

# 海南岛入侵植物的分布特点及其对本地植物的影响

罗文启<sup>1</sup> 符少怀<sup>2</sup> 杨小波<sup>1\*</sup> 陈玉凯<sup>1</sup> 周威<sup>1</sup> 杨琦<sup>1</sup> 陶楚<sup>1</sup> 周文嵩<sup>1</sup>

<sup>1</sup>海南大学热带作物种质资源保护与开发利用教育部重点实验室, 海口 570228; <sup>2</sup>海南省农村环保能源站, 海口 570228

**摘要** 以国家农业部指定的20种恶性入侵植物为目的种, 在海南岛开展其分布特征与入侵强度的调查研究, 重点研究了陆域环境中6种广布入侵植物——飞机草(*Chromolaena odorata*)、假臭草(*Praxelis clematidea*)、含羞草(*Mimosa pudica*)、苏门白酒草(*Conyza sumatrensis*)、三裂叶蟛蜞菊(*Wedelia trilobata*)、马缨丹(*Lantana camara*)在7种生态系统(天然次生林、农田、村落、种植园、林缘、弃耕地、草地)中的入侵频率及入侵植物对本地植物的影响。结果表明: 1)海南岛有恶性入侵植物11种, 占调查目的种总数的55.0%。2)海南岛的东北、西南部分布的入侵植物种数较多, 东南部次之, 中部地区最少。3) 6种入侵植物的整体入侵强度为: 假臭草>飞机草>含羞草>三裂叶蟛蜞菊>马缨丹>苏门白酒草; 苏门白酒草、马缨丹在不同生态系统中的入侵频率无显著差异; 而假臭草在种植园及弃耕地, 含羞草在农田, 三裂叶蟛蜞菊在种植园生态系统中的入侵频率均显著高于其他生境。4)种植园、弃耕地和农田生态系统是植物入侵的主要生境类型, 而林缘和天然次生林生态系统均对植物入侵表现出抵御作用。5)植物入侵对当地植物多样性的影响存在正、负及无关联效应, 并主要影响群落中的草本植物功能群; 样地中入侵植物盖度总值与本地植物平均种数在种植园、农田和村落生态系统中无相关性, 在林缘和弃耕地生态系统中, 两者呈显著负相关关系; 而在草地生态系统中, 在一定盖度范围内, 入侵植物盖度总值与本地植物平均种数呈显著正相关关系。

**关键词** 分布, 海南岛, 入侵植物, 影响, 本地植物

**引用格式:** 罗文启, 符少怀, 杨小波, 陈玉凯, 周威, 杨琦, 陶楚, 周文嵩 (2015). 海南岛入侵植物的分布特点及其对本地植物的影响. 植物生态学报, 39, 486–500. doi: 10.17521/cjpe.2015.0047

## Distribution patterns of alien invasive plants and their influences on native plants of Hainan Island

LUO Wen-Qi<sup>1</sup>, FU Shao-Huai<sup>2</sup>, YANG Xiao-Bo<sup>1\*</sup>, CHEN Yu-Kai<sup>1</sup>, ZHOU Wei<sup>1</sup>, YANG Qi<sup>1</sup>, TAO Chu<sup>1</sup>, and ZHOU Wen-Song<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory of Production and Development Utilization of Tropical Crop Germplasm Resource, Ministry of Education, Hainan University, Haikou 570228, China; and <sup>2</sup>Rural Environmental Protection Energy Station of Hainan, Haikou 570228, China

### Abstract

**Aims** Our objective was to explore the distribution patterns of 20 noxious invasive plants in Hainan Island notified by the National Ministry of Agriculture, and their influences on native plants. We also focused on investigating the traits of six most widely spread invasive plants and plant distributions in seven types of terrestrial ecosystems. Three hypotheses were deployed in this study: (1) the ecological effects of plant invasion were related to the characteristics of invaded ecosystems and successional phases of invaded communities; (2) the invasive plants rather affected certain functional groups than the whole communities; (3) and most invasive plant species tended to colonize frequently disturbed ecosystems, while they were usually excluded by intact forest ecosystems.

**Methods** The plot survey was conducted to investigate the distributions of the 20 target invasive plants. The appearance frequency of the six most widely spread invasive plants (i.e., *Chromolaena odorata*, *Praxelis clematidea*, *Mimosa pudica*, *Wedelia trilobata*, *Conyza sumatrensis*, and *Lantana camara*) was compared among seven terrestrial ecosystems (i.e., secondary forest, farmland, grassland, abandoned land, plantation, village, and forest edge) to evaluate the invasibility of different ecosystems. The plots invaded by target species were classified, and species richness of native species in these invaded plots was compared using one-way ANOVAS. Relationships between the total coverage of invasive plants and the species richness of native plants were assessed using a linear regression model.

**Important findings** (1) A total of 11 noxious invasive plants were found in Hainan Island, accounting for 55% of the target specie. (2) The target invasive species were mostly distributed in the northeastern and southwestern

regions of Hainan Island, less in the southeastern region, and least in the central region. (3) An order of the intensity regarding plant invasiveness was expressed as *Praxelis clematidea* > *Chromolaena odorata* > *Mimosa pudica* > *Wedelia trilobata* > *Lantana camara* > *Conyza sumatrensis*. The appearance frequency of *Conyza sumatrensis* and *Lantana camara* showed no significant differences among the surveyed ecosystems, while *Praxelis clematidea*, *Mimosa pudica* and *Wedelia trilobata* had obviously higher appearance frequency in plantations and abandoned lands, in farmlands, and in plantations, respectively. (4) Farmlands, plantations and abandoned lands were the most frequently invaded ecosystems; but forest edges and natural secondary forests appeared to be less vulnerable to plant invasion. (5) The appearance frequency of invasive plants was negatively correlated with plant coverage of the community invaded by the target species. The total coverage of invasive plants and the richness of native plant species showed a positive correlation in grasslands when the coverage was within a certain extent, and a negative correlation both in forest edges and abandoned lands, and no obvious correlation in plantations farmlands and village sites.

**Key words** distribution, Hainan Island, invasive plants, influence, native plants

**Citation:** Luo WQ, Fu SH, Yang XB, Chen YK, Zhou W, Yang Q, Tao C, Zhou WS (2015). Distribution patterns of alien invasive plants and their influences on native plants of Hainan Island. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 39, 486–500. doi: 10.17521/cjpe.2015.0047

外来物种入侵已成为严重危害陆地及海洋环境的生态问题,被认为是一种生物污染而被广泛关注和研究(Weis & Weis, 2003)。深入了解外来物种的入侵机制,并进行有效的预测、预防和管理是减少入侵生物危害的最有效手段(Byers, 2002),而从区域尺度上分析入侵物种的分布特征并探索其形成原因是认识生物入侵问题的重要基础(Erik, 2004)。

针对入侵植物的分布问题, Losdale (1999)研究了全球入侵植物的分布特征,并发现温带地区的耕地、城镇和生物多样性热点地区更易遭受外来植物的入侵,而荒漠、稀树草原等生态系统的可入侵空间较小; Barney等(2008)研究了两种不同入侵历史的外来植物在北美的分布和扩散格局,发现其入侵范围均随着时间的推移而扩大;此外,还有不少学者运用气候模拟技术对入侵植物的潜在分布区进行了预测(Erik, 2004; Ibáñez *et al.*, 2009; Crossman *et al.*, 2011);而国内的研究多集中在入侵植物多样性的区域分异及其影响因素等方面,如吴晓雯等(2006)研究了入侵植物在我国的分布格局,发现其物种数从南到北逐渐减少,而物种密度由东南海岸向内陆递减的分布特征,并推测中国的东南部地区将更容易遭受外来植物入侵;王苏铭等(2012)研究了入侵植物在北京地区的分布特征;张帅等(2010)研究了入侵植物在我国74个地理单元的分布情况,发现入侵植物的分布具有明显的区域分化现象,而降水与温度是影响其空间分布格局的主要因素。

有关入侵植物影响生态系统功能的报道有很多,并多关注其负面效应(Williamson, 2001; Byers *et al.*, 2002; Simberloff *et al.*, 2003),认为植物入侵导致本地群落中生物多样性的下降(李冰和李玉瑛, 2009),例如:丁晖等(2007)研究发现,入侵森林林隙中的紫茎泽兰(*Ageratina adenophora*)使群落中本地植物的物种丰富度显著下降;Fox等在澳洲西部一个草地生态系统中的研究表明群落中的外来物种比例与本地植物种数呈负相关关系(Stohlgren *et al.*, 1999);Tilman (1997)在美国Bethel市一个草地生态系统中的实验也得出了一致的结论。因此一般认为,外来植物成功入侵后将抑制群落中本地植物的多样性。但也有研究发现:入侵植物对群落植物多样性的影响与入侵种及本地植物的生活型有关(Hejda *et al.*, 2009);植物入侵的生态效应与入侵地的演替阶段有关,例如:豆科植物入侵生态环境恶劣的尾矿区后,能有效地改善土壤肥力,为演替中期过渡种的定居和发育创造良好的条件,并促进物种多样性的增加(Gozlan & Newton, 2009);李安定等(2013)研究发现,喜旱莲子草(空心莲子草)(*Alternanthera philoxeroides*)在入侵的早期阶段能改变群落生境条件,进而促进其他物种的生存与定居,并增加物种的多样性,而只有当其种群盖度持续增加后,才可能会威胁其他物种的生存;Hejda等(2009)研究发现,入侵植物的盖度是决定群落物种丰富度和均匀度的主要因子,入侵植物对物种多样性的影响与本地植物优势种的盖度、高度有密切关系。因此,植物入

侵的生态效应受生态系统类型、群落演替阶段的影响;不同功能群植物对植物入侵的响应也有差异。本文通过研究7种生态系统类型中入侵植物的入侵特征及其对本地植物的影响,旨在检验以下科学假设:1)植物入侵的生态效应与入侵地的环境特征和演替阶段有关,入侵植物可能对入侵地产生正面或负面影响;2)植物入侵主要影响群落中某一功能群的物种多样性,而不是影响全部群落个体;3)多数入侵植物有偏好的入侵生境,而人为干扰少的生态系统类型对植物入侵有抵制作用。

海南岛虽然气候条件宜人、生物资源丰富,但生态环境脆弱,是许多外来入侵物种的“天然大温室”,目前有关海南岛入侵植物的研究主要集中在以下两方面:一是区域性入侵植物种类调查或群落组成调查(单家林, 2003; 秦新生等, 2008);二是入侵植物生理生态的研究(Huang *et al.*, 2013; 黄乔乔等, 2013)。这些研究有效地整合了特定区域内外来植物种类组成的信息,并在入侵生态学方面做了一定的探索,但还没有在海南全岛范围内开展主要入侵植物的分布特征及其入侵强度的研究,有关入侵植物在不同生态系统中的入侵特征及对本地植物多样性影响的研究都还缺乏。本文研究了国家农业部指定的20种恶性入侵植物在海南岛的分布特征及其对当地植物的影响,并比较了6种主要入侵植物在7种生态系统中的入侵强度,以期进一步了解海南岛入侵植物的分布现状,并为外来植物的防控、生物多样性保护与生态安全的管理提供理论依据。

## 1 材料和方法

### 1.1 研究区域地理、生态环境概况

海南岛地处热带北缘,面积3.4万km<sup>2</sup>,是我国第二大岛屿。海南岛气候温和,年平均气温为22.5–26.0℃,年降水量为1 500–2 000 mm。海南岛的地势中部高、四周低,这种地理地貌使得其年总积温、日照时数等都具有自中部向沿海递增的特征,受季风与台风影响,年降水量分布不均匀,干湿两季明显,且不同区域的年降水量存在差异。如东部与中部属于湿润区,西部与南部属于半干旱区,水分相对不足,北部地区则为半湿润区(唐少霞等, 2008)。海南岛植物资源丰富,目前记载的野生植物有4 000多种,外来植物165种,其中入侵植物有58

种(彭宗波等, 2013; 杨小波等, 2013)。

### 1.2 研究方法 with 对象

#### 1.2.1 入侵植物种的确定

根据国家农业部2012年对海南省恶性入侵植物的调查要求,确定以下20种为调查的目的种:飞机草(*Chromolaena odorata*)、假臭草(*Praxelis clematidea*)、含羞草(*Mimosa pudica*)、银胶菊(*Parthenium hysterophorus*)、微甘菊(*Mikania micrantha*)、凤眼蓝(*Eichhornia crassipes*)、假高粱(*Pseudosorghum fasciculare*)、三裂叶蟛蜞菊(*Wedelia trilobata*)、苏门白酒草(*Conyza sumatrensis*)、喜旱莲子草(*Alternanthera philoxeroides*)、马缨丹(*Lantana camara*)、黄顶菊(*Flaveria bidentis*)、*Solanum rostratum*、野莴苣(*Lactuca serriola*)、加拿大一枝黄花(*Solidago canadensis*)、*Sicyos angulatus*、紫茎泽兰、豚草(*Ambrosia artemisiifolia*)、*Cenchrus pauciflorus*、齿裂大戟(*Euphorbia dentata*)。

#### 1.2.2 样方设置

调查于2012年4–5月进行,采用路线法与样方调查相结合的方法,抽样调查了海南岛18个市县的近郊区和自然保护林区。调查样方随机布设于农田、村落、种植园、林缘、弃耕地、草地、天然次生林等不同生态系统,共布设了351个样地。根据所处的演替阶段的不同,调查的生态系统类型可分为处于演替早期的农田、村落、种植园和草地生态系统;处于演替中后期的林缘、天然次生林生态系统。为避免季节性收割对本地植物变化的影响,本文数据分析中选取的种植园生态系统以胡椒园、茶树园、桉树林、橡胶园等轮作周期长的种植园为主。天然次生林主要为热带雨林或季雨林,以下简称次生林,两种植被类型分布的树种主要有高山榕(*Ficus altissima*)、蓝树(*Wrightia laevis*)、郎伞木(*Ardisia elegans*)、九节(*Psychotria rubra*)、牛矢果(*Osmanthus matsumuranus*)、银珠(*Peltophorum tonkinense*)、山麻秆(*Alchornea davidii*)、银柴(*Aporosa dioica*)、槁藤(*Entada phaseoloides*)、相思子(*Abrus precatorius*)、海南假砂仁(*Amomum chinense*)等。发现目的种群后,以该种群为中心,设置一个2 m × 2 m的样方,然后随机取一方向,沿该方向每隔10 m设一个样方,共设5个2 m × 2 m的样方(1套样方),然后沿垂直于第1套样方的方向设置第2套样方,两套样方共10个样方,计40 m<sup>2</sup>(1个样地)。记录样地中的土壤类

型及植被特征,统计样方内的植物种类。采用目测估值法计算群落中植物群落的盖度,计算方法为:盖度=草本植物的植株投影面积/样方面积。

### 1.2.3 数据分析

选择农田、村落、种植园、林缘、弃耕地、草地、次生林7种人为干扰程度有差异和不同演替特征的生境类型作为研究对象,结合调查中各生态系统类型的入侵程度和实地调查的可行性,分别在农田、村落、种植园、林缘、弃耕地、草地、次生林中选取14、14、20、11、17、11、10个共97个样地的信息用于数据统计分析(图1),分析的样地共含970个样方,总面积为3 904 m<sup>2</sup>。以1套样方中入侵样方所占比例作为入侵频率,用以比较不同生态系统中入侵植物的入侵频率,这样,每个样地有2个重复。目前,有关植物盖度等级的划分多出现在植被覆盖度估算的研究中(盖永芹等, 2009; 李锦荣等, 2010),而对样方中种群盖度等级的划分没有统一的标准,因此,在划分盖度等级时,本文根据评估标准及分布范围,把入侵植物的种群盖度分为一级(1%–20%)、二级(21%–40%)、三级(41%–60%)、四级(≥61%)共4个等级。运用Excel 2003和SPSS 17.0软件进行数据统计分析。用Systat SigmaPlot 10.0软件绘图。由于调查数据中入侵频率和盖度两项指标是服从二项分布的百分数的数据资料,并且含有小于30%或大于70%的数值,因此,数据分析前对其进行反正弦转换(Sokal & Rohlf, 1995)。

## 2 结果

### 2.1 海南岛入侵植物种类组成

在国家农业部指定的20种恶性入侵植物中,海南岛分布有11种,占总数的55.0%;包括飞机草、假臭草、含羞草、银胶菊、微甘菊、三裂叶蟛蜞菊、假高粱、苏门白酒草、喜旱莲子草、马缨丹、凤眼蓝。

### 2.2 海南岛入侵植物的水平分布格局

海南岛恶性入侵植物的分布情况如图2,其中,海口市、临高县、儋州市和乐东县是分布入侵植物种数最多的4个市县,均有11种,其次是琼海市、文昌市、澄迈县和昌江县,均有10种,而琼中市和白沙县分布种数最少,只有8种,其余8个市县均有9种(附录1)。海南岛东北部是入侵植物分布比较集中的区域,单个市县分布有入侵植物9–11种;其次是西南部的昌江市和乐东县,分别有10和11种,而中部

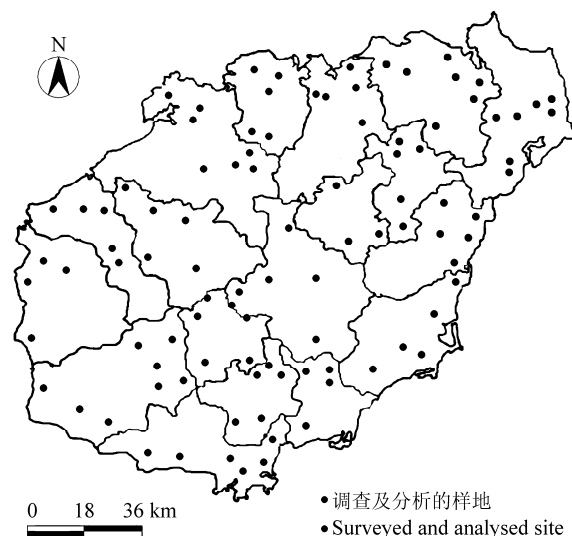


图1 调查及分析的样地在海南岛的分布。  
Fig. 1 Distribution of surveyed and analyzed sites in Hainan Island.

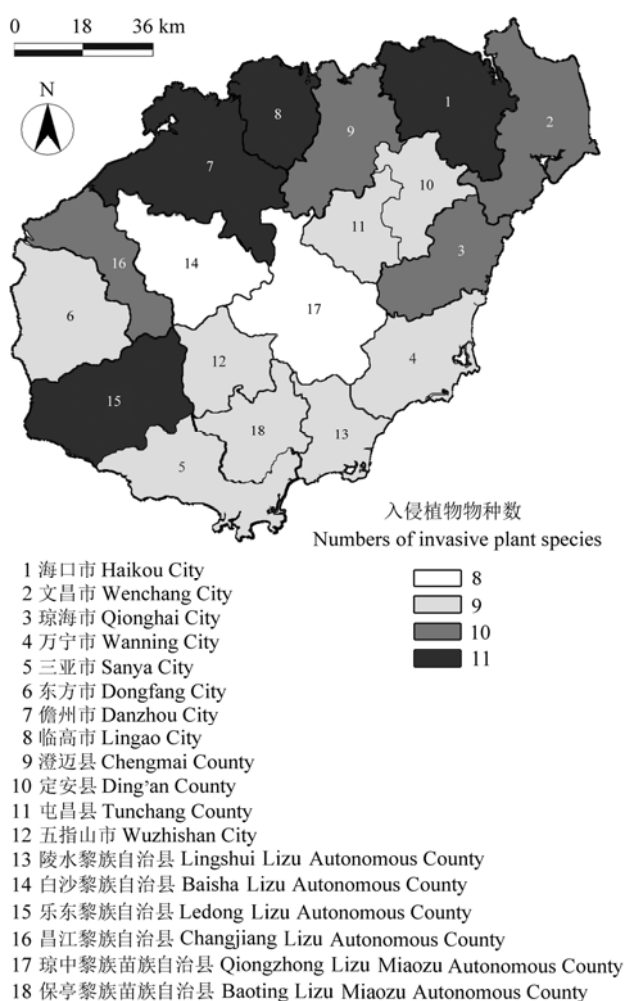


图2 海南岛入侵植物在各市县分布的数量梯度图。  
Fig. 2 The richness of invasive species and its distribution across cities and counties of Hainan Island.

地区分布较少, 其余市县均分布有9种。入侵植物在海南岛的分布特征表现为分布广泛, 区域间种数相差不大, 但整体表现为东北部、西南部地区种类最多, 东南部地区次之, 中部地区种类最少。

海南岛广布的恶性入侵植物为假臭草、飞机草、含羞草、苏门白酒草、马缨丹、三裂叶蟛蜞菊, 这6种入侵植物在抽查的每个市县均有分布, 入侵频率高; 而其他5种入侵植物在不同区域的分布情况存在差异, 如银胶菊在西南部和北部地区的入侵频率高, 而在中部的五指山市、琼中县等地区入侵频率较低; 凤眼蓝则主要分布在北部和东部市县, 在西南部的昌江、东方和乐东县的入侵频率较低; 微甘菊与假高粱在全岛的分布广泛, 但目前入侵强度小, 应该加强防范。

2.3 不同生态系统中入侵植物的种类组成

从表1可以看出, 除次生林外, 其余6种生态系统中都有入侵植物分布, 其中弃耕地、村落、农田中分布的入侵植物种数最多, 均有10种, 草地和种植园生态系统中有7种, 而林缘中分布最少, 只有6种。飞机草、假臭草、含羞草、马缨丹、三裂叶蟛蜞菊、苏门白酒草的入侵生境广泛, 在除次生林外的其他6种生境下均有分布; 银胶菊主要分布在村落、弃耕地中; 而假高粱常入侵到弃耕地、农田、村落生态系统中; 凤眼蓝主要分布于村落及农田边的河道中。

2.4 主要入侵植物的入侵频率及其与生境的关系

比较11种入侵植物在6种生境下的入侵频率发

现: 单以累计入侵频率分析时, 6种生态系统的整体入侵强度没有显著差异( $p > 0.05$ ); 但种植园、农田和弃耕地中累计入侵频率高, 可入侵空间较大, 而在林缘生态系统中, 累计入侵频率最低, 可入侵空间小, 体现了林缘生境对入侵植物的制约性(表2)。

分析单一入侵植物在不同生态系统中的入侵频率可知: 苏门白酒草, 马缨丹在6种生境中的入侵频率没有显著差异( $p > 0.05$ ), 表明这两种入侵植物的生态适应性广泛, 而假臭草、含羞草及三裂叶蟛蜞菊均有最适的入侵生境。例如: 假臭草在种植园和弃耕地中的入侵频率较高, 分别为0.946和0.706, 显著大于其他4种生境下的入侵频率( $p < 0.01$ ); 含羞草在农田生境中的入侵频率为0.592, 显著高于其他5种生境中的入侵频率( $p < 0.01$ ); 三裂叶蟛蜞菊在种植园下的入侵频率也显著高于其他生境下的入侵频率( $p < 0.01$ ); 而微甘菊、假高粱、银胶菊在入侵生境中的入侵频率也没有显著差异性; 与陆生入侵植物相比, 凤眼蓝和喜旱莲子草的入侵生境相对局限, 主要分布于农田等具有湿生环境特征的生态系统中, 体现出入侵生境的局限性。

2.5 不同生态系统中主要入侵植物的入侵强度比较分析

6种恶性入侵植物的种群盖度变化范围大, 但除三裂叶蟛蜞菊外, 其余入侵植物的种群盖度均集中分布在1%–20%之间(表3); 进一步分析种群盖度与入侵频率之间的关系可知, 苏门白酒草的入侵频率与种群盖度没有相关性; 而假臭草在弃耕地, 含

表1 不同生态系统中入侵植物的种类组成

Table 1 Composition of invasive plant species in different types of ecosystems

生态系统 Ecosystem	入侵植物物种 Invasive plant species	总数 Total
农田 Farmland	喜旱莲子草 <i>Alternanthera philoxeroides</i> , 飞机草 <i>Chromolaena odorata</i> , 苏门白酒草 <i>Conyza sumatrensis</i> , 凤眼蓝 <i>Eichhornia crassipes</i> , 马缨丹 <i>Lantana camara</i> , 含羞草 <i>Mimosa pudica</i> , 假臭草 <i>Praxelis clematidea</i> , 假高粱 <i>Pseudosorghum fasciculare</i> , 银胶菊 <i>Parthenium hysterio</i> , 三裂叶蟛蜞菊 <i>Wedelia trilobata</i>	10
弃耕地 Abandoned land	喜旱莲子草 <i>Alternanthera philoxeroides</i> , 飞机草 <i>Chromolaena odorata</i> , 苏门白酒草 <i>Conyza sumatrensis</i> , 马缨丹 <i>Lantana camara</i> , 微甘菊 <i>Mikania micrantha</i> , 含羞草 <i>Mimosa pudica</i> , 假臭草 <i>Praxelis clematidea</i> , 假高粱 <i>Pseudosorghum fasciculare</i> , 银胶菊 <i>Parthenium hysterio</i> , 三裂叶蟛蜞菊 <i>Wedelia trilobata</i>	10
种植园 Plantation	飞机草 <i>Chromolaena odorata</i> , 苏门白酒草 <i>Conyza sumatrensis</i> , 马缨丹 <i>Lantana camara</i> , 微甘菊 <i>Mikania micrantha</i> , 含羞草 <i>Mimosa pudica</i> , 假臭草 <i>Praxelis clematidea</i> , 三裂叶蟛蜞菊 <i>Wedelia trilobata</i>	7
林缘 Forest edge	飞机草 <i>Chromolaena odorata</i> , 苏门白酒草 <i>Conyza sumatrensis</i> , 马缨丹 <i>Lantana camara</i> , 含羞草 <i>Mimosa pudica</i> , 假臭草 <i>Praxelis clematidea</i> , 三裂叶蟛蜞菊 <i>Wedelia trilobata</i>	6
村落 Village	喜旱莲子草 <i>Alternanthera philoxeroides</i> , 飞机草 <i>Chromolaena odorata</i> , 苏门白酒草 <i>Conyza sumatrensis</i> , 凤眼蓝 <i>Eichhornia crassipes</i> , 马缨丹 <i>Lantana camara</i> , 含羞草 <i>Mimosa pudica</i> , 假臭草 <i>Praxelis clematidea</i> , 假高粱 <i>Pseudosorghum fasciculare</i> , 银胶菊 <i>Parthenium hysterio</i> , 三裂叶蟛蜞菊 <i>Wedelia trilobata</i>	10
草地 Grassland	喜旱莲子草 <i>Alternanthera philoxeroides</i> , 飞机草 <i>Chromolaena odorata</i> , 苏门白酒草 <i>Conyza sumatrensis</i> , 马缨丹 <i>Lantana camara</i> , 含羞草 <i>Mimosa pudica</i> , 假臭草 <i>Praxelis clematidea</i> , 三裂叶蟛蜞菊 <i>Wedelia trilobata</i>	7
次生林 Secondary forest	无 None	0

表2 不同生态系统中入侵植物的入侵频率比较(平均值±标准误差)  
Table 2 Comparison of frequencies of plant invasion among different types of ecosystems (mean ± SE)

入侵植物 Invasive plant species	植物入侵频率 Frequency of plants invasions					
	弃耕地 Abandoned land	种植园 Plantation	村落 Village	林缘 Forest edge	农田 Farmland	草地 Grassland
假臭草 <i>Praxelis clematidea</i>	0.709 ± 0.519 <sup>a</sup>	0.946 ± 0.472 <sup>a</sup>	0.485 ± 0.298 <sup>b</sup>	0.556 ± 0.529 <sup>bc</sup>	0.790 ± 0.451 <sup>bc</sup>	0.685 ± 0.218 <sup>b</sup>
含羞草 <i>Mimosa pudica</i>	0.502 ± 0.407 <sup>a</sup>	0.331 ± 0.357 <sup>a</sup>	0.274 ± 0.351 <sup>ab</sup>	0.204 ± 0.430 <sup>a</sup>	0.592 ± 0.455 <sup>c</sup>	0.474 ± 0.250 <sup>ab</sup>
飞机草 <i>Chromolaena odorata</i>	0.749 ± 0.493 <sup>a</sup>	0.701 ± 0.465 <sup>a</sup>	0.628 ± 0.326 <sup>a</sup>	0.556 ± 0.529 <sup>a</sup>	0.733 ± 0.459 <sup>a</sup>	0.771 ± 0.226 <sup>a</sup>
苏门白酒草 <i>Conyza sumatrensis</i>	0.273 ± 0.431 <sup>a</sup>	0.339 ± 0.443 <sup>a</sup>	0.291 ± 0.394 <sup>a</sup>	0.186 ± 0.347 <sup>a</sup>	0.355 ± 0.527 <sup>a</sup>	0.191 ± 0.094 <sup>a</sup>
假高粱 <i>Pseudosorghum fasciculare</i>	0.118 ± 0.211 <sup>a</sup>	—	0.112 ± 0.185 <sup>a</sup>	—	0.051 ± 0.125 <sup>a</sup>	—
马缨丹 <i>Lantana camara</i>	0.118 ± 0.211 <sup>a</sup>	0.025 ± 0.092 <sup>a</sup>	0.112 ± 0.185 <sup>a</sup>	0.099 ± 0.188 <sup>a</sup>	0.051 ± 0.125 <sup>a</sup>	0.092 ± 0.137 <sup>a</sup>
喜旱莲子草 <i>Alternanthera philoxeroides</i>	0.126 ± 0.211 <sup>a</sup>	0.022 ± 0.115 <sup>a</sup>	0.032 ± 0.105 <sup>a</sup>	—	0.091 ± 0.114 <sup>a</sup>	0.052 ± 0.137 <sup>a</sup>
三裂叶蟛蜞菊 <i>Wedelia trilobata</i>	0.126 ± 0.391 <sup>a</sup>	0.226 ± 0.173 <sup>b</sup>	0.029 ± 0.140 <sup>a</sup>	0.050 ± 0.169 <sup>a</sup>	0.179 ± 0.397 <sup>a</sup>	0.129 ± 0.140 <sup>a</sup>
银胶菊 <i>Parthenium hysterophorus</i>	0.085 ± 0.121 <sup>a</sup>	0.015 ± 0.002 <sup>a</sup>	0.112 ± 0.105 <sup>a</sup>	—	0.051 ± 0.125 <sup>a</sup>	0.092 ± 0.037 <sup>a</sup>
凤眼蓝 <i>Eichhornia crassipes</i>	—	—	0.025 ± 0.140 <sup>a</sup>	—	0.012 ± 0.021 <sup>a</sup>	—
微甘菊 <i>Mikania micrantha</i>	0.130 ± 0.125 <sup>a</sup>	0.085 ± 0.003 <sup>a</sup>	0.112 ± 0.115 <sup>a</sup>	—	0.075 ± 0.121 <sup>a</sup>	—
累计入侵频率 Accumulated frequency of plants invasions	2.936	2.675	2.212	1.601	2.930	2.486

不同小写字母表示差异显著( $p < 0.05$ )。—, 无。  
Different lowercase letters indicate significant differences ( $p < 0.05$ ). —, none.

表3 不同生态系统中入侵植物种群盖度及分布特征  
Table 3 Community coverage and distribution patterns of invasive plants in different ecosystems

入侵种 Invasive plants species	盖度等级 Coverage grade	占入侵样方比例 Ratio of the invaded plot	入侵植物盖度等级与入侵频率的相关性 Relationship between frequency of plant invasions and degree of community coverage					
			草地 Grassland	林缘 Forest edge	弃耕地 Abandoned land	村落 Village	农田 Farmland	种植园 Plantation
飞机草 <i>Chromolaena odorata</i>	1%–20%	66%	–0.792 <sup>*</sup>	–0.912 <sup>**</sup>	–0.783 <sup>*</sup>	–0.725 <sup>*</sup>	–0.860 <sup>**</sup>	–0.596
	21%–40%	21%						
	41%–60%	9%						
	≥61%	5%						
含羞草 <i>Mimosa pudica</i>	1%–20%	80%	–0.780 <sup>*</sup>	–0.661 <sup>*</sup>	–0.629	–0.710 <sup>*</sup>	0.682 <sup>*</sup>	–0.564
	21%–40%	7%						
	41%–60%	13%						
	≥61%	—						
假臭草 <i>Praxelis clematidea</i>	1%–20%	66%	–0.788 <sup>*</sup>	–0.739 <sup>*</sup>	0.139 <sup>*</sup>	–0.621	–0.702 <sup>*</sup>	–0.893
	21%–40%	19%						
	41%–60%	5%						
	≥61%	10%						
苏门白酒草 <i>Conyza sumatrensis</i>	1%–20%	91%	–0.484	–0.688	–0.729	0.661	–0.600	0.688
	21%–40%	9%						
	41%–60%	—						
	≥61%	—						
马缨丹 <i>Lantana camara</i>	1%–20%	60%	–0.600	–0.899	–0.612 <sup>**</sup>	–0.544 <sup>*</sup>	–0.563	–0.672
	21%–40%	24%						
	41%–60%	11%						
	≥61%	5%						
三裂叶蟛蜞菊 <i>Wedelia trilobata</i>	1%–20%	36%	–0.600 <sup>*</sup>	0.403	0.231	0.243	0.356	0.900 <sup>**</sup>
	21%–40%	7%						
	41%–60%	7%						
	≥61%	50%						

<sup>\*</sup>,  $p < 0.05$ ; <sup>\*\*</sup>,  $p < 0.01$ .

羞草在农田, 三裂叶蟛蜞菊在种植园生态系统中, 其种群盖度与入侵频率呈正相关关系, 表明这3种入侵植物有偏好的入侵生境; 而飞机草的种群盖度与入侵频率在除种植园外的生态系统中均表现为显著或极显著的负相关关系; 在林缘生态系统中, 除马缨丹和苏门白酒草外, 其余4种入侵植物的入侵频率都随着盖度等级的增加而显著降低, 表明在林缘生态系统中, 多数入侵植物很难成片分布生长, 林缘对植物入侵存在制约作用。

## 2.6 不同生态系统中入侵植物种数与本地植物种数的关系

针对6种生态系统类型, 研究单个样方中入侵植物种数变化对本地植物平均种数的影响, 并按生活型把本地植物分成乔木、灌木、草本、藤本4种类型, 分别研究4种类型植物的平均种数对入侵植物种数变化的响应, 结果表明: 在弃耕地、种植园、林缘3种生态系统中, 群落中本地植物的平均种数与入侵植物种数变化无明显相关性(图3C、3D、3F), 而在农田生态系统中, 两者呈先增加后减少的变化趋势(图3A), 其中当样方中入侵植物种数为1时, 本地植物平均种数最多; 而在草地生态系统中, 两者表现出先减少后增加的变化趋势, 其中当入侵植物种数为2时, 本地植物平均种数最少(图3B); 在村落生态系统中, 本地植物平均种数随着入侵植物种数的增加而显著减少, 两者呈负相关关系(图3E)。

样方中乔木、灌木及藤本的平均种数与入侵种数的变化在研究的6类生态系统中均没有明显的相关性, 这3类生活型植物受入侵植物种数变化的影响小; 而草本植物的平均种数在不同的生态系统中对入侵植物种数增加的响应不同, 如在种植园和林缘生态系统中, 两者无相关性(图3D、3F); 在农田生态系统中, 表现出先增加后减少的趋势(图3A), 而在草地生态系统中, 表现出先减少后增加的趋势(图3B); 在弃耕地生态系统中, 虽然当入侵植物种数为1和2时, 群落中草本植物的平均种数无显著差异, 但其整体变化趋势为随着入侵植物种数的增加而增加(图3C), 而在村落中, 两者呈负相关关系(图3E)。

## 2.7 不同生态系统中主要入侵植物盖度总值与本地植物种数的关系

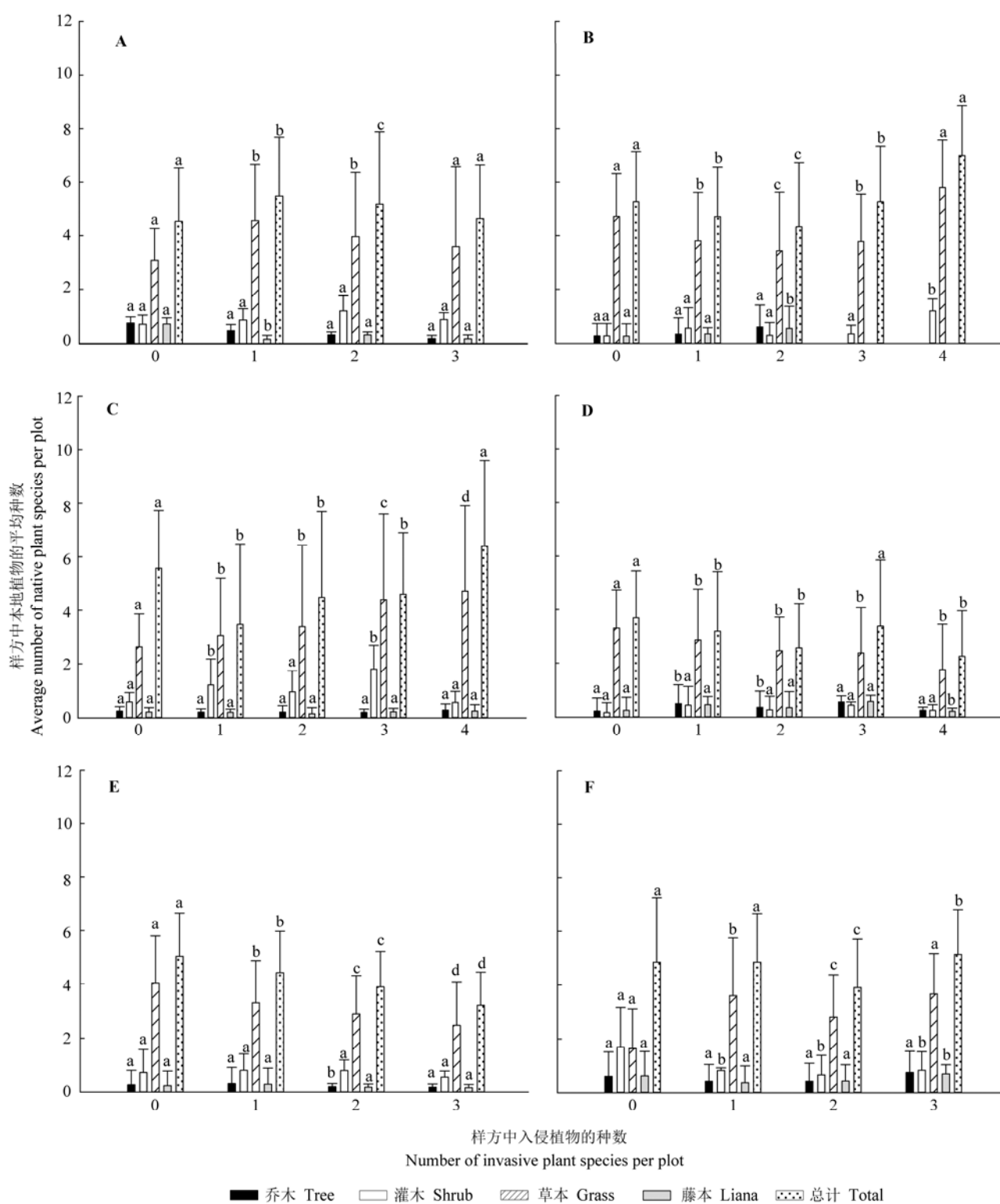
以调查的单个样地为对象, 统计10个样方中所有入侵植物的盖度总值与本地植物种数, 并分析不

同生态系统中两者之间的相关性, 结果表明: 在种植园、农田和村落3种生态系统中, 入侵植物盖度总值与本地植物的物种丰富度没有显著相关性( $p > 0.05$ ) (图4A、4B、4C); 而在林缘( $n = 12, p = 0.031, R^2 = 0.387$ )和弃耕地( $n = 18, p = 0.045, R^2 = 0.251$ )生态系统中, 样地中入侵植物的盖度总值与本地植物种数呈显著负相关关系( $p < 0.05$ ), 本地植物的物种丰富度将随着入侵植物盖度总值的增大而减少(图4E、4F), 高盖度的入侵植物居群将抑制本地植物的多样性; 但在草地( $n = 11, p = 0.014, R^2 = 0.449$ )生态系统中, 在单个样方平均盖度低于49.1%时, 入侵植物的盖度总值与本地植物种数却呈正相关关系( $p < 0.05$ ), 即本地植物的物种丰富度将随着入侵植物盖度总值的增加而增加, 表现在特定的入侵阶段, 增加入侵植物的居群盖度有助于促进本地植物的多样性(图4D)。

## 3 讨论

### 3.1 入侵植物在海南岛的分布特征

入侵植物在海南岛分布广泛, 且不同区域间种数相差不大, 但整体呈现为东北部、西南部地区种类较多, 东南部次之, 而中部较少的分布特征。入侵植物的分布主要取决于环境的可入侵性和物种的入侵能力两个方面(Newsome & Noble, 1986; 刘建等, 2010)。如“理想”的入侵植物通常具备生活史短, 自交亲和性、结实率高, 可进行无性繁殖等特点, 并能迅速响应环境中的干扰(Rejmánek & Richardson, 1996)。本文研究的11种入侵植物中, 除马缨丹外, 其余10种均为一、二年生的草本植物, 其中有6种为菊科植物, 如飞机草、假臭草、微甘菊等, 这些植物产生的种子数量大而质量轻, 通常还附有冠毛, 便于长距离传播和扩散(李振宇和谢焱, 2002; Weber *et al.*, 2008), 而喜旱莲子草、微甘菊、凤眼蓝、三裂叶蟛蜞菊具有无性繁殖的特性, 其繁殖体可以借助水流进行传播, 这些生物学特征和传播机制增强了其入侵能力, 有助于入侵植物的扩散和迅速占据入侵地, 并能在较短的时间内扩大种群, 从而导致其在海南岛的分布范围很广。但对比不同区域的分布特点发现, 东北部和西南部的入侵种数相对较多, 为10–11种, 而中部和东南部分布较少, 这种差异可能与不同区域间的气候条件和人为干扰强度有关。由于海南岛的西部地区贯穿有环西粤海铁路, 具有



**图3** 不同生态系统中样方中入侵植物种数与本地植物平均种数的变化关系(平均值 $\pm$ 标准误差)。A, 农田。B, 草地。C, 弃耕地。D, 种植园。E, 村落。F, 林缘。不同小写字母表示差异显著( $p < 0.05$ )。

**Fig. 3** The relationship between the number of invasive plant species and the average number of native plant species per plot in different types of ecosystems (mean  $\pm$  SE). A, Farmland. B, Grassland. C, Abandoned land. D, Plantation. E, Village. F, Forest edge. Different lowercase letters indicate significant differences ( $p < 0.05$ ).



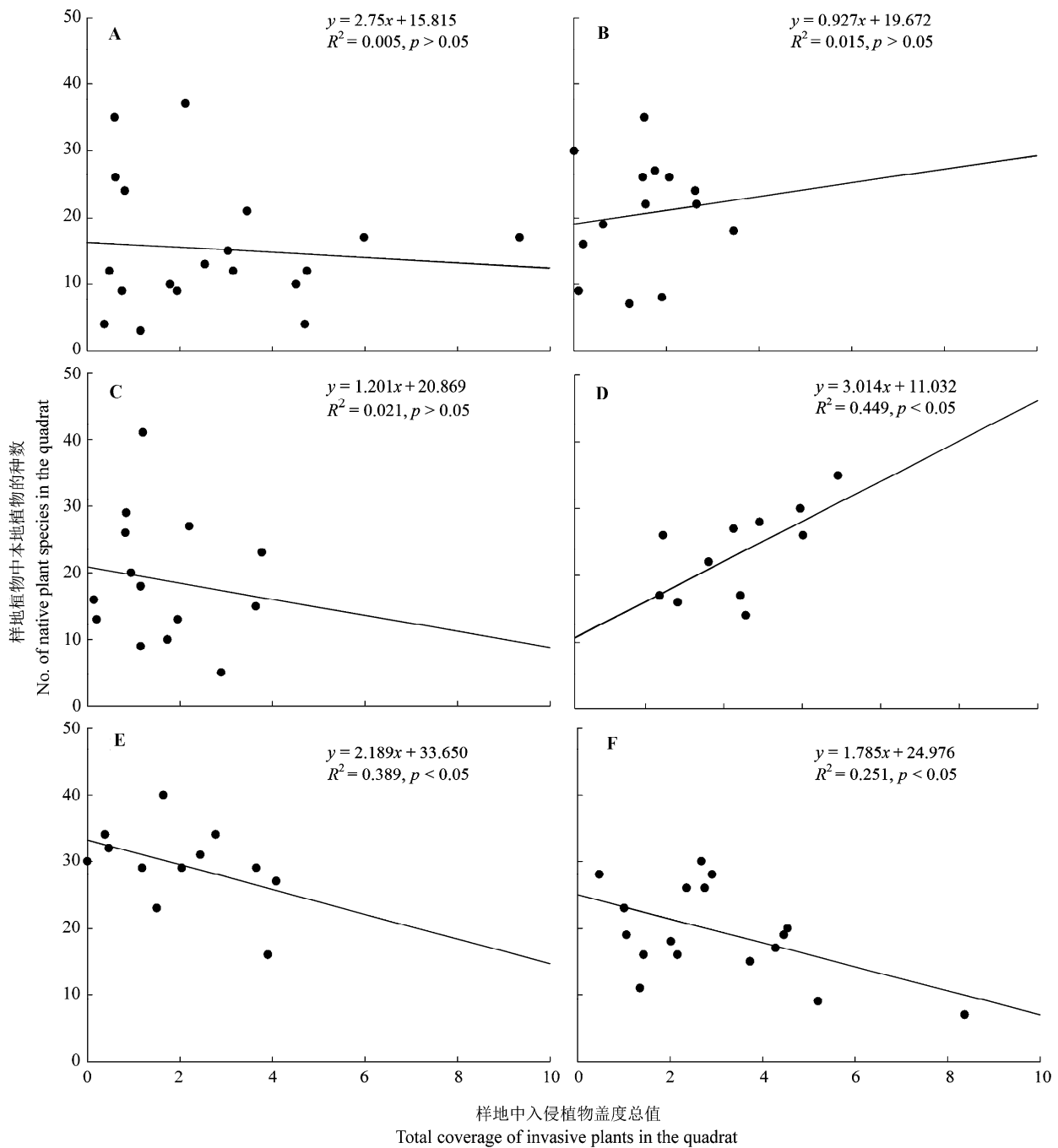


图4 6种生态系统中样地中入侵植物盖度总值与本地植物种数的关系。A, 种植园。B, 村落。C, 农田。D, 草地。E, 林缘。F, 弃耕地。

**Fig. 4** The relationship between the total coverage of invasive plants and the number of native plant species sampled from quadrats of six ecosystems. **A**, Plantation. **B**, Village. **C**, Farmland. **D**, Grassland. **E**, Forest edge. **F**, Abandoned land.

较长的运输史, 而连接该地区的海口市、儋州市、东方市都是水陆交通的重要枢纽, 境内人流密集, 干扰强度大, 这些因素都能有效地促进入侵植物的传播和扩散(吴晓雯等, 2006; 张帅等, 2010)。结合气候条件进一步分析, 海南岛西部地区的年晴天数平

均为300天, 明显高于中部和东部地区, 但降水量较少, 而中部地区是全岛降水集中分布的地区, 年降水量达2 000 mm, 属于湿润地区。此外, 中部地区的年平均气温为23 ℃左右, 处于全岛平均气温(23–26 ℃)的下限, 低于海南岛其他地区的温度(蔡

大鑫等, 2010)。综合气候条件和入侵种数的分布特征发现, 入侵植物在年平均气温较高、降水量较低、而日照时间较长的东北、西南部地区分布的种类较多, 在年平均气温较低、降水量较高、日照时间较短的中部、东部地区分布的种类较少, 这可能与入侵植物的生活习性有关, 因为本文研究的入侵植物多为草本阳性植物, 它们的种子萌发和种群发展都需要足够的光温条件, 过高湿和低温的环境可能对其生长和扩散具有抑制作用。

### 3.2 不同生境下入侵植物的发生频率和种群特征

本文研究表明: 弃耕地、村落、农田生态系统中所含的入侵种数最多, 均有10种; 而在林缘生境中, 11种入侵植物的入侵频率和累计入侵频率都较低, 在抽样调查的次生林内, 没有发现入侵植物的分布(表1), 说明入侵植物主要分布在人为干扰强度大的生境中, 而在人为干扰强度小、群落结构复杂的生境中分布较少。结合6种生态系统的演替阶段分析, 弃耕地、村落、草地和农田均属于演替早期的生境类型, 受人为干扰的强度大, 而机械和人为活动的介导能有效地减少入侵植物的传播障碍, 或形成干扰间的协同效应(Hobbs, 1991); 入侵植物通常能够迅速响应环境中的干扰, 并且具有较强的表型可塑性, 这些特征促成了其在干扰生境中的成功入侵(Hobbs & Huenneke, 1992)。植物对光能的捕获和利用效率高是决定其能否适应环境并很好地存活下去的重要因素(Baruch & Goldstein, 1999; Durand & Goldstein, 2001), 因此, 入侵生境的光环境对植物的入侵过程有很大影响, 如弃耕地通常具有高光照、高肥力的环境特征, 这为入侵种群的建立和发展提供了条件, 导致弃耕地常成为入侵植物(如假臭草、三裂叶蟛蜞菊等)集中分布的生境, 这与钟军弟等(2014)在广西的研究结果一致, 表明弃耕地具有较大的可入侵空间。林缘和天然次生林生态系统属于演替中后期的生境类型, 与演替早期的生境类型相比, 受人为干扰强度较低, 而增加的物种密度也将减少群落中的空缺生态位, 从而降低植物成功入侵的几率(Stachowicz & Tilman, 2005)。另一方面, 林缘或林下的光照强度和光合有效辐射都较低, 这种环境特征也将限制植物入侵林缘的深度(Brothers & Spingarn, 1992; Shea & Chesson, 2002), 因为本文研究的入侵植物多是处于演替初期的草本植物, 这些植物从种子萌发到幼苗生长及种群的发

育均需要充足的光照, 它们的入侵可能在演替早期的生境类型, 如农田、草地和村落中具有更好的生态适应性; 但在林缘和林下的入侵却受到光照条件的制约, 且林缘的群落结构对低矮生活型的入侵植物也具有阻碍作用(Honnay *et al.*, 2002), 如喜旱莲子草、含羞草等在林缘中的入侵频率都很低。因此, 入侵植物虽然在林区广泛分布, 但它们仅分布在光照充足的路边或新垦的裸地上, 而无法入侵到森林内部, 国外的不少报道也证实了这种分布特点(Parendes & Jones, 2000)。分析入侵种群的盖度可知, 除三裂叶蟛蜞菊的种群盖度较高外, 其余5种入侵植物的盖度都集中分布在1%–20%之间, 并与入侵地的环境特征存在相关性, 如含羞草在农田、假臭草在弃耕地、三裂叶蟛蜞菊在种植园中通常具有成群分布生长的特点, 体现出这3种入侵植物在对应的生境中有更好的生态适应性; 而在林缘生态系统中, 除马缨丹和苏门白酒草外, 其余4种入侵植物的入侵频率与种群盖度呈负相关关系, 表明在林缘生态系统中, 入侵植物在入侵群落中的密度小, 难以形成单优群落, 这与入侵植物的种子是否能到达林缘, 能否存活及能否萌芽有密切的关系, 这些问题有待进一步实验验证。

### 3.3 入侵群落中入侵植物对本地植物的影响

入侵植物导致本地植物多样性降低的现象已被广泛认识, 但在不同生态系统中可能存在差异(Daehler, 2003)。本文的研究结果显示, 样方中入侵植物种数与本地植物平均种数在弃耕地、种植园和林缘3种生态系统中无明显相关性, 当样方中入侵植物种数由0到4种变化时, 群落中本地植物平均种数均没有明显的递变规律; 进一步分析不同生活型植物与入侵植物种数变化的关系发现, 仅弃耕地中草本植物的平均种数略有上升的趋势, 但差异不显著(图3C); 而乔木、灌木、藤本生活型植物的平均种数与入侵植物的种数变化不相关。在农田生态系统中, 本地植物平均种数随入侵植物种数的增加呈先增加后减少的变化趋势, 其中当入侵植物种数为1时, 本地植物平均种数最多, 随后呈减少的趋势(图3A), 表明群落中少数入侵种的存在具有促进本地植物多样性的作用, 其原因可能是早期的植物入侵过程改善了群落环境并促进了本地种的生存和定居, 从而增加了本地植物的物种丰富度, 但持续扩大的入侵种群将会抑制本地植物的多样性, 这与李

安定等(2013)对莲子草的研究结果是一致的。本文的研究结果也表明: 针对不同的生态系统类型和不同的入侵阶段, 植物入侵对本地植物的影响存在差异; 而一定强度的植物入侵可能具有正面的生态效应。

Stohlgren等(1999)对草地生态系统的研究表明, 在群落水平上, 本地植物种数与入侵植物种数呈正相关关系, 并认为这与两类植物对草地环境的变化有相同的响应有关。而本文发现, 草地群落中本地植物平均种数随入侵种数的增加呈先减少后增加的趋势, 且在入侵种数为2时最少, 草本植物也呈一致的变化趋势, 而乔木、灌木和藤本植物的种数变化不显著, 其原因可能是当入侵种数较少时, 某些入侵植物排挤本地植物后形成了单优群落, 并导致本地植物物种丰富度下降, 而随着入侵种数的增加, 新入侵的植物改变了优势种的组成, 这种变化进一步促进了新的本地植物迁入, 从而增加了本地植物的多样性, 因为群落优势种对新物种的迁入具有决定性作用(Liancourt *et al.*, 2009)。Huston (1997)的研究也表明, 群落的可入侵性更多取决于关键种, 而并非整个群落中的物种数, 但在较小尺度上取样时, 物种多样性与入侵关系的模式比较复杂, 群落类型和地域的差异都会导致不同的结果, 还需要考虑其他因素的影响(Fridley *et al.*, 2007)。针对本文研究的10种陆生入侵植物, 在入侵植物组合不同的群落中, 具体是哪一类群的入侵植物对本地植物的种数有直接影响, 还需要针对某些单一入侵植物的群落进行比较研究, 并考虑草地演替过程与入侵植物迁入的关系。在村落生态系统中, 本地植物平均种数与入侵植物种数呈负相关关系, 其原因可能是人为地对居住环境进行改造后, 减少了本地植物的多样性, 使入侵植物更容易占据空缺生态位, 并逐渐成为群落优势种, 随着干扰强度的增加, 其优势地位变得更突出, 而群落中的次优种和伴生种的地位逐渐降低甚至消失, 这与王丽丽(2013)对农村生态系统中伴人植物的研究结果是一致的, 体现出人为干扰介导下入侵植物对本地植物多样性的影响。

在本文研究的6种生态系统中, 样方中乔木、灌木和藤本植物的平均种数与入侵植物种数的变化均没有显著相关性, 说明这3种生活型植物的物种丰富度受植物入侵的影响小, 而草本植物在不同生态系统中对入侵植物种数的变化有不同的响应, 如在

农田生态系统中, 当样方中入侵植物种数由0到3种变化时, 群落中草本植物平均种数呈先增加后减少的变化趋势, 其中当入侵植物种数为1时达到最多; 而在草地生态系统中, 草本植物平均种数随入侵植物种数的增加呈先减少后增加的变化趋势(图3B), 其中当入侵植物种数为2时最少, 并且这两类生态系统中草本植物种数的变化都与群落中本地植物平均种数的变化趋势一致。虽然在弃耕地中, 本地植物平均种数与入侵植物种数没有显著相关性, 但群落中草本植物的平均种数却表现出随入侵植物种数的增加而增加的趋势(图3C), 表明在农田、草地和弃耕地3类生态系统中, 群落中入侵植物种数的变化对乔木、灌木和藤本植物物种丰富度的影响并不显著, 但对草本植物的物种丰富度有显著的影响, 进一步表明: 植物入侵后并非影响群落中的所有个体, 而是对其中某一植物功能群有较直接的作用。

## 4 结论

(1)在国家农业部确定的20种恶性入侵植物中, 海南岛分布有11种, 占目的种总数的55%; 海南岛的东北部、西南部地区是入侵植物分布种数较多的区域, 东南部次之, 中部最少; 入侵植物在各市县的分布种数相差不大, 表现出在全岛广布的特征; 飞机草、假臭草、含羞草、苏门白酒草、三裂叶蟛蜞菊、马缨丹是海南岛目前分布最广泛、入侵强度较大的6种入侵植物。

(2)结合海南岛的土地利用方式和气候条件发现, 弃耕地、种植园以及农田是入侵植物分布的主要生境, 而林缘和天然次生林生态系统的可入侵空间较小, 并对植物入侵表现出制约作用; 入侵植物主要分布在人为干扰强度大的生境中, 多数入侵植物的种群盖度小, 并没有形成大面积爆发的入侵态势。

(3)植物入侵对本地植物的影响因生态系统类型存在差异, 一种是负面效应, 表现在村落生态系统中; 一种是正面效应(至少是阶段性的), 体现在草地、农田生态系统中, 即一定强度范围内的植物入侵过程能改善入侵群落的生境条件, 促进本地植物的多样性; 而另外一种表现为以人为干扰为介导的综合效应, 如林缘、种植园和弃耕地3种生态系统类型, 植物入侵的效应可能受干扰强度的影响而存在较大的差异。

(4)植物入侵主要对群落中草本功能群的物种多样性有显著影响,而对乔木、灌木、藤本的影响不显著;入侵植物的盖度总值对本地植物物种多样性的影响因生态系统类型而存在差异,具有正面、负面或者不相关3种效应。

**基金项目** 国家自然科学基金(31060073和31460120)、海南省研究生创新科研课题项目(00817372-3/2013-03990)和海南大学研究生联合培养项目。

## 参考文献

- Barney JN, Whitlow TH, Lembo AJ Jr (2008). Revealing historic invasion patterns and potential invasion sites for two non-native plant species. *PLoS ONE*, 3(2), e1635, doi: 10.1371/journal.pone.0001635.
- Baruch Z, Goldstein G (1999). Leaf construction cost, nutrient concentration, and net CO<sub>2</sub> assimilation of native and invasive species in Hawaii. *Oecologia*, 121, 183–192.
- Brothers TS, Spingarn A (1992). Forest fragmentation and alien plant invasion of central Indiana old-growth forests. *Conservation Biology*, 6, 91–100.
- Byers JE (2002). Physical habitat attribute mediates biotic resistant to non-indigenous species invasion. *Oecologia*, 130, 146–156.
- Byers JE, Reichard SH, Randall JM, Parker IM, Smith CS, Lonsdale WM, Atkinson IAE, Seastedt TR, Williamson M, Chornesky E, Hayes D (2002). Directing research to reduce the impacts of nonindigenous species. *Conservation Biology*, 16, 630–640.
- Cai DX, Liu SJ, Tian GH, Xu XC, Cui D, Zhang JH (2010). Analysis on tourism climate resource of Hainan Island. *Modern Agricultural Science and Technology*, (16), 19–24. (in Chinese with English abstract) [蔡大鑫, 刘少军, 田光辉, 许向春, 崔丹, 张京红 (2010). 海南岛旅游气候资源分析. 现代农业科技, (16), 19–24.]
- Crossman ND, Bryan BA, Cooke DA (2011). An invasive plant and climate change threat index for weed risk management: Integrating habitat distribution pattern and dispersal process. *Ecological Indicators*, 11, 183–198.
- Daehler CC (2003). Performance's comparisons of co-occurring native and alien invasive plants: Implications for conservation and restoration. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 34, 183–211.
- Ding H, Xu HG, Liu ZL (2007). Impacts of invasion of *Eupatorium adenophorum* on vegetation diversity. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 23(2), 29–32, 75. (in Chinese with English abstract) [丁晖, 徐海根, 刘志磊 (2007). 外来入侵植物紫茎泽兰对植物多样性的影响. 生态与农村环境学报, 23(2), 29–32, 75.]
- Durand LZ, Goldstein G (2001). Photosynthesis, photo inhibition, and nitrogen use efficiency in native and invasive tree ferns in Hawaii. *Oecologia*, 126, 345–354.
- Erik W (2004). Constraints in range predictions of invasive plant species due to non-equilibrium distribution patterns: Purple loosestrife (*Lythrum salicaria*) in North America. *Ecological Modelling*, 179, 551–567.
- Fridley JD, Stachowicz JJ, Naeem S, Sax DF, Seabloom EW, Smith MD, Stohlgren TJ, Tilman D, Von Holle B (2007). The invasion paradox: reconciling pattern and process in species invasions. *Ecology*, 88, 3–17.
- Gai YQ, Li XB, Zhang L, Li C, Liang Y (2009). Land use/cover change and vegetation coverage monitoring by remote sensing: A case study of Miyun, Beijing. *Resources Science*, 31, 523–529. (in Chinese with English abstract) [盖永芹, 李晓兵, 张立, 李超, 梁燕 (2009). 土地利用/覆被变化与植被盖度的遥感监测——以北京市密云县为例. 资源科学, 31, 523–529.]
- Gozlan RE, Newton AC (2009). Biological invasions: Benefits versus risks. *Science*, 324, 1015–1016.
- Hejda M, Pyšek P, Jarošík V (2009). Impact of invasive plants on the species richness, diversity and composition of invaded communities. *Journal of Ecology*, 97, 393–403.
- Hobbs RJ (1991). Disturbance—A precursor to weed invasion in native vegetation. *Plant Protection Quarterly*, 6, 99–104.
- Hobbs RJ, Huenneke LF (1992). Disturbance, diversity, and invasion: Implications for conservation. *Conservation Biology*, 6, 324–337.
- Honnay O, Verheyen K, Hermy M (2002). Permeability of ancient forest edges for weedy plant species invasion. *Forest Ecology and Management*, 161, 109–122.
- Huang QQ, Shen YD, Li XX, Fan ZW, Li MG, Cheng HT (2013). Native expanding *Merremia boissiana* is not more allelopathic than its non-expanding congener *M. vitifolia* in the expanded range in Hainan. *American Journal of Plant Sciences*, 4, 774–779.
- Huang QQ, Shen YD, Fan ZW, Li XX, Song X, Cheng HT, Hou YP (2013). Effects of soil from different forest types in Wuzhi Mountain on the seedling growth of *Merremia boissiana*. *Ecology and Environmental Sciences*, 22, 95–99. (in Chinese with English abstract) [黄乔乔, 沈奕德, 范志伟, 李晓霞, 宋鑫, 程汉亨, 侯玉平 (2013). 五指山不同林型土壤对金钟藤幼苗生长的影响. 生态环境学报, 22, 95–99.]
- Huston MA (1997). Hidden treatments in ecological experiments: Re-evaluating the ecosystem function of biodiversity. *Oecologia*, 110, 449–460.
- Ibáñez I, Silander Jr JA, Wilson AM, LaFleur N, Tanaka N, Tsuyama I (2009). Multivariate forecasts of potential distributions of invasive plant species. *Ecological Applications*, 19, 359–375.
- Li AD, Xie YG, Zhang JL, Long XQ (2013). Impacts of the

- invasion of *Alternanthera philoxeroides* on species composition and diversity of heterogeneous habitat in Caohai wetland. *Ecology and Environmental Sciences*, 22, 1322–1328. (in Chinese with English abstract) [李安定, 谢元贵, 张建利, 龙秀琴 (2013). 异质生境空心莲子草植物群落组成及物种多样性研究. 生态环境学报, 22, 1322–1328.]
- Li B, Li YY (2009). The Interaction between invasive and native species in the biological invasion. *Sichuan Environment*, 28, 64–67. (in Chinese with English abstract) [李冰, 李玉瑛 (2009). 生物入侵中入侵种与土著种的相互作用. 四川环境, 28, 64–67.]
- Li JR, Sun BP, Ling X, Guo JY, Wang TS, Zhou WY, Zhao Y, Zhou XS (2010). Study on land use and dynamic changes of vegetation cover in and after the project of returning farmland to forests—taking the Ansai County as example. *Journal of Inner Mongolia Agricultural University*, 31, 130–135. (in Chinese with English abstract) [李锦荣, 孙保平, 凌侠, 郭建英, 王同顺, 周文渊, 赵岩, 周湘山 (2010). 退耕还林工程前后土地利用与植被盖度动态变化研究——以安塞县为例. 内蒙古农业大学学报, 31, 130–135.]
- Li ZY, Xie Y (2002). *Invasive Alien Species in China*. China Forestry Publishing House, Beijing. (in Chinese) [李振宇, 解焱 (2002). 中国外来入侵种. 中国林业出版社, 北京.]
- Liancourt P, Viard-Cr  tat F, Michalet R (2009). Contrasting community responses to fertilization and the role of the competitive ability of dominant species. *Journal of Vegetation Science*, 20, 138–147.
- Liu J, Li JM, Yu H, He WM, Yu FH, Sang WG, Liu GF, Dong M (2010). The relationship between functional traits and invasiveness of alien plants. *Biodiversity Science*, 18, 569–576. (in Chinese with English abstract) [刘建, 李钧敏, 余华, 何维明, 于飞海, 桑卫国, 刘国方, 董鸣 (2010). 植物功能性状与外来植物入侵. 生物多样性, 18, 569–576.]
- Losdale WM (1999). Global patterns of plant invasions and the concept of invasibility. *Ecology*, 80, 1522–1536.
- Newsome AE, Noble IR (1986). Ecological and physiological characters of invading species. In: Groves RH, Burdon JJ eds. *Ecology of Biological Invasions*. Cambridge University Press, Cambridge, UK. 1–20.
- Parendes LA, Jones JA (2000). Role of light availability and dispersal in exotic plant invasion along roads and streams in the H. J. Andrews experimental forest, Oregon. *Conservation Biology*, 14, 64–75.
- Peng ZB, Jiang Y, Jiang JS (2013). Risk evaluation indicator system for exotic plant invasion in Hainan Island, South China. *Chinese Journal of Ecology*, 32, 2029–2034. (in Chinese with English abstract) [彭宗波, 蒋英, 蒋菊生 (2013). 海南岛外来植物入侵风险评价指标体系. 生态学杂志, 32, 2029–2034.]
- Qin XS, Zhang RJ, Chen HF, Yan YH, Zheng XL, Xing FW (2008). Alien plants in limestone regions of Hainan Island, China. *Chinese Journal of Ecology*, 27, 1861–1868. (in Chinese with English abstract) [秦新生, 张荣京, 陈红锋, 严岳鸿, 郑希龙, 邢福武 (2008). 海南岛石灰岩地区的外来植物. 生态学杂志, 27, 1861–1868.]
- Rejm  nek M, Richardson DM (1996). What attributes make some plant species more invasive? *Ecology*, 77, 1655–1661.
- Shan JL (2003). Preliminary studies on exotic plant communities in Hainan. *Chinese Journal of Tropical Agriculture*, 23(3), 1–4. (in Chinese with English abstract) [单家林 (2003). 海南岛外来植物群落初探. 热带农业科学, 23(3), 1–4.]
- Shea K, Chesson P (2002). Community ecology theory as a framework for biological invasions. *Trends in Ecology & Evolution*, 17, 170–176.
- Simberloff D, Relva MA, Nuñez MA (2003). Introduced species and management of a *Nothofagus/Austrocedrus* forest. *Environmental Management*, 31, 263–275.
- Sokal RR, Rohlf FJ (1995). *Biometry*. 3rd edn. Freeman, New York. 23–28.
- Stachowicz JJ, Tilman D (2005). Species invasions and the relationships between species diversity, community saturation, and ecosystem functioning. In: Sax DF, Stachowicz JJ, Gaines SD eds. *Species Invasions: Insights into Ecology, Evolution, and Biogeography*. Sinauer Associates, Berlin.
- Stohlgren TJ, Binkley D, Chong GW, Kalkhan MA, Schell LD, Bull KA, Otsuki Y, Newman G, Bashkin M, Son Y (1999). Exotic plant species invade hot spots of native plant diversity. *Ecological Monographs*, 69, 25–46.
- Tang SX, Zhao ZZ, Bi H, Xie GZ (2008). Climate resources in Hainan. *Journal of Hainan Normal University (Natural Science)*, 21, 343–346. (in Chinese with English abstract) [唐少霞, 赵志忠, 毕华, 谢跟踪 (2008). 海南岛气候资源特征及其开发利用. 海南师范大学学报 (自然科学版), 21, 343–346.]
- Tilman D (1997). Community invisibility, recruitment limitation and grassland biodiversity. *Ecology*, 78, 81–92.
- Wang LL (2013). *Effects of the New Countryside Construction on Synarthropic Plant Diversity: A Case Study of Yaodu District of Linfen City*. Master degree dissertation, Shanxi Normal University, Linfen. 1–6. (in Chinese with English abstract) [王丽丽 (2013). 新农村建设对伴人植物多样性的影响——以临汾市尧都区为例. 硕士学位论文, 山西师范大学, 临汾. 1–6.]
- Wang SM, Zhang N, Yu LQ, Zhao RH, Hao P, Li JW, Jiang YS, Sha HF, Liu Y, Zhang ZX (2012). Distribution pattern

- and their influencing factors of invasive alien plants in Beijing. *Acta Ecologica Sinica*, 32, 4619–4628. (in Chinese with English abstract) [王苏铭, 张楠, 于琳倩, 赵容慧, 郝鹏, 李景文, 姜英淑, 沙海峰, 刘义, 张志翔 (2012). 北京地区外来入侵植物分布特征及其影响因素. *生态学报*, 32, 4619–4628.]
- Weber E, Sun SG, Li B (2008). Invasive alien plants in China: Diversity and ecological insights. *Biological Invasions*, 10, 1411–1429.
- Weis JS, Weis P (2003). Is the invasion of the common reed, *Phragmites australis*, into tidal marshes of the Eastern US an ecological disaster? *Marine Pollution Bulletin*, 46, 816–820.
- Williamson M (2001). Can the impact of invasive species be predicted? In: Groves RH, Panetta FD, Virtue JG eds. *Weed Risk Assessment*. CSIRO, Canberra. 20–33.
- Wu XW, Luo J, Chen JK, Li B (2006). Spatial patterns of invasive alien plants in China and its relationship with environmental and antropological factors. *Journal of Plant Ecology* (formerly *Acta Phytoecologica Sinica*), 30, 576–584. (in Chinese with English abstract) [吴晓雯, 罗晶, 陈家宽, 李博 (2006). 中国外来入侵植物的分布格局及其与环境因子和人类活动的关系. *植物生态学报*, 30, 576–584.]
- Yang XB, Chen YK, Li DH, Long WX (2013). *A Checklist of Plants in Hainan*. Science Press, Beijing. (in Chinese) [杨小波, 陈玉凯, 李东海, 龙文兴 (2013). 海南植物名录. 科学出版社, 北京.]
- Zhang S, Guo SL, Guan M, Yin LP, Zhang RX (2010). Diversity differentiation of invasive plants at a regional scale in China and its influencing factors: According to analyses on the data from 74 regions. *Acta Ecologica Sinica*, 30, 4241–4256. (in Chinese with English abstract) [张帅, 郭水良, 管铭, 印丽萍, 张若轩 (2010). 我国入侵植物多样性的区域分异及其影响因素——以74个地区数据为基础. *生态学报*, 30, 4241–4256.]
- Zhong JD, Xu YM, Zeng FH, Liu WG, Chen Y, Liu JX (2014). Analysis on the growth characteristics of *Eupatorium catarium* in different types of habitats. *Guihaia*, 34, 68–73. (in Chinese with English abstract) [钟军弟, 徐意媚, 曾富华, 刘晚苟, 陈燕, 刘金祥 (2014). 不同生境下假臭草生长特征分析. *广西植物*, 34, 68–73.]

责任编辑: 陈子英 责任编辑: 王 葳

附录1 海南岛各市县入侵植物的分布

Supplementary Table 1 Checklist of invasive plant species in surveyed cities/counties of Hainan Island

市/县 City/County	调查到的入侵种 Documented invasive species	总数 Total
海口市 Haikou City	飞机草 <i>Chromolaena odorata</i> , 含羞草 <i>Mimosa pudica</i> , 假臭草 <i>Praxelis clematidea</i> , 马缨丹 <i>Lantana camara</i> , 苏门白酒草 <i>Conyza sumatrensis</i> , 银胶菊 <i>Parthenium hysterophorus</i> , 微甘菊 <i>Mikania micrantha</i> , 假高粱 <i>Pseudosorghum fasciculare</i> , 三裂叶蟛蜞菊 <i>Wedelia trilobata</i> , 凤眼蓝 <i>Eichhornia crassipes</i> , 喜旱莲子草 <i>Alternanthera philoxeroides</i>	11
文昌市 Wenchang City	飞机草 <i>Chromolaena odorata</i> , 含羞草 <i>Mimosa pudica</i> , 假臭草 <i>Praxelis clematidea</i> , 马缨丹 <i>Lantana camara</i> , 喜旱莲子草 <i>Alternanthera philoxeroides</i> , 银胶菊 <i>Parthenium hysterophorus</i> , 三裂叶蟛蜞菊 <i>Wedelia trilobata</i> , 苏门白酒草 <i>Conyza sumatrensis</i> , 微甘菊 <i>Mikania micrantha</i> , 凤眼蓝 <i>Eichhornia crassipes</i>	10
琼海市 Qionghai City	飞机草 <i>Chromolaena odorata</i> , 含羞草 <i>Mimosa pudica</i> , 假臭草 <i>Praxelis clematidea</i> , 马缨丹 <i>Lantana camara</i> , 苏门白酒草 <i>Conyza sumatrensis</i> , 银胶菊 <i>Parthenium hysterophorus</i> , 三裂叶蟛蜞菊 <i>Wedelia trilobata</i> , 假高粱 <i>Pseudosorghum fasciculare</i> , 喜旱莲子草 <i>Alternanthera philoxeroides</i> , 微甘菊 <i>Mikania micrantha</i>	10
万宁市 Wanning City	飞机草 <i>Chromolaena odorata</i> , 含羞草 <i>Mimosa pudica</i> , 假臭草 <i>Praxelis clematidea</i> , 马缨丹 <i>Lantana camara</i> , 苏门白酒草 <i>Conyza sumatrensis</i> , 银胶菊 <i>Parthenium hysterophorus</i> , 三裂叶蟛蜞菊 <i>Wedelia trilobata</i> , 假高粱 <i>Pseudosorghum fasciculare</i> , 喜旱莲子草 <i>Alternanthera philoxeroides</i>	9
陵水黎族自治县 Lingshui Lizu Autonomous County	飞机草 <i>Chromolaena odorata</i> , 含羞草 <i>Mimosa pudica</i> , 假臭草 <i>Praxelis clematidea</i> , 马缨丹 <i>Lantana camara</i> , 苏门白酒草 <i>Conyza sumatrensis</i> , 银胶菊 <i>Parthenium hysterophorus</i> , 三裂叶蟛蜞菊 <i>Wedelia trilobata</i> , 假高粱 <i>Pseudosorghum fasciculare</i> , 喜旱莲子草 <i>Alternanthera philoxeroides</i>	9
保亭黎族苗族自治县 Baoting Lizu-Maozu Autonomous County	飞机草 <i>Chromolaena odorata</i> , 含羞草 <i>Mimosa pudica</i> , 假臭草 <i>Praxelis clematidea</i> , 马缨丹 <i>Lantana camara</i> , 苏门白酒草 <i>Conyza sumatrensis</i> , 银胶菊 <i>Parthenium hysterophorus</i> , 三裂叶蟛蜞菊 <i>Wedelia trilobata</i> , 假高粱 <i>Pseudosorghum fasciculare</i> , 喜旱莲子草 <i>Alternanthera philoxeroides</i>	9
三亚市 Sanya City	飞机草 <i>Chromolaena odorata</i> , 含羞草 <i>Mimosa pudica</i> , 假臭草 <i>Praxelis clematidea</i> , 马缨丹 <i>Lantana camara</i> , 苏门白酒草 <i>Conyza sumatrensis</i> , 银胶菊 <i>Parthenium hysterophorus</i> , 三裂叶蟛蜞菊 <i>Wedelia trilobata</i> , 喜旱莲子草 <i>Alternanthera philoxeroides</i> , 凤眼蓝 <i>Eichhornia crassipes</i>	9
乐东黎族自治县 Ledong Lizu Autonomous County	飞机草 <i>Chromolaena odorata</i> , 含羞草 <i>Mimosa pudica</i> , 假臭草 <i>Praxelis clematidea</i> , 马缨丹 <i>Lantana camara</i> , 苏门白酒草 <i>Conyza sumatrensis</i> , 银胶菊 <i>Parthenium hysterophorus</i> , 三裂叶蟛蜞菊 <i>Wedelia trilobata</i> , 喜旱莲子草 <i>Alternanthera philoxeroides</i> , 凤眼蓝 <i>Eichhornia crassipes</i> , 假高粱 <i>Pseudosorghum fasciculare</i> , 微甘菊 <i>Mikania micrantha</i>	11
东方市 Dongfang City	飞机草 <i>Chromolaena odorata</i> , 含羞草 <i>Mimosa pudica</i> , 假臭草 <i>Praxelis clematidea</i> , 马缨丹 <i>Lantana camara</i> , 苏门白酒草 <i>Conyza sumatrensis</i> , 银胶菊 <i>Parthenium hysterophorus</i> , 三裂叶蟛蜞菊 <i>Wedelia trilobata</i> , 喜旱莲子草 <i>Alternanthera philoxeroides</i> , 微甘菊 <i>Mikania micrantha</i>	9
昌江黎族自治县 Changjiang Lizu Autonomous County	飞机草 <i>Chromolaena odorata</i> , 含羞草 <i>Mimosa pudica</i> , 假臭草 <i>Praxelis clematidea</i> , 马缨丹 <i>Lantana camara</i> , 苏门白酒草 <i>Conyza sumatrensis</i> , 三裂叶蟛蜞菊 <i>Wedelia trilobata</i> , 喜旱莲子草 <i>Alternanthera philoxeroides</i> , 银胶菊 <i>Parthenium hysterophorus</i> , 微甘菊 <i>Mikania micrantha</i> , 凤眼蓝 <i>Eichhornia crassipes</i>	10
白沙黎族自治县 Baisha Lizu Autonomous County	飞机草 <i>Chromolaena odorata</i> , 含羞草 <i>Mimosa pudica</i> , 假臭草 <i>Praxelis clematidea</i> , 马缨丹 <i>Lantana camara</i> , 苏门白酒草 <i>Conyza sumatrensis</i> , 银胶菊 <i>Parthenium hysterophorus</i> , 三裂叶蟛蜞菊 <i>Wedelia trilobata</i> , 喜旱莲子草 <i>Alternanthera philoxeroides</i>	8
澄迈县 Chengmai County	飞机草 <i>Chromolaena odorata</i> , 含羞草 <i>Mimosa pudica</i> , 假臭草 <i>Praxelis clematidea</i> , 马缨丹 <i>Lantana camara</i> , 苏门白酒草 <i>Conyza sumatrensis</i> , 银胶菊 <i>Parthenium hysterophorus</i> , 三裂叶蟛蜞菊 <i>Wedelia trilobata</i> , 假高粱 <i>Pseudosorghum fasciculare</i> , 喜旱莲子草 <i>Alternanthera philoxeroides</i> , 微甘菊 <i>Mikania micrantha</i>	10
临高县 Linggao County	飞机草 <i>Chromolaena odorata</i> , 含羞草 <i>Mimosa pudica</i> , 假臭草 <i>Praxelis clematidea</i> , 马缨丹 <i>Lantana camara</i> , 苏门白酒草 <i>Conyza sumatrensis</i> , 银胶菊 <i>Parthenium hysterophorus</i> , 三裂叶蟛蜞菊 <i>Wedelia trilobata</i> , 假高粱 <i>Pseudosorghum fasciculare</i> , 喜旱莲子草 <i>Alternanthera philoxeroides</i> , 微甘菊 <i>Mikania micrantha</i> , 凤眼蓝 <i>Eichhornia crassipes</i>	11
五指山市 Wuzhishan City	飞机草 <i>Chromolaena odorata</i> , 含羞草 <i>Mimosa pudica</i> , 假臭草 <i>Praxelis clematidea</i> , 马缨丹 <i>Lantana camara</i> , 苏门白酒草 <i>Conyza sumatrensis</i> , 三裂叶蟛蜞菊 <i>Wedelia trilobata</i> , 银胶菊 <i>Parthenium hysterophorus</i> , 凤眼蓝 <i>Eichhornia crassipes</i> , 微甘菊 <i>Mikania micrantha</i>	9
琼中黎族苗族自治县 Qiongzong Lizu Miaozy Autonomous County	飞机草 <i>Chromolaena odorata</i> , 含羞草 <i>Mimosa pudica</i> , 假臭草 <i>Praxelis clematidea</i> , 马缨丹 <i>Lantana camara</i> , 苏门白酒草 <i>Conyza sumatrensis</i> , 三裂叶蟛蜞菊 <i>Wedelia trilobata</i> , 假高粱 <i>Pseudosorghum fasciculare</i> , 喜旱莲子草 <i>Alternanthera philoxeroides</i>	8
定安县 Ding'an County	飞机草 <i>Chromolaena odorata</i> , 含羞草 <i>Mimosa pudica</i> , 假臭草 <i>Praxelis clematidea</i> , 马缨丹 <i>Lantana camara</i> , 苏门白酒草 <i>Conyza sumatrensis</i> , 三裂叶蟛蜞菊 <i>Wedelia trilobata</i> , 银胶菊 <i>Parthenium hysterophorus</i> , 喜旱莲子草 <i>Alternanthera philoxeroides</i> , 微甘菊 <i>Mikania micrantha</i>	9
屯昌县 Tunchang County	飞机草 <i>Chromolaena odorata</i> , 含羞草 <i>Mimosa pudica</i> , 假臭草 <i>Praxelis clematidea</i> , 马缨丹 <i>Lantana camara</i> , 苏门白酒草 <i>Conyza sumatrensis</i> , 银胶菊 <i>Parthenium hysterophorus</i> , 三裂叶蟛蜞菊 <i>Wedelia trilobata</i> , 喜旱莲子草 <i>Alternanthera philoxeroides</i> , 微甘菊 <i>Mikania micrantha</i>	9
儋州市 Danzhou City	飞机草 <i>Chromolaena odorata</i> , 含羞草 <i>Mimosa pudica</i> , 假臭草 <i>Praxelis clematidea</i> , 马缨丹 <i>Lantana camara</i> , 苏门白酒草 <i>Conyza sumatrensis</i> , 银胶菊 <i>Parthenium hysterophorus</i> , 三裂叶蟛蜞菊 <i>Wedelia trilobata</i> , 喜旱莲子草 <i>Alternanthera philoxeroides</i> , 假高粱 <i>Pseudosorghum fasciculare</i> , 凤眼蓝 <i>Eichhornia crassipes</i> , 微甘菊 <i>Mikania micrantha</i>	11