

互花米草入侵对长江口九段沙湿地昆虫功能群组成特征及季节动态的影响

潘卉¹, 陈秀芝², 吴捷^{1,*}, 张晶¹

(1. 中国科学院上海生命科学研究院植物生理生态研究所上海昆虫博物馆, 上海 200032;

2. 上海九段沙湿地国家级自然保护区管理署, 上海 200135)

摘要:【目的】揭示互花米草 *Spartina alterniflora* 入侵对盐沼湿地昆虫不同功能群组成特征和时间动态的影响。【方法】于 2015 年的不同季节, 在不同的样点沿 10 m 长的样线, 以扫网法对长江口九段沙湿地不同样点的互花米草、芦苇和藨草群落进行昆虫采集。采用非参数检验方法比较不同植物群落中不同昆虫取食功能群物种丰富度、个体多度和季节动态的差异, 采用非参数多维度排序方法分析植物生境对各昆虫功能群组成的影响, 并用指示种分析方法分析不同昆虫的生境偏好。【结果】共采集昆虫 72 科, 188 种, 10 338 头。互花米草群落昆虫物种丰富度和个体多度显著低于芦苇群落, 藨草群落昆虫物种丰富度与互花米草群落差异不显著, 但昆虫个体数显著多于互花米草群落。不同昆虫功能群分别比较表明, 植食昆虫物种数和个体数在互花米草和芦苇群落间差异不显著, 藨草群落植食昆虫物种数最少但个体数量最多。芦苇群落捕食/寄生昆虫物种数和个体数均显著多于互花米草和藨草群落。腐食/菌食昆虫物种数和个体数在不同植物群落无显著差异。季节动态分析显示, 不同昆虫功能群物种数和个体数在互花米草群落的峰值均出现在春季, 而在芦苇和藨草群落中则具不同趋势。根据非参数多维度排序分析结果, 互花米草入侵显著改变了昆虫的群落结构, 并对不同昆虫功能群的物种组成均产生了显著影响。指示种分析方法结果进一步表明, 偏好互花米草的昆虫物种数最少, 主要为广食性植食昆虫。偏好芦苇分布的昆虫物种数最多, 主要为捕食/寄生昆虫和专食性植食昆虫。偏好藨草的植食昆虫虽为广食性, 但指示值较高。【结论】互花米草入侵降低了盐沼湿地的昆虫多样性, 并显著改变了盐沼湿地昆虫功能群组成特征和季节动态。相比植食昆虫, 天敌昆虫对互花米草入侵的影响更为敏感。一些广食性的植食昆虫可能已对互花米草产生了适应机制, 其可能造成的生态学后果应引起重视。

关键词: 互花米草; 昆虫; 功能群; 季节动态; 湿地; 九段沙

中图分类号: Q968 文献标识码: A 文章编号: 0454-6296(2017)01-0067-17

Effects of *Spartina alterniflora* invasion on the structural characteristics and seasonal dynamics of insect functional groups in Jiuduansha wetland of the Yangtze River Estuary, East China

PAN Hui¹, CHEN Xiu-Zhi², WU Jie^{1,*}, ZHANG Jing¹ (1. Shanghai Entomological Museum, Institute of Plant Physiology and Ecology, Shanghai Institutes for Biological Sciences, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200032, China; 2. Shanghai Jiuduansha Wetland National Nature Reserve Administration, Shanghai 200135, China)

Abstract: 【Aim】 This study aims to explore the effects of *Spartina alterniflora* invasion on the structural characteristics and seasonal dynamics of insect functional groups in salt marshes. 【Methods】 In 2015, insects were seasonally collected by a sweeping net along a 10 m long transect line in different sample plots of *S. alterniflora*, *Phragmites australis* and *Scirpus triquetus* communities in Jiuduansha wetland of the

基金项目: 中国科学院战略生物资源科技支撑体系运行专项(CZBZX-1)

作者简介: 潘卉, 女, 1988年7月生, 上海人, 实验师, 研究方向为昆虫生物多样性及保护, E-mail: panhui@sibs.ac.cn

* 通讯作者 Corresponding author, E-mail: wujie@sibs.ac.cn

收稿日期 Received: 2016-10-19; 接受日期 Accepted: 2016-12-14

Yangtze River Estuary, East China. The nonparametric test method was adopted to compare the variations in the species richness, individual abundance and seasonal dynamics of different functional feeding groups of insects between different plant communities. The effects of plant habitats on the assemblage compositions of different insect functional groups were assessed by the nonmetric multidimensional scaling (NMS) ordination analysis. The habitat preferences of insect species were analysed by the indicator species analysis (ISA). 【Results】 A total of 10 338 individuals belonging to 188 species in 72 insect families were collected. Species richness and individual abundance of insects were significantly lower in *S. alterniflora* than in *P. australis*. The species richness of insects in *Sc. triqueter* was not significantly different from that in *S. alterniflora*. However, the individual number of insects in *Sc. triqueter* was significantly higher than that in *S. alterniflora*. As far as different insect functional groups were concerned, *Sc. triqueter* had the lowest species number but the highest individual number of insect herbivores. Both species and individual numbers of insect herbivores were not significantly different between *S. alterniflora* and *P. australis*. The species richness and abundance of predator/parasitoid insects were significantly higher in *P. australis* than in *S. alterniflora* and *Sc. triqueter*. The species and individual numbers of insect detritivores were not significantly different among plants. In addition, it was shown that the richness and abundance of all insect functional groups in *S. alterniflora* reached their peak values in spring. However, in *P. australis* and *Sc. triqueter*, different functional groups reached their species richness and abundance peaks in different seasons. According to the results of NMS ordination analysis, *S. alterniflora* invasion significantly changed the insect community composition, even when each functional group was individually concerned. According to the results of ISA, the number of insect species preferring *S. alterniflora* was the lowest. Of these species, most were generalist herbivores. The number of species preferring *P. australis* was the highest. Among these species, most were predator/parasitoid and specialist herbivore species. Herbivore species preferring *Sc. triqueter* were all generalists, but with relatively high indicator values. 【Conclusion】 *S. alterniflora* invasion reduces the insect biodiversity and significantly changes the structural characteristics and seasonal dynamics of insect functional groups in Jiuduansha wetland. In comparison with insect herbivores, natural enemy insects are more sensitive to the effects of *S. alterniflora* invasion. Some generalist herbivores may have developed adaptation mechanisms to *S. alterniflora*. Enough attention should be paid to the potential ecological and evolutionary consequences behind these phenomena.

Key words: *Spartina alterniflora*; insect; functional group; seasonal dynamics; wetland; Jiuduansha

外来植物入侵对入侵生态系统的生物多样性、群落结构、非生物环境特征和物质循环产生严重影响 (Crooks, 2002; Liao *et al.*, 2008; Vilà *et al.*, 2011; Hengstum *et al.*, 2014), 已成为导致全球环境变化的重要因素 (Vitousek *et al.*, 1997)。因此, 关于外来植物入侵可能导致的生态系统后果已引起普遍关注 (Vilà *et al.*, 2011)。

互花米草 *Spartina alterniflora* 是原产于北美洲和南美洲东海岸的多年生禾本科 (Gramineae) 杂草, 因其在护岸促淤方面具有重要的功能而被很多沿海国家和地区引种。然而由于互花米草具有较强的繁殖扩散能力, 目前已在引入地造成了广泛的外来种入侵问题 (Daehler and Strong, 1996; Ayres *et al.*, 2004; 陈中义等, 2004)。我国自 20 世纪 70 年代末引种互花米草, 经过几十年暴发式的扩散, 互花米

草已成为我国沿海湿地分布最广的外来入侵植物 (邓自发等, 2006), 严重挤压了土著盐沼植物的生存空间 (Chen *et al.*, 2004), 干扰了盐沼湿地正常的营养物质循环 (Cheng *et al.*, 2006; Liao *et al.*, 2008; Zhang *et al.*, 2010), 并对入侵盐沼湿地的鸟类、底栖动物、土壤线虫和微生物的物种多样性和群落结构造成显著影响 (陈中义等, 2005; Chen *et al.*, 2007; Gan *et al.*, 2009; Cui *et al.*, 2011; 江昞等, 2016)。

昆虫是盐沼湿地生物多样性的重要组成部分, 在盐沼湿地初级生产力消费、有机凋落物输出和维持盐沼植物群落结构稳定性等方面具有重要作用 (Rand, 2003; Bertness *et al.*, 2008; Canepuccia *et al.*, 2011), 同时也是湿地鸟类和鱼类的重要食物来源 (Hanson and Riggs, 1995; Xiong *et al.*, 2010)。

由于缺乏共同的进化历史,互花米草对土著植物的竞争替代作用可能对盐沼湿地昆虫的多样性和群落结构产生影响,进而可能影响到昆虫群落与入侵系统的生态功能。目前,探讨互花米草入侵对湿地昆虫物种多样性影响的研究较少且研究结论尚缺乏一致性。例如,高慧等(2006)和彭筱葳等(2006)发现互花米草与土著植物芦苇和海三棱藨草相比,具有较低的昆虫物种丰富度,并且互花米草上的昆虫群落与芦苇和海三棱藨草上的昆虫群落在结构组成上具有较大差异。但其他研究则发现互花米草上的昆虫多样性并不显著低于芦苇上的昆虫多样性(Wu *et al.*, 2009; 童春富, 2012),并且互花米草和芦苇上的昆虫群落组成也具有较高的相似性(陈秀芝, 2012)。这些争议的存在,增加了我们评价互花米草入侵影响的难度。此外,还需要引起注意的是,除个别研究外(童春富, 2012),现有研究多局限于揭示互花米草入侵对昆虫物种多样性组成的影响,而没有针对互花米草对盐沼昆虫功能群组成特征的影响开展深入研究,因此很难建立物种多样性变化与生态系统功能之间的联系(Schwartz *et al.*, 2000; Winfree *et al.*, 2015),从而限制了我们对互花米草入侵可能产生的生态和进化后果的全面认识。

本研究采样地为受互花米草入侵影响严重的长江口九段沙湿地,通过对九段沙湿地藨草、芦苇和互花米草群落的昆虫多样性开展季节性采样,揭示互花米草入侵对盐沼湿地昆虫群落功能群特征及季节动态可能产生的影响,并通过对不同昆虫物种对互花米草和土著植物的选择偏好性分析,探讨互花米草入侵可能对盐沼湿地产生的生态学后果,从而为盐沼湿地的生物多样性资源的保护和管理提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究地点概况

九段沙湿地位于上海长江入海口(121°46'12" - 122°1'03"E, 31°03'02" - 31°17'24"N),属于新兴的河口沙洲岛屿湿地,总面积约420 km²,主要受东亚季风气候影响,年均温为15.7℃,年均降水约1145 mm。九段沙湿地主要由上沙、中沙和下沙以及江亚南沙4块沙体组成,土著优势植物为芦苇 *Phragmites australis*、藨草 *Scirpus triquetus* 和海三棱藨草 *Sc. mariquetus*,但自1997年为配合浦东机场东迁而引种互花米草以来,互花米草已在中沙和下沙形

成了大面积的单优群落,其总面积已超过了其他土著植物群落,并有继续扩张的趋势(刘钰等, 2013)。

1.2 样地设置和采样

由于近几年来海三棱藨草群落受互花米草入侵影响较大,因此研究选取了藨草和芦苇群落作为土著植物群落的研究对象。为了避免互花米草入侵形成的生境片段化,以及群落交错带对昆虫分布的影响,藨草群落和芦苇群落采样地点分别设置在几乎没有受到互花米草入侵影响的江亚南沙和上沙。互花米草群落的采样地点则设置在互花米草占绝对优势的下沙。其中藨草群落设置3个样点,芦苇和互花米草群落各设置9个采样点,各样点间距大于10 m。分别于2015年2月(冬季)、4月(春季)、8月(夏季)和11月(秋季)对各个样点的昆虫进行采集。由于沙洲岛屿采样的困难,研究主要采用扫网法对昆虫进行采集(扫网直径30 cm)。采样时,由固定人员在不同样点沿10 m长样线,以左右两侧各扫网25次的频率进行采集。扫网中的昆虫用乙酸乙酯麻醉后,置于75%的酒精瓶内保存,带回室内鉴定。

1.3 标本分类鉴定和功能群划分

昆虫标本的鉴定主要通过核对上海昆虫博物馆馆藏定名标本和咨询相关专家完成(专家及所鉴定类群参考致谢),部分标本鉴定参考了郑乐怡和归鸿(1999)。所有标本均保存于中国科学院上海昆虫博物馆。

昆虫功能群的划分主要依据其食性,分为植食(herbivore, H)、捕食/寄生(predator/parasitoid, PP)和腐食/菌食(detritivore/fungivore, DF),其余食性昆虫(含食性不确定)由于占比较低,因此没有进一步分析,统一归为其他。对于一些缺乏生物学信息的物种,则根据野外观察和所属分类类群的一般食性特征进行判定。

1.4 数据处理和分析

由于研究样本数量偏小($n < 30$),因此采用SPSS统计学软件的非参数检验(Mann-Whitney *U* test)方法对组间差异和不同处理的效应进行统计学检验。昆虫群落组成的相似性则在Pc-ord 5.0软件环境下,采用非参数多维测度法(nonmetric multidimensional scaling, NMS)进行分析。排序前先将数据进行 $\log_x + 1$ 的转换。排序结果采用多响应置换过程(multi-response permutation procedure, MRPP)分析方法进行检验(McCune and Grace,

2002)。为了讨论不同昆虫对不同植物群落的分布偏好,采用指示种分析方法(indicator species analysis),计算不同昆虫物种在不同植物群落上的指示值,并采用蒙特卡洛检验(Monte Carlo test)估计显著水平,作为其对不同植物选择偏好性的测度(Dufrêne and Legendre, 1997)。为了保证结果的可靠性,个体数少于5并且指示值低于60的物种将不进行分析。

2 结果

2.1 群落组成

通过扫网,共采集了昆虫10目,72科,188种,总计10338头,其中植食昆虫49种,捕食寄生天敌昆虫103种,腐食/菌食昆虫20种,其他食性昆虫16种(表1)。

表1 长江口九段沙湿地不同植物群落扫网采集昆虫

Table 1 Insect species collected by sweeping net from different plant communities in Jiuduansha wetland of the Yangtze River Estuary, East China

| 物种 Species | 功能群 Functional group | 总个体数 Total individual number | 植物群落 Plant communities | | |
|--|-------------------------|---------------------------------|------------------------|--------------|--------------|
| | | | St ($n=3$) | Pa ($n=9$) | Sa ($n=9$) |
| 革翅目 Dermaptera | | | | | |
| 垫跗螋科 Chelisochidae | | | | | |
| 首垫跗螋 <i>Proreus simulans</i> | PP | 7 | 0/0 | 5/3 | 2/2 |
| 直翅目 Orthoptera | | | | | |
| 草螽科 Conocephalidae | | | | | |
| 上海草螽 <i>Conocephalus shanghaiensis</i> | H | 10 | 0/0 | 7/3 | 3/3 |
| 蛉蟋科 Trigonidiidae | | | | | |
| 小黄蛉 <i>Natula matsuurai</i> | H | 15 | 0/0 | 1/1 | 14/7 |
| 啮目 Psocoptera | | | | | |
| 单啮科 Caeciliusidae | | | | | |
| 单啮 <i>Caecilius</i> sp. | H | 139 | 0/0 | 11/5 | 128/9 |
| 外啮科 Ectopsocidae | | | | | |
| 邻外啮 <i>Ectopsocopsis</i> sp. | DF | 2 | 0/0 | 0/0 | 2/2 |
| 缨翅目 Thysanoptera | | | | | |
| 管蓟马科 Phlaeothripidae | | | | | |
| 稻管蓟马 <i>Haplothrips aculeatus</i> | H | 4 688 | 3 598/3 | 300/9 | 790/9 |
| 棒管蓟马 <i>Bactrothrips</i> sp. | H | 10 | 0/0 | 7/3 | 3/3 |
| 蓟马科 Thripidae | | | | | |
| 玉米黄呆蓟马 <i>Anaphothrips obscurus</i> | H | 9 | 0/0 | 0/0 | 9/1 |
| 花蓟马 <i>Frankliniella intonsa</i> | H | 11 | 2/1 | 0/0 | 9/2 |
| 端大蓟马 <i>Megalurothrips distalis</i> | H | 13 | 0/0 | 1/1 | 12/2 |
| 台湾蓟马 <i>Thrips formosanus</i> | H | 74 | 0/0 | 56/9 | 18/5 |
| 半翅目 Hemiptera | | | | | |
| 粒脉蜡蝉科 Meenoplidae | | | | | |
| 粉白粒脉蜡蝉 <i>Nisia atrovonosa</i> | H | 2 | 0/0 | 2/1 | 0/0 |
| 飞虱科 Delphacidae | | | | | |
| 凹颊绿飞虱 <i>Chloriona alaica</i> | H | 117 | 0/0 | 114/8 | 3/2 |
| 白背飞虱 <i>Sogatella furcifera</i> | H | 3 | 0/0 | 1/1 | 2/2 |
| 芦苇长突飞虱 <i>Stenocranus matsumurai</i> | H | 345 | 0/0 | 322/9 | 23/4 |
| 飞虱 <i>Delphacidae</i> sp. 03 | H | 1 | 1/1 | 0/0 | 0/0 |
| 飞虱 <i>Delphacidae</i> sp. 04 | H | 3 | 0/0 | 3/3 | 0/0 |
| 叶蝉科 Cicadellidae | | | | | |
| 二点叶蝉 <i>Macrosteles fascifrons</i> | H | 149 | 149/3 | 0/0 | 0/0 |

续表 1 Table 1 continued

| 物种 Species | 功能群 Functional group | 总个体数 Total individual number | 植物群落 Plant communities | | |
|--------------------------------------|-------------------------|---------------------------------|------------------------|--------------------|--------------------|
| | | | St (<i>n</i> = 3) | Pa (<i>n</i> = 9) | Sa (<i>n</i> = 9) |
| 蚜科 Aphididae | | | | | |
| 桃粉大尾蚜 <i>Hyalopterus amygdali</i> | H | 39 | 7/2 | 22/6 | 10/5 |
| 背孔长蝽科 Orsillidae | | | | | |
| 小长蝽 <i>Nysius erica</i> | H | 2 | 0/0 | 0/0 | 2/1 |
| 杆长蝽科 Blissidae | | | | | |
| 大狭长蝽 <i>Dimorphopterus pallipes</i> | H | 1 027 | 0/0 | 975/9 | 52/3 |
| 花蝽科 Anthocoridae | | | | | |
| 小花蝽 <i>Orius</i> sp. | PP | 2 | 0/0 | 0/0 | 2/2 |
| 姬蝽科 Nabidae | | | | | |
| 姬蝽 <i>Nabis</i> sp. | PP | 3 | 2/2 | 0/0 | 1/1 |
| 盲蝽科 Miridae | | | | | |
| 泛泰盲蝽 <i>Taylorilygus apicalis</i> | H | 8 | 0/0 | 1/1 | 7/3 |
| 莎长蝽科 Cymidae | | | | | |
| 褐莎长蝽 <i>Cymus koreanus</i> | H | 22 | 0/0 | 2/1 | 20/3 |
| 脉翅目 Neuroptera | | | | | |
| 草蛉科 Chrysopidae | | | | | |
| 日本通草蛉 <i>Chrysoperla nipponensis</i> | PP | 2 | 0/0 | 2/2 | 0/0 |
| 鞘翅目 Coleoptera | | | | | |
| 步甲科 Carabidae | | | | | |
| 婪步甲 <i>Harpalini</i> sp. | PP | 2 | 0/0 | 2/2 | 0/0 |
| 隐翅虫科 Staphylinidae | | | | | |
| 阿隐翅虫 <i>Atheta</i> sp. | PP | 2 | 0/0 | 1/1 | 1/1 |
| 丸甲科 Byrrhidae sp. | | | | | |
| 丸甲 <i>Byrrhidae</i> sp. | DF | 2 | 0/0 | 2/2 | 0/0 |
| 缨翅甲科 Ptiliidae | | | | | |
| 缨翅甲 <i>Ptiliidae</i> sp. | DF | 24 | 0/0 | 0/0 | 24/6 |
| 隐食甲科 Cryptophagidae | | | | | |
| 隐食甲 <i>Cryptophagus</i> sp. | DF | 1 | 0/0 | 0/0 | 1/1 |
| 郭公甲科 Cleridae | | | | | |
| 新叶郭公甲 <i>Neohydnius hozumii</i> | PP | 30 | 0/0 | 28/9 | 2/2 |
| 姬花甲科 Phalacridae | | | | | |
| 姬花甲 <i>Merobrachys</i> sp. | DF | 36 | 0/0 | 28/5 | 8/4 |
| 瓢虫科 Coccinellidae | | | | | |
| 异色瓢虫 <i>Harmonia axyridis</i> | PP | 1 | 0/0 | 0/0 | 1/1 |
| 龟纹瓢虫 <i>Propylea japonica</i> | PP | 6 | 0/0 | 2/2 | 4/2 |
| 黑背毛瓢虫 <i>Scymnus babai</i> | PP | 31 | 1/1 | 28/9 | 2/2 |
| 黑襟毛瓢虫 <i>Scymnus hoffmanni</i> | PP | 367 | 1/1 | 346/9 | 20/6 |
| 拟球甲科 Corylophidae | | | | | |
| 丝拟球甲 <i>Sericoderus</i> sp. | DF | 10 | 0/0 | 0/0 | 10/5 |
| 薪甲科 Lathridiidae | | | | | |
| 长跗薪甲 <i>Melanophthalma</i> sp. | DF | 252 | 0/0 | 212/9 | 40/7 |
| 丽光鞘薪甲 <i>Corticaria ornata</i> | DF | 5 | 0/0 | 3/2 | 2/1 |
| 扁谷盗科 Laemophloeidae | | | | | |
| 隐扁谷盗 <i>Cryptolestes</i> sp. | DF | 36 | 0/0 | 7/5 | 29/7 |
| 蚁形甲科 Anthicidae | | | | | |

续表 1 Table 1 continued

| 物种 Species | 功能群 Functional group | 总个体数 Total individual number | 植物群落 Plant communities | | |
|-------------------------------------|-------------------------|---------------------------------|------------------------|--------------------|--------------------|
| | | | St (<i>n</i> = 3) | Pa (<i>n</i> = 9) | Sa (<i>n</i> = 9) |
| 长颈蚁形甲 <i>Macratia</i> sp. | PP | 136 | 0/0 | 128/9 | 8/4 |
| 负泥虫科 Cioceridae | | | | | |
| 短腿水叶甲 <i>Donacia frontalis</i> | H | 8 | 8/3 | 0/0 | 0/0 |
| 象甲科 Curculionidae | | | | | |
| 船象 <i>Baridinae</i> sp. 01 | H | 1 | 0/0 | 0/0 | 1/1 |
| 小蠹科 Scolytidae | | | | | |
| 梢小蠹 <i>Cryphalus</i> sp. | H | 3 | 0/0 | 2/2 | 1/1 |
| 叶甲科 Chrysomelidae | | | | | |
| 黄曲条菜跳甲 <i>Phyllotreta striolata</i> | H | 1 | 0/0 | 0/0 | 1/1 |
| 双翅目 Diptera | | | | | |
| 斑蝇科 Otitidae | | | | | |
| 松蜜斑蝇 <i>Melieria omissa</i> | H | 29 | 0/0 | 1/1 | 28/5 |
| 大蚊科 Tipulidae | | | | | |
| 大蚊 <i>Tipulidae</i> sp. 03 | DF | 7 | 0/0 | 7/4 | 0/0 |
| 大蚊 <i>Tipulidae</i> sp. 04 | DF | 1 | 0/0 | 1/1 | 0/0 |
| 大蚊 <i>Tipulidae</i> sp. 05 | DF | 1 | 0/0 | 1/1 | 0/0 |
| 瘿蚊科 Cecidomyiidae | | | | | |
| 芦苇茎瘿蚊 <i>Giraudiella inclusa</i> | H | 1 | 0/0 | 1/1 | 0/0 |
| 瘿蚊 <i>Cecidomyiidae</i> sp. 04 | Oth | 14 | 0/0 | 0/0 | 14/2 |
| 蚊科 Culicidae | | | | | |
| 库蚊属 <i>Culex</i> sp. | Oth | 11 | 0/0 | 3/3 | 8/5 |
| 蚊 <i>Culicidae</i> sp. | Oth | 4 | 0/0 | 1/1 | 3/2 |
| 蚋科 Simuliidae | | | | | |
| 蚋 <i>Simuliidae</i> sp. | Oth | 7 | 2/2 | 3/3 | 2/2 |
| 蠓科 Ceratopogonidae | | | | | |
| 库蠓 <i>Culicoides</i> sp. | Oth | 1 | 0/0 | 1/1 | 0/0 |
| 蠓科 <i>Ceratopogonidae</i> sp. 01 | Oth | 7 | 0/0 | 5/2 | 2/2 |
| 蠓科 <i>Ceratopogonidae</i> sp. 02 | Oth | 5 | 0/0 | 0/0 | 5/2 |
| 蠓科 <i>Ceratopogonidae</i> sp. 03 | Oth | 4 | 1/1 | 3/3 | 0/0 |
| 蠓科 <i>Ceratopogonidae</i> sp. 07 | Oth | 7 | 3/1 | 2/2 | 2/1 |
| 蠓科 <i>Ceratopogonidae</i> sp. 11 | Oth | 6 | 2/1 | 2/1 | 2/2 |
| 摇蚊科 Chironomidae | | | | | |
| 摇蚊 <i>Chironomidae</i> sp. 01 | Oth | 93 | 6/3 | 42/8 | 45/6 |
| 摇蚊 <i>Chironomidae</i> sp. 03 | Oth | 10 | 1/1 | 6/4 | 3/3 |
| 摇蚊 <i>Chironomidae</i> sp. 07 | Oth | 1 | 0/0 | 0/0 | 1/1 |
| 摇蚊 <i>Chironomidae</i> sp. 09 | Oth | 2 | 0/0 | 0/0 | 2/2 |
| 摇蚊 <i>Chironomidae</i> sp. 10 | Oth | 5 | 0/0 | 3/1 | 2/1 |
| 摇蚊 <i>Chironomidae</i> sp. 12 | Oth | 1 | 0/0 | 1/1 | 0/0 |
| 舞虻科 Empididae | | | | | |
| 舞虻 <i>Empididae</i> sp. | PP | 95 | 0/0 | 69/8 | 26/7 |
| 食蚜蝇科 Syrphidae | | | | | |
| 黑纹食蚜蝇 <i>Episyrphus balteatus</i> | PP | 1 | 0/0 | 0/0 | 1/1 |
| 大灰食蚜蝇 <i>Metasyrphus corollae</i> | PP | 1 | 0/0 | 1/1 | 0/0 |
| 蝇科 Muscidae | | | | | |
| 瘦须溜蝇 <i>Lispe pygmaea</i> | PP | 11 | 0/0 | 3/3 | 8/5 |

续表 1 Table 1 continued

| 物种 Species | 功能群 Functional group | 总个体数 Total individual number | 植物群落 Plant communities | | |
|--|-------------------------|---------------------------------|------------------------|----------|----------|
| | | | St (n=3) | Pa (n=9) | Sa (n=9) |
| 麻蝇科 Sarcophagidae | | | | | |
| 本州沼野蝇 <i>Goniophyto honshuensis</i> | DF | 5 | 0/0 | 3/2 | 2/2 |
| 缟蝇科 Lauxaniidae | | | | | |
| 尖额裸颊缟蝇 <i>Trigonometopus eborifacies</i> | DF | 3 | 0/0 | 2/2 | 1/1 |
| 同脉缟蝇 <i>Homoneura</i> sp. | DF | 2 | 0/0 | 2/2 | 0/0 |
| 鼓翅蝇科 Sepsidae | | | | | |
| 单斑鼓翅蝇 <i>Sepsis monostigma</i> | DF | 7 | 0/0 | 0/0 | 7/1 |
| 寡脉蝇科 Asteiidae | | | | | |
| 寡脉蝇 <i>Asteiidae</i> sp. | DF | 30 | 1/1 | 21/6 | 8/4 |
| 角蛹蝇科 Aulacigastridae | | | | | |
| 角蛹蝇 <i>Aulacigaster</i> sp. | DF | 1 | 0/0 | 1/1 | 0/0 |
| 水蝇科 Ephydriidae | | | | | |
| 矮颊水蝇 <i>Allotrichoma</i> sp. | H | 6 | 0/0 | 5/4 | 1/1 |
| 毛眼水蝇 <i>Hydrellia</i> sp. | H | 184 | 0/0 | 21/7 | 163/8 |
| 凸额水蝇 <i>Psilopa</i> sp. 01 | H | 24 | 15/3 | 3/3 | 6/4 |
| 凸额水蝇 <i>Psilopa</i> sp. 02 | H | 1 | 0/0 | 0/0 | 1/1 |
| 凸额水蝇 <i>Psilopa</i> sp. 03 | H | 6 | 0/0 | 6/3 | 0/0 |
| 原温泉水蝇 <i>Scatella major</i> | DF | 14 | 7/3 | 0/0 | 7/3 |
| 水蝇 <i>Ephydriidae</i> sp. 10 | H | 26 | 4/2 | 2/1 | 20/5 |
| 果蝇科 Drosophilidae | | | | | |
| 果蝇 <i>Drosophila</i> sp. | DF | 1 | 0/0 | 0/0 | 1/1 |
| 蚤蝇科 Phoridae | | | | | |
| 异蚤蝇 <i>Megaselia</i> sp. | PP | 1 | 0/0 | 1/1 | 0/0 |
| 蚤蝇 <i>Phoridae</i> sp. 02 | PP | 2 | 0/0 | 0/0 | 2/1 |
| 蚤蝇 <i>Phoridae</i> sp. 03 | PP | 1 | 0/0 | 0/0 | 1/1 |
| 实蝇科 Tephritidae | | | | | |
| 斑实蝇 <i>Paroxyna</i> sp. | H | 1 | 0/0 | 0/0 | 1/1 |
| 杆蝇科 Chloropidae | | | | | |
| 黑杆蝇 <i>Cryptonevra flavitarsis</i> | H | 30 | 0/0 | 26/9 | 4/1 |
| 距杆蝇 <i>Cadrema</i> sp. | H | 8 | 0/0 | 0/0 | 8/3 |
| 瘤杆蝇 <i>Elachiptera</i> sp. | H | 10 | 0/0 | 1/1 | 9/4 |
| 愈背杆蝇 <i>Lasiosina</i> sp. | H | 513 | 0/0 | 74/9 | 439/9 |
| 平胸杆蝇 <i>Mepachymerus</i> sp. | H | 5 | 0/0 | 4/1 | 1/1 |
| 近鬃杆蝇 <i>Thaumatomyia</i> sp. | H | 1 | 0/0 | 1/1 | 0/0 |
| 长缘杆蝇 <i>Oscinellinae</i> sp. 01 | H | 31 | 0/0 | 3/3 | 28/6 |
| 长缘杆蝇 <i>Oscinellinae</i> sp. 02 | H | 17 | 0/0 | 10/6 | 7/2 |
| 长缘杆蝇 <i>Oscinellinae</i> sp. 03 | H | 3 | 0/0 | 2/2 | 1/1 |
| 长缘杆蝇 <i>Oscinellinae</i> sp. 21 | H | 11 | 0/0 | 0/0 | 11/1 |
| 长缘杆蝇 <i>Oscinellinae</i> sp. 28 | H | 1 | 0/0 | 0/0 | 1/1 |
| 杆蝇 <i>Chloropidae</i> sp. 02 | H | 1 | 0/0 | 0/0 | 1/1 |
| 杆蝇 <i>Chloropidae</i> sp. 14 | H | 3 | 0/0 | 3/2 | 0/0 |
| 鳞翅目 Lepidoptera | | | | | |
| 毒蛾科 Lymantriidae | | | | | |
| 素毒蛾 <i>Laelia coenosa</i> | H | 53 | 0/0 | 0/0 | 53/7 |
| 螟蛾科 Pyralidae | | | | | |

续表 1 Table 1 continued

| 物种 Species | 功能群 Functional group | 总个体数 Total individual number | 植物群落 Plant communities | | |
|--------------------------------------|-------------------------|---------------------------------|------------------------|--------------------|--------------------|
| | | | St (<i>n</i> = 3) | Pa (<i>n</i> = 9) | Sa (<i>n</i> = 9) |
| 芦螟 <i>Chilo luteellus</i> | H | 1 | 0/0 | 1/1 | 0/0 |
| 膜翅目 Hymenoptera | | | | | |
| 赤眼蜂科 Trichogrammatidae | | | | | |
| 赤眼蜂 <i>Trichogramma</i> sp. 01 | PP | 36 | 30/3 | 5/4 | 1/1 |
| 赤眼蜂 <i>Trichogramma</i> sp. 02 | PP | 10 | 10/3 | 0/0 | 0/0 |
| 缨小蜂科 Mymaridae | | | | | |
| 缨翅缨小蜂 <i>Anagrus</i> sp. | PP | 186 | 12/3 | 173/9 | 1/1 |
| 缨小蜂 Mymaridae sp. 08 | PP | 2 | 1/1 | 0/0 | 1/1 |
| 小蜂科 Chalcididae | | | | | |
| 大腿小蜂 <i>Brachymeria</i> sp. | PP | 1 | 0/0 | 0/0 | 1/1 |
| 长尾小蜂科 Torymidae | | | | | |
| 长尾小蜂 <i>Torymus</i> sp. | PP | 14 | 0/0 | 6/4 | 8/2 |
| 广肩小蜂科 Eurytomidae | | | | | |
| 食瘿广肩小蜂 <i>Sycophila</i> sp. | PP | 1 | 0/0 | 0/0 | 1/1 |
| 广肩小蜂 <i>Eurytoma</i> sp. 01 | PP | 7 | 0/0 | 6/6 | 1/1 |
| 广肩小蜂 <i>Eurytoma</i> sp. 03 | PP | 16 | 0/0 | 15/7 | 1/1 |
| 蚜小蜂科 Aphelinidae | | | | | |
| 蚜小蜂 <i>Aphelinus</i> sp. 06 | PP | 7 | 0/0 | 2/2 | 5/4 |
| 姬小蜂科 Eulophidae | | | | | |
| 长尾啮小蜂 <i>Aprostocetus</i> sp. 01 | PP | 68 | 7/3 | 53/9 | 8/2 |
| 长尾啮小蜂 <i>Aprostocetus</i> sp. 03 | PP | 38 | 38/3 | 0/0 | 0/0 |
| 长尾啮小蜂 <i>Aprostocetus</i> sp. 11 | PP | 4 | 0/0 | 4/3 | 0/0 |
| 扁角姬小蜂 <i>Closterocerus</i> sp. | PP | 4 | 0/0 | 3/3 | 1/1 |
| 啮小蜂 <i>Tetrastichus</i> sp. 07 | PP | 2 | 0/0 | 2/1 | 0/0 |
| 啮小蜂 <i>Tetrastichus</i> sp. 13 | PP | 2 | 1/1 | 0/0 | 1/1 |
| 姬小蜂 Eulophidae sp. 05 | PP | 2 | 0/0 | 2/1 | 0/0 |
| 姬小蜂 Eulophidae sp. 08 | PP | 1 | 1/1 | 0/0 | 0/0 |
| 姬小蜂 Eulophidae sp. 09 | PP | 2 | 0/0 | 1/1 | 1/1 |
| 姬小蜂 Eulophidae sp. 11 | PP | 1 | 1/1 | 0/0 | 0/0 |
| 姬小蜂 Eulophidae sp. 13 | PP | 3 | 0/0 | 2/2 | 1/1 |
| 姬小蜂 Eulophidae sp. 20 | PP | 3 | 0/0 | 3/2 | 0/0 |
| 姬小蜂 Eulophidae sp. 21 | PP | 2 | 0/0 | 2/0 | 0/0 |
| 姬小蜂 Eulophidae sp. 22 | PP | 1 | 0/0 | 0/0 | 1/1 |
| 跳小蜂科 Encyrtidae | | | | | |
| 日本阿斯泰跳小蜂 <i>Astymachus japonicus</i> | PP | 19 | 0/0 | 19/9 | 0/0 |
| 扁胸鲍氏跳小蜂 <i>Boucekiella depressa</i> | PP | 67 | 0/0 | 64/9 | 3/2 |
| 平背跳小蜂 <i>Platencyrtus aclerus</i> | PP | 16 | 0/0 | 14/6 | 2/2 |
| 跳小蜂 Encyrtidae sp. 01 | PP | 2 | 0/0 | 2/2 | 0/0 |
| 旋小蜂科 Eupelmidae | | | | | |
| 旋小蜂 <i>Eupelmus</i> sp. | PP | 1 | 0/0 | 1/1 | 0/0 |
| 金小蜂科 Pteromalidae | | | | | |
| 瘿蚊金小蜂 <i>Propicroscytus</i> sp. | PP | 1 | 0/0 | 1/1 | 0/0 |
| 狭翅金小蜂 <i>Panstenon</i> sp. 03 | PP | 9 | 1/1 | 1/1 | 7/3 |
| 狭翅金小蜂 <i>Panstenon</i> sp. 05 | PP | 2 | 0/0 | 2/1 | 0/0 |
| 金小蜂 Pteromalidae sp. 05 | PP | 3 | 0/0 | 3/2 | 0/0 |

续表 1 Table 1 continued

| 物种 Species | 功能群 Functional group | 总个体数 Total individual number | 植物群落 Plant communities | | |
|-------------------------------------|-------------------------|---------------------------------|------------------------|--------------------|--------------------|
| | | | St (<i>n</i> = 3) | Pa (<i>n</i> = 9) | Sa (<i>n</i> = 9) |
| 金小蜂 <i>Pteromalidae</i> sp. 22 | PP | 2 | 0/0 | 1/1 | 1/1 |
| 金小蜂 <i>Pteromalidae</i> sp. 30 | PP | 4 | 0/0 | 4/1 | 0/0 |
| 金小蜂 <i>Pteromalidae</i> sp. 31 | PP | 5 | 0/0 | 5/1 | 0/0 |
| 金小蜂 <i>Pteromalidae</i> sp. 32 | PP | 1 | 0/0 | 1/1 | 0/0 |
| 金小蜂 <i>Pteromalidae</i> sp. 33 | PP | 1 | 1/1 | 0/0 | 0/0 |
| 金小蜂 <i>Pteromalidae</i> sp. 34 | PP | 5 | 1/1 | 1/1 | 3/2 |
| 广腹细蜂科 <i>Platygastridae</i> | | | | | |
| 优小细蜂 <i>Eumicrosoma</i> sp. | PP | 540 | 0/0 | 537/9 | 3/2 |
| 芦毒蛾黑卵蜂 <i>Telenomus laelia</i> | PP | 10 | 0/0 | 7/5 | 3/2 |
| 黑卵蜂 <i>Telenomus</i> sp. 01 | PP | 7 | 0/0 | 0/0 | 7/3 |
| 黑卵蜂 <i>Telenomus</i> sp. 02 | PP | 11 | 11/3 | 0/0 | 0/0 |
| 黑卵蜂 <i>Telenomus</i> sp. 03 | PP | 3 | 0/0 | 1/1 | 2/1 |
| 黑卵蜂 <i>Telenomus</i> sp. 04 | PP | 71 | 0/0 | 71/8 | 0/0 |
| 瘦蚊广腹细蜂 <i>Platygaster</i> sp. | PP | 23 | 0/0 | 20/7 | 3/2 |
| 广腹细蜂 <i>Platygastrinae</i> sp. | PP | 3 | 0/0 | 3/1 | 0/0 |
| 缘腹细蜂 <i>Scelioninae</i> sp. 01 | PP | 2 | 0/0 | 2/2 | 0/0 |
| 缘腹细蜂 <i>Scelioninae</i> sp. 03 | PP | 1 | 0/0 | 1/1 | 0/0 |
| 缘腹细蜂 <i>Scelioninae</i> sp. 04 | PP | 1 | 0/0 | 0/0 | 1/1 |
| 缘腹细蜂 <i>Scelioninae</i> sp. 05 | PP | 1 | 0/0 | 1/1 | 0/0 |
| 缘腹细蜂 <i>Scelioninae</i> sp. 21 | PP | 3 | 0/0 | 2/2 | 1/1 |
| 大痣细蜂科 <i>Megaspilidae</i> | | | | | |
| 大痣细蜂 <i>Megaspilidae</i> sp. | PP | 1 | 0/0 | 1/1 | 0/0 |
| 姬蜂科 <i>Ichneumonidae</i> | | | | | |
| 田猎姬蜂 <i>Agrothereutes</i> sp. | PP | 1 | 0/0 | 0/0 | 1/1 |
| 台湾弯尾姬蜂 <i>Diadegma akoensis</i> | PP | 1 | 0/0 | 1/1 | 0/0 |
| 花胫屈蚜蝇姬蜂 <i>Diplazon laetatorius</i> | PP | 2 | 0/0 | 0/0 | 2/1 |
| 沟姬蜂 <i>Gelis</i> sp. | PP | 2 | 0/0 | 1/1 | 1/1 |
| 姬蜂 <i>Ichneumonidae</i> sp. 01 | PP | 1 | 0/0 | 1/1 | 0/0 |
| 姬蜂 <i>Ichneumonidae</i> sp. 08 | PP | 3 | 0/0 | 3/3 | 0/0 |
| 姬蜂 <i>Ichneumonidae</i> sp. 14 | PP | 1 | 0/0 | 1/1 | 0/0 |
| 姬蜂 <i>Ichneumonidae</i> sp. 15 | PP | 1 | 0/0 | 0/0 | 1/1 |
| 茧蜂科 <i>Braconidae</i> | | | | | |
| 脊茧蜂 <i>Aleiodes</i> sp. | PP | 4 | 0/0 | 4/2 | 0/0 |
| 绒茧蜂 <i>Apanteles</i> sp. | PP | 3 | 0/0 | 3/1 | 0/0 |
| 盾茧蜂 <i>Aspidobracon</i> sp. | PP | 5 | 0/0 | 2/1 | 3/1 |
| 茶小卷蛾茧蜂 <i>Bracon adoxophyesi</i> | PP | 7 | 0/0 | 7/4 | 0/0 |
| 甲腹茧蜂 <i>Chelonus</i> sp. | PP | 2 | 0/0 | 2/2 | 0/0 |
| 条背茧蜂 <i>Rhaconotus</i> sp. 01 | PP | 11 | 0/0 | 11/5 | 0/0 |
| 条背茧蜂 <i>Rhaconotus</i> sp. 02 | PP | 1 | 0/0 | 1/1 | 0/0 |
| 全盾茧蜂 <i>Schizoprymnus</i> sp. 01 | PP | 1 | 1/1 | 0/0 | 0/0 |
| 反颚茧蜂 <i>Chorebus</i> sp. | PP | 1 | 0/0 | 1/1 | 0/0 |
| 反颚茧蜂 <i>Alyssinae</i> sp. 01 | PP | 1 | 0/0 | 1/1 | 0/0 |
| 反颚茧蜂 <i>Alyssinae</i> sp. 02 | PP | 1 | 0/0 | 1/1 | 0/0 |
| 茧蜂 <i>Braconidae</i> sp. 08 | PP | 1 | 1/1 | 0/0 | 0/0 |
| 茧蜂 <i>Braconidae</i> sp. 15 | PP | 3 | 0/0 | 3/3 | 0/0 |

续表 1 Table 1 continued

| 物种 Species | 功能群 Functional group | 总个体数 Total individual number | 植物群落 Plant communities | | |
|-----------------------------------|-------------------------|---------------------------------|------------------------|--------------|--------------|
| | | | St ($n=3$) | Pa ($n=9$) | Sa ($n=9$) |
| 茧蜂 Braconidae sp. 20 | PP | 1 | 0/0 | 0/0 | 1/1 |
| 茧蜂 Braconidae sp. 21 | PP | 1 | 0/0 | 0/0 | 1/1 |
| 茧蜂 Braconidae sp. 23 | PP | 3 | 0/0 | 1/1 | 2/1 |
| 茧蜂 Braconidae sp. 25 | PP | 1 | 0/0 | 0/0 | 1/1 |
| 蚜茧蜂科 Aphidiidae | | | | | |
| 蚜茧蜂 Aphidiidae sp. 02 | PP | 2 | 0/0 | 0/0 | 2/2 |
| 蚜茧蜂 Aphidiidae sp. 04 | PP | 1 | 0/0 | 1/1 | 0/0 |
| 肿腿蜂科 Bethyridae | | | | | |
| 日本棱角肿腿蜂 <i>Goniozus japonicus</i> | PP | 2 | 0/0 | 2/2 | 0/0 |
| 蚁科 Formicidae | | | | | |
| 无毛凹臭蚁 <i>Ochetellus glaber</i> | PP | 56 | 0/0 | 16/5 | 40/5 |
| 方头泥蜂科 Crabronidae | | | | | |
| 米木短柄泥蜂 <i>Mimumesa</i> sp. | PP | 4 | 0/0 | 4/3 | 0/0 |
| 脊短柄泥蜂 <i>Psenulus</i> sp. | PP | 1 | 0/0 | 1/1 | 0/0 |

H: 植食 Herbivores; PP: 捕食/寄生 Predators/parasitoids; DF: 腐食/菌食 Detritivores/fungivores; Oth: 其他 Others; Sa: 互花米草 *Spartina alterniflora*; Pa: 芦苇 *Phragmites australis*; St: 蘆草 *Scirpus triquetus*. 植物群落栏的数值为“个体数/频次”。Numbers under plant communities are “individual number/occurrence frequency”.

2.2 物种丰富度与多度

芦苇采集到的平均昆虫物种数最多,显著多于互花米草和蘆草 (Mann-Whitney U test, $P < 0.05$) (图 1: A)。就昆虫个体数量而言,蘆草的平均昆虫个体数量最多,而互花米草上的平均昆虫个体数量则最少(图 1: B)。对不同昆虫功能群分别进行物种丰富度比较,发现植食昆虫(H)平均物种数在芦苇和互花米草间差异并不显著,而在蘆草上最少

(图 2: A)。芦苇上捕食/寄生昆虫(PP)平均物种数则显著多于互花米草和蘆草。腐食/菌食昆虫(DF)物种数在互花米草和芦苇间差异不显著,但均显著多于蘆草。不同昆虫功能群个体数量比较则表明,蘆草上植食昆虫数量显著多于其他两种植物(图 2: B)。捕食/寄生昆虫数量则在芦苇上最多,而在互花米草和蘆草间则差异不显著。腐食/菌食昆虫数量在芦苇上最多,互花米草上次之,蘆草上最少。

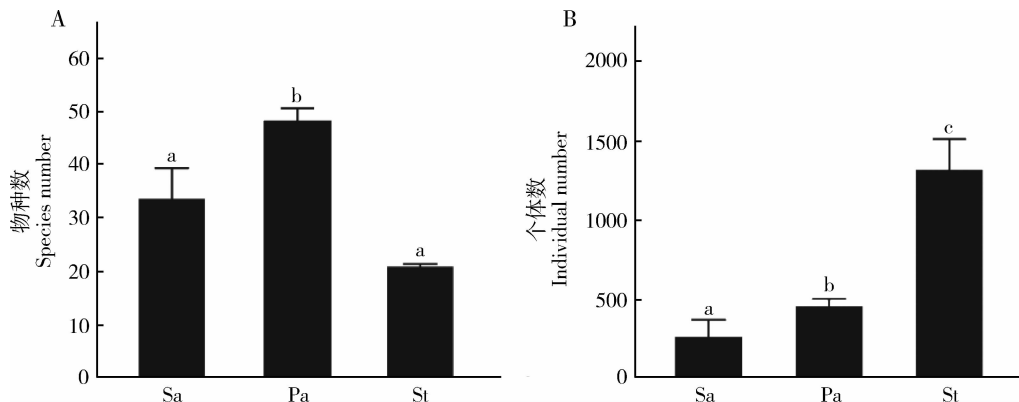


图 1 长江口九段沙湿地不同植物群落采集的昆虫物种(A)和个体(B)数量

Fig. 1 The numbers of insect species (A) and individuals (B) collected in different plant communities in Jiuduansha wetland of the Yangtze River Estuary, East China

Sa: 互花米草 *Spartina alterniflora*; Pa: 芦苇 *Phragmites australis*; St: 蘆草 *Scirpus triquetus*. 图中数据为平均值 \pm 标准误; 柱上不同字母表示不同植物群落间差异显著 (Mann-Whitney U test, $P < 0.05$)。Data in the figure are mean \pm SE. Different letters above bars indicate significant difference between different plant communities (Mann-Whitney U test, $P < 0.05$).

2.3 不同昆虫功能群季节动态

对不同昆虫功能群的季节动态进行分析,结果

表明所有昆虫功能群的物种丰富度和个体多度均呈现出冬(2月)秋低(11月),春(4月)夏(8月)高的

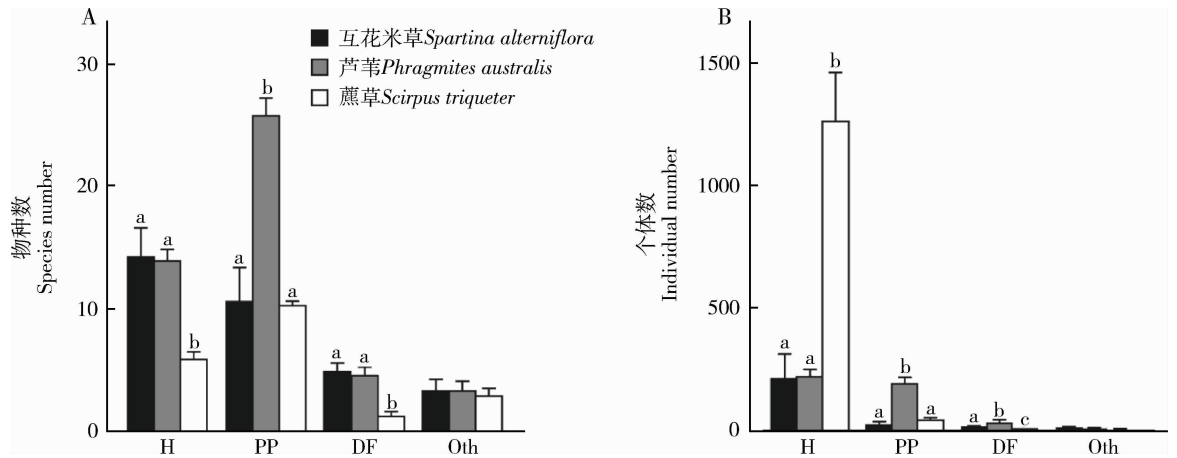


图2 长江口九段沙湿地不同植物群落采集的不同昆虫功能群物种数量(A)和个体(B)数量

Fig. 2 The numbers of species (A) and individuals (B) of different insect functional groups collected in different plant communities in Jiuduansha wetland of the Yangtze River Estuary, East China

H: 植食昆虫 Herbivores; PP: 捕食/寄生昆虫 Predators/parasitoids; DF: 腐食/菌食昆虫 Detritivores/fungivores; Oth: 其他昆虫 Others. 图中数据为平均值 \pm 标准误; 柱上不同字母表示不同植物群落间差异显著 (Mann-Whitney U test, $P < 0.05$)。Data in the figure are mean \pm SE. Different letters above bars indicate significant differences between different plant communities (Mann-Whitney U test, $P < 0.05$).

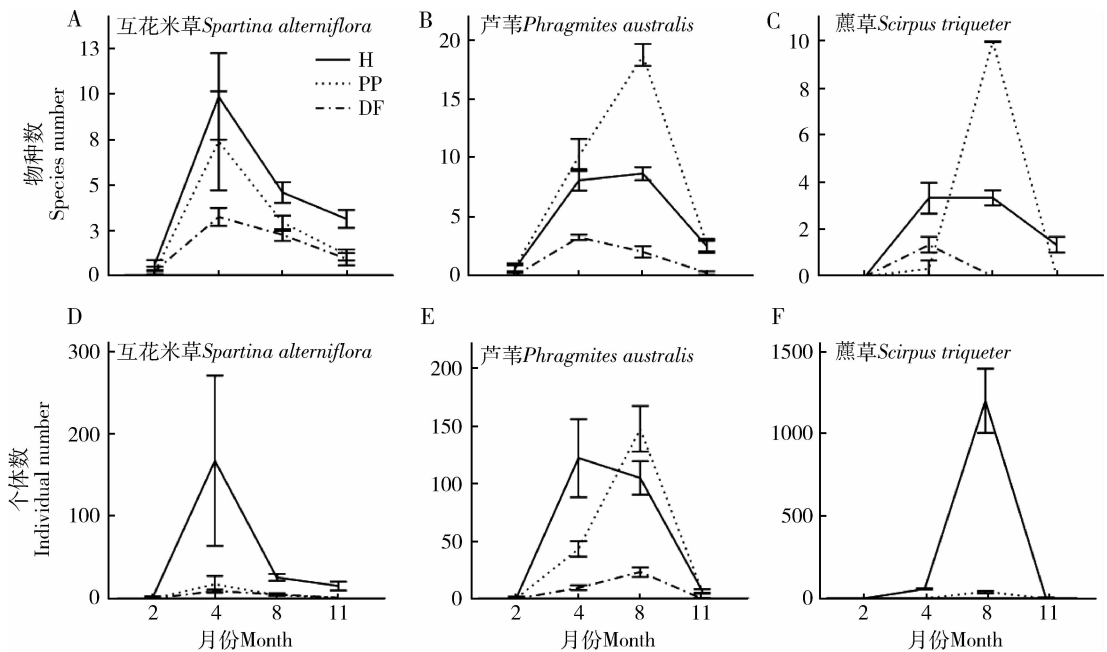


图3 长江口九段沙湿地不同植物群落昆虫功能群组成的季节动态

Fig. 3 Temporal dynamics of the functional group composition of insects in different plant communities in Jiuduansha wetland of the Yangtze River Estuary, East China

H: 植食昆虫 Herbivores; PP: 捕食/寄生昆虫 Predators/parasitoids; DF: 腐食/菌食昆虫 Detritivores/fungivores. 图中数据为平均值 \pm 标准误。Data in the figure are mean \pm SE.

季节动态(图3: A~F)。然而,不同功能群在不同植物群落中的季节动态存在差异。互花米草春季植食昆虫物种数显著多于其他季节 (Mann-Whitney U test, $P > 0.05$) (图3: A, D), 而芦苇上植食昆虫物种数和个体数在春季和夏季均维持较高的数量, 且

二者差异不显著 (Mann-Whitney U test, $P > 0.05$) (图3: B, E)。蔗草上植食昆虫物种数在春季和夏季差异不显著 (Mann-Whitney U test, $P > 0.05$) (图3: C), 但夏季植食昆虫个体数量显著高于其他季节 (Mann-Whitney U test, $P < 0.05$) (图3: F)。

互花米草群落中捕食/寄生昆虫物种数和个体数量的波动与植食昆虫具同步性,峰值均出现在春季,不过春季和夏季之间的差异缺乏统计学支持(Mann-Whitney U test, $P > 0.05$)。芦苇上捕食/寄生天敌昆虫的物种丰富度和个体数量则在夏季达到峰值,并显著高于其他季节(Mann-Whitney U test, $P < 0.05$)。蘆草群落捕食/寄生昆虫物种数的季节波动趋势与芦苇类似,但数量较少。不同植物群落腐食/菌食昆虫物种数的季节动态则较为相似,均在春季最多。腐食/菌食昆虫个体数量动态在互花米草和芦苇间略有差异,互花米草是在春季最多,而芦苇则是在夏季最多。蘆草上腐食昆虫数量较少,因此没有明显的趋势。

2.4 昆虫群落相似性比较

NMS 排序结果显示,湿地昆虫群落物种组成与

植物生境关系密切,不同植物样点聚集成不同的群(MRPP, $A = 0.31$, $P < 0.001$)(图 4: A)。按照不同昆虫功能群进行 NMS 排序,其结果也表明不同植物群落中植食昆虫(MRPP, $A = 0.37$, $P < 0.001$)(图 4: B)、捕食/寄生昆虫(MRPP, $A = 0.30$, $P < 0.001$)(图 4: C)和腐食/菌食昆虫(MRPP, $A = 0.29$, $P < 0.001$)(图 4: D)组成均存在显著差异。与芦苇相比,互花米草不同样点间捕食/寄生昆虫的组成相似性较低,样点分散度较高(图 4: C)。腐食/菌食昆虫功能群物种组成的相似性在不同植物群落间差异虽然显著,但芦苇和互花米草样点之间存在一定的重叠,表明植物群落对腐食/菌食昆虫功能群物种组成的影响,要低于对其他昆虫功能群物种组成的影响(图 4: D)。

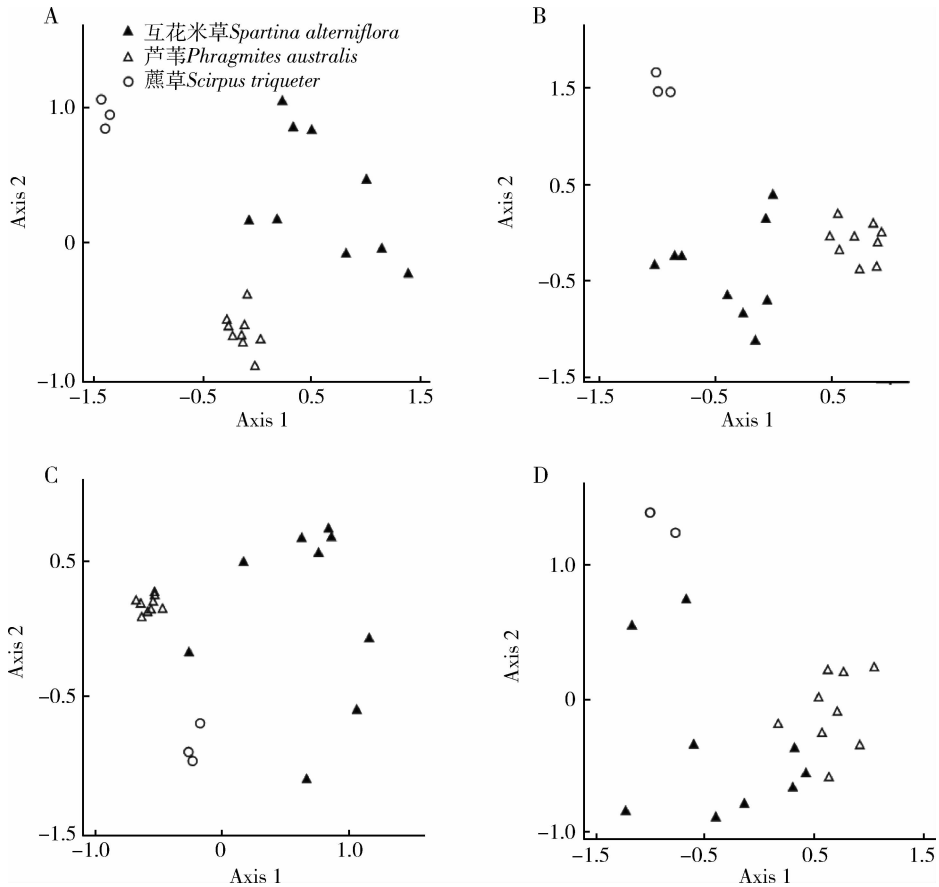


图 4 长江口九段沙湿地不同功能群昆虫群落的非参数多维排序(NMS)结果

Fig. 4 Nonmetric multidimensional scaling ordination results of different insect functional groups in Jiuduansha wetland of the Yangtze River Estuary, East China

A: 所有昆虫 All insect groups (final stress = 7.3, $r^2_{axis 1} = 0.56$, $r^2_{axis 2} = 0.34$); B: 植食昆虫功能群 Herbivores (final stress = 10.0, $r^2_{axis 1} = 0.51$, $r^2_{axis 2} = 0.38$); C: 捕食寄生功能群 Predators and parasitoids (final stress = 8.8, $r^2_{axis 1} = 0.38$, $r^2_{axis 2} = 0.36$); D: 腐食昆虫功能群 Detritivores (final stress = 11.2, $r^2_{axis 1} = 0.59$, $r^2_{axis 2} = 0.32$).

2.5 不同昆虫物种的选择偏好

指示种分析表明共有 39 种昆虫对植物生境存在显著的选择偏好(表 2)。偏好芦苇的昆虫物种数量最多,为 22 种;蔗草次之,为 9 种;互花米草最少为 8 种。偏好芦苇的植食昆虫有 5 种,其中 4 种为专食性昆虫,分别为芦苇长突飞虱 *Stenocranus matsumurai*、凹颊绿飞虱 *Chloriona alaica*、大狭长蝽 *Dimorphopterus pallipes* 和黑杆蝇 *Cryptonevra flavitarsis*, 另一种植食昆虫台湾蓟马 *Thrips formosanus* 则取食范围较广。偏好蔗草的植食昆虫有 4 种,其中二点叶蝉 *Macrosteles fascifrons*、稻管蓟马 *Haplothrips aculeatus* 和短腿水叶甲 *Donacia frontalis* 虽为广食性

昆虫,但在蔗草群落具有非常高的指示值。偏好互花米草的植食昆虫有 5 种,其中素毒蛾 *Laelia coenosa* 和小黄蛉 *Natula matsuurai* 均为广食性昆虫,其余的愈背杆蝇 *Lasiosina* sp.、长缘杆蝇 *Oscinellinae* sp. 和单啮 *Caecilius* sp. 在其他植物群落也有分布,因此应该也为广食性昆虫。对植物生境具有选择偏好的捕食/寄生昆虫物种数达 20 种,其中 16 种偏好芦苇,4 种偏好蔗草。在所有对植物群落有偏好性的物种中,腐食/菌食昆虫占比最低,只有 5 种(13%),其中偏好芦苇 1 种,偏好蔗草 1 种,偏好互花米草 3 种。

表 2 指示种分析揭示对不同植物群落具有偏好性的昆虫物种

Table 2 Insect species with a preference to different plant communities according to indicator species analysis

| 物种 Species | 功能群 Functional group | 偏好植物 Preference plant | 指示值 Indicator value | 个体数 Individual number |
|--------------------------------------|-------------------------|--------------------------|------------------------|--------------------------|
| 直翅目 Orthoptera | | | | |
| 蛉蟋科 Trigonidiidae | | | | |
| 小黄蛉 <i>Natula matsuurai</i> | H | Sa | 72.6 ^{**} | 15 |
| 啮目 Psocoptera | | | | |
| 单啮科 Caeciliusidae | | | | |
| 单啮 <i>Caecilius</i> sp. | H | Sa | 92.1 ^{***} | 139 |
| 缨翅目 Thysanoptera | | | | |
| 管蓟马科 Phlaeothripidae | | | | |
| 稻管蓟马 <i>Haplothrips aculeatus</i> | H | St | 90.8 ^{**} | 4 688 |
| 蓟马科 Thripidae | | | | |
| 台湾蓟马 <i>Thrips formosanus</i> | H | Pa | 75.7 ^{**} | 74 |
| 半翅目 Hemiptera | | | | |
| 飞虱科 Delphacidae | | | | |
| 芦苇长突飞虱 <i>Stenocranus matsumurai</i> | H | Pa | 93.3 ^{***} | 345 |
| 凹颊绿飞虱 <i>Chloriona alaica</i> | H | Pa | 86.6 ^{***} | 117 |
| 杆长蝽科 Blissidae | | | | |
| 大狭长蝽 <i>Dimorphopterus pallipes</i> | H | Pa | 94.9 ^{***} | 1 027 |
| 叶蝉科 Cicadellidae | | | | |
| 二点叶蝉 <i>Macrosteles fascifrons</i> | H | St | 100.0 ^{***} | 149 |
| 鞘翅目 Coleoptera | | | | |
| 缨翅甲科 Ptiliidae | | | | |
| 缨翅甲 <i>Ptiliidae</i> sp. | DF | Sa | 66.7 [*] | 24 |
| 郭公甲科 Cleridae | | | | |
| 新叶郭公甲 <i>Neohydnius hozumii</i> | PP | Pa | 93.3 ^{***} | 30 |
| 瓢虫科 Coccinellidae | | | | |
| 黑背毛瓢虫 <i>Scymnus babai</i> | PP | Pa | 84.8 ^{***} | 31 |
| 黑襟毛瓢虫 <i>Scymnus hoffmanni</i> | PP | Pa | 93.8 ^{***} | 367 |
| 拟球甲科 Corylophidae | | | | |
| 丝拟球甲 <i>Sericoderus</i> sp. | DF | Sa | 55.6 [*] | 10 |
| 薪甲科 Lathridiidae | | | | |
| 长跗薪甲 <i>Melanophthalma</i> sp. | DF | Pa | 84.1 ^{***} | 252 |
| 扁谷盗科 Laemophloeidae | | | | |
| 隐扁谷盗 <i>Cryptolestes</i> sp. | DF | Sa | 62.7 [*] | 36 |

续表 2 Table 2 continued

| 物种 Species | 功能群 Functional group | 偏好植物 Preference plant | 指示值 Indicator value | 个体数 Individual number |
|--------------------------------------|-------------------------|--------------------------|------------------------|--------------------------|
| 蚁形甲科 Anthicidae | | | | |
| 长颈蚁形甲 <i>Macratris</i> sp. | PP | Pa | 94.1 ^{***} | 136 |
| 叶甲科 Chrysomelidae | | | | |
| 短腿水叶甲 <i>Donacia frontalis</i> | H | St | 100.0 ^{***} | 8 |
| 双翅目 Diptera | | | | |
| 舞虻科 Empididae | | | | |
| 舞虻 <i>Empididae</i> sp. | PP | Pa | 64.6 [*] | 95 |
| 水蝇科 Ephydriidae | | | | |
| 凸额水蝇 <i>Psilopa</i> sp. 01 | H | St | 83.3 ^{***} | 24 |
| 原温泉水蝇 <i>Scatella major</i> | DF | St | 75.0 ^{**} | 14 |
| 杆蝇科 Chloropidae | | | | |
| 黑杆蝇 <i>Cryptonevra flavitarsis</i> | H | Pa | 86.7 ^{***} | 30 |
| 愈背杆蝇 <i>Lasiosina</i> sp. | H | Sa | 85.6 ^{**} | 513 |
| 长缘杆蝇 <i>Oscinellinae</i> sp. 01 | H | Sa | 60.2 [*] | 31 |
| 鳞翅目 Lepidoptera | | | | |
| 毒蛾科 Lymantriidae | | | | |
| 素毒蛾 <i>Laelia coenosa</i> | H | Sa | 77.8 ^{**} | 53 |
| 膜翅目 Hymenoptera | | | | |
| 赤眼蜂科 Trichogrammatidae | | | | |
| 赤眼蜂 <i>Trichogramma</i> sp. 01 | PP | St | 93.7 ^{***} | 36 |
| 赤眼蜂 <i>Trichogramma</i> sp. 02 | PP | St | 100.0 ^{***} | 10 |
| 缨小蜂科 Mymaridae | | | | |
| 缨翅缨小蜂 <i>Anagrus</i> sp. | PP | Pa | 82.4 ^{***} | 186 |
| 广肩小蜂科 Eurytomidae | | | | |
| 广肩小蜂 <i>Eurytoma</i> sp. 01 | PP | Pa | 72.9 ^{**} | 16 |
| 广肩小蜂 <i>Eurytoma</i> sp. 02 | PP | Pa | 57.1 [*] | 7 |
| 姬小蜂科 Eulophidae | | | | |
| 长尾啮小蜂 <i>Aprostocetus</i> sp. 01 | PP | Pa | 64.6 ^{**} | 68 |
| 长尾啮小蜂 <i>Aprostocetus</i> sp. 02 | PP | St | 100.0 ^{***} | 38 |
| 跳小蜂科 Encyrtidae | | | | |
| 日本阿斯泰跳小蜂 <i>Astymachus japonicus</i> | PP | Pa | 100.0 ^{***} | 19 |
| 扁胸鲍氏跳小蜂 <i>Boucekiella depressa</i> | PP | Pa | 95.5 ^{***} | 67 |
| 平背跳小蜂 <i>Platencyrtus aclerus</i> | PP | Pa | 58.3 [*] | 16 |
| 广腹细蜂科 Platygasteridae | | | | |
| 优小细蜂 <i>Eumicrosoma</i> sp. | PP | Pa | 99.4 ^{***} | 540 |
| 缘腹细蜂 <i>Scelioninae</i> sp. | PP | Pa | 88.9 ^{***} | 71 |
| 瘦蚊广腹细蜂 <i>Platygaster</i> sp. | PP | Pa | 67.6 [*] | 23 |
| 黑卵蜂 <i>Telenomus</i> sp. 02 | PP | St | 100.0 ^{***} | 11 |
| 茧蜂科 Braconidae | | | | |
| 条背茧蜂 <i>Rhaconotus</i> sp. 01 | PP | Pa | 55.6 [*] | 11 |

H: 植食 Herbivores; PP: 捕食/寄生 Predators/parasitoid; DF: 腐食/菌食 Detritivores/fungivores; Sa: 互花米草 *Spartina alterniflora*; Pa: 芦苇 *Phragmites australis*; St: 蘆草 *Scirpus triquetus*. * $P < 0.05$; ** $P < 0.01$; *** $P < 0.001$ (蒙特卡洛检验 Monte Carlo test).

3 结论与讨论

本文研究结果表明,互花米草入侵能够对盐沼

湿地的昆虫物种丰富度和个体多度上产生不利影响,并显著改变了盐沼湿地原有的昆虫群落结构。该结果与高慧等(2006)的结论一致。高慧等(2006)认为,互花米草入侵时间短、营养质量低和

叶片表面的泌盐现象,是导致土著植食昆虫对互花米草缺少适应并引起互花米草群落昆虫多样性下降的重要原因。然而,本研究发现,虽然植食昆虫的物种组成在互花米草和芦苇群落之间差异显著,但植食昆虫的物种丰富度和个体多度在两种植物群落间却差异并不显著。该结果与 Wu 等 (2009) 的结果基本一致,这表明土著植食昆虫对互花米草入侵可能已产生了适应分化,其中不同食性范围土著植食昆虫对互花米草的适应差异可能是造成上述现象的重要原因。相比专食性昆虫,广食性昆虫更容易对外来入侵植物产生适应,并能通过取食外来植物获得更高的发育表现 (Novotny *et al.*, 2003; Parker and Hay, 2005; Bezemer *et al.*, 2014; Avanesyan and Culley, 2015)。通过植物群落偏好分析,本研究确实发现一些广食性的植食昆虫对互花米草具有显著分布偏好,并可能已对互花米草产生了寄主转移。目前关于土著植食昆虫对互花米草的适应机制的研究还开展较少,但最近 Ju 等 (2016) 的研究指出互花米草与土著植物芦苇在营养质量时间动态上的差异,可能是导致土著鳞翅目植食昆虫种群数量在两种植物群落呈现不同动态变化规律的重要原因。此外,由于缺乏共同进化史,外来入侵植物可能对部分土著植食昆虫的取食缺乏有效的物理化学防御手段,从而能够促进这些土著植食昆虫对其产生选择偏好 (Parker and Hay, 2005; Verhoeven *et al.*, 2009)。虽然上述机制是否也存在于互花米草与土著植食昆虫的相互作用关系中仍有待证实,但是土著广食性植食昆虫在互花米草入侵过程中可能具有的生物阻抗作用,以及对互花米草和土著植物竞争关系可能产生的影响应引起足够的重视 (Ju *et al.*, 2016)。

与植食昆虫相比,本研究发​​现盐沼天敌昆虫的多样性对互花米草的入侵影响更为敏感。现有研究表明,外来入侵植物能够通过影响植食寄主的数量和质量,来影响捕食和寄生天敌的数量和分布偏好 (de Groot *et al.*, 2007; Lau, 2013)。互花米草群落中植食昆虫寄主的缺乏,特别是专食性植食昆虫寄主的缺乏,可能是导致其上天敌昆虫物种数和个体数较少的重要原因。例如,在偏好芦苇分布的膜翅目寄生昆虫中,很多寄主均属于芦苇上的专食性植食昆虫,如长尾啮小蜂 *Aprostocetus* sp. 01、日本阿斯泰跳小蜂 *Astymachus japonicus*、扁胸鲍氏跳小蜂 *Boucekiella depressa* 和平背跳小蜂 *Platencyrtus aclerus*,其寄主均为芦苇上重要害虫宫苍日仁蚧

Nipponaclerda biwakoensis。缨翅缨小蜂 *Anagrus* sp. 主要寄生各种飞虱的卵,优小细蜂 *Eumicrosoma* sp. 则为大狭长蝽卵的寄生蜂 (表 2)。童春富 (2012) 曾发现在互花米草、芦苇和海三棱藨草植物群落带中,植食昆虫与捕食天敌物种数之间存在较强的相关性,从而认为可能存在寄主跟随现象。我们的研究在一定程度上也支持了这一观点。不过,除了影响植食寄主和猎物的数量,外来入侵植物也可以通过改变植物群落的空间结构和化学信号特征,来影响天敌的捕食和寄生搜索行为,从而影响天敌昆虫的分布和种群数量 (Pearson, 2009; Bezemer *et al.*, 2014)。考虑到互花米草在形态结构和理化特征上与土著植物差异明显,上述机制是否也存在于互花米草与天敌昆虫的相互作用关系中,值得深入研究。此外,互花米草入侵对天敌昆虫多样性的不利影响,很可能会通过营养级互作关系的改变对整个盐沼食物网产生影响,相关问题也应引起重视。

在本研究中,腐食/菌食昆虫多样性受互花米草入侵影响较小,其物种组成在不同植物群落中的相似性也较高。这可能与腐食/菌食昆虫对食物来源选择偏好性不强有关 (Makkonen *et al.*, 2012)。然而,由于采样方法的限制,本研究只涉及了植株表面腐食/菌食昆虫多样性的变化情况,互花米草入侵对地表凋落物中腐食/菌食昆虫多样性的影响,仍需进一步研究。

除了影响昆虫功能群组成特征和多样性,本研究还发现互花米草的入侵能对不同昆虫功能群的季节动态产生影响。互花米草群落春季具有较高的植食昆虫物种丰富度和个体数量,可能与互花米草具有相对于土著植物较长的生长周期有关 (Liao *et al.*, 2007)。由于互花米草地上植株枯萎期较短,并且能够在冬季保留一定的地表绿色植株,因此一些植食昆虫有可能通过取食互花米草获得更充分的生长发育时间,并提高越冬代的存活效率,从而对来年春季的种群增长产生积极的影响 (Ju *et al.*, 2016)。随着土著植物的返青和进入生长旺盛期,一些植食昆虫可能会迁移到芦苇等土著植物群落,从而导致夏季互花米草群落中植食昆虫物种数和个体数量的下降。相比之下,芦苇和藨草群落中植食昆虫的季节动态可能更多的是受植物生产力变化和气候因子变化的影响。除了影响植食昆虫的季节动态,互花米草还能对天敌昆虫物种丰富度和多度的季节动态产生影响。互花米草群落天敌昆虫的物种数和个体数的季节动态与植食昆虫相似,峰值均出现在春季。

而芦苇和蘆草群落天敌昆虫物种数和个体数的峰值均出现在夏季。由于包括天敌昆虫物种组成差异、微环境气候因子的变化和“植物-植食昆虫-天敌”三营养级互作关系的改变,都能对不同植物群落天敌昆虫的季节动态产生影响。在缺乏相关研究的背景下,目前还很难对相关的影响机制进行讨论,但相关影响可能造成的生态和进化后果应引起重视。相比植食和天敌昆虫,腐食/菌食昆虫由于采集数量太少,其季节动态在不同植物群落间趋势较不明显。

综上,本研究结果表明,互花米草入侵不仅能够对盐沼湿地的昆虫多样性和群落结构产生消极影响,还能影响盐沼湿地昆虫功能群组成结构和季节动态,因此在进行互花米草入侵导致的生态系统风险评价过程中,应将相关内容纳入评价体系。此外,由于天敌昆虫和植食昆虫功能群,以及广食性植食昆虫和专食性植食昆虫对互花米草入侵存在着响应差异,因此仅仅研究物种数量或多样性指数变化,并不能充分反映互花米草入侵对盐沼湿地昆虫生态功能可能造成的影响。如何从营养级互作和功能多样性角度来研究互花米草入侵对盐沼湿地生态系统的影响,应引起更多的关注。

致谢 衷心感谢为本文提供过标本鉴定协助和信息的各位专家,其中中国科学院上海昆虫博物馆朱卫兵博士和刘宪伟老师帮助鉴定了部分双翅目、半翅目、革翅目和直翅目昆虫标本,中国科学院动物研究所陈琳老师和张彦周老师帮助鉴定了斑蝇科、细果蝇科和部分跳小蜂科标本,浙江大学陈学新老师课题组帮助鉴定了部分姬蜂科、茧蜂科和广腹细蜂科标本。

参考文献 (References)

- Avanesyan A, Culley TM, 2015. Herbivory of native and exotic North-American prairie grasses by nymph *Melanoplus* grasshoppers. *Plant Ecol.*, 216(3): 451 - 464.
- Ayres DR, Smith DL, Zaremba K, Klohr S, Strong DR, 2004. Spread of exotic cordgrasses and hybrids (*Spartina* sp.) in the tidal marshes of San Francisco Bay, California, USA. *Biol. Invasions*, 6: 221 - 231.
- Bertness MD, Crain C, Holdredge C, Sala N, 2008. Eutrophication and consumer control of New England salt marsh primary productivity. *Conserv. Biol.*, 22(1): 131 - 139.
- Bezemer TM, Harvey JA, Cronin T, 2014. Response of native insect communities to invasive plants. *Annu. Rev. Entomol.*, 59: 119 - 141.
- Canepuccia AD, Montemayor D, Pascual J, Farina JL, Iribarne OO, 2011. A stem-boring moth drives detritus production in SW Atlantic marshes. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 442(12): 1 - 9.
- Chen HL, Li B, Hu JB, Chen JK, Wu JH, 2007. Effects of *Spartina alterniflora* invasion on benthic nematode communities in the Yangtze Estuary. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 336: 99 - 110.
- Chen XZ, 2012. Insect diversity and its influencing factors in Jiuduansha wetland national nature reserve, Shanghai. *Journal of Shanghai Normal University (Natural Sciences)*, 41(4): 399 - 409. [陈秀芝, 2012. 上海九段沙国家级湿地自然保护区昆虫多样性及其影响因素研究. 上海师范大学学报(自然科学版), 41(4): 399 - 409]
- Chen ZY, Fu CC, Wang HY, Li B, Wu JH, Chen JK, 2005. Effects of *Spartina alterniflora* invasions on the benthic macro-invertebrates community at Dongtan of Chongming Salt Marsh, the Yangtze River Estuary. *Wetland Science*, 3(1): 1 - 7. [陈中义, 付萃长, 王海毅, 李博, 吴纪华, 陈家宽, 2005. 互花米草入侵东滩盐沼对大型底栖无脊椎动物群落的影响. 湿地科学, 3(1): 1 - 7]
- Chen ZY, Li B, Chen JK, 2004. Ecological consequences and management of *Spartina* spp. invasions in coastal ecosystems. *Biodiversity Science*, 12(2): 280 - 289. [陈中义, 李博, 陈家宽, 2004. 米草属植物入侵的生态后果及管理对策. 生物多样性, 12(2): 280 - 289]
- Chen ZY, Li B, Hu JB, Chen JK, 2004. Local competitive effects of introduced *Spartina alterniflora* on *Scirpus marqueti* at Dongtan of Chongming Island, the Yangtze River Estuary and their potential ecological consequences. *Hydrobiologia*, 528(1): 99 - 106.
- Cheng XL, Luo YQ, Chen JQ, Lin GH, Chen JK, Li B, 2006. Short-term C4 plant *Spartina alterniflora* invasions change the soil carbon in C3 plant-dominated tidal wetlands on a growing estuarine island. *Soil Biol. Biochem.*, 38(12): 3380 - 3386.
- Crooks JA, 2002. Characterizing ecosystem-level consequences of biological invasions: the role of ecosystem engineers. *Oikos*, 97(2): 153 - 166.
- Cui BS, He Q, An Y, 2011. *Spartina alterniflora* invasions and effects on crab communities in a western Pacific estuary. *Ecol. Eng.*, 37: 1920 - 1924.
- Daehler CC, Strong DR, 1996. Status, prediction and prevention of introduced cordgrass *Spartina* spp. invasions in Pacific estuaries, USA. *Biol. Conserv.*, 78: 51 - 58.
- de Groot M, Kleijn D, Jogan N, 2007. Species groups occupying different trophic levels respond differently to the invasion of semi-natural vegetation by *Solidago canadensis*. *Biol. Conserv.*, 136(136): 612 - 617.
- Deng ZF, An SQ, Zhi YB, Zhou CF, Chen L, Zhao CJ, Fang SB, Li HL, 2006. Preliminary studies on invasive model and outbreak mechanism of exotic species, *Spartina alterniflora* Loise. *Acta Ecologica Sinica*, 26(8): 2678 - 2686. [邓自发, 安树青, 智颖飙, 周长芳, 陈琳, 赵聪蛟, 方淑波, 李红丽, 2006. 外来种互花米草入侵模式与爆发机制. 生态学报, 26(8): 2678 - 2686]
- Dufrêne M, Legendre P, 1997. Species assemblages and indicator species: the need for a flexible asymmetrical approach. *Ecol.*

- Monogr., 67: 345–366.
- Gan XJ, Cai YT, Choi CY, Ma ZJ, Chen JK, Li B, 2009. Potential impacts of invasive *Spartina alterniflora* on spring bird communities at Chongming Dongtan, a Chinese wetland of international importance. *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, 83(2): 211–218.
- Gao H, Peng XW, Li B, Wu QH, Dong HQ, 2006. Effects of the invasive plant *Spartina alterniflora* on insect diversity in Jiuduansha wetlands in the Yangtze River Estuary. *Biodiversity Science*, 14(5): 400–409. [高慧, 彭筱葳, 李博, 吴千红, 董慧琴, 2006. 互花米草入侵九段沙河口湿地对当地昆虫多样性的影响. 生物多样性, 14(5): 400–409]
- Hanson MA, Riggs MR, 1995. Potential effects of fish predation on wetland invertebrates: a comparison of wetlands with and without fathead minnow. *Wetlands*, 15: 167–175.
- Hengstum TV, Hooftman DAP, Oostermeijer JGB, Tienderen PHV, 2014. Impact of plant invasions on local arthropod communities: a meta-analysis. *J. Ecol.*, 102(1): 4–11.
- Jiang K, Chen XN, Bao YX, Li HH, Shi WW, Wang H, Ren P, 2016. Effect of *Spartina alterniflora* invasion on the vertical structure of macrobenthic community. *Acta Ecologica Sinica*, 36(2): 535–544. [江旷, 陈小南, 鲍毅新, 李海宏, 施渭渭, 王华, 任鹏, 2016. 互花米草入侵对大型底栖动物群落垂直结构的影响. 生态学报, 36(2): 535–544]
- Ju RT, Chen YY, Gao L, Li B, 2016. The extended phenology of *Spartina*, invasion alters a native herbivorous insect's abundance and diet in a Chinese salt marsh. *Biol. Invasions*, 18(8): 2229–2236.
- Lau JA, 2013. Trophic consequences of a biological invasion: do plant invasions increase predator abundance? *Oikos*, 122(122): 474–480.
- Liao CZ, Luo YQ, Jiang LF, Zhou XH, Wu XW, Chen JK, Li B, 2007. Invasion of *Spartina alterniflora* enhanced ecosystem carbon and nitrogen stocks in the Yangtze Estuary, China. *Ecosystems*, 10: 1351–1361.
- Liao CZ, Peng RH, Luo YQ, Zhou XH, Wu XW, Fang CM, Chen JK, Li B, 2008. Altered ecosystem carbon and nitrogen cycles by plant invasion: a meta-analysis. *New Phytol.*, 177(3): 706–714.
- Liu Y, Li XZ, Yan ZZ, Chen XZ, He YL, Guo WY, Sun PY, 2013. Biomass and carbon storage of *Phragmites australis* and *Spartina alterniflora* in Jiuduansha Wetland of Yangtze Estuary, East China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 24(8): 2129–2134. [刘钰, 李秀珍, 闫中正, 陈秀芝, 何彦龙, 郭文永, 孙培英, 2013. 长江口九段沙湿地芦苇和互花米草生物量及碳储量. 应用生态学报, 24(8): 2129–2134]
- Makkonen M, Berg MP, Handa IT, Hättenschwiler S, Ruijven JV, Bodegom PMV, Aerts R, 2012. Highly consistent effects of plant litter identity and functional traits on decomposition across a latitudinal gradient. *Ecol. Lett.*, 15(9): 1033–1041.
- McCune B, Grace JB, 2002. Analysis of Ecological Communities. MjM Software Design, Gleneden Beach, Oregon.
- Novotny V, Miller S, Cizek L, Leps J, Janda M, Basset Y, Weiblen GD, Karrow K, 2003. Colonising aliens: caterpillars (Lepidoptera) feeding on *Piper aduncum* and *P. umbellatum* in rainforests in Papua New Guinea. *Ecol. Entomol.*, 28: 704–716.
- Parker JD, Hay ME, 2005. Biotic resistance to plant invasions? Native herbivores prefer non-native plants. *Ecol. Lett.*, 8(9): 959–967.
- Pearson DE, 2009. Invasive plant architecture alters trophic interactions by changing predator abundance and behavior. *Oecologia*, 159(3): 549–558.
- Peng XW, Gao H, Dong HQ, Wu QH, 2006. Study on diurnal insect communities in different habitats at the Jiuduansha Wetland National Nature Reserve. *Journal of Fudan University (Natural Science)*, 45(6): 784–790. [彭筱葳, 高慧, 董慧琴, 吴千红, 2006. 九段沙湿地国家自然保护区不同生境昼行性昆虫群落研究. 复旦学报, 45(6): 784–790]
- Rand TA, 2003. Herbivore-mediated apparent competition between two salt marsh forbs. *Ecology*, 84(6): 1517–1526.
- Schwartz MW, Brigham CA, Hoeksema JD, Lyons KG, Mills MH, Mantgem PJV, 2000. Linking biodiversity to ecosystem function: implications for conservation ecology. *Oecologia*, 122(3): 297–305.
- Tong CF, 2012. Effects of vegetation type on arthropod functional groups in the aerial habitat of salt marsh. *Acta Ecologica Sinica*, 32(3): 786–795. [童春富, 2012. 植被类型对盐沼湿地空气生境节肢动物功能群的影响. 生态学报, 32(3): 786–795]
- Verhoeven KJF, Biere A, Harvey JA, Putten WHVD, 2009. Plant invaders and their novel natural enemies: who is naïve? *Ecol. Lett.*, 12(2): 107–117.
- Vilà M, Espinar JL, Hejda M, Hulme PE, Jarosik V, Maron JL, Pergl J, Schaffner U, Sun Y, Pysek P, 2011. Ecological impacts of invasive alien plants: a meta analysis of their effects on species, communities and ecosystems. *Ecol. Lett.*, 14: 702–708.
- Vitousek PM, D'Antonio CM, Loope LL, Rejmanek M, Westbrooks R, 1997. Introduced species: a significant component of human-caused global change. *New Zeal. J. Ecol.*, 21(1): 1–16.
- Winfree RW, Fox J, Williams NM, Reilly JR, Cariveau DP, 2015. Abundance of common species, not species richness, drives delivery of a real world ecosystem service. *Ecol. Lett.*, 18(7): 626–635.
- Wu YT, Wang CH, Zhang XD, Zhao B, Jiang LF, Chen JK, Li B, 2009. Effects of saltmarsh invasion by *Spartina alterniflora* on arthropod community structure and diets. *Biol. Invasions*, 11(3): 635–649.
- Xiong LH, Wu X, Lu JJ, 2010. Bird predation on concealed insects in a reed-dominated estuarine tidal marsh. *Wetlands*, 30(6): 1203–1211.
- Zhang Y, Ding W, Luo J, Donnison A, 2010. Changes in soil organic carbon dynamics in an Eastern Chinese coastal wetland following invasion by a C_4 plant *Spartina alterniflora*. *Soil Biol. Biochem.*, 42(10): 1712–1720.
- Zheng LY, Gui H, 1999. Insect Classification. Nanjing Normal University Press, Nanjing. [郑乐怡, 归鸿, 1999. 昆虫分类. 南京: 南京师范大学出版社]