

广西北海西村港互花米草对红树林湿地大型底栖动物群落的影响

赵彩云¹ 柳晓燕¹ 白加德² 吕凤春¹ 李俊生^{1*}

¹ (中国环境科学研究院环境基准与风险评估国家重点实验室, 北京 100012)

² (北京麋鹿生态实验中心, 北京 100076)

摘要: 为了解互花米草(*Spartina alterniflora*)入侵红树林的生态影响, 作者对位于北海市西村港的红树林湿地以及周边互花米草盐沼的大型底栖动物群落多样性和群落结构进行了研究。2012年10月至2013年9月连续4次取样, 按照取样时间研究大型底栖动物的种类、物种组成、生物量和生物多样性等群落特征的差异, 探讨互花米草入侵红树林湿地对大型底栖动物的影响。本研究共采集底栖动物16种, 隶属于5门7纲15科, 其中互花米草群落10种, 红树林湿地12种。研究发现互花米草入侵后中国绿螂(*Glauconome chinensis*)个体数量剧增, 导致不同采样时间互花米草盐沼的大型底栖动物生物量均显著高于红树林湿地; 除个别月份外, 红树林湿地大型底栖动物的Margalef丰富度指数、Shannon-Wiener多样性指数、Simpson多样性指数和Pielou均匀度指数均显著高于互花米草群落。基于生境-采样时间的双因素方差分析结果表明, Shannon-Wiener多样性指数和Simpson指数在两种生境间差异显著; 两种生境的Margalef丰富度和Pielou均匀度指数在不同采样时间差异显著; 大型底栖动物生物量和物种数量在两种生境间和不同采样时间差异均显著。基于多元回归分析的研究结果表明, 互花米草密度是影响大型底栖动物生物量的关键因子, 而互花米草株高可以解释物种个体数量、Shannon-Wiener多样性指数和Simpson指数在两种生境的变化。对不同采样时间大型底栖动物群落结构的非度量多维度(non-metric multidimensional scaling, NMDS)分析结果表明, 红树林与互花米草群落的大型底栖动物群落相似性很低。总而言之, 在西村港地区, 互花米草入侵虽然增加了大型底栖动物的生物量, 但由于优势物种的凸显, 显著降低了大型底栖动物群落的多样性, 且种类组成与群落结构与红树林群落相比已有差异。由此可见, 互花米草入侵红树林对当地的大型底栖动物群落多样性造成影响。

关键词: 大型底栖动物, *Spartina alterniflora*, 群落结构, 生物多样性, 生物入侵

Impact of *Spartina alterniflora* on benthic macro-invertebrates communities on mangrove wetland in Xicungang Estuary, Guangxi

Caiyun Zhao¹, Xiaoyan Liu¹, Jiade Bai², Fengchun Lü¹, Junsheng Li^{1*}

¹ State Key Laboratory of Environmental Criteria and Risk Assessment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012

² Beijing Milu Ecological Research Center, Beijing 100076

Abstract: In order to assess the ecological impacts of *Spartina alterniflora* on mangrove ecosystems, we investigated macro-invertebrate communities in *S. alterniflora* wetlands and a mangrove wetland between October 2012 and September 2013, in the Xicungang estuary, Guangxi Zhuang Autonomous Region. The species composition, biomass and diversity of macro-invertebrates were compared at different times between the mangrove habitat and *S. alterniflora* community. Sixteen species from Arthropoda, Mollusca, Annelida, Cnidaria and Sipuncula were collected from the two habitats. Twelve species were found in mangrove wetlands whereas 10 species were found in *S. alterniflora* wetlands. Perhaps due to the invasion of *S. alterniflora*, *Glauconome chinensis* became the predominant species, leading to a greater macro-invertebrate biomass in *S.*

收稿日期: 2014-06-03; 接受日期: 2014-09-15

基金项目: 环保部事业经费项目; 广西北部湾沿海外来入侵物种互花米草普查与生态安全调查项目; 陆地自然环境外来入侵物种普查、防控与资源化利用; 中国环境科学研究院院所基金项目(2012-YSKY-05)

* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: lijsh@craes.org.cn

alterniflora wetlands than in mangrove wetland. On the other hand, the Margalef, Shannon-Wiener index, Simpson and Pielou diversity indices of macro-invertebrates were lower in *S. alterniflora* habitat than in mangrove habitat. Two-way ANOVA was used to analyze the effect of sampling periods and habitats on the number of species, biomass and diversity indices of macro-invertebrates. Our results showed that Shannon-Wiener index and Simpson diversity indices differed between the two habitats, the Margalef and Pielou diversity indices differed among sampling periods, number of species and biomass were affected by both habitats and sampling periods. Based on multiple linear regression analyses, macro-invertebrate biomass was related to the density of *S. alterniflora*, and Shannon-Wiener, Simpson diversity and species richness of macro-invertebrates were all related with the height of *S. alterniflora*. According to our NMDS (non-metric multidimensional scaling) analysis, macro-invertebrate communities in *S. alterniflora* habitat mainly differed from those of mangrove habitats due to sampling periods. In conclusion, the invasion of *S. alterniflora* in mangrove wetlands in Xicungang estuary increased the biomass of macro-invertebrates, while decreased the diversity of them, and also changed the community structure of macro-invertebrate assemblages.

Key word: macro-invertebrates, *Spartina alterniflora*, community structure, biodiversity biological invasion

红树林是最具特色的湿地生态系统,在我国主要分布于广西、广东、海南、台湾、福建和浙江南部沿岸(吴培强等, 2013)。我国拥有丰富的红树林资源,在历史上面积曾达到250,000 ha,由于围海造地、改造盐田、围海养殖等不合理的开发利用,严重破坏了红树林资源,到2010年,我国红树林已经锐减到24,578.2 ha(吴培强等, 2013)。

此外,外来入侵物种也危害着红树林生态系统的安全,如互花米草(*Spartina alterniflora*)、薇甘菊(*Mikania micrantha*)、无瓣海桑(*Sonneratia apwtala*)、大米草(*Spartina anglica*)、凤眼莲(*Eichhornia crassipes*)、马樱丹(*Lantana camara*)等(周青青等, 2010),其中互花米草近年来在我国沿海大面积暴发,不断侵占红树林生存空间,对我国红树林湿地生态系统构成了威胁。广西壮族自治区拥有丰富的红树林资源,为保滩护岸,北海市于1979年在山口镇山角海面 and 党江镇沙冲船厂海滩首次引进互花米草,由于其繁殖速度快,迅速在海滩上滋生蔓延,成为当地典型的外来入侵物种(覃盈盈和梁士楚, 2008),与红树林争夺资源,威胁着红树林生态系统。

大型底栖动物类群是湿地生态系统的重要组成部分,起着分解有机物、转化营养物质等作用(胡知渊等, 2009)。底栖动物对环境变化敏感,是评价潮滩生态系统健康程度的重要指标(Levin & Talley, 2000)。有研究表明,互花米草入侵可以改变底泥的理化性质,比如使土壤剖面变黑,有机质含量提高(陈中义, 2004),这些特征的改变在一定程度上也影响着大型底栖动物群落结构,因此大型底栖动物常用来评价互花米草入侵的生态影响。

我国在海南东寨港(邹发生等, 1999)、深圳福田(高阳等, 2004)、广西北海(高爱根等, 2005)和浙江乐清湾(郑荣泉等, 2006)等地的红树林开展了大型底栖动物群落研究;也在上海崇明岛(徐晓军等, 2006; Chen *et al.*, 2007; 谢志发等, 2008; Wang *et al.*, 2010)、江苏(谢文静和高抒, 2009; 沈永明等, 2013)、福建一带(林秀春等, 2010)研究了互花米草群落入侵对盐沼湿地的大型底栖动物群落的影响。然而,对于互花米草入侵红树林对大型底栖动物影响的研究相对较少。洪荣标等(2005)研究认为互花米草群落的大型底栖动物多样性高于红树林湿地;魏德重等(2012)研究表明红树林生境中大型底栖动物的物种多样性和功能群的复杂性均高于互花米草群落;王安安等(2014)结果证明互花米草入侵红树林湿地,虽然大型底栖动物多样性没有显著差异,但物种组成和群落结构已有明显不同。这种研究结果的差异可能与时空差异有关,因此本文在广西北海开展了对比研究,有助于理解不同地区互花米草入侵对红树林的影响。

本文研究了广西北海西村港互花米草和红树林两种不同生境中大型底栖动物的群落结构,探讨了互花米草入侵是否导致大型底栖动物的群落结构、物种组成、生物多样性发生变化,以评估互花米草的生态危害。

1 材料与方法

1.1 研究地点

研究地点位于广西省北海市铁山港区西村港海堤西村港红树林区域(21°26' N, 109°17' E)。该区

域红树林呈不连续分布,最大的一片红树林面积约0.143 km²。在红树林外围分布有互花米草斑块,面积约为1.627×10³ m²,并衍生出多个小斑块。该区域互花米草长势良好,平均密度为346株/m²,平均株高为43.31 cm。

研究地区属亚热带季风型海洋性气候,年均日照时数为1,790–1,800 h,年均气温23.4℃,气温年变化幅度约为13.8℃,10℃年均积温7,708℃–8,261℃。年均降水量1,500–1,700 mm,年均蒸发量1,000–1,400 mm,平均相对湿度为80%。海水年均温度为23.5℃,盐度为20–23‰,pH值7.60–7.80。受季风影响,海陆风特征明显。海域潮汐为非正规全日潮,一年中约60%时间为1天1次潮,其余时间为1天2次潮,年平均潮差在2.31–2.59 m。

1.2 采样方法

分别在2012年10月、2012年12月、2013年5月、2013年9月进行取样。在西村港互花米草和红树林同一水平位置,分别设置5个取样点(5个重复),相邻样点间距离为100 m,10个取样点在潮间带的高程基本相等(图1)。每次取样在最低潮时用直径为10 cm的圆筒取样,每个取样点采集4个圆筒的随机样品,取样深度为20 cm,4个样品混合(陈中义等,

2005)。所采集泥样用0.5 mm孔径的分样筛淘洗,获取大型底栖动物样品。样品用75%酒精保存后带回实验室进行分拣,并依据《中国海洋贝类图鉴》和《中国海洋生物种类与分布》进行物种鉴定、计数和重量测定。每个取样点设置一个0.5 m×0.5 m小样方,统计样方内互花米草的株数(样方内所有分株的数量),随机选取10株个体,分别测量株高。同时监测每个取样点的土壤温度、湿度以及pH值。

1.3 统计分析

基于每个样点的大型底栖动物每个物种个体数,采用Margalef物种丰富度、Shannon-Wiener多样性指数、Simpson多样性指数、Pielou均匀度指数和物种优势度指数对大型底栖动物群落多样性进行分析(Ludwig & Reynolds, 1988):

Margalef物种丰富度指数:

$$M = (S - 1) / \ln N \quad (1)$$

Shannon-Wiener多样性指数(Pielou, 1975):

$$H' = -\sum P_i \ln P_i \quad (2)$$

Simpson指数:

$$D = 1 - \sum P_i^2 \quad (3)$$

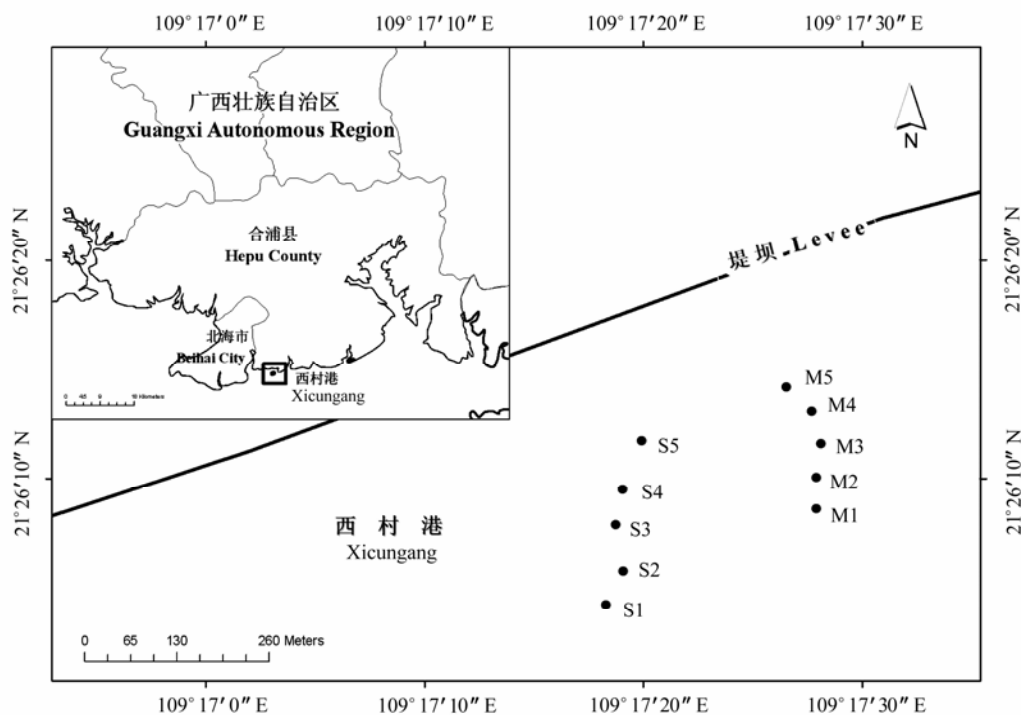


图1 广西北海西村港大型底栖动物采样点分布图(S表示互花米草群落,M表示红树林)

Fig. 1 Locations of macro-invertebrates sampling sites in Xicungang, Beihai city, Guangxi Province. S represents *Spartina alterniflora* community, and M represents mangrove wetland.

Pielou均匀度指数:

$$J = H' / H'_{\max}$$
 (4)

物种优势度指数Y:

$$Y = P_i \times f_i$$
 (5)

其中*S*表示物种总数, *N*为观察到的个体总数, *P_i*表示第*i*种物种的个体数占总个体数*N*的比例, *f_i*为该物种出现的样点数与总样点数之比的百分数, 当 *Y*>0.02时, 该种即为优势物种(陆强等, 2013)。

基于Bray-Curtis相似距离, 运用非度量多维分析(non-metric multidimensional scaling, NMDS) (Clarke, 1993)对互花米草群落和红树林中的大型底栖动物群落结构进行了分析, 并运用Stress值表征群落相似性。为了保证数据的正态分布, 对所获取大型底栖动物的多样性和生物量进行(log(*X*+1))标准化的转化。采用Two-Way ANOVA分析不同生境和不同取样时间对大型底栖动物多样性指数和生物量的影响。若多样性和生物量存在显著差异, 则基于LSD多重比较进行差异显著性检验。若生境是影响大型底栖动物生物量与生物多样性的主要因素, 则基于环境因子(土壤温度、土壤湿度、pH值)以及互花米草特征(株高、密度)对相应的指标采用多元回归分析(multiple linear regressions)检验, 用*r*²和AIC值比较模型之间的适合度, 选择最佳模型

(Burnham & Anderson, 1998), 用Beta描述最佳模型中的关键因子, 以此探讨引起群落多样性变化的关键生境因子。其中物种多样性分析使用数理统计软件PAST完成(Hammer *et al.*, 2001), 方差分析使用数理统计软件SPSS 7.5完成, 多元回归使用SAM (Spatial Analysis in Macroecology)软件(Rangel *et al.*, 2006), 本文均以*P*<0.05为差异显著。

2 结果

2.1 大型底栖动物物种组成

两年4次共采集大型底栖动物16种(表1), 隶属于5门7纲15科。其中软体动物9种, 节肢动物4种, 环节动物1种, 星虫动物1种, 腔肠动物1种。互花米草群落两年共采集大型底栖动物10种, 其中中国绿螂(*Glauconome chinensis*)为绝对优势种, 占有互花米草群落物种个体总数的98.6% (*Y* = 0.97); 在2012年10月、12月、2013年5月、9月分别占互花米草群落同一时期大型底栖动物个体总数的98.23%、99.78%、86.67%、98.98%。红树林中两年共采集大型底栖动物12种, 优势种均为中国绿螂, 占有红树林大型底栖动物个体总数的41.9% (*Y* = 0.19); 其次为短指和尚蟹(*Mictyris brevidactylus*)和沙蟹(*Ocypodidae*, sp.), 分别占29.0% (*Y* = 0.16)和13.0%

表1 西村港互花米草群落与红树林的大型底栖动物群落种类和组成
Table 1 Species composition of macro-invertebrates in *Spartina alterniflora* and mangrove in Xicungang

门 Phyla	纲 Class	科 Family	种 Species	互花米草 <i>Spartina alterniflora</i>	红树林 Mangrove
节肢动物门 Arthropoda	甲壳纲 Crustacea	和尚蟹科 Mictyridae	短指和尚蟹 <i>Mictyris brevidactylus</i>	+	+
		沙蟹科 Ocypodidae	沙蟹 <i>Ocypodidae</i> , sp.	+	+
			弧边招潮蟹 <i>Uca arcuata</i>	—	+
		藤壶科 Balanuidae	藤壶 <i>Balanus</i> sp.	—	+
软体动物门 Mollusca	腹足纲 Gastropoda	汇螺科 Potamididae	汇螺 <i>Potamididae</i> , sp.	—	+
		滨螺科 Littorinidae	黑口拟滨螺 <i>Littoria melanostoma</i>	+	+
		蜑螺科 Neritidae	奥莱彩螺 <i>Clithon oualaniensis</i>	+	+
				+	—
	双壳纲 Bivalvia	满月蛤科 Lucinidae	满月蛤 <i>Lucinidae</i> , sp.	+	—
		绿螂科 Glauconcomidae	中国绿螂 <i>Glauconome chinensis</i>	++	+
		樱蛤科 Tellinidae	透明美丽蛤 <i>Tellina diaphana</i>	—	+
	多板纲 Polyplacophora	铗石鳖科 Ischnochitonidae	铗石鳖 <i>Ischnochitonidae</i> , sp.	—	+
		石鳖科 Chitonidae	石鳖 <i>Chitonidae</i> , sp.	+	+
环节动物门 Annelida	多毛纲 Polychaeta	多板纲 Polyplacophora	多板 <i>Polyplacophora</i> , sp.	+	—
		沙蚕科 Nereididae	沙蚕 <i>Nereididae</i> , sp.	+	—
		方格星虫纲 Sipunculidea	方格星虫 <i>Sipunculus nudus</i>	—	+
		石珊瑚目 Madreporaria	石珊瑚 <i>Madreporaria</i> , sp.	+	—

++表示该物种个体数量占总个体数量的10%以上, +表示该物种个体数量占总个体数量的10%以下, —表示该物种在该生境下不存在。++The number of individuals > 10% of the total; + The number of individuals < 10% of the total; — Absent.

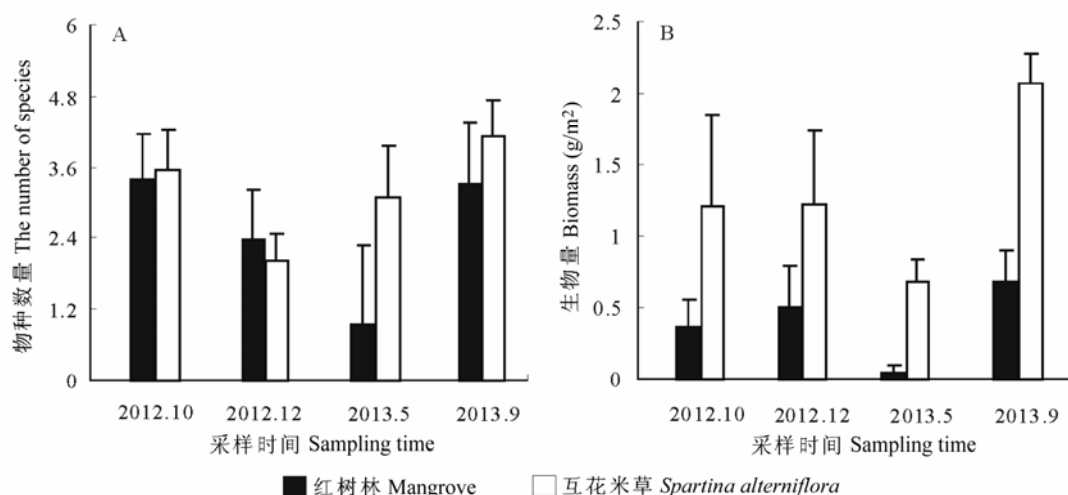


图2 不同采样时间红树林与互花米草群落大型底栖动物物种数量(A)和生物量(B)的差异

Fig. 2 Comparison of the number of macro-invertebrates (A) and biomass (B) in *Spartina alterniflora* community and mangrove at different sampling time

($Y = 0.05$); 其中2012年10月、12月和2013年5月短指和尚蟹为红树林的优势种, 分别占同一时期红树林大型底栖动物个体总数的32.0% ($Y = 0.19$)、77.78% ($Y = 0.78$)、33.0% ($Y = 0.07$); 2013年9月, 中国绿螂成为红树林的优势类群(占65.96%) ($Y = 0.53$), 其次为短指和尚蟹(占8.51%) ($Y = 0.03$)。

互花米草群落和红树林生境中大型底栖动物物种数量具有差异。除2012年12月外, 其他3次取样互花米草群落的大型底栖动物物种数量均高于红树林(图2A)。基于采样时间-生境双因素方差分析结果表明, 两类生境的大型底栖动物物种数量存在显著差异 ($P < 0.05$), 不同取样时间存在极显著差异 ($P < 0.01$), 生境与采样时间对物种数量存在交互影响 ($P < 0.05$)。基于多重比较分析的结果表明, 2012年10月和2013年9月的大型底栖动物物种数量显著高于2012年12月 ($P < 0.05$) 和2013年5月 ($P < 0.05$); 而2012年10月与2013年9月间无显著差异(图2A)。

为进一步探讨互花米草与生境其他特征对大型底栖动物物种数量的影响, 基于多元回归分析了大型底栖动物物种数量与土壤温度、土壤湿度、pH值、互花米草株高、互花米草密度之间的关系, 结果表明互花米草株高 ($\text{Beta} = 0.002$) 为导致大型底栖动物物种数量在两种生境间变化的关键因子。

2.2 大型底栖动物生物量

两种生境中大型底栖动物的生物量有明显差异。不同时间的采样结果表明, 红树林中的大型底栖动物生物量显著低于互花米草生境(图2B), 这主

要是因为大型底栖动物的组成以双壳纲为主, 其生物量达到22.778 g/m², 占整体生物量的96.53%; 其次为甲壳纲, 生物量为0.486 g/m², 占整体生物量的2.06%。而不同取样时间内互花米草群落中双壳纲生物量均显著高于红树林生境, 如2013年9月互花米草群落中双壳类生物量达到15.747 g/m², 而同一时期红树林中双壳类生物量仅为0.335 g/m²(表2)。进一步分析表明, 主要是由于互花米草群落中出现了个体数量较多的中国绿螂, 为绝对优势类群。

基于采样时间-生境的双因素方差分析结果表明, 不同取样时间内, 互花米草群落的大型底栖动物生物量均显著高于红树林 ($P < 0.01$), 且不同取样时间的大型底栖动物生物量也显著不同 ($P < 0.01$)。基于多重比较分析的结果表明, 2013年9月的生物量显著高于其余3次取样 ($P < 0.05$), 而2013年5月的生物量显著低于其余3次取样 ($P < 0.05$)(图2B)。

基于多元回归分析的结果表明, 互花米草密度 ($\text{Beta} = 0.588$) 可以解释大型底栖动物生物量在不同生境的变化, 即互花米草密度越高, 大型底栖动物生物量越高。

2.3 大型底栖动物群落物种多样性

红树林中大型底栖动物群落的Shannon-Wiener多样性指数、Simpson多样性指数、Pielou均匀度指数和Margalef丰富度指数均高于互花米草群落, 仅2013年5月相反。基于采样时间-生境的双因素方差分析结果表明, 红树林生境中的Shannon-Wiener多样性指数 ($P < 0.05$)(图3A)和Simpson多样性指数

表2 西村港不同季节不同生境的大型底栖动物生物量(g/m²)
Table 2 Biomass of macro-invertebrates in different habitats and different seasons in Xicungang

采样时间 Time	生境 Habitat	甲壳纲 Crustacea	腹足纲 Gastropoda	双壳纲 Bivalvia	多板纲 Polyplacophora	多毛纲 Polychaeta	方格星虫纲 Sipunculidea	珊瑚纲 Anthozoa	合计 Sum
2012.10	互花米草 <i>Spartina alterniflora</i>	0.040	0.008	3.063	0.030	0.005	0.00	0.005	3.151
	红树林 Mangrove	0.094	0.037	0.057	0.00	0.00	0.00	0.00	0.188
2012.12	互花米草 <i>Spartina alterniflora</i>	0.002	0.00	2.997	0.00	0.00	0.00	0.00	2.999
	红树林 Mangrove	0.206	0.00	0.144	0.00	0.00	0.00	0.00	0.350
2013.5	互花米草 <i>Spartina alterniflora</i>	0.020	0.060	0.435	0.00	0.002	0.00	0.00	0.517
	红树林 Mangrove	0.008	0.006	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.014
2013.9	互花米草 <i>Spartina alterniflora</i>	0.028	0.043	15.747	0.032	0.00	0.00	0.00	15.850
	红树林 Mangrove	0.087	0.003	0.335	0.074	0.00	0.030	0.00	0.530
合计 Sum		0.486	0.157	22.778	0.136	0.006	0.030	0.005	23.598

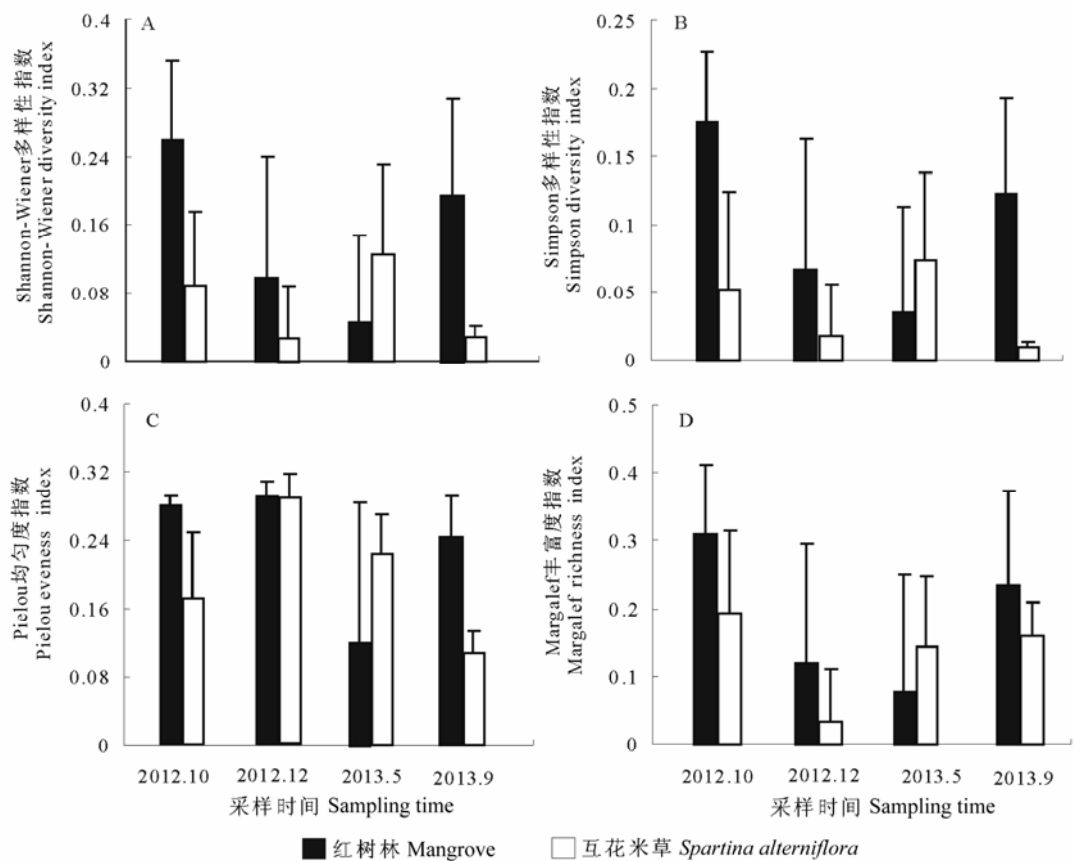


图3 西村港红树林和互花米草群落中大型底栖动物群落多样性
Fig. 3 Diversity indices of macro-invertebrates across mangrove and *Spartina alterniflora* in Xicungang, Beihai

($P<0.01$)(图3B)均显著高于互花米草群落, 且采样时间和生境对这两个多样性指数均有交互影响($P<0.05$); 而大型底栖动物的Pielou均匀度指数($P<0.01$)(图3C)和Margalef丰富度指数($P<0.05$) (图3D)在不同取样时间显著不同。多重方差分析结果表明, 2012年10月大型底栖动物Margalef丰富度指数显著高于2012年12月($P<0.05$)和2013年5月($P<$

0.05); 2012年12月大型底栖动物Pielou均匀度指数极显著高于2013年5月($P<0.01$)和2013年9月($P<0.01$)(图3C), 并且采样时间和生境对大型底栖动物Pielou均匀度指数有交互影响。

基于多元回归分析互花米草与生境其他特征对大型底栖动物Shannon-Wiener多样性指数和Simpson多样性指数的影响, 结果表明互花米草株

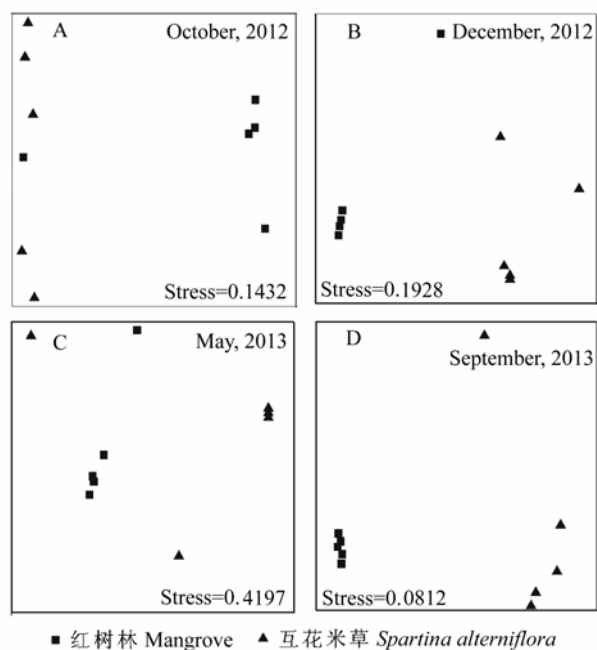


图4 西村港盐沼不同取样时间大型底栖动物采样点的非度量多维度分析

Fig. 4 Non-metric multidimensional scaling (NMDS) plots for the benthic macro-invertebrates at Xicungang marshes at different sampling time

高与这两个指数显著负相关, 且为解释大型底栖动物在两种生境变化的最佳因子。

2.4 大型底栖动物群落结构

本文运用非度量多维度分析(NMDS)研究不同季节的大型底栖动物群落结构, 结果表明尽管不同季节的群落结构略有差异, 但整体而言互花米草和红树林生境中的大型底栖动物群落相似性很低。其中2012年12月(图4B)和2013年9月(图4D)的分析结果表明, 互花米草和红树林生境中大型底栖动物群落结构明显不同, NMDS分析的压力系数(Stress)分别为0.1928和0.0812; 2012年10月(图4A)和2013年5月(图4C)互花米草和红树林生境中大型底栖动物群落相似度很低, NMDS分析的压力系数分别为0.1432和0.4197。且2012年秋季与2013年相比, 大型底栖动物群落结构在两种生境的相似度明显下降。

3 讨论

3.1 互花米草入侵红树林改变了大型底栖动物物种组成

红树林湿地与互花米草群落内大型底栖动物群落优势种和种类组成差异较大。广西北海西村港

红树林湿地中大型底栖动物主要由甲壳动物与软体动物组成, 这与陈光程等(2013)对红树林植被的大型底栖动物群落的调查结果相似。红树林湿地中甲壳动物物种数量高于互花米草群落, 主要是由于红树林为螃蟹等节肢动物提供了食物。如黄冠闽等(2013)在调查中发现, 秋茄(*Kandelia candel*)幼苗的叶片有昆虫和螃蟹等动物啃食的痕迹, 而且红树林凋落物更是一些大型底栖动物直接或者间接的食物来源。另外, 一些甲壳类动物如藤壶(*Balanidae*)和小藤壶(*Chthamalidae*)等主要附着在红树林枝干上(韦受庆等, 1993)。而西村港互花米草群落主要是以软体动物为主, 甲壳类物种数量很少, 可能是因为该地区互花米草密度较高, 达到346株/m², 不利于其活动。

互花米草群落不同季节的优势种均是中国绿螂, 红树林湿地2012年3次采样均是短指和尚蟹为优势种, 2013年9月中国绿螂为优势种。这是因为互花米草入侵促进了其根和根区土壤的可利用性(Lana & Guiss, 1992), 降低了土壤中的盐分, 并且通过消浪、沉积物淤积等为底埋型无脊椎动物的生存提供了有利生境(Netto & Lana, 1997), 因此底埋型底栖动物——中国绿螂(董存有, 1993)的种群数量迅速增加。尽管在以往的广西红树林大型底栖动物调查中就发现中国绿螂的分布(韦受庆等, 1993), 但并不是优势种。此次调查中发现红树林湿地中中国绿螂种群数量在2013年9月采样中增多, 一方面可能源于西村港红树林结构比较单一, 为秋茄群落; 另一方面也可能与互花米草斑块逐渐扩大, 不断向红树林入侵有关。Chen等(2009)研究也发现了中国绿螂在互花米草群落和当地植物海三棱藨草(*Scripus mariqueter*)群落之间显著的差异, 由此认为大型底栖动物对外来入侵物种的容忍程度与当地生境密切相关。

3.2 互花米草入侵增加了大型底栖动物生物量, 改变了群落生物多样性

生境的不同是导致大型底栖动物生物量、物种数量、Shannon-Wiener多样性指数和Simpson指数的差异的主要因素。这主要是由于在不同取样时间内, 中国绿螂均为互花米草群落的绝对优势物种, 而红树林生境中优势物种相对不明显, 这之前研究发现的强势种过于凸显将导致生物多样性指数降低的结果(张景平等, 2010)相一致。

有关互花米草入侵导致大型底栖动物群落多

样性变化方面有不同的研究结论。如王安安等(2014)研究发现在浙江乐清红树林保护区,红树林湿地与互花米草群落中的大型底栖动物群落多样性没有显著差异;而对福建厦门九龙江口红树林湿地与互花米草湿地的大型底栖动物的研究结果表明,红树林湿地内大型底栖动物群落的Margalef丰富度指数、Shannon-Wiener多样性指数、Pielou均匀度指数均低于互花米草区(高世和李复雪, 1985; 何明海等, 1993; 洪荣标等, 2005)。这一差异可能来自于互花米草入侵时间的不同:有研究表明互花米草入侵初期,其生境中的大型底栖动物群落物种丰富度和多样性处于较低的水平,但随着入侵时间的延长,会逐渐上升,并有可能高于原生境(Posey *et al.*, 2003; Robertson & Weis, 2005; 周虹霞等, 2005)。对中国沿海互花米草的调查也发现,互花米草的生物学特征如株高表现为广西西村港<浙江乐清<福建厦门,密度则相反(赵相建等, 未发表数据)。研究表明,互花米草入侵的早期,通常株从矮小细密,而到了入侵中期,植株高大而密度降低(Davis *et al.*, 2004),因此推断这3个地区的互花米草入侵阶段不同,西村港处于入侵初级阶段,而福建厦门的互花米草发育时间较长。本文基于互花米草生长特征与基质环境特征的多元回归分析结果表明,互花米草的株高和密度是影响大型底栖动物群落多样性变化的主要因素。此外,还需要进一步考虑基质硬度、有机物质含量、土壤溶解氧量等综合因素(侯森林等, 2012),这都有待于进一步研究。

大型底栖动物的Margalef丰富度指数和均匀度指数在不同取样时间内存在显著差异,该结论与侯森林等(2012)研究得出的季节对大型底栖动物生物多样性有显著影响的结果一致。有研究表明,互花米草的生长促进了某些大型底栖动物个体数量的变化(虞蔚岩等, 2009),两者密切相关。比如优势物种中国绿螂的数量在秋季(2012年9月和2013年10月)>冬季(2012年12月)>春季(2013年5月);而不同季节的物种数量为秋季>春季>冬季,一些种类仅在秋季出现,如满月蛤(Lucinidae, sp.),石鳖(Chitonidae, sp.)等。这可能是由于秋季互花米草生长处于旺盛期,大型底栖动物的种类和个体数量均明显增加,而冬季互花米草处于枯萎期,大型底栖动物种类明显减少。双因素方差分析的结果也表明,

生境和时间会综合影响大型底栖动物的均匀度指数。由此可见,大型底栖动物的季节变化也可能与互花米草不同季节的生长状况密切相关。

3.3 互花米草入侵改变大型底栖动物群落结构

本研究结果表明,大型底栖动物群落结构在两种生境中相似性很小。如石珊瑚(Madreporaria, sp.)、沙蚕(Nereididae, sp.)、石鳖、满月蛤,在红树林群湿地中未发现分布;而弧边招潮蟹(*Uca arcuata*)、藤壶(*Balanus* sp.)、汇螺(Potamididae, sp.)、透明美丽蛤(*Tellina diaphana*)、锉石鳖(Ischnochitonidae, sp.)、裸体方格星虫(*Sipunculus nudus*)在互花米草群落中均未采集到。说明互花米草入侵导致当地大型底栖动物群落物种数下降,且物种组成发生变化。基于NMDS分析结果也表明,互花米草入侵导致两种生境中大型底栖动物群落结构发生变化,该结论与王安安等(2014)的结论一致。这有可能是由于互花米草入侵改变了底泥的理化性质(陈中义, 2004),促进泥沙淤积,影响了生态系统中的水流、光照等环境特征(Neira *et al.*, 2007),从而影响大型底栖的动物生境的理化性质和生存条件,进而影响大型底栖动物的种类与群落结构。

致谢: 感谢在采样过程中广西壮族自治区环保厅蒋波,北海市环保局曾庆富、孙雄宇给予的帮助;感谢刘茂华、宫璐、邓贞贞、靳勇超、何丁元等在大型底栖动物采样以及标本整理过程中给予的帮助和支持。

参考文献

- Burnham KP, Anderson DR (1998) *Model Selection and Inference: An Information-theoretic Approach*. Springer, New York.
- Chen GC (陈光程), Yu D (余丹), Ye Y (叶勇), Chen B (陈彬) (2013) Impacts of mangrove vegetation on macro-benthic faunal communities. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), **33**, 327–336. (in Chinese with English abstract)
- Chen HL, Li B, Hu JB, Chen JK, Wu JH (2007) Effects of *Spartina alterniflora* invasion on benthic nematode communities in the Yangtze Estuary. *Marine Ecology Progress Series*, **336**, 99–110.
- Chen ZB, Guo L, Jin BS, Wu JH, Zheng GH (2009) Effect of the exotic plant *Spartina alterniflora* on macrobenthos communities in salt marshes of the Yangtze River estuary, China. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, **82**, 265–272.
- Chen ZY (陈中义) (2004) *Ecological Impacts of the Introduced Spartina alterniflora Invasion in the Coastal Ecosystems of*

- Chongming Dongtan, the Yangtze River Estuary (互花米草入侵国际重要湿地崇明东滩的生态后果). PhD dissertation, Fudan University. (in Chinese with English abstract)
- Chen ZY (陈中义), Fu CZ (傅萃长), Wang HY (王海毅), Li B (李博), Wu JH (吴纪华), Chen JK (陈家宽) (2005) Effects of *Spartina alterniflora* invasions on the benthic macro-invertebrates community at Dongtan of Chongming salt marsh, the Yangtze River estuary. *Wetland Science* (湿地科学), **3**, 1–7. (in Chinese with English abstract)
- Clarke KR (1993) Non-parametric multivariate analyses of changes in community structure. *Australian Journal of Ecology*, **18**, 117–143.
- Davis HG, Taylor CM, Civille JC, Strong DR (2004) An Allee effect at the front of a plant invasion: *Spartina* in a Pacific estuary. *Journal of Ecology*, **92**, 321–327.
- Dong CY (董存有) (1993) Preliminary observation on *Glaucomya chinensis* in Zhujiang estuary. *Sichuan Journal of Zoology* (四川动物), **12**(2), 32–33. (in Chinese)
- Gao AG (高爱根), Chen QZ (陈全震), Zeng JN (曾江宁), Liao YB (廖一波), Yang JY (杨俊毅) (2005) Macrofauna community in the mangrove area of Xiamen Island, Zhejiang. *Journal of Marine Sciences* (海洋学研究), **23**(2), 33–40. (in Chinese with English abstract)
- Gao SH (高世和), Li FX (李复雪) (1985) Community ecology of ground-dwelling macrofauna of mangrove in the Jiulongjiang estuary, Fujian. *Journal of Oceanography in Taiwan Strait* (台湾海峡), **4**, 179–191. (in Chinese with English abstract)
- Gao Y (高阳), Cai LZ (蔡立哲), Ma L (马丽), Xu HL (徐华林), Wang YJ (王勇军), Zan QJ (詹启杰) (2004) Vertical distribution of macrobenthos of Futian mangrove mudflat in Shenzhen Bay. *Journal of Oceanography in Taiwan Strait* (台湾海峡), **23**, 76–81. (in Chinese with English abstract)
- Hammer Ø, Harper DAT, Ryan PD (2001) PAST: paleontological statistics software package for education and data analysis. *Palaeontologia Electronica*, **4**, 1–9.
- He MH (何明海), Cai EX (蔡尔西), Xu HZ (徐惠州), Jiang JX (江锦祥), Zheng FW (郑凤武), Li RG (李荣冠) (1993) Studies on benthic ecology in mangrove in Jiulong River estuary, Fujian. *Journal of Oceanography in Taiwan Strait* (台湾海峡), **12**, 61–68. (in Chinese with English abstract)
- Hong RB (洪荣标), Lü XM (吕小梅), Chen L (陈岚), Fang SH (方少华) (2005) Benthos on mangrove wetland and smooth cordgrass (*Spartina alterniflora*) wetland in Jiulongjiang estuary. *Journal of Oceanography in Taiwan Strait* (台湾海峡), **24**, 189–194. (in Chinese with English abstract)
- Hou SL (侯森林), Yu XY (余晓韵), Lu CH (鲁长虎) (2012) Effect of *Spartina alterniflora* invasion on the macrobenthic community in the Sheyang estuary. *Transaction of Oceanology and Limnology* (海洋湖沼通报), (1), 138–146. (in Chinese with English abstract)
- Hu ZY (胡知渊), Bao YX (鲍毅新), Cheng HY (程宏毅), Zhang LL (张龙龙), Ge BM (葛宝明) (2009) Research progress on ecology of natural wetland zoobenthos in China. *Chinese Journal of Ecology* (生态学杂志), **28**, 959–968. (in Chinese with English abstract)
- Huang GM (黄冠闽), Zhang YH (张宜辉), Fang BZ (方柏州), Lin WS (林伟山) (2013) Effects of *Spartina alterniflora* on mangrove *Kandelia candel* seedlings regeneration. *Journal of Fujian Forestry Science and Technology* (福建林业科技), **40**(4), 93–113. (in Chinese with English abstract)
- Lana PC, Guiss C (1992) Macrofauna–plant–biomass interactions in a euhaline salt marsh in Paranagua Bay (Se Brazil). *Marine Ecology Progress Series*, **80**, 57–64.
- Levin LA, Talley TS (2000) Influences of vegetation and abiotic environmental factors on salt marsh invertebrates. In: *Concepts and Controversies in Tidal Marsh Ecology* (eds Weinstein MP, Kreeger DA), Kluwer, Dordrecht, pp. 661–707. Springer, the Netherlands.
- Lin XC (林秀春), Ren S (任帅), Gong Y (龚玉), Chen X (陈晓) (2010) Studies on macrobenthic community on *Spartina alterniflora* invaded area of Putian. *Journal of Putian University* (莆田高等专科学校学报), **17**(2), 96–100. (in Chinese with English abstract)
- Lu Q (陆强), Chen HL (陈慧丽), Shao XY (邵晓阳), Wang YY (王莹莹), Tao M (陶敏), He J (何京), Tang L (唐龙) (2013) Ecological characteristics of macrobenthic communities and its relationships with environmental factors in Hangzhou Xixi Wetland. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), **33**(9), 2803–2815. (in Chinese with English abstract)
- Ludwig JA, Reynolds JF (1988) *Statistical Ecology*. John Wiley & Sons, New York.
- Neira C, Levin LA, Grosholz ED, Mendoza G (2007) Influence of invasive *Spartina* growth stages on associated macrofaunal communities. *Biological Invasions*, **9**, 975–993.
- Netto SA, Lana PC (1997) Influence of *Spartina alterniflora* on superficial sediment characteristics of tidal flats in Paranagua Bay (south-eastern Brazil). *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, **44**, 641–648.
- Pielou EC (1975) *Ecological Diversity*. Wiley, New York.
- Posey MH, Alphin TD, Meyer DL, Johnson JM (2003) Benthic communities of common reed *Phragmites australis* and marsh cordgrass *Spartina alterniflora* marshes in Chesapeake Bay. *Marine Ecology Progress Series*, **261**, 51–61.
- Rangel TFLVB, Diniz-Filho JAF, Bini LM (2006) Towards an integrated computational tool for spatial analysis in macroecology and biogeography. *Global Ecology and Biogeography*, **15**, 321–327.
- Robertson TL, Weis JS (2005) A comparison of epifaunal communities associated with the stems of salt marsh grasses *Phragmites australis* and *Spartina alterniflora*. *Wetlands*, **25**, 1–7.
- Shen YM (沈永明), Wang YF (王艳芳), Chen SJ (陈寿军), Wu DL (吴德力), Yu WY (虞慰岩), Li ZH (李朝晖) (2013) The temporal and spatial distributions of the macrobenthos in *Spartina alterniflora* salt marsh. *Geographical Research* (地

- 理研究), **32**, 638–644. (in Chinese with English abstract)
- Tan YY (覃盈盈), Liang SC (梁士楚) (2008) Current status and eradication strategy of invasive alien plants *Spartina alterniflora* in Guangxi. *Wetland Science & Management* (湿地科学与管理), **4**(2), 47–50. (in Chinese with English abstract)
- Wang AA (王安安), Sun X (孙雪), Cai JB (蔡景波), Chai XL (柴雪良), Liu J (刘健), Shang X (商栩) (2014) Effects of *Spartina alterniflora* invasions on the benthic macroinvertebrates community at mangrove wetland. *Journal of Zhejiang Agricultural Sciences* (浙江农业科学), (4), 572–577. (in Chinese with English abstract)
- Wang RZ, Yuan L, Zhang LQ (2010) Impacts of *Spartina alterniflora* invasion on the benthic communities of salt marshes in the Yangtze Estuary, China. *Ecological Engineering*, **36**, 799–806.
- Wei DZ (魏德重), Xiang CY (项长友), Bao YX (鲍毅新), Li LF (李良峰), Zhang SS (章书声) (2012) Effect of mangrove planting on macrobenthic community structure and functional group. *Journal of Zhejiang Normal University* (Natural Sciences) (浙江师范大学学报(自然科学版)), **35**, 195–202. (in Chinese with English abstract)
- Wei SQ (韦受庆), Chen J (陈坚), Fan HQ (范航清) (1993) A study on the benthic macrofauna and its ecology in Shankou Mangrove Reserve area of Guangxi. *Journal of the Guangxi Academy of Sciences* (广西科学院学报), **9**(2), 45–57. (in Chinese with English abstract)
- Wu PQ (吴培强), Zhang J (张杰), Ma Y (马毅), Li XM (李晓敏) (2013) Remote sensing monitoring and analysis of the changes of mangrove in China in the past 20 years. *Advances in Marine Science* (海洋科学进展), **31**, 406–414. (in Chinese with English abstract)
- Xie WJ (谢文静), Gao S (高抒) (2009) Composition of the benthic macrofauna in the *Spartina alterniflora* salt marshes in the Wanggang area, central Jiangsu coast, eastern China. *Journal of Nanjing University* (Natural Sciences) (南京大学学报(自然科学版)), **45**, 553–561. (in Chinese with English abstract)
- Xie ZF (谢志发), He WS (何文珊), Liu WL (刘文亮), Lu JJ (陆健健) (2008) Influence of *Spartina alterniflora* salt marsh at its different development stages on macrobenthos. *Chinese Journal of Ecology* (生态学杂志), **27**, 63–67. (in Chinese with English abstract)
- Xu XJ (徐晓军), Wang H (王华), You WH (由文辉), Liu BX (刘宝兴) (2006) A study on the fluctuation of zoobenthic community in Chongming Dongtan's *Spartina alterniflora* Loisel. *Transactions of Oceanology and Limnology* (海洋湖沼通报), (2), 89–94. (in Chinese with English abstract)
- Yu WY (虞蔚岩), Li ZH (李朝晖), Hua C (华春), Shen YM (沈永明), Ma L (马玲), Guo N (郭娜), Li ZX (李智星) (2009) The diversity analysis of macrobenthic fauna on the tidal flat with *Spartina alterniflora* in Dongtai, Yancheng in Jiangsu. *Transactions of Oceanology and Limnology* (海洋湖沼通报), (1), 123–128. (in Chinese with English abstract)
- Zheng RQ (郑荣泉), Ge BM (葛宝明), Zhang YP (张永普), Zheng X (郑祥) (2006) The comparative study on the macrobenthic community ecology between the mangrove swamp and the naked tidal flat at the Yueqing Bay. *Ecological Science* (生态科学), **25**, 299–302. (in Chinese with English abstract)
- Zou FS (邹发生), Song XJ (宋晓军), Chen W (陈伟), Zheng XR (郑馨仁), Chen JH (陈建海) (1999) The diversity of benthic macrofauna on mud flat in Dongzhaigang Mangrove Reserve, Hainan. *Chinese Biodiversity* (生物多样性), **7**, 175–180. (in Chinese with English abstract)
- Zhou QQ (周青青), Chen ZL (陈志力), Xin K (辛琨) (2010) Research on the alien invasive status of mangrove in China. *Journal of Anhui Agricultural Sciences* (安徽农业科学), **38**, 2662–2664. (in Chinese with English abstract)
- Zhang JP (张景平), Huang XP (黄小平), Jiang ZJ (江志坚), Huang DJ (黄道建), Huang LM (黄良民) (2010) Assessment of the Pearl River estuary pollution by water comprehensive pollution index and biodiversity index. *Journal of Tropical Oceanography* (热带海洋学报), **29**, 69–76. (in Chinese with English abstract)
- Zhou HX (周虹霞), Liu JE (刘金娥), Qin P (钦佩) (2005) Effects of alien species (*Spartina alterniflora*) on soil microorganism diversity in salt marshes, Jiangsu coastal inter-tidal ecosystem. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), **25**, 2304–2311. (in Chinese with English abstract)

(责任编辑: 李新正 责任编辑: 时意专)