=1.76$)和夏季的老鼠簕站位($H'=1.65$)最高;均匀度站位间相差不大。综合比较,老鼠簕、无瓣海桑和木榄 3 个站位无论是物种丰富度,还是均匀度和香浓威纳指数,其指数均较高。

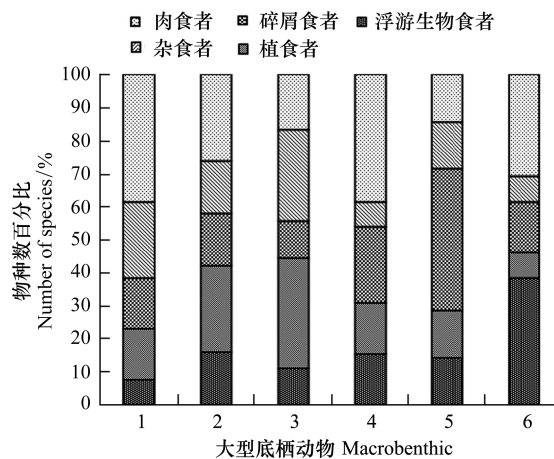


图 5 不同采样站位大型底栖动物功能群物种组成百分比

Fig. 5 Relative number of species of the different functional feeding groups in different sampling sites

表 4 不同采样站位大型底栖动物物种多样性指数

Table 4 The species diversity indices of macrobenthos in different sampling sites

项目 Items	采样站位 Sampling sites					
	A1	A2	A3	B1	B2	B3
d	0.90±0.59	1.93±0.11	1.28±0.45	0.60±0.55	0.45±0.13	0.91±0.44
J'	0.51±0.23	0.63±0.07	0.54±0.14	0.68±0.10	0.42±0.13	0.56±0.07
H'	0.92±0.59	1.51±0.13	1.04±0.27	0.88±0.64	0.63±0.67	0.92±0.33

2.6 大型底栖动物群落结构

根据等级聚类分析图(图 6a)可见,全年平均生物量在 55%的非相似度下,被分为 3 个组,分别为组 1:短叶茳茳-老鼠簕-木榄;组 2:无瓣海桑;组 3:秋茄-芦苇。非参数多变量标序(MDS)连续地展示样本间生物组成的相似关系,即生物组成越相似的两个站位,在 MDS 图上代表它们的点的距离就越近;生物组成相差越远的两个站位,则代表它们的点在图上的距离就越远^[1]。在非参数多变量标序(图 6a)图中短叶茳茳、老鼠簕和木榄站位 3 个站位彼此紧邻,说明这 3 个站位的大型底栖动物群落非常相似。秋茄和芦苇站位相邻,并远离其他站位;无瓣海桑站位远离上述的两个分组,但距离短叶茳茳、老鼠簕和木榄站位分组较近。等级聚类分析和非参数多变量标序的结果一致。

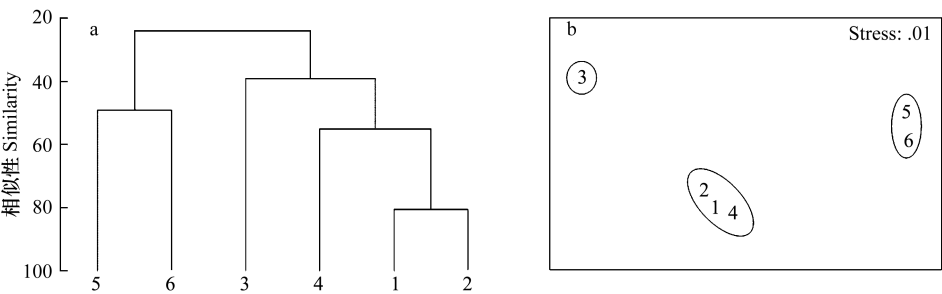


图 6 鹤州北不同采样站位大型底栖动物群落结构的等级聚类分析(a)和非参数多变量标序(b)

Fig.6 The hierarchical cluster dendrogram (a) and non-metric multidimensional scaling ordinations (b) of macrobenthic communities in different sampling sites

根据上述分组特征,利用群落间相似性百分比分析(SIMPER)对造成鹤州北湿地大型底栖动物群落结构差异的物种进行鉴定(表 5),结果表明:瘤颯除在秋季老鼠簕站位有极少量分布外和赛氏女教士螺一样只在组 2(无瓣海桑站位)有大量分布,而羽须鳃沙蚕仅在组 2(无瓣海桑站位)未发现,因此这 3 个物种对组 2(无瓣海桑站位)与其他的组有区别贡献最大;谭氏泥蟹在组 3 未发现,而在组 1 栖息密度非常大,因此是造成组 1 和组 3 区别的最重要物种。

表 5 鹤州北大型底栖动物群落组间物种相似性百分比分析

Table 5 Percentage contribution of taxa (≈50%) differentiation among groups(SIMPER analysis)

	组 1 Group 1	组 3 Group 3	组 1 比组 3 Group 1 with 3
瘤颯 <i>Tarebia granifera</i>	19.98	16.38	
赛氏女教士螺 <i>Pythia cecillei</i>	14.58	11.68	
羽须鳃沙蚕 <i>Dendronereis pinnaticirrus</i>	14.44	12.92	
谭氏泥蟹 <i>Ilyrplax deschampsii</i>	10.40	11.02	25.33
中华螺赢蜚 <i>Corophium sinensis</i>			11.40
单叶沙蚕 <i>Namalycastis abiuma</i>			10.22
疣吻沙蚕 <i>Tylorrhynchus heterochaetus</i>			10.19
累积贡献 Cum/%	59.41	52.01	57.14
组间不相似性 Dissimilarity	42.49	68.48	54.88

Group 1: A1+A2+B1, Group 2: A3, Group 3: B2+B3; 数据 log₁₀(X+1)转化后去掉低于累积贡献率 50%的物种

2.7 大型底栖动物与环境因子的关系

表 6 为鹤州北围垦湿地不同站位环境因子的特征。使用典范对应分析(CCA)方法评估大型底栖动物主要物种(非机会种)和环境变量之间的关系(图 7)。蒙特卡罗置换检验显示鹤州北围垦湿地大型底栖动物群落变化与盐度($P<0.05$)、深度($P<0.05$)变量相关性显著,但与温度($P>0.05$)变量相关性不显著。疣吻沙蚕(3)、谭氏泥蟹(9)、单叶沙蚕(2)和中华螺赢蜚(11)分布在原点附近,说明盐度、深度和温度 3 个环境变量对其影响最小;瘤颯(7)、赛氏女教士螺(8)和无齿螳臂相手蟹(12)与盐度、深度和温度变量正相关,其他的物种

均与 3 个环境变量呈负相关;环境变量之间的夹角可以近似代表它们之间的相关性,盐度、深度和温度 3 个环境变量之间的相关性均较强,其中盐度和深度的相关性最强。

表 6 鹤州北不同采样站位的环境特征

Table 6 Physical characteristics of different sampling sites in North Hezhou

项目 Items	采样站位 Sampling sites					
	A1	A2	A3	B1	B2	B3
水温 Water temperature/℃	14.7—29.5	14.9—28.4	14.3—28.5	15.8—29.5	16.0—29.8	15.7—29.6
水深 Water depth/m	1.74±1.03	1.98±1.68	2.13±1.33	0.78±0.17	0.58±0.36	0.45±0.22
盐度 Salinity/(g/kg)	5.89±4.20	5.67±3.18	6.03±7.31	5.35±4.14	5.32±5.34	5.26±2.13

3 讨论

3.1 鹤州北围垦湿地大型底栖动物群落的结构特征

6 个站位大型底栖动物物种组成结构简单,优势种的体积小、种类单一,多为繁殖力强的 r-对策的小型甲壳动物,缺少大型蟹类和软体动物。这与章飞军等^[16]研究结果相一致。单一种的优势地位越突出、主导群落的种类越少,则群落的多样性水平越低^[17]。某一物种的优势很突出,可能说明环境正处于压力之下,而比较高的多样性则可能代表环境更加稳定成熟^[8]。在鹤州北湿地 6 个站位中,优势种麦克碟尾虫、羽须鳃沙蚕和谭氏泥蟹 3 个物种的平均密度占总平均密度的 71%,栖息密度和生物量集中在少数几个物种上,这些都说明鹤州北湿地大型底栖动物群落发育比较脆弱,生态系统处于不稳定的状态。

红树林内的底栖动物具有低物种多样性和高栖息密度的特点^[18],但是在群落演替初期,物种的多样性和均匀性一般会比较低,随着演替过程而逐渐增高,群落中生物个体也会经历从体型较小生活周期短的 r-选择种类到大型有较长世代种的 K-选择种类的过程^[19]。鹤州北湿地大型底栖动物的生活型以底内型为主,缺少底上型;功能群以食物链下层的浮游生物食者、植食者和杂食者为主,缺少食物链高层的肉食者和食碎屑者,说明生境较为单一^[20],而且物种数量、生物多样性和均匀性均较低,说明整个系统处于生物演替的初级阶段,这和鹤州北湿地人工林恢复时间仅为 2a,时间较短,湿地植被属于生物演替的初级阶段的现状相吻合。

3.2 不同生境下大型底栖动物优势种的组成

无瓣海桑为先锋造林物种,可以促进其它红树植物天然定居和生长^[21]。鹤州北湿地无瓣海桑站位的大型底栖动物群落以树栖腹足类和攀爬型蟹类为主,缺少多毛类和双壳类。优势物种为耳螺科的瘤蜷($Y=0.1255$)、赛氏女教士螺($Y=0.0206$)和相手蟹科的无齿螳臂相手蟹($Y=0.0575$)。赛氏女教士螺属有鳃目耳螺科,营树栖生活,分布在高潮线附近,属于狭分布种^[22],在本研究的 6 个站位中只在无瓣海桑站位发现。相手蟹科动物因其可以显著影响生境和营养循环的生物扰动作用而在红树林研究中受到广泛关注,更被视为关键物种来研究^[8]。熊李虎和陆健健^[23]研究长江口湿地无齿螳臂相手蟹的分布情况时发现,无齿螳臂相手蟹

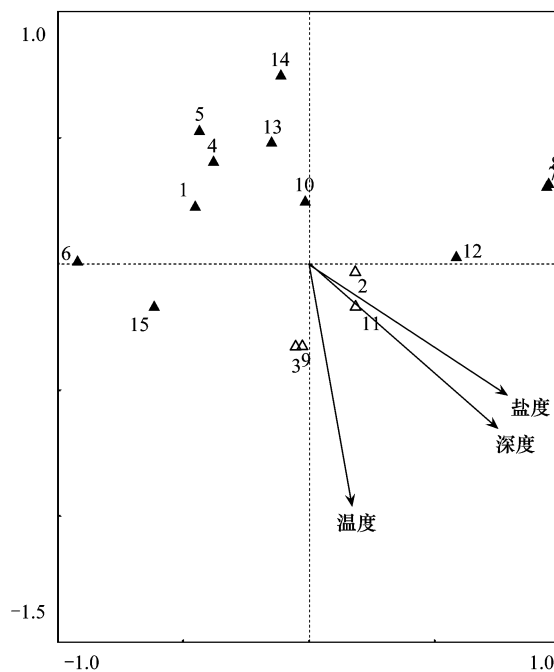


图 7 典范对应分析物种和环境因子双标图

Fig. 7 Biplot resulting from the canonical correspondence analysis (species×environmental variables)

△:受环境影响较小的物种;▲:受环境影响较大的物种;箭头表示环境变量;Salinity:盐度;Depth:深度;Temperature:温度;1:羽须鳃沙蚕;2:单叶沙蚕;3:疣吻沙蚕;4:孔雀须鳃虫;5:中蚓虫;6:异足索沙蚕;7:瘤蜷;8:赛氏女教士螺;9:谭氏泥蟹;10:麦克碟尾虫;11:中华螺赢蜚;12:无齿螳臂相手蟹;13:日本拟背尾水虱;14:青纵沟扭虫;15:弹涂鱼

的栖息密度与植株高度接近显著正相关。黄建荣等^[24]在研究珠海淇澳岛红树林蟹类区系时发现,在道路两侧和堤坝等红树林外硬质泥滩,无齿螳臂相手蟹等个体相对较大,挖穴能力强的蟹类是优势种。在本调查中我们发现,无瓣海桑树干潮水上缘线上攀附有大量的无齿螳臂相手蟹,并且林下发现大量的蟹类洞穴。杨泽华等^[11]在长江口湿地研究发现,随着高程的增加,淹水时间缩短,特别适合穴居型蟹类和底上附着型的拟沼螺生活,但是游泳底栖型和底内型种类明显减少。所以,瘤螯、赛氏女教士螺和无齿螳臂相手蟹的大量出现与无瓣海桑植株高大,地上枝干分化复杂,淹水时间缩短,为底栖生物提供了复杂多样的生境有很大的关系。该站位发现了除刀额新对虾外的全部甲壳类动物和除紫游螺外的全部腹足类动物,但是没有发现双壳类,环节动物也仅发现 4 种。

老鼠簕和短叶荳蔻同无瓣海桑一样位于堤坝外临海一侧,水文活动强烈,加上这两个站位植株矮小,淹水时间较长,环境干扰作用十分明显,底上附着型底栖动物难以生存,尤其不适于攀爬蟹类无齿螳臂相手蟹的生存,这就为小型蟹类谭氏泥蟹提供了发展空间。谭氏泥蟹是河口区典型的小型蟹类优势种^[25-26]。在本研究中,在短叶荳蔻($Y=0.6715$)和老鼠簕($Y=0.5019$)两个站位,谭氏泥蟹的秋季的栖息密度分别高达 448.00 个/ m^2 和 164.00 个/ m^2 。

芦苇站位位于堤坝内围垦区临潮沟一侧,优势种为麦克碟尾虫($Y=0.4090$)、羽须鳃沙蚕($Y=0.3102$)(两者平均密度皆为 6 个站位最高)和小型双壳类,四季均未发现蟹类。羽须鳃沙蚕是深圳河口泥滩底栖动物群落的优势种,体大肉肥,是湿地鸟类的天然饵料^[27]。麦克碟尾虫是珠海淇澳—担杆岛红树林自然保护区底栖动物种群的优势种,优势度明显^[28]。潮沟虽然有潮汐作用但是较临海站位水文变化不明显,盐度偏低,且底质类型为软泥底,适宜多毛类、双壳类和小型甲壳类这样低盐的底内型和游泳底栖型的生存,并且由于芦苇的茎叶分化简单,底上部分细密柔软,不利于蟹类的攀爬和掘穴,这和澳大利亚东北部潮间带发现中潮带的多毛类最多而蟹类则偏向分布于高潮带的结果相一致^[29]。特别是在 6 个站位中羽须鳃沙蚕在芦苇站位的栖息密度最大且春季达到峰值 125.33 个/ m^2 ,这可能与春季是羽须鳃沙蚕的繁殖期有关。

3.3 大型底栖动物和环境因子的关系

盐度是影响河口区大型底栖动物物种分布最重要的环境因子^[30]。斯海尔德河口潮间带湿地大型底栖动物群落沿着盐度梯度有显著变化,大型底栖动物物种多样性和物种数目随盐度下降而减小^[31-32]。蒙特卡罗置换检验显示盐度和深度是对鹤州北围垦湿地大型底栖动物分布影响贡献最大的环境因子。温度、深度和盐度 3 个环境变量之间夹角均为锐角,说明 3 个变量之间有较强的相关性,尤其是盐度和深度变量之间相关性很强。深度可以反映潮汐淹没程度,对大型底栖动物的分布有很大影响。谭氏泥蟹、疣吻沙蚕、中华螺赢蜚和单叶沙蚕属于广盐种,受到盐度的影响最小,普遍分布在 6 个站位;瘤螯、赛氏女教士螺和无齿螳臂相手蟹与盐度和深度呈正相关,均为无瓣海桑站位的优势物种,这与无瓣海桑站位位于临海一侧且植株高大的生境特征相符合;弹涂鱼、羽须鳃沙蚕和麦克碟尾虫等淡水种与盐度和深度负相关,普遍分布在临潮沟一侧的 3 个站位,与水浅且水文变化不大的生境特征相一致。可以看出鹤州北围垦湿地大型底栖动物以淡水和广盐型物种为主,只有无瓣海桑站位的优势物种分布与盐度和深度正相关。

3.4 围垦区红树林人工湿地和自然滩涂大型底栖动物群落结构的比较

围垦是大型底栖动物群落结构改变的一个重要因素^[33]。在本次调查中,围垦区内人工湿地的大型底栖动物群落结构与堤坝外侧的自然滩涂差异显著。围垦区大型底栖动物的物种数量(20 种)小于自然滩涂(28 种),其年平均密度和年平均生物量分别为 291.33 个/ m^2 和 17.24 g/ m^2 ,同样明显小于自然滩涂(615.96 个/ m^2 和 71.23 g/ m^2);从动物类群上分析,围垦区站位双壳类(4 种)多于自然滩涂(1 种),而自然滩涂的螺类(5 种)和甲壳动物(10 种)多于围垦区(1 种和 5 种),这与袁兴中和陆健健^[34]在研究围垦对长江口南岸底栖动物群落结构的影响时发现在围垦以后,甲壳动物种类减少;昆虫幼虫比例增加;随着围垦时间延长,软体动物种类相对有所增加的现象一致。潮汐的改变对围垦后滩涂环境的影响也较重要,主要表现在潮汐消失后形成的封闭系统导致淡水化和陆生化^[35]。围垦后仍有潮水周期性影响的站位物种多样性虽然降低,但是却有利

于某些和盐沼植物有关的大型底栖动物的生存^[34]。同样位于围垦区内的芦苇、秋茄和木榄 3 个站位,由于木榄站位与堤坝闸门相对,潮汐作用较为明显,其大型底栖动物群落结构与围垦区外的老鼠簕和短叶茳茳站位相似,这一点从等级聚类和非参数多变量标序图中可以得到证明。而芦苇和秋茄站位远离闸门,潮沟水文变化小,两个站位均被茂密的草本植物覆盖,其大型底栖动物群落的栖息密度、生物量以及多样性指数均较临海站位低很多,并出现了淡水起源的红明樱蛤等小型双壳类。堤坝外侧无瓣海桑、老鼠簕和短叶茳茳站位,真红树植物无瓣海桑和老鼠簕的大型底栖动物群落最为复杂、稳定。两者皆已形成一定规模的纯林,这为林下的大型底栖动物提供了栖息、摄食场所,因此大型底栖动物类群的生态恢复也有较大发展。

3.5 对管理者的建议

鹤州北围垦湿地人工红树林恢复时间较短,生态环境较差,大型底栖动物群落结构单一脆弱,需要管理者加强对恢复区的保护和管理:(1)禁止鱼塘向恢复区排入养殖废水,以免造成潮沟淤堵,陆地化程度加剧。并定期清理红树植被周围的杂草;(2)定期清理和挖掘潮沟,保持围垦区内潮沟具有一定的潮汐作用和水文变化,维持潮间带的完整性,促进大型底栖动物的生存和发展;(3)避免农药等有毒物质和垃圾破坏大型底栖动物生存环境和人为捕捞大型底栖动物。

References:

- [1] Zhang J H, Huang X S. The protection and development of mangrove in Zhuhai. *Guangzhou Environmental Sciences*, 2003, 18(2): 37-40.
- [2] Peng Y S, Chen G Z, Tian G H, Yang X B. Niches of plant populations in mangrove reserve of Qi'ao Island, Pearl River Estuary. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(6): 357-361.
- [3] Lee S Y. Mangrove macrobenthos: assemblages, services, and linkages. *Journal of Sea Research*, 2008, 59(1/2): 16-29.
- [4] Nagelkerken I, Blaber S J M, Bouillon S, Green P, Haywood M, Kirtong L G, Meyneke J O, Pawliki J, Penrose J H M, Sasekumark A, Somerfield P J. The habitat function of mangroves for terrestrial and marine fauna: a review. *Aquatic Botany*, 2008, 89(2): 155-185.
- [5] Hu Z Y, Bao Y X, Cheng H Y, Zhang L L, Ge B M. Research progress on ecology of natural wetland zoobenthos in China. *Chinese Journal of Ecology*, 2009, 28(5): 959-968.
- [6] Ye Y, Weng J, Lu C Y, Cheng G C. Mangrove biodiversity restoration. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(4): 1243-1250.
- [7] Bosire J O, Dahdouh-Guebas F, Walton M, Crona B I, Lewis III R R, Field C, Kairo J G, Koedam N. Functionality of restored mangroves: a review. *Aquatic Botany*, 2008, 89(2): 251-259.
- [8] Macintosh D J, Ashton E C, Havanon S. Mangrove rehabilitation and intertidal biodiversity: a study in the Ranong Mangrove Ecosystem, Thailand. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2002, 55(3): 331-345.
- [9] Elison A M. Managing mangroves with benthic biodiversity in mind: moving beyond roving banditry. *Journal of Sea Research*, 2008, 59(1/2): 2-15.
- [10] Fan H Q, He B Y, Wei S Q. Influences of sand dune movement within the coastal mangrove stands on the macrobenthos *in Situ*. *Acta Ecologica Sinica*, 2000, 20(5): 722-727.
- [11] Yang Z H, Tong C F, Lu J J. Characteristics of macrobenthic fauna communities in three successional stages of the new emergent salt marsh in an estuary of the Yangtze River. *Zoological Research*, 2006, 27(4): 411-418.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [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] 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.
- [16] Zhang F J, Tong C F, Xie Z F, Liu W L, Gao W, Lu J J. The re-colonisation progress of intertidal benthic fauna community in the Changjiang Estuary. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(12): 4944-4952.
- [17] Du F Y, Wang X H, Li C H, Zhang H H, Jia X P. Study on species diversity of macrobenthos in Daya Bay, South China Sea. *South China Fisheries Science*, 2008, 4(6): 33-41.
- [18] Wang W Q, Wang M. The Mangroves of China. Beijing: Science Press, 2007: 89-89.
- [19] Shen G Y, Huang L F, Guo F, Shi B Z. Marine Ecology. 3rd ed. Beijing: Science Press, 2010: 112-113.
- [20] 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.
- [21] Chen Y J, Liao B W, Zheng S F, Li M, Song X Y. Dynamics and species-diversities of artificial *Sonneratia apetala*, *Sonneratia caseolaris* and *Kandelia candel* communities. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(6): 924-928.

- [22] Liu Y, Wang M, Wang W Q, Lu C Y. Ellobiid molluscs of Chinese mangrove habitats. *Biodiversity Science*, 2011, 19(6): 723-728.
- [23] Xiong L H, Lu J J. Distribution and use of burrows by *Chiromantes dehaani* in different vegetations in salt marsh of Yangtze Estuary. *Chinese Journal of Zoology*, 2009, 44(6): 1-9.
- [24] Huang J R, Liu Q Z, Zhao Y C, Dou B X, Li L C, Liu W Q, Lin J Q. The crab fauna in the mangrove of the Qi'ao Island, Zhuhai. *Ecology and Environmental Sciences*, 2011, 20(4): 730-736.
- [25] Zhou X, Ge Z M, Shi W Y, Wang T H. Temporal and spatial fluctuation of macrobenthos community in a newly established wetland in Yangtze River Estuary. *Chinese Journal of Ecology*, 2007, 26(3): 372-377.
- [26] An C G, Zhao Y L, Lin L, Li J Y, Cui L L, Ma C Y. The biodiversity of marobenthos of intertidal zone on Chongming Island in summer. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(2): 577-586.
- [27] Cai L Z, Li H M, Lin P, Liu J J. Analysis of environmental effect and polychaete quantitative variations on intertidal mudflat in Shenzhen Estuary. *Journal of Xiamen University: Natural Science*, 2001, 40(3): 741-750.
- [28] Wang C F. Studies on the Taxonomy and Ecology of Macrobenthic Crustaceans Under Different Vegetations in the Qi'ao-Dan'gan Island Mangrove Natural Reserve, Pearl River Estuary, China. Guangzhou: Doctoral Dissertation of Zhongshan University, 2010.
- [29] Dittmann S. Zonation of benthic communities in a tropical tidal flat of north-east Australia. *Journal of Sea Research*, 2000, 43(1): 33-51.
- [30] van der Linden P, Patrício J, Marchini A, Cid N, Neto J M, Marques J C. A biological trait approach to assess the functional composition of subtidal benthic communities in an estuarine ecosystem. *Ecological Indicators*, 2012, 20: 121-133.
- [31] Ysebaert T, Herman P M J, Meire P, Craeymeersch J, Verbeek H, Heip C H R. Large-scale spatial patterns in estuaries: estuarine macrobenthic communities in the Schelde estuary, NW Europe. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2003, 57(1/2): 335-355.
- [32] Hampel H, Elliott M, Cattrijsse A. Macrofaunal communities in the habitats of intertidal marshes along the salinity gradient of the Schelde estuary. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2009, 84(1): 45-53.
- [33] Ma C A, Xu L L, Tian W, Lü 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.
- [34] Yuan X Z, Lu J J. Influence of diking on the benthic macro-invertebrate community structure and diversity in the south bank of the Changjiang Estuary. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, 21(10): 1642-1647.
- [35] Huang S F, Liu Y, Li C, Huang J M. Influence of reclamation on macrobenthic community in the Pearl River Estuary. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2011, 17(4): 499-503.

参考文献:

- [1] 章金鸿, 黄晓珊, 李玫. 珠海红树林的保护与发展. *广州环境科学*, 2003, 18(2): 37-40.
- [5] 胡知渊, 鲍毅新, 程宏毅, 张龙龙, 葛宝明. 中国自然湿地底栖动物生态学研究进展. *生态学杂志*, 2009, 28(5): 959-968.
- [6] 叶勇, 翁劲, 卢昌义, 陈光程. 红树林生物多样性恢复. *生态学报*, 2006, 26(4): 1243-1250.
- [10] 范航清, 何斌源, 韦受庆. 海岸红树林地沙丘移动对林内大型底栖动物的影响. *生态学报*, 2000, 20(5): 722-727.
- [11] 杨泽华, 童春富, 陆健健. 长江口湿地三个演替阶段大型底栖动物群落特征. *动物学研究*, 2006, 27(4): 411-418.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [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] 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.
- [16] 章飞军, 童春富, 谢志发, 刘文亮, 高伟, 陆健健. 长江口潮间带大型底栖动物群落演替. *生态学报*, 2007, 27(12): 4944-4952.
- [17] 杜飞雁, 王雪辉, 李纯厚, 张汉华, 贾晓平. 大亚湾大型底栖动物物种多样性现状. *南方水产*, 2008, 4(6): 33-41.
- [18] 王文卿, 王瑁. 中国红树林. 北京: 科学出版社, 2007: 89-89.
- [19] 沈国英, 黄凌风, 郭丰, 施并章. 海洋生态学 (第三版). 北京: 科学出版社, 2010: 112-113.
- [20] 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.
- [21] 陈玉军, 廖宝文, 郑松发, 李玫, 宋湘豫. 无瓣海桑、海桑、秋茄红树人工林群落动态及物种多样性研究. *应用生态学报*, 2004, 15(6): 924-928.
- [22] 刘毅, 王瑁, 王文卿, 卢昌义. 中国红树林区的耳螺. *生物多样性*, 2011, 19(6): 723-728.
- [23] 熊李虎, 陆健健. 长江河口湿地不同植被中无齿螳臂相手蟹的分布及其洞穴利用. *动物学杂志*, 2009, 44(6): 1-9.
- [24] 黄建荣, 刘启智, 赵一臣, 窦碧霞, 李连春, 刘蔚秋, 林继球. 珠海淇澳岛红树林蟹类区系. *生态环境学报*, 2011, 20(4): 730-736.
- [25] 周晓, 葛振鸣, 施文彧, 王天厚. 长江口新生湿地大型底栖动物群落时空变化格局. *生态学杂志*, 2007, 26(3): 372-377.
- [26] 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.
- [27] 蔡立哲, 厉红梅, 林鹏, 刘俊杰. 深圳河口潮间带泥滩多毛类的数量变化及环境影响. *厦门大学学报: 自然科学版*, 2001, 40(3): 741-750.
- [28] 王昌付. 珠江河口淇澳-担杆岛红树林自然保护区大型底栖甲壳动物的分类学和生态学研究 [D]. 广州: 中山大学, 2010.
- [33] 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.
- [34] 袁兴中, 陆健健. 围垦对长江口南岸底栖动物群落结构及多样性的影响. *生态学报*, 2001, 21(10): 1642-1647.
- [35] 黄少峰, 刘玉, 李策, 黄晋沐. 珠江口滩涂围垦对大型底栖动物群落的影响. *应用与环境生物学报*, 2011, 17(4): 499-503.

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 Zhaoen, 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 Zijong, 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 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085 电话:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn	Edited by	Editorial board of ACTA ECOLOGICA SINICA Add: 18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China Tel: (010)62941099 www.ecologica.cn 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 中国科学院生态环境研究中心 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085	Sponsored by	Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add: 18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
出 版	科 学 出 版 社 地址:北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717	Published by	Science Press Add: 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷	北京北林印刷厂	Printed by	Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
发 行	科 学 出 版 社 地址:东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717 电话:(010)64034563 E-mail: journal@cspg.net	Distributed by	Science Press Add: 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel: (010)64034563 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 地址:北京 399 信箱 邮政编码:100044	Foreign	China International Book Trading Corporation Add: P.O.Box 399 Beijing 100044, China
广告经营 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