

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1787.2023.03.006

海口城市空间差异对外来入侵植物分布格局的影响

李岚曦¹, 何荣晓^{1,2*}, 杨帆^{1,2}, 陈俊¹, 曹凌仪¹

¹海南大学热带农林学院, 海南海口 570228;

²热带特色林木花卉遗传与种质创新教育部重点实验室, 海南海口 570228

摘要:【目的】城市是外来入侵物种引入和二次传播的主要地区, 城市环境中的入侵植物会对生物多样性和社会经济造成影响。阐明城市空间差异对入侵植物分布格局的影响, 可为海口市生物入侵科学管理提供参考。【方法】以海口市主城区为研究区域, 通过对 461 块随机样方的调查, 记录外来入侵植物种类、盖度、平均株高和样方环境信息。从入侵植物的样方发生率、物种组成、丰富度和多度等方面, 比较其在城市化梯度和土地利用类型上的发生差异和分布特征。【结果】(1) 调查共记录外来入侵植物 36 种, 隶属 13 科 31 属, 其中菊科为优势科; 以一年生和原产地为热带美洲的草本居多。(2) 城市核心区和城市边缘区的入侵植物丰富度显著高于城市郊区, 但城市郊区的多度显著高于城市核心区和城市边缘区。(3) 在居住区、交通用地、空闲地、商业/单位/工矿用地中, 入侵植物的发生概率与不透水面百分比呈负相关, 而在林地、农业用地和城市公共绿地中, 入侵植物更容易发生在不透水面百分比比较高的区域。【结论】城市化梯度和土地利用类型均显著影响入侵植物的分布格局, 不透水面的比例作为一个重要的解释因子, 可以为入侵植物的发生提供预判参考。

关键词: 城市化梯度; 土地利用类型; 植物入侵; 不透水面; 入侵发生概率



开放科学标识码
(OSID 码)

Effects of urban spatial differences in Haikou on the distribution pattern of invasive alien plants

LI Lanxi¹, HE Rongxiao^{1,2*}, YANG Fan^{1,2}, CHEN Jun¹, CAO Lingyi¹

¹School of Tropical Agriculture and Forestry, Hainan University, Haikou, Hainan 570228, China;

²Key Laboratory of Genetics and Germplasm Innovation of Tropical Special Forest Trees and Ornamental Plants, Ministry of Education, Haikou, Hainan 570228, China

Abstract:【Aim】Cities are the main areas for the introduction and secondary spread of invasive alien species. Invasive plants in urban environments impact biodiversity and the social economy. To clarify the influence of urban spatial differences on the distribution patterns of invasive plants can provide a reference for scientific management.【Method】Based on the survey of 461 random sample plots in Haikou City, the species, coverage, average height and environmental information of invasive alien plants were recorded. The occurrence differences and distribution characteristics of invasive plants on different urbanization gradient and land use types were compared in terms of sample plot incidence, species composition, richness, and abundance.【Result】A total of 36 species of invasive alien plants were recorded, belonging to 13 families and 31 genera. Compositae was the dominant family, and most invasive plants were annual and native to tropical America. The richness was significantly higher in urban cores and urban fringes than in urban suburbs; however, the abundance was significantly higher in urban suburbs than in urban cores and urban fringes. The probability of invasive plant occurrence was negatively correlated with the proportion of impervious surface areas in residential area, transportation land, open land, and commercial, institutional, industrial, and mining areas, respectively. However, in woodlands, agricultural lands, and public green spaces, invasive plants were more likely to occur in areas with higher open surfaces, respectively.【Conclusion】Both urbanization gradient and land use type significantly affected the distribution pattern of invasive plants. As an important explanatory factor, the proportion of impervious surface areas could provide a predictive reference for the occurrence of invasive plants.

Key words: urbanization gradient; land use type; plant invasion; impervious surface area; invasion occurrence probability

收稿日期(Received): 2022-08-16 接受日期(Accepted): 2022-11-20

基金项目: 海南省自然科学基金(421MS015)

作者简介: 李岚曦, 女, 硕士研究生。研究方向: 城市入侵植物多样性。E-mail: hermitMist@163.com

* 通信作者(Author for correspondence), 何荣晓, E-mail: rx.he@hainanu.edu.cn

全球贸易和交通运输的发展引发了各地的外来物种入侵问题,这对当地的生态系统服务、环境治理和人类健康构成了威胁(Rai & Singh, 2020)。入侵灾害的暴发还造成管理成本增加,产生直接和间接经济损失(闫小玲等, 2012)。研究普遍认为,外来入侵物种会破坏当地生态系统,从而导致本地生物多样性的损失(陈宝明等, 2016),但这种入侵现象对生态系统的负面影响存在差异(闫小玲等, 2014)。

城市化造成的景观斑块破碎化、植物引种幅度加大、植物配置结构单一等现象加速了外来入侵植物在城市环境中的扩散(蔡好和董丽, 2017; 毛齐正等, 2013),使城市成为外来入侵物种引入和二次传播的主要地区(Padayachee *et al.*, 2017)。据统计,城市环境中非本地物种已占据全球城市植物物种的 28%(Aronson *et al.*, 2014),其中外来入侵物种在城市绿地生态系统中具有较高的比例(李净等, 2017; 刘时彦等, 2021),使城市生态系统面临不同程度的外来物种入侵问题。

城市基础设施建设密度和人为干扰强度的差异使其空间布局呈现梯度特征(McDonnell & Hahs, 2008),这种梯度特征与土地利用格局发生变化有关(毛齐正等, 2013)。在人为干扰下,随着原有生境破碎化和城市地面硬化,以植被为主的自然景观不断减少,城市呈现极高的空间异质性(王效科等, 2020)。已有研究表明,城市生态系统中的景观

异质性可能导致外来植物的入侵过程发生显著变化(Wang *et al.*, 2019),入侵植物在异质环境的分布呈现种类差异化并表现出空间分布规律性(Godefroid & Ricotta, 2018; Štajerová *et al.*, 2017)。因此,掌握入侵植物在城市异质环境的分布规律,可以为生物入侵的科学管理提供决策信息。

海口市作为我国重要的热带岛屿城市,属于典型的热带海洋性季风气候,光、温、水、土壤条件均较好,具有植物适宜的生长环境,入侵植物繁殖体来源及扩散途径多样,且其正在经历快速的城市扩张,城市居民数和建成区面积持续增长(雷金睿等, 2018),这些都为外来植物入侵提供了条件。基于上述背景,本研究选择海南省海口市为研究区域,调查分析城乡梯度上入侵植物的物种组成及分布规律,对比各土地利用类型中入侵物种的发生状况和组成差异,探讨海口市入侵植物分布的成因和存在的风险,以为海口市生物入侵管理提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

研究区位于海南省海口市(图 1),其陆地面积约 2297 km²,截至 2020 年底,常住人口约 287 万(海口市统计局, 2021)。本研究选择海口市主城区为研究范围(约 563 km²),并根据建成程度划分为城市核心区、城市边缘区和城市郊区。

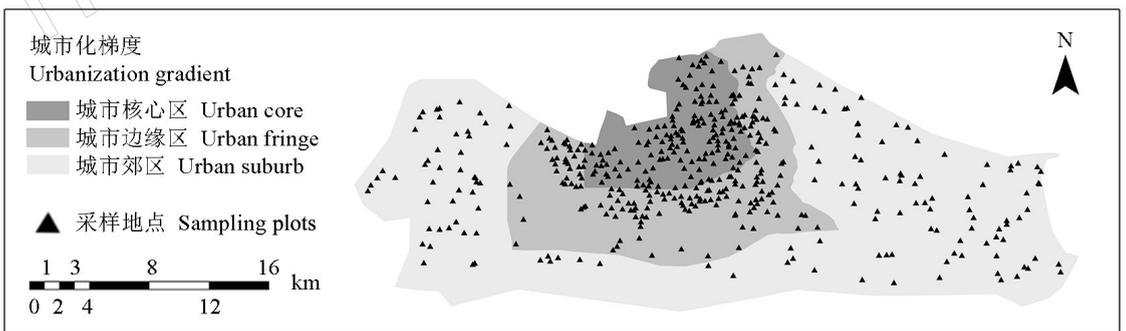


图 1 研究区城市化梯度类型的划分和采样点

Fig.1 The classification of urbanization gradient types in study area and sampling plots

1.2 样方调查与数据收集

采用随机抽样的方式,利用 ArcGIS 地图(ES-RI, version 10.0)和 Google Earth (GE)在海口市主城区内布设样方 470 个。以点位坐标为圆心建立半径为 12 m 的样方,记录样方内的土地利用类型,土地覆盖类型及其百分比,草本植物种类、面积及

平均株高。由于存在物理阻隔及管理规定而无法进入的地块,最终布设有效样方 461 个。

对记录到的土地利用类型和数量进行归类,将样方数据集划分为居住区用地、城市公共绿地、交通用地、农业用地、林地、空闲地、商业/单位/工矿用地,每类用地分别涵盖 106、35、52、48、45、73 和

102 块样方。将建筑、水泥、地砖、沥青、木材等计为不透水覆盖面,将土壤、沙石、草坪、草本、灌木、乔木、水面、荒草地等计为透水覆盖面,不透水覆盖面在样方所占的比例即为不透水面百分比。

根据《中国入侵植物名录》(马金双,2013)判断记录到的物种是否为外来入侵物种,并区分其入侵等级(一级为恶性入侵种,二级为严重入侵种,三级为局部入侵种,四级为一般入侵种);根据《华南归化植物暨入侵植物》(曾宪锋,2018)划分其危害程度(重度、中度、轻度);根据中国外来入侵信息系统网站(<http://www.iplant.cn/ias/protlist>)和《中国外来入侵植物彩色图鉴》(严靖等,2016)查询其生活型及原产地;并查看其是否列入中华人民共和国政府发布的中国外来入侵物种名单(国家环境保护总局,2003;中华人民共和国环境保护部,2010;中华人民共和国环境保护部和中国科学院,2014,2016)。

1.3 数据处理

通过计算外来入侵植物的重要值(王育松和上官铁梁,2010)来比较其优势程度,重要值(importance value, IV) = $(C' + H') / 2 \times 100\%$,式中 C' 和 H' 分别代表相对盖度和相对株高。入侵植物发生的丰富度以样方中入侵植物的物种数表示,多度以样方中所有入侵植物的总盖度表示。

采用韦恩关系图表达入侵植物在城市化梯度及土地利用类型之间的相交关系,利用 Kruskal Wallis 秩和检验比较入侵植物发生的多度及丰富度的总体差异,再使用 Nemenyi 分析进行组间多重比较。对外来入侵植物在样方中的有无数据与城市不透水百分比进行相关性分析,再与样方不透水百分比进行回归分析,并将城市化梯度类型、土地利用类型及变量间的相互作用纳入模型中,采用似然比检验来评估变量的重要性。以上分析在 R 程序的"venn" "PMCMR"和"lmtest"软件包中完成。

2 结果与分析

2.1 海口市入侵植物区系和优势种分析

所有样方共调查到外来入侵植物 36 种,隶属 13 科 31 属,其中,菊科种类最多,有 12 种;随后依次为禾本科和苋科,分别有 5 和 4 种。原产地分析结果显示,来自美洲的入侵植物最多,为 31 种,其中,有 14 种来自热带美洲,4 种来自于非洲,1 种来自于大洋洲(图 2)。

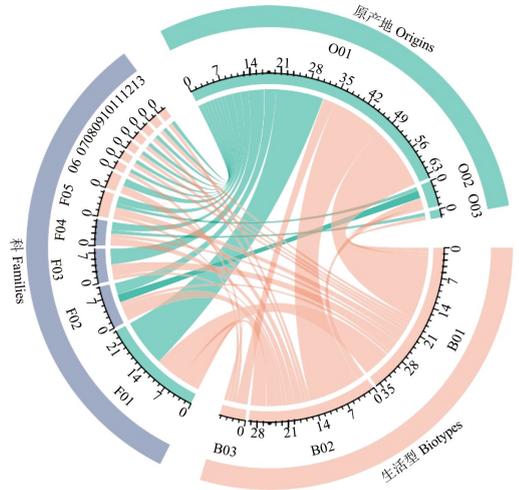


图 2 生活型、原产地和科属之间关系的弦图

Fig.2 Chord diagram denoting the relationships among the biotypes, place of origin, and families

B01: 一年生; B02: 多年生; B03: 一年生或多年生; O01: 美洲 (主要为热带美洲); O02: 非洲; O03: 大洋洲至太平洋岛屿; F01: 菊科; F02: 禾本科; F03: 苋科; F04: 豆科; F05: 大戟科; F06: 锦葵科; F07: 天南星科; F08: 白花菜科; F09: 唇形科; F10: 紫茉莉科; F11: 雨久花科; F12: 茜草科; F13: 马鞭草科。
B01: Annual; B02: Perennial; B03: Annual or perennial; O01: America (mainly tropical America); O02: Africa; O03: Oceania to Pacific Islands; F01: Asteraceae; F02: Poaceae; F03: Amaranthaceae; F04: Fabaceae; F05: Euphorbiaceae; F06: Malvaceae; F07: Araceae; F08: Cleomaceae; F09: Lamiaceae; F10: Nyctaginaceae; F11: Pontederiaceae; F12: Rubiaceae; F13: Verbenaceae.

飞机草 *Chromolaena odorata* (L.) R. M. King & H. Rob.、南美蟛蜞菊 *Sphagneticola trilobata* (L.) Pruski、含羞草 *Mimosa pudica* L.、假臭草 *Praxelis clematidea* Cassini、小飞蓬 *Erigeron canadensis* L.、白花鬼针草 *Bidens pilosa* L. 和银胶菊 *Parthenium hysterophorus* L. 出现最为频繁, 分别出现 56、35、22、19、17、14 和 13 次。且飞机草在林地和空闲地出现频次最高, 分别为 20 和 17 次; 南美蟛蜞菊多出现在空闲地 (10 次)、城市公共绿地 (8 次) 和商业/单位/工矿用地 (7 次); 其他 5 种植物多出现在空闲地。大藻 *Pistia stratiotes* L.、飞机草、南美蟛蜞菊、假臭草、皱子白花菜 *Cleome rutidosperma* DC. Prodr. 是重要值较高的 5 种入侵植物 (图 3)。

2.2 城市化梯度上的入侵植物对比分析

不同城市化梯度上的样方入侵发生率统计结果 (图 4) 表明, 城市郊区 (47%) 大于城市边缘区 (30%) 和城市核心区 (20%)。从图 5 可以看出, 城市核心区、城市边缘区、城市郊区分别调查到 29、30、18 种入侵植物。相对于城市郊区, 城市核心区和城市边缘区的入侵植物种类更多, 物种交集数也更大, 有 25 种共同发生的入侵植物。

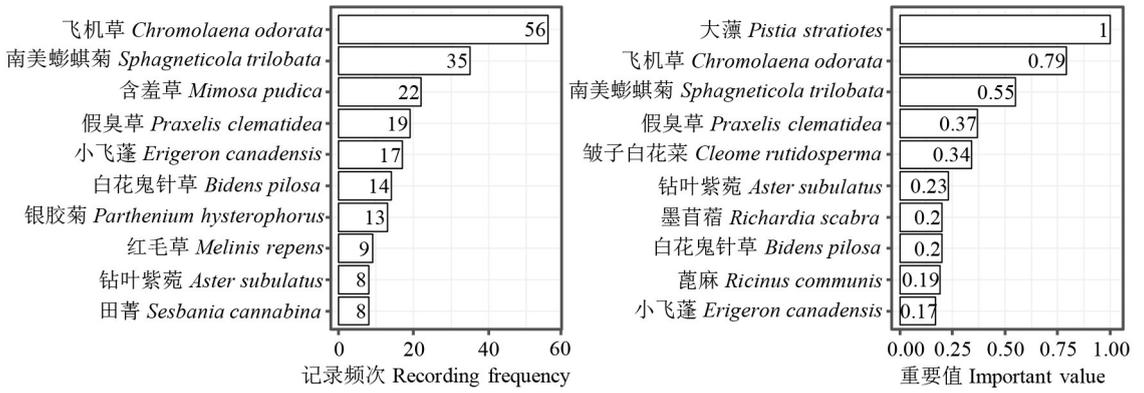


图 3 外来入侵植物的记录频次和重要值

Fig.3 Recording frequency and important value of invasive alien plants

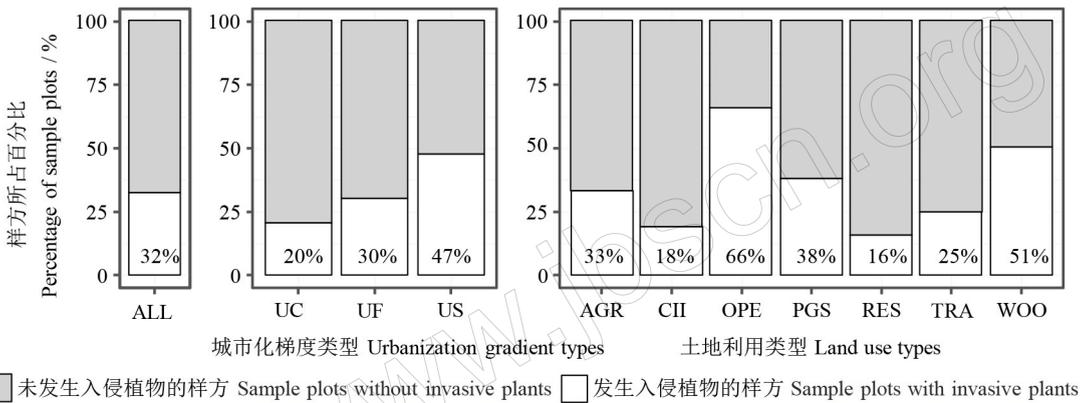


图 4 发生与未发生入侵植物的样方百分比

Fig.4 Percentage of sample plots with and without invasive plants

ALL: 所有样方; UC: 城市核心区; UF: 城市边缘区; US: 城市郊区; AGR: 农业用地; CII: 商业/单位/工矿用地; OPE: 空闲地; PGS: 城市公共绿地; RES: 居住区用地; TRA: 交通用地; WOO: 林地。

ALL: All sample plots; UC: Urban core; UF: Urban fringe; US: Urban suburb; AGR: Agricultural land; CII: Commercial/institution/industrial and mining areas; OPE: Open land; PGS: Urban public green areas; RES: Residential areas; TRA: Transportation land; WOO: Woodland.

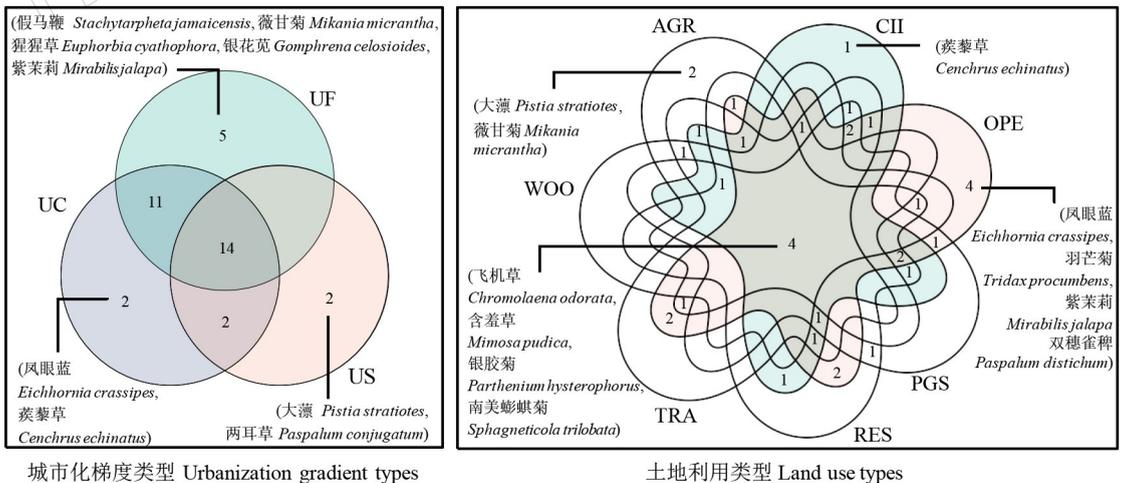


图 5 样方物种类型维恩图

Fig.5 Venn diagram of species in sample plots

UC: 城市核心区; UF: 城市边缘区; US: 城市郊区; AGR: 农业用地; CII: 商业/单位/工矿用地; OPE: 空闲地; PGS: 城市公共绿地; RES: 居住区用地; TRA: 交通用地; WOO: 林地。

UC: Urban core; UF: Urban fringe; US: Urban suburb; AGR: Agricultural land; CII: Commercial/institution/industrial and mining areas; OPE: Open land; PGS: Urban public green areas; RES: Residential areas; TRA: Transportation land; WOO: Woodland.

入侵植物的丰富度和多度在城市化梯度上存在差异。城市核心区和城市边缘区的入侵植物丰富度和多度无明显差异($P>0.05$),但它们与城市郊区均有明显差异($P<0.05$) (图6)。城市核心区

($r=2.69$)和城市边缘区($r=2.27$)的丰富度显著高于城市郊区($r=1.36$),但城市郊区($a=84.03$)的多度显著高于城市核心区($a=50.01$)和城市边缘区($a=37.82$)。

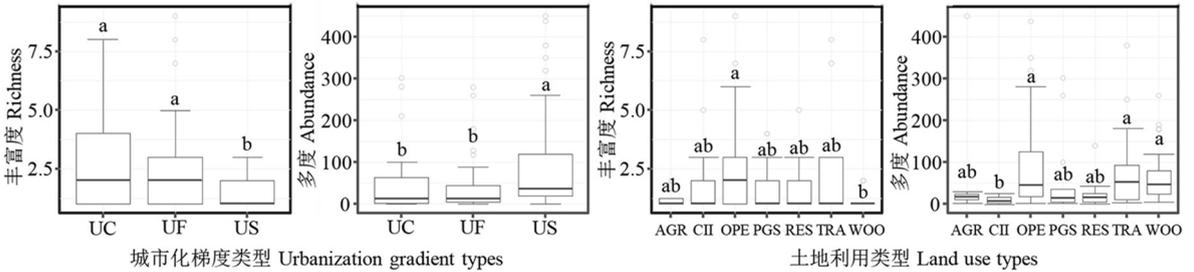


图6 各城市化梯度和土地利用类型的入侵植物丰富度及多度

Fig.6 Invasive plant richness and abundance among urbanization gradient or land use type

UC:城市核心区;UF:城市边缘区;US:城市郊区;AGR:农业用地;CII:商业/单位/工矿用地;OPE:空闲地;PGS:城市公共绿地;RES:居住区用地;TRA:交通用地;WOO:林地。不同小写字母表示不同城市化梯度或不同土地利用类型间差异显著($P<0.05$)。

UC: Urban core; UF: Urban fringe; US: Urban suburb; AGR: Agricultural land; CII: Commercial/ institution/ industrial and mining areas; OPE: Open land; PGS: Urban public green areas; RES: Residential areas; TRA: Transportation land; WOO: Woodland. Different lowercase letters indicate significant differences among different urbanization gradient or land use types ($P<0.05$).

2.3 不同土地利用类型的入侵植物对比分析

在不同土地利用类型样方中,空闲地(66%)和林地(51%)发生入侵植物的比率最高,居住区用地(16%)和商业/单位/工矿用地(18%)比率最低(图4)。飞机草、含羞草、银胶菊、南美蟛蜞菊为7种用地类型的交集物种,大藻和薇甘菊 *Mikania micrantha* H. B. K.仅在农业用地,蒺藜草 *Cenchrus echinatus* L.仅在商业/单位/工矿用地,凤眼莲 *Eichhornia crassipes* (Mart.) Solme、羽芒菊 *Tridax procumbens* L.、紫茉莉 *Mirabilis jalapa* L.、双穗雀稗 *Paspalum distichum* L.仅在空闲地。空闲地和商业/单位/工矿用地的入侵植物种类最多,分别为27和20种,林地最少且只有5种,交通用地、居住区用地、城市公共绿地和农业用地分别有17、16、13和12种外来入侵植物(图5)。

Kruskal-Wallis 检验显示,不同土地利用类型的入侵植物丰富度和多度差异显著($P<0.001$)。Nemenyi 分析组间差异性,发现交通用地及林地与商业/单位/工矿用地的丰富度存在显著差异;空闲地和林地的丰度存在显著差异(图6)。交通用地和空闲地的入侵植物丰富度及多度最高;林地丰富度最低,但其多度排名第三;商业/单位/工矿用地的多度最低。

2.4 不透水面百分比与入侵植物发生概率的关联性分析

入侵植物的发生概率与不透水面百分比呈显著

负相关(图7),说明城市不透水面可能对入侵植物的定殖存在间接的抑制作用。逻辑回归模型结果显示,城市化梯度类型对模型影响较小,且城市土地利用类型与不透水面百分比之间存在交互影响(表1)。入侵植物的发生概率与不透水面百分比的负相关性并不存在于每一种土地利用类型中,比如在农业用地、城市公共绿地和林地呈现了相反规律(图8)。

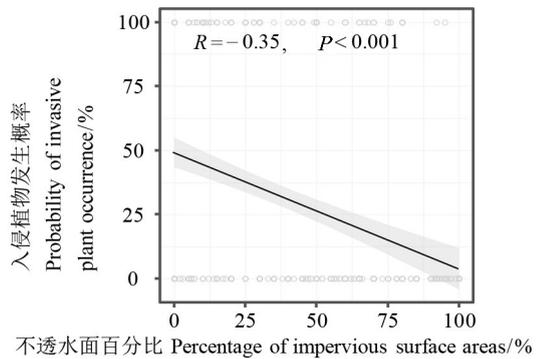


图7 不透水面百分比与入侵植物发生概率的相关性

Fig.7 Graph of correlation between percentage of impervious surface areas and probability of invasive plants occurrence

3 讨论

3.1 海口市外来入侵植物特点

本次调查到的36种入侵草本植物中,有18种为一年生草本植物,其生长周期短、世代更新快,具有快速响应新环境的特性(席璐璐等,2021)。海南与热带美洲纬度相近、地理环境相似,有利于原产

于热带美洲的外来物种通过化感作用对竞争物种产生影响(段婷婷等,2022;史生晶等,2019)。据统计,一级恶性外来入侵草本和二级严重外来入侵草本共有 26 种,在华南地区表现为重度危害草本的有 21 种,被列入国家外来入侵物种的有 14 种。有研究结果显示,菊科是中国入侵植物的主要植物科之一(张斯斯和肖宜安,2013),在本研究区域内

的高风险入侵草本同样以菊科植物居多。

飞机草、南美蓟、假臭草、小飞蓬、白花鬼针草和银胶菊均是发生频次和重要值较高的植物。它们在多项关于海南入侵风险调查与评估中被列为高风险植物(罗文启等,2015;彭宗波等,2013),这些物种大多果实数量大且轻,或是具有无性繁殖的特点,对海南当地生态系统造成了负面影响。

表 1 模型中其他变量的似然比检验评估结果

Table 1 Evaluation and results of likelihood ratio test for other variables in the model

变量 Variable	卡方 Chi-square	自由度 df	显著性 P-value
城市化梯度类型 Urbanization gradient types	2.825	2	0.2436
土地利用类型 Land use types	19.594	6	0.0033 **
不透水面百分比 × 城市化梯度类型 Percentage of impervious surface areas × urbanization gradient types	1.861	2	0.3944
不透水面百分比 × 土地利用类型 Percentage of impervious surface areas × land use types	11.793	6	0.0668

用似然比检验结果来表征逻辑回归模型中其他各变量的显著性; ** 表示显著性水平 $P < 0.01$ 。

The results of likelihood ratio test were used to characterize the significance of other variables in the logistic regression model; ** indicates the significance at the $P < 0.01$ level.

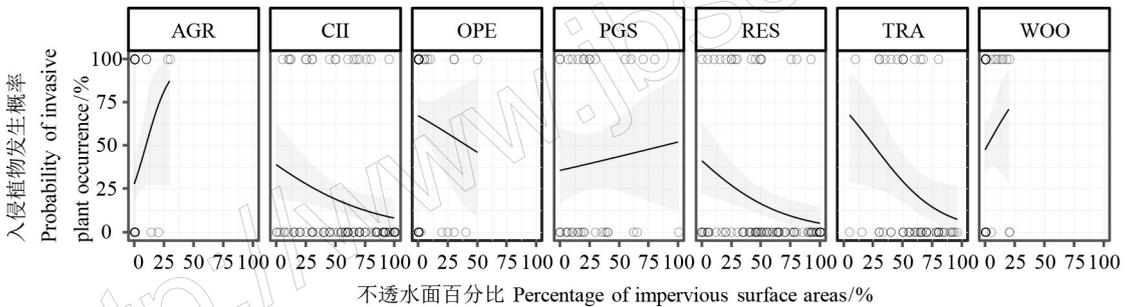


图 8 各土地利用类型的不透水面百分比与入侵植物发生概率的关系

Fig.8 Relationship between percentage of impervious surface areas and probability of invasive plants occurrence in land use types

AGR; 农业用地; CII; 商业/单位/工矿用地; OPE; 空闲地; PGS; 城市公共绿地; RES; 居住区用地; TRA; 交用地; WOO; 林地。
 AGR: Agricultural land; CII: Commercial/institution/industrial and mining areas; OPE: Open land; PGS: Urban public green areas;
 RES: Residential areas; TRA: Transportation land; WOO: Woodland.

3.2 城市化梯度差异对植物入侵的影响

随着海口城市化梯度升高,入侵植物的丰富度增加,城市核心区和边缘区的入侵植物丰富度显著高于城市郊区。由于城市人口密集,城市建设发展过程中引起的人类活动和交通运输导致了大量非本地物种的引入,造成较大的繁殖体压力(Potgieter *et al.*, 2020)。在北京市典型公园的外来入侵植物分布格局(赵云峰等,2022)、以色列海法市的植物调查研究(Malkinson *et al.*, 2018)中也呈现相同规律。此外,海口入侵植物的发生率随着城市化梯度的降低而增加,城市郊区的多度显著高于城市核心区和边缘区。相比于郊区,核心区和边缘区主要以商业、居民用地为主,形成多种多样的破碎化生境和高比例不透水面,阻隔大量入侵植物繁殖体的传

播和定殖(黄金夏等,2022),使得入侵植物繁殖程度受限;而郊区存在较多的农林地,且不透水面比例较低,存在更多的可入侵地面积,易于成片传播繁衍。

3.3 土地利用类型差异对植物入侵的影响

入侵植物的发生概率与不同土地利用类型的不透水面百分比有关,样方尺度上的环境因子能更好地解释入侵植物空间分布格局(DeParis *et al.*, 2022)。总体来说,在人为活动较强的生境中,入侵植物发生概率与不透水面积占比成负相关,而在人为活动相对较弱的生境,两者表现为正相关。不透水面是城市地区的特点,反映了城市化程度,是影响城市生态环境主要因素(辜寄蓉和李琳,2016)。大量不透水面覆盖自然地表会导致包括入侵植物

在内的植物生存空间被压缩(李祖政等, 2018), 这种现象常表现在人为活动或管理较强的生境, 如居住区用地、交通过地、空闲地和商业/单位/工矿用地。而入侵植物在林地、农业用地和城市公共绿地不透水面百分比高的区域发生概率较高, 这3种土地利用类型本身具有较高比例的自然地表, 存在不透水面的区域往往为交通或设施管理等用地。如在本研究中林地入侵植物丰富度最低, 但51%的林地样方中出现入侵植物, 入侵的林地大多数只在林缘道路有飞机草分布, 说明大部分林地具有种植密度大、郁闭度高的特点, 能够有效抑制入侵物种扩散和定殖(李嘉昊等, 2018; Urbanowicz *et al.*, 2018), 但一些林缘存在不透水面的林地, 可以存活少数竞争性强的入侵植物。具有不透水面的农业用地样方通常包含了少量的农村道路或设施农用地, 这些生境上的入侵植物往往不会被主动清除, 为其提供了连续传播和繁殖的周期(张岳等, 2022)。对于城市绿地而言, 不透水面百分比高的区域一般为管理用房、人行小径和广场等, 与植物群落全覆盖的样方相比, 这些地区周边人为干扰较大, 群落结构稳定性较低, 因此具有更高的入侵植物发生概率(郎金顶等, 2008)。

3.4 研究展望

在城市的发展建设中, 除了绿地建设及园艺引种, 许多人为活动也无意中导致大量非本地物种的引入, 城市成为外来物种定殖的初始地(Mclean *et al.*, 2017)。城市提供了不同于自然生态系统的独特生境, 它在某种程度上减少了物种竞争, 为一些入侵植物提供了可能的生存空间和机会(Cadotte *et al.*, 2017)。城市中的许多廊道, 如城市街道(张楠等, 2018)、城市绿道(蔡好和董丽, 2017)或生态退化的城市河流(Aronson *et al.*, 2017), 通常都有助于增加入侵植物传播速度和扩散距离。因此, 在未来研究中, 除了揭示入侵植物在城市不同空间尺度下的分布规律, 更应进一步探究各种城市生态廊道对入侵植物扩散的影响, 并重点关注和预测生态脆弱的地区, 以防入侵植物的繁衍和传播扩散。

参考文献

蔡好, 董丽, 2017. 北京市绿道入侵植物扩散的外界影响因子研究. *城市建筑* (36): 25-29.
陈宝明, 彭少麟, 吴秀平, 王鹏龙, 马建霞, 2016. 近20年

外来生物入侵危害与风险评估文献计量分析. *生态学报*, 36(20): 6677-6685.
段婷婷, 何文亮, 杨嘉琦, 林梓颖, 赖广志, 卢柏铨, 吴钿, 李进, 2022. 湛江市外来植物入侵状况. *生物安全学报*, 31(3): 245-251.
辜寄蓉, 李琳, 2016. 成都市不透水面时空变化分析. *环境与可持续发展*, 41(4): 211-216.
国家环境保护总局, 2003. 关于发布中国第一批外来入侵物种名单的通知. (2003-01-10) [2022-07-29]. https://www.mee.gov.cn/gkml/zj/wj/200910/t20091022_172155.htm.
海口市统计局, 2021. 海口市第七次全国人口普查公报. (2021-05-13) [2022-07-29]. <http://tjj.haikou.gov.cn/hkstjj/tjpc/202105/658b9ee344f846f8afb479395f24d03c.shtml>.
中华人民共和国环境保护部, 2010. 关于发布中国第二批外来入侵物种名单的通知. (2010-01-07) [2022-07-29]. https://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bwj/201001/t20100126_184831.htm.
中华人民共和国环境保护部, 中国科学院, 2014. 关于发布中国外来入侵物种名单(第三批)的公告. (2014-08-20) [2022-07-29]. https://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bgg/201408/t20140828_288367.htm.
中华人民共和国环境保护部, 中国科学院, 2016. 关于发布《中国自然生态系统外来入侵物种名单(第四批)》的公告. (2016-12-20) [2022-07-29]. https://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bgg/201612/t20161226_373636.htm.
黄金夏, 易雪梅, 贾伟涛, 刘莹, 张松林, 李小红, 吴胜军, 马茂华, 2022. 三峡库区消落带外来植物入侵与景观基质组成结构的关联性. *应用生态学报*, 33(2): 477-488.
郎金顶, 刘艳红, 裴伟, 2008. 北京市建成区绿地植物物种来源分析. *植物学通报*, 25(2): 195-202.
雷金睿, 陈宗铸, 杨琦, 陈小花, 2018. 基于GIS的海口市建成区景观格局分析. *福建林业科技*, 45(2): 78-82
李嘉昊, 李东海, 赵瑞白, 杨小波, 罗文启, 张凯, 吴庭天, 2018. 海南省主要陆生入侵植物在不同生境类型的适生性. *热带生物学报*, 9(2): 225-233.
李净, 赵娟娟, 陈珊珊, 陈春娣, 张启翔, 2017. 厦门市城市外来植物的种类构成. *生态环境学报*, 26(1): 20-26.
李祖政, 尤海梅, 王梓懿, 2018. 徐州城市景观格局对绿地植物多样性的多尺度影响. *应用生态学报*, 29(6): 1813-1821.
刘时彦, 赵娟娟, 宋晨晨, 李明娟, 江南, 陈静, 2021. 重庆市主城建成区主要绿地的植物种类构成研究. *生态科学*, 40(6): 89-98.
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(5): 486-500.
马金双, 2013. 中国入侵植物名录. 北京: 高等教育出版社.
毛齐正, 马克明, 邬建国, 唐荣莉, 张育新, 罗上华, 宝乐, 蔡小虎, 2013. 城市生物多样性分布格局研究进展. *生态*

- 学报, 33(4): 1051-1064.
- 彭宗波, 蒋英, 蒋菊, 2013. 海南岛外来植物入侵风险评价指标体系. *生态学杂志*, 32(8): 2029-2034.
- 史生晶, 王桔红, 陈文, 陈学林, 2019. 入侵植物鬼针草和鳢肠的化感作用及其入侵性研究. *生态环境学报*, 28(12): 2373-2380.
- 王效科, 苏跃波, 任玉芬, 张红星, 孙旭, 欧阳志云, 2020. 城市生态系统: 高度空间异质性. *生态学报*, 40(15): 5103-5112.
- 王育松, 上官铁梁, 2010. 关于重要值计算方法的若干问题. *山西大学学报(自然科学版)*, 33(2): 312-316.
- 席璐璐, 缙倩倩, 王国华, 宋冰, 2021. 荒漠绿洲过渡带一年生草本植物对干旱胁迫的响应. *生态学报*, 41(13): 5425-5434.
- 严靖, 闫小玲, 马金双, 2016. *中国外来入侵植物彩色图鉴*. 上海: 上海科学技术出版社.
- 闫小玲, 刘全儒, 寿海洋, 曾宪锋, 张勇, 陈丽, 刘演, 马海英, 齐淑艳, 马金双, 2014. 中国外来入侵植物的等级划分与地理分布格局分析. *生物多样性*, 22(5): 667-676.
- 闫小玲, 寿海洋, 马金双, 2012. 中国外来入侵植物研究现状及存在的问题. *植物分类与资源学报*, 34(3): 287-313.
- 曾宪锋, 2018. *华南归化植物暨入侵植物*. 北京: 科学出版社.
- 张楠, 董丽, 王颢, 王阔, 2018. 北京城市生态廊道草本植物组成及分布格局. *中国园林*, 34(6): 94-99.
- 张斯斯, 肖宜安, 2013. 中国外来入侵植物生活型与性系统多样性. *植物研究*, 33(3): 351-359.
- 张岳, 张国良, 王忠辉, 宋振, 武永峰, 左栋清, 潘会, 刘贤飞, 付卫东, 2022. 贵州省关岭县和惠水县农业外来入侵植物调查与分析. *中国农业气象*, 43(9): 704-719.
- 赵云峰, 赵彩云, 朱金方, 李飞飞, 杨秀清, 郭朝丹, 2022. 北京市典型公园外来入侵植物分布格局研究. *生态学报*, 42(9): 1-10.
- ARONSON M F, LA SORTE F A, NILON C H, KATTI M, GODDARD M A, LEPCZYK C A, WARREN P S, WILLIAMS N S, CILLIERS S, CLARKSON B, DOBBS C, DOLAN R, HEDBLUM M, KLOTZ S, KOOIJMANS J L, KUHN I, MACGREGOR-FOORS I, MCDONNELL M, MORTBERG U, PYSEK P, SIEBERT S, SUSHINSKY J, WERNER P, WINTER M, 2014. A global analysis of the impacts of urbanization on bird and plant diversity reveals key anthropogenic drivers. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 281: 20133330.
- ARONSON M F J, PATEL M V, O'NEILL K M, 2017. Urban riparian systems function as corridors for both native and invasive plant species. *Biological Invasions*, 19(12): 3645-3657.
- CADOTTE M W, YASUI S L E, LIVINGSTONE S, MACIVOR J S, 2017. Are urban systems beneficial, detrimental, or in different for biological invasion? *Biological Invasions*, 19(12): 3489-3503.
- DEPARIS M, LEGAY N, ISSELIN-NONDEDEU F, BONTHOUX S, 2022. Considering urban uses at a fine spatial resolution to understand the distribution of invasive plant species in cities. *Landscape Ecology*, 37(4): 1145-1159.
- GODEFROID S, RICOTTA C, 2018. Alien plant species do have a clear preference for different land uses within urban environments. *Urban Ecosystems*, 21(6): 1189-1198.
- MALKINSON D, KOPEL D, WITTENBERG L, 2018. From rural-urban gradients to patch-matrix frameworks: plant diversity patterns in urban landscapes. *Landscape and Urban Planning*, 169: 260-268.
- MCDONNELL M J, HAHS A K, 2008. The use of gradient analysis studies in advancing our understanding of the ecology of urbanizing landscapes: current status and future directions. *Landscape Ecology*, 23(10): 1143-1155.
- MCLEAN P, GALLIEN L, WILSON J R U, GAETNER M, RICHARDSON D M, 2017. Small urban centres as launching sites for plant invasions in natural areas: insights from South Africa. *Biological Invasions*, 19(12): 3541-3555.
- PADAYACHEE A L, IRLICH U M, FAULKNER K T, GAETNER M, PROCHES S, WILSON J R U, ROUGET M, 2017. How do invasive species travel to and through urban environments? *Biological Invasions*, 19(12): 3557-3570.
- POTGIETER L J, DOUWES E, GAERTNER M, MEASEY J, PAAP T, RICHARDSON D M, 2020. Biological invasions in south africa's urban ecosystems: patterns, processes, impacts, and management. *Biological Invasions in South Africa*, 24: 275-309.
- RAI P, SINGH J S, 2020. Invasive alien plant species: their impact on environment, ecosystem services and human health. *Ecological Indicators*, 111: 106020.
- ŠTAJEROVÁ K, ŠMILAUER P, BRŮNA J, PYŠEK P, 2017. Distribution of invasive plants in urban environment is strongly spatially structured. *Landscape Ecology*, 32(3): 681-692.
- URBANOWICZ C, HUTYRA L R, STINSON K A, 2018. The effects of urbanization and land use on ragweed distribution. *Ecosphere*, 9(12): e02512.
- WANG C, WU B, JIANG K, DU D, 2019. Canada goldenrod invasion affect taxonomic and functional diversity of plant communities in heterogeneous landscapes in urban ecosystems in East China. *Urban Forestry & Urban Greening*, 38: 145-156.