

文章编号: 1674 - 7054(2018)02 - 0225 - 09

海南省主要陆生入侵植物在不同生境类型的适生性

李嘉昊 李东海 赵瑞白 杨小波 罗文启 张 凯 吴庭天

(海南大学 热带农林学院 海口 570228)

摘 要: 应用 MaxEnt 与 ArcGIS 技术 结合野外调查数据 对海南省含羞草 (*Mimosa pudica*)、飞机草 (*Chromolaena odorata*)、马缨丹 (*Lantana camara*)、假臭草 (*Praxelis clematidea*) 等 6 种主要陆生入侵植物的适生区进行了预测和分析。结果表明: (1) 6 种陆生入侵植物适生区的适生等级由沿海向内陆呈逐级递减趋势, 可能是气候分布不同所致, 可能是海拔升高所致, 也可能是土地利用类型的变化等因素所致; (2) 刀切法 (Jackknife) 分析显示, 土地利用类型与入侵植物的适生区有着极为重要的关系, 是影响 6 种陆生入侵植物分布的最主要环境因子。另外, 海拔、坡向、温度的年较差、降雨季节性变化等环境因子对不同入侵植物的适生区也产生重要的影响; (3) 6 种入侵植物在村落周边、城镇建设用地、其他建设用地 (盐场、工业区、厂矿、采石场等用地) 生境中具有极高的适生性; 在林地、草地类生境中的适生性较高, 但是在有林地 (郁闭度 > 30% 的天然林和人工林) 和高覆盖率草地 (覆盖率 > 50% 的天然草地、改良草地和割草地) 生境中的适生性较低。

关键词: 陆生入侵植物; MaxEnt; 生境类型; 环境因子

中图分类号: S 451

文献标志码: A

DOI: 10. 15886/j. cnki. rds wxb. 2018. 02. 016

物种分布与环境之间的关系已经是生态学的一个焦点问题^[1], 开展此方面的研究至关重要。针对外来入侵物种适生区预测的问题, Phillips 等^[2]于 2006 年最早使用 MaxEnt 对低地褐喉树懒 (*Bradypus variegates*) 和山区小稻鼠 (*Microryzomy sminutus*) 等动物入侵种在中南美洲的分布区进行了预测, 并与另一种更早被使用的物种分布模型 GARP 进行了对比, 结果表明, MaxEnt 准确性更好。国内, 最早的是王运生等^[3]开展的对危险性入侵植物病原线虫 (*Radopholus similis*) 研究。在植物方面, 国际上已广泛使用 MaxEnt 预测冬青树 (*Ilex khasiana*) 和高山杨梅 (*Canacomyrica monticola*) 等濒危物种的适生区域和对其生境进行适宜性评价^[4-5]。在国内, 杨波等^[6]结合气候及地形因素, 对外来入侵植物飞机草在中国范围内的适生区域开展了研究, 还有学者对一些外来入侵性杂草如加拿大一枝黄花、飞蓬、喜旱莲子草等在中国的适生区域进行了研究, 取得良好的结果, 这些成果对入侵植物危害的防治提供了科学依据^[7-9]。海南岛气候条件怡人, 植物多样性极其丰富, 但也极易遭受外来植物的入侵。目前, 海南有关入侵植物的科研成果主要有以下两方面: 一是海南省陆生入侵植物种类和主要陆生入侵植物的分布规律及入侵特点, 发现假臭草 (*Praxelis clematidea*)、飞机草 (*Chromolaena odorata*)、三裂叶蟛蜞菊 (*Wedelia trilobata*)、含羞草 (*Mimosa pudica*) 等为海南省最主要的 6 种陆生入侵植物^[10-12]; 二是从生理方面探讨入侵植物的入侵机制^[13]。笔者应用 MaxEnt 与 ArcGIS 技术 结合野外调查数据, 对海南省含羞草 (*Mimosa pudica*)、飞机草 (*Chromolaena odorata*)、马缨丹 (*Lantana camara*)、假臭草 (*Praxelis clematidea*) 等 6 种主要陆生入侵植物的适生区进行了预测和分析, 旨在为入侵植物危害的防治提供科学依据。

收稿日期: 2018 - 01 - 04

修回日期: 2018 - 01 - 22

基金项目: 国家自然科学基金 (30160070, 31760170)

作者简介: 李嘉昊 (1992 -) 男, 海南大学热带农林学院 2015 级硕士研究生, E-mail: 449268178@ qq. com

通信作者: 李东海 (1971 -) 男, 高级实验师, 硕导, 研究方向: 野生近缘植物与生态, E-mail: dhlye@ 163. com; 杨小波 (1962 -) 男, 教授, 博导, 研究方向: 植物资源与生态, E-mail: yanfengxb@ 163. com

1 材料与方法

1.1 调查方法与分布数据获取 采用取样方法与路线法相结合的调查方法,抽样调查了海南省 18 个市县的城镇、村落周边及自然林区。样方随机设置于农村周边、城镇建设用地、草地、灌木丛、种植园、林区、农田等不同生境下,全省共计样地 351 个,样方 3 510 个。本次调查的目的种为三裂叶蟛蜞菊、假臭草、飞机草、马缨丹、含羞草、苏门白酒草,找到目的种群后,以该种群为中心布置 1 个 2 m × 2 m 的样方,再随机择 1 方向每隔 10 m 布置 1 个样方,共布 5 个 2 m × 2 m 的样方(1 套样方),然后沿着与第 1 套样方垂直的方向布置第 2 套样方,2 套样方共计 10 个样方,面积 40 m²(1 个样地)。记录样地内的入侵植物种类、株数、高度、盖度、经纬度坐标、生境类型及伴生植物等信息。

1.2 环境数据 本研究用的环境数据见表 1。气候因子数据下载自 WorldClim 数据库(<http://www.worldclim.org>),该数据库免费提供 1950—2000 年世界气候栅格数据,运用 ArcGIS10.2 平台,提取出海南地区的 19 个气候因子,空间分辨率为 30" (约 1 km²)。地形因子从中国科学院计算机网络信息中心国际科学数据镜像网站(<http://gscloud.cn>)下载分辨率为 90 m 的数字高程地图,并提取出海拔、坡度、坡向,分别生成分辨率为 30" 的栅格数据图层。土地利用类型数据来自于中国科学院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn/Default.aspx>),下载 1 : 10 万比例尺土地利用现状遥感监测数据基础上通过矢量数据栅格化生成的 1 km 栅格数据^[14-22]。海南省地图来自于国家基础地理信息系统网站(<http://nfgis.nsd.gov.cn/>)。

表 1 研究采用的环境因子描述
Tab. 1 Environmental variables used in the study

类型 Type	代码 Code	描述 Description
气候因子 Climatic variable	Bio1	年平均温度 Annual mean temperature
	Bio2	每月最高温与最低温差值的平均值 Mean of the difference between the monthly max and min temperatures
	Bio3	等温性 Isothermicity
	Bio4	季节性温度变异 Seasonal range of temperature
	Bio5	最热月最高温度 Max. temperature in the hottest month
	Bio6	最冷月最低温度 Min. temperature in the coldest month
	Bio7	温度年较差 Annual temperature range
	Bio8	最湿季度平均温度 Mean temp. in the wettest season
	Bio9	最干季度平均温度 Mean temp. in the driest season
	Bio10	最热季度平均温度 Mean temp. in the hottest season
	Bio11	最冷季度平均温度 Mean temp. in the coldest season
	Bio12	年降雨量 Annual rainfall
	Bio13	最湿月降雨量 Rainfall in the wettest month
	Bio14	最干月降雨量 Rainfall in the driest month
	Bio15	降雨季节性变化 Rainfall seasonal variation
	Bio16	最湿季度降雨量 Rainfall in the wettest season
	Bio17	最干季度降雨量 Rainfall in the driest season
	Bio18	最热季度降雨量 Rainfall in the hottest season
	Bio19	最冷季度降雨量 Rainfall in the coldest season
地形因子 Topographic variable	ELE	海拔 Elevation
	SLO	坡度 Slope
	ASP	坡向 Aspect
土地利用类型 Landuse types	Land	水田、旱地、疏林地、城镇用地等

1.3 数据处理 笔者使用的物种分布模型为 MaxEnt。基于生态位原理,MaxEnt 可以模拟物种的适生区域并对其进行分级。该模型的工作原理是可以根据目的物种出现点的环境变量特征计算出目的物种所需要的环境条件,然后研究在此环境条件下最大熵的模拟分布,最后得出目的种在研究区域不同等级的适生区分布。MaxEnt 软件自带刀切法(Jackknife)功能,环境因子贡献率计算、分布图制作、ROC 曲线分析、各环境变量的响应曲线均由软件自动生成,极大地提高了工作效率。

使用 EXCEL 软件将获得的入侵植物分布点数据按照物种名、经度、纬度整理好并保存为 CSV 格式,将环境栅格数据转换为 ASC 格式,将分布点数据和环境数据一起导入 MaxEnt 模型。随机选取 25% 的分布点作为测试集(test data),剩余的作为训练集(training data),设定模型运算次数为 50 次,其他参数均为软件默认值^[23-24]。

1.4 环境因子权重分析 采用 MaxEnt 软件中的刀切法(Jackknife)分析各个环境因子对模型预测结果的重要程度,按贡献率大小评价影响物种适生区分布的主要环境因子^[25]。

2 结果与分析

2.1 入侵植物调查结果 6 种入侵植物在海南省不同市县下的分布点调查结果见表 2。从表 2 可知,6 种入侵植物分布点数据 1 527 个,其中,飞机草分布点 395 个,含羞草分布点 348 个,假臭草分布点 382 个,马缨丹分布点 116 个,三裂叶蟛蜞菊分布点 78 个,苏门白酒草分布点 208 个。

表 2 入侵植物在海南省不同市县内的分布点

Tab. 2 The distribution of invasive plants in different cities and counties

市县名 City/county	分布点数量 Number of distribution points					
	飞机草 <i>C. odorata</i>	含羞草 <i>M. pudica</i>	假臭草 <i>P. clematidea</i>	马缨丹 <i>L. camara</i>	三裂叶蟛蜞菊 <i>W. trilobata</i>	苏门白酒草 <i>Conyza sumatrensis</i>
海口市 Haikou	55	40	48	17	5	37
文昌市 Wenchang	26	22	30	5	5	17
琼海市 Qionghai	27	29	32	8	6	14
万宁市 Wanning	32	23	20	5	3	16
三亚市 Sanya	21	13	12	6	5	6
东方市 Dongfang	13	16	22	5	1	5
儋州市 Danzhou	32	34	35	3	12	18
临高市 Lin'gao	27	22	26	10	6	11
澄迈县 Chengmai	33	31	27	7	4	9
定安县 Ding'an	8	23	15	7	3	6
屯昌县 Tunchang	13	7	15	10	3	4
五指山市 Wuzhishan	20	15	17	3	3	13
陵水黎族自治县 Lingshui	19	17	15	5	4	8
白沙黎族自治县 Baisha	13	24	25	3	4	11
乐东黎族自治县 Ledong	15	11	8	4	2	4
昌江黎族自治县 Changjiang	11	10	11	6	3	6
琼中黎族苗族自治县 Qiongzhong	20	12	16	9	4	12
保亭黎族苗族自治县 Baoting	9	6	8	3	5	11
总计 Total	395	348	382	116	78	208

2.2 MaxEnt 准确性检验 采用 MaxEnt 软件中受试者工作特征曲线 (ROC) 下面积 (AUC) 大小来检验模型的准确度, 曲线下面积大小 (AUC 值) 代表模型的预测能力^[25]。AUC 值小于 0.6, 基本上算预测失败; 0.6~0.7 表明预测准确性一般; 0.7~0.8 表明预测准确性良好; 0.8~0.9 表明预测准确性好; 0.9~1.0, 表明预测准确性非常好^[26]。笔者利用 MaxEnt 对 6 种陆生入侵植物在海南省的适生区进行预测, 所得 AUC 值分别为: 飞机草的 AUC 值为 0.813, 含羞草的 AUC 值为 0.845, 假臭草的 AUC 值为 0.802, 马缨丹的 AUC 值为 0.848, 三裂叶蟛蜞菊的 AUC 值为 0.804, 苏门白酒草的 AUC 值为 0.823。经检验模型预测结果准确度很好。

2.3 海南省 6 种主要陆生入侵植物适生区域分布 MaxEnt 预测的结果是 6 种陆生入侵植物在海南省的适生性概率 P 的大小在 0~1 之间, 且 P 值越大则适生性越高, 参照岳茂锋等^[27]对刺轴含羞草 (*Mimosa pigra* L.) 适生等级的划分并结合本次对海南省野外实际调查的情况, 以 P 值大小将研究区域划分为 3 个适生等级, $P < 0.20$ 为低度适生区, $0.20 \leq P < 0.50$ 为中度适生区, $P \geq 0.50$ 为高度适生区。

从图 1 可知 6 种入侵植物适生区的分布存在着一定的相似性, 表现为由沿海向内陆适生区的适生等级呈逐级递减趋势, 海南省中南部地区普遍表现为 6 种入侵植物的低度适生区。物种的地理分布主要取决于它对于气候、地形、生境类型等环境因子的适应性^[28], 影响该结果的因素可能是气候分布不同所致, 可能是海拔升高所致, 也可能是土地利用类型的变化所致。

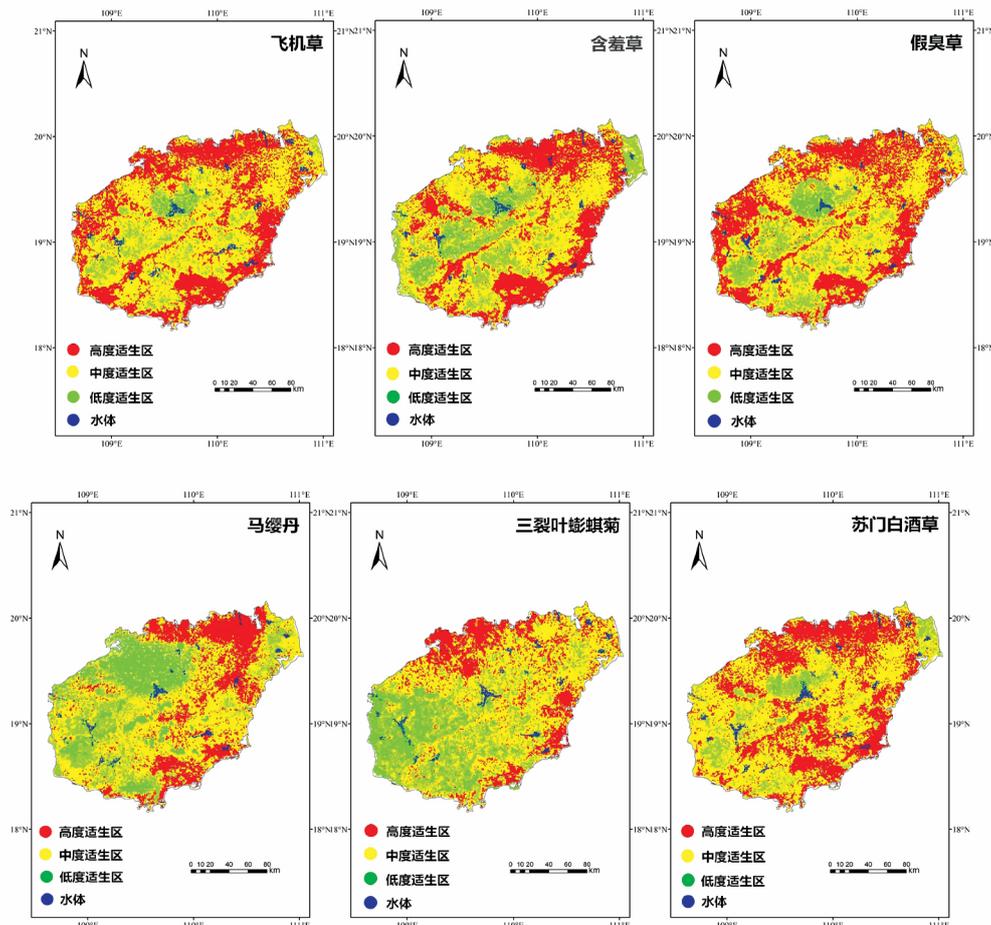


图 1 海南省主要入侵植物适生区域分布图

Fig. 1 Thematic maps for the regional distribution of the main invasive plants in Hainan Province

2.4 影响 6 种入侵植物适生区的主要环境因子 刀切法 (Jackknife) 分析结果表明 (表 3), 土地利用类型是影响 6 种入侵植物适生区的最主要环境因子, 此外, 海拔、坡向、温度的年较差、降雨季节性变化对不同入侵植物的适生区也同样产生重要的影响。

表 3 6 种入侵植物的主要影响环境因子贡献率

Tab. 3 Percentage contribution of the main environmental factors affecting the six invasive plants

代码 Code		贡献率/% Percentage contribution					
		飞机草 <i>C. odorata</i>	含羞草 <i>M. pudica</i>	假臭草 <i>P. clematidea</i>	马缨丹 <i>L. camara</i>	三裂叶 蟛蜞菊 <i>W. trilobata</i>	苏门白酒草 <i>Conyza sumatrensis</i>
Bio1	年平均温度 Annual mean temperature	2.1	3	1.5	1.7	0	0.7
Bio2	每月最高温与最低温差值的平均值 Mean of difference between monthly maximum and minimum temperatures	3.0	1.5	8.0	2.4	0	4.8
Bio3	等温性 Isothermicity	5.3	1.7	2.9	4.2	1	2.1
Bio4	季节性温度变异 Seasonal variation of temperature	3.7	2.5	1.7	1.7	0.9	9.1
Bio5	最热月的最高温度 Maximum temp. in the hottest month	2.4	6.0	5.7	3.6	0	2.3
Bio6	最冷月的最低温度 Minimum temp. in the coldest month	2.6	3.0	4.1	4.0	0.5	0.2
Bio7	温度的年较差 Annual range of temp.	6.0	10	7.9	16.8	0.3	7.7
Bio8	最湿季度的平均温度 Mean temp. in the wettest season	0.1	2.3	1.0	1.7	2.3	1.7
Bio9	最干季度的平均温度 Mean temp. in the driest season	2.0	5.7	1.4	0.3	2.4	1.5
Bio10	最热季度的平均温度 Mean temp. in the hottest season	2.3	9.2	8.9	0.4	4.3	1.5
Bio11	最冷季度的平均温度 Mean temperature in the coldest month	4.0	7.8	0.2	0	0	0.3
Bio12	年降雨量 Annual rainfall	0.4	0.5	0.3	2.5	0.1	0
Bio13	最湿月的降雨量 Rainfall in the wettest month	0	0.4	0.2	1.4	11	2.8
Bio14	最干月的降雨量 Rainfall in the driest month	1.0	1.6	1.5	1.9	3.8	0.5
Bio15	降雨季节性变化 Seasonal change in the wet season	0.4	2.8	0.8	12.8	4.6	5.6
Bio16	最湿季度的降雨量 Rainfall in the wettest season	3.0	2.6	4.0	0.1	0.7	1.2
Bio17	最干季度的降雨量 Rainfall in the driest season	0.5	0.1	0.2	0	0	1.3
Bio18	最热季度的降雨量 Rainfall in the hottest month	2.5	5.2	2.8	7.8	0.1	5.1
Bio19	最冷季度的降雨量 Rainfall in the coldest month	0.5	0.8	1.3	0.6	0.2	0.5
ELE	海拔 Sea level	25.1	5.9	2.0	9.3	0	1.4
SLP	坡度 Slope	3.8	2.3	3.4	5.4	6.2	3.5
ASP	坡向 Aspect	7.8	8.3	17.9	3.2	19.2	17.0
Land	土地利用类型 Landuse type	21.4	16.7	22.3	18.2	42.3	29.2

2.5 海南省主要陆生入侵植物在不同生境类型中的适生性 土地利用类型是影响 6 种入侵植物适生区的最重要环境因子 采用刀切法(Jackknife)进一步分析 6 种入侵植物分别在不同土地利用类型中的适生性大小。从图 2 可知 6 种入侵植物普遍在城镇用地(51)、农村居民点附近(52)、其他建设用地(53)中表现出极高的适生性,其次在水田(11)、旱地(12)中的适生性也很高。6 种入侵植物在林地类(2)、草地类(3)生境中的适生性较高,但是在有林地(21)(郁闭度 > 30%的天然林和人工林)或高覆盖率草地(31)(覆盖率 > 50%的天然草地、改良草地和割草地)中的适生性较低,飞机草、假臭草、三裂叶蟛蜞菊在裸土地(65)(地表土质覆盖 植被覆盖度在 5% 以下的土地)中表现出极高的适生性,适生度均超过了 80%。

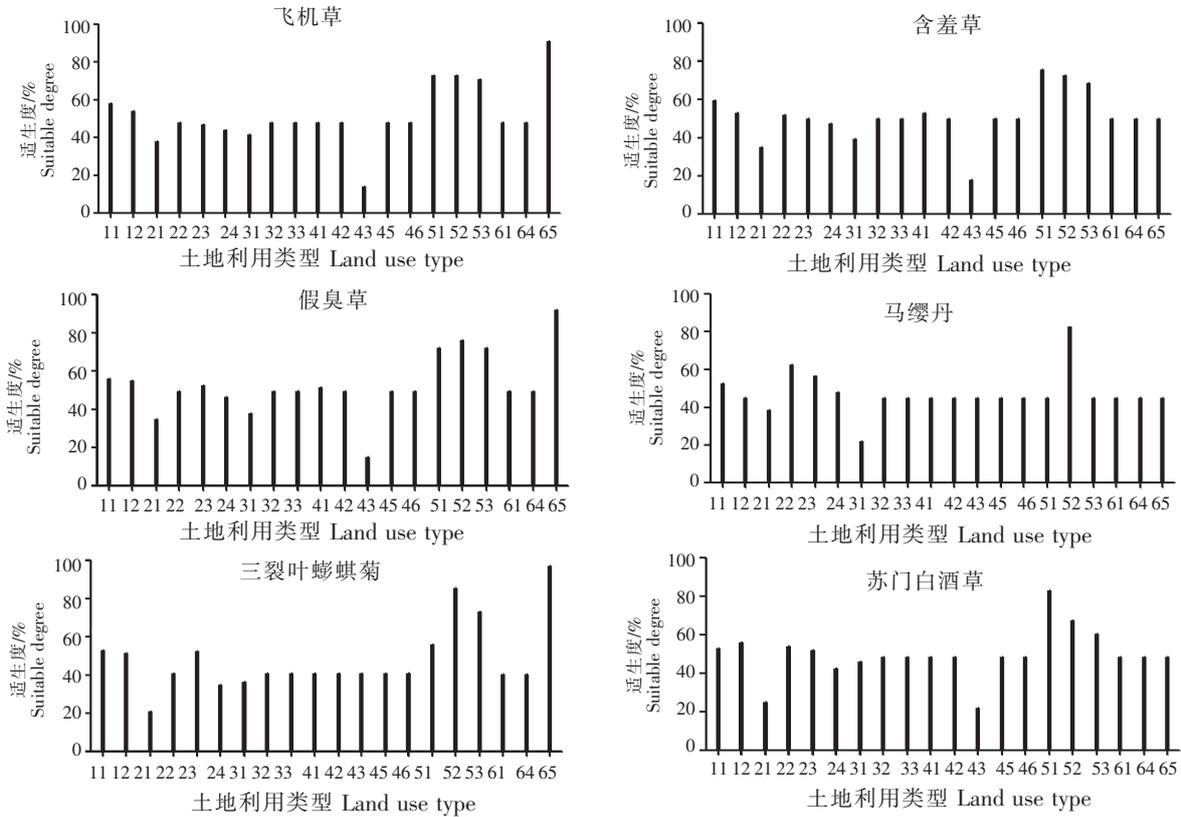


图 2 同一入侵植物在不同生境类型的适生性图

1 级土地利用类型:1.耕地;2.林地;3.草地;4.水域;5.城乡、工矿、居民用地;6.未利用土地;

2 级土地利用类型:1.耕地;11.水田 12.旱地;2.林地;21.有林地 22.灌木林 23.疏林地 24.其他林地;3.草地;31.高覆盖度草地 32.中覆盖度草地 33.低覆盖度草地;4.水域;41.河渠 42.湖泊 43.水库坑塘 44.永久性冰川雪地 45.滩涂 46.滩地;5.城乡、工矿、居民用地;51.城镇用地 52.农村居民点 53.其他建设用地 6.未利用土地;61.沙地 62.戈壁 63.盐碱地 64.沼泽地 65.裸土地 66.裸岩石质地 67.其他(高寒荒漠、苔原)

Fig.2 The adaptivity of the same invasive plants in different habitats

1 level of land use types:1.Cultivated land;2.Woodland;3.Grassland;4.Waters;5.Urban and rural areas,industrial and mining,residential land;6.Unused land;

Level 2 Type of land use:1.Cultivated land:11.Paddy field:12.Dry land;2.Woodland:21.Forest land:22.Shrubbery forest.23. Forest land.24.Other woodland;3.Grassland:31.High-coverage grassland.Medium coverage grassland low coverage grassland 4. water rea 41 canal 82 lake 43 reservoir pits 46 permanent glacier snow 45 beach 46 beach land 5.urban and rural areas, mining,residential land:51 Urban land 52.Rural settlements 53.Other land for construction 6.Unused land:61.Sandy land 62. Gobi 63.Saline-alkali land 64.Wetlands 65.Bare land 66.Bare rock formations 67.Other (alpine desert,Tundra)

3 讨论

笔者应用 MaxEnt 和 ArcGIS 技术 结合野外调查数据 对 6 种陆生入侵植物在海南省的适生区进行了预测 结果表明:6 种入侵植物适生区的适生等级均由沿海向内陆呈逐级递减趋势,高度适生区普遍分布在沿海地带,海南省中南部地区均为 6 种入侵植物的低度适生区,进一步采用刀切法(Jackknife)分析影响 6 种入侵植物的主要环境因子,结果表明,土地利用类型为影响 6 种入侵植物适生区的最主要环境因子,

此外海拔、坡向、温度的年较差、降雨季节性变化对不同入侵植物的适生区也产生较为重要的影响。但是国内一些对入侵性杂草在中国适生区的预测研究表明,气候因子多为影响入侵植物适生区的最主要环境因子,地形等其他环境因子影响相对较小。柳晓燕等^[29]对豚草在中国的适生区展开了预测,并将土地利用类型作为环境因子导入MaxEnt中,结果表明,气候因子对豚草的适生区影响最大,土地利用类型对豚草分布有一定的影响,但不显著。这些研究与本研究结果并不一致,可能是研究尺度的不同,在同一气候带的小尺度范围内研究物种分布,地形等非气候因子起主导作用^[30]。邱罗等^[31]对入侵植物薇甘菊在广州的潜在分布进行了预测,发现海拔因子对薇甘菊的分布影响最为显著,而在大尺度范围内,如国家或全球尺度,气候因子普遍为影响入侵植物分布的最主要环境因子^[32-33]。因而,在气候变化条件下探讨入侵植物在大尺度范围内分布区的变化也是当今的一个研究热点^[34]。此外,入侵植物分布数据的来源不同,也会对研究结果产生一定的影响^[35]。本研究所选用的入侵植物分布数据全部来源于野外实际调查,相对于标本数据更能够真实的反应入侵植物的分布现状,所得模型的AUC值均在0.8以上,模型预测结果很好,因此,本研究结果具有很高的参考价值。

野外调研过程中发现,入侵植物在不同生境中的入侵强度差异很大,例如林地内部几乎没有入侵植物的存在,居民点周边却普遍有大量的分布,入侵植物在不同的生境中表现出不同的适生性,所以,笔者在环境因子的选择中引入了土地利用类型,并进一步分析6种入侵植物在不同土地利用类型中的适生性。结果表明:6种入侵植物普遍在城镇用地、农村居民点、其他建设用地生境中适生性极高,在水田、旱地生境中也表现出较高的适生性。有关研究表明,较强的人为干扰能够促进植物入侵的发生且草本植物的扩散比木本植物的扩散更易受到人为干扰及社会经济因素的影响^[36]。这与本研究结果相符,居民地、耕地类生境人类活动频繁,人为干扰较强,有利于入侵的开展。6种入侵植物在林地、草地类生境中整体适生性较高,但是在林地(林冠层盖度>30%的天然林和人工林)中的适生性明显小于疏林地(林冠层盖度为10%~30%的林地)、灌木林(林冠层盖度>40%、高度小于2m的低矮林地和灌丛林地)、其他林地(未成林造林地、苗圃及各类园地)中的适生性,在高覆盖度草地中的适生性也不同程度的低于在中覆盖度草地、低覆盖度草地中的适生性。有林地属于演替中后期的生境,相对于演替前期的生境类型,有林地生境人类活动干扰更小,物种丰富度、物种密度更大,也将减少生境中的可入侵空间,从而对植物开展入侵有制约作用。同理,高覆盖率草地留给入侵植物的可入侵空间更小,相对于中覆盖率草地、低覆盖率草地入侵过程更难开展^[37]。另一方面,本研究的物种多为演替前期的草本植物,这些植物的生长过程尤其是发育早期都需要充足的光照,相对灌木林、疏林地、其他林地而言有林地的郁闭度更高,较低的光照强度将制约入侵植物的生长,有关研究表明,林下光照强度和光合有效辐射均比较低,受低光照的制约导致入侵植物很难入侵到林地生境内部,且高大的木本植物对低矮的草本入侵植物生长也具有阻碍作用^[38-40]。陈建业等^[41]对路域生境中的入侵植物研究发现,高速公路周围的裸土地若不及时进行植被恢复,极易遭受外来入侵植物入侵,这些研究均表明了充足的光照和入侵空间对植物入侵开展的重要性。

结合6种入侵植物在海南省的适生区域分布图(图3)与海南省土地利用类型图(<http://www.resdc.cn/Default.aspx>)分析发现,海南省土地利用类型的分布由沿海至内陆有一定的规律性,并非随机分布。表现为沿海地区多为城镇用地、其他建设用地、旱地、水田等土地利用类型,然后逐渐演变为大量的其他林地(果园、桑园、茶园、热作林园等)及部分的灌木林生境,最后至海南省中南部地区绝大部分为有林地生境,并且居民地类生境和耕地类生境主要集中分布在海南省北部沿海(文昌市、海口市、儋州市、澄迈县、临高县、昌江县、东方市),而东南、西南部沿海分布明显较少,正是这种土地利用类型分布的变化成为影响6种入侵植物在海南省适生区的最主要因素,另外海拔、坡向、温度的年较差、降雨季节性变化等环境因子对不同入侵植物的适生区也产生一定的影响。

本研究仅选用与温度、降水有关的气候因子、地形因子及土地利用类型,入侵植物在入侵地的适生性跟许多因素有关,例如生物间相互作用、土壤类型、温室效应等其他因素^[42],这可能在一定程度上影响本研究结果的准确性,今后若能引入更多相关环境变量,将使得模拟结果更为准确。

6种陆生入侵植物适生区域的适生等级由沿海向内陆呈逐级递减趋势,主要影响因素为土地利用类型的变化,其次是地形因子,气候因子对6种入侵植物的适生区域影响不大。在不同的土地利用类型中,6种陆生入侵植物普遍在城镇用地、农村居民点周边、其他建设用地中具有极高的适生性,在林地、草地类

生境类型中的适生性较高,但是在有林地(郁闭度 > 30%的天然林和人工林)或高覆盖率草地(覆盖率 > 50%的天然草地、改良草地和割草地)生境中适生性较低,入侵植物在人为干扰强、光照充足和拥有足够入侵空间的生境中更易开展入侵。

参考文献:

- [1] Yang X Q, Kushwaha S P S, Saran S, et al. MaxEnt modeling for predicting the potential distribution of medicinal plant, *Jussiaea Adhatoda* L. in Lesser Himalayan Foothills [J]. *Ecological Engineering*, 2013, 51(1): 83–87.
- [2] Phillips S J, Anderson R P, Schapire R E. Maximum entropy modeling of species geographic distributions [J]. *Ecological Modelling*, 2006, 190(3/4): 231–259.
- [3] 王运生, 谢丙炎, 万方浩, 等. 相似穿孔线虫在中国的适生区预测 [J]. *中国农业科学*, 2007, 40(11): 2502–2506.
- [4] Kumar S, Stohlgren T J. MaxEnt modeling for predicting suitable habitat for threatened and endangered tree *Canacomyrica monticola* in New Caledonia [J]. *Journal of Ecology & the Natural Environment*, 2009, 1(1): 94–98.
- [5] Adhikari D, Barik S K, Upadhaya K. Habitat distribution modelling for reintroduction of *Ilex khasiana* Purk., a critically endangered tree species of northeastern India [J]. *Ecological Engineering*, 2012, 40(3): 37–43.
- [6] 杨波, 薛跃规, 唐小飞, 等. 外来入侵植物飞机草在中国的适生区预测 [J]. *植物保护*, 2009, 35(4): 70–73.
- [7] 雷军成, 徐海根. 基于 MaxEnt 的加拿大一枝黄花在中国的潜在分布区预测 [J]. *生态与农村环境学报*, 2010, 26(2): 137–141.
- [8] 张颖, 李君, 林蔚, 等. 基于最大熵生态位元模型的入侵杂草春飞蓬在中国潜在分布区的预测 [J]. *应用生态学报*, 2011, 22(11): 2970–2976.
- [9] 陈立立, 余岩, 何兴金. 喜旱莲子草在中国的入侵和扩散动态及其潜在分布区预测 [J]. *生物多样性*, 2008, 16(6): 578–585.
- [10] 单家林. 海南岛外来植物群落初探 [J]. *热带农业科学* 2003 23(3): 1–4.
- [11] 罗文启, 符少怀, 杨小波, 等. 海南岛入侵植物的分布特点及其对本地植物的影响 [J]. *植物生态学报*, 2015, 39(5): 486–500.
- [12] 秦新生, 张荣京, 陈红锋, 等. 海南岛石灰岩地区的外来植物 [J]. *生态学杂志*, 2008, 27(11): 1861–1868.
- [13] 黄乔乔, 沈奕德, 范志伟, 等. 五指山不同林型土壤对金钟藤幼苗生长的影响 [J]. *生态环境学报*, 2013(1): 95–99.
- [14] 刘纪远. 中国资源环境遥感宏观调查与动态研究 [M]. 北京: 中国科学技术出版社, 1996.
- [15] 刘纪远. 国家资源环境遥感宏观调查与动态监测研究 [J]. *遥感学报*, 1997, 1(3): 225–230.
- [16] Zhuang D, Liu J, Liu M. Research activities on land-use/cover change in the past ten years in China using space technology [J]. *Chinese Geographical Science*, 1999, 9(4): 43–47.
- [17] 刘纪远, 布和敖斯尔. 中国土地利用变化现代过程时空特征的研究——基于卫星遥感数据 [J]. *第四纪研究*, 2000, 20(3): 229–239.
- [18] Liu J, Liu M, Deng X, et al. The land use and land cover change database and its relative studies in China [J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2002, 12(3): 275–282.
- [19] 刘纪远, 刘明亮, 庄大方, 等. 中国近期土地利用变化的空间格局分析 [J]. *中国科学* 2002, 32(12): 1031–1040.
- [20] 刘纪远, 张增祥, 庄大方, 等. 20世纪90年代中国土地利用变化的遥感时空信息研究 [M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- [21] Liu J, Liu M, Tian H, et al. Spatial and temporal patterns of China's cropland during 1990–2000: An analysis based on Landsat TM data [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2005, 98(4): 442–456.
- [22] 刘纪远, 张增祥, 徐新良, 等. 21世纪初中国土地利用变化的空间格局与驱动力分析 [J]. *地理学报*, 2009, 64(12): 1411–1420.
- [23] Phillips S J, Anderson R P, Schapire R E. Maximum entropy modeling of species geographic distributions [J]. *Ecological Modelling*, 2006, 190(3/4): 231–259.
- [24] Elith J, Phillips S J, Hastie T, et al. A statistical explanation of MaxEnt for ecologists [J]. *Diversity & Distributions*, 2015, 17(1): 43–57.
- [25] 洪再吉. 刀切法与刀切估计量性质 [J]. *汕头大学学报(自然科学版)*, 1989, 4(1): 12–20.
- [26] 王运生, 谢丙炎, 万方浩, 等. ROC 曲线分析在评价入侵物种分布模型中的应用 [J]. *生物多样性*, 2007, 15(4): 365–372.
- [27] 岳茂峰, 冯莉, 田兴山, 等. 基于 MaxEnt 的入侵植物刺轴含羞草的适生分布区预测 [J]. *生物安全学报*, 2013, 22(3): 173–180.
- [28] 张新时, 周广胜. 中国全球变化与陆地生态系统关系研究 [J]. *地学前缘*, 1997(21): 137–144.
- [29] 柳晓燕, 李俊生, 赵彩云, 等. 基于 MAXENT 模型和 ArcGIS 预测豚草在中国的潜在适生区 [J]. *植物保护学报*, 2016, 43(6): 1041–1048.
- [30] 吴卉晶, 咎启杰, 曾辉. 区域尺度薇甘菊入侵分布的影响因子 [J]. *生态学报*, 2009, 29(10): 5442–5449.

- [31] 邱罗,杨志高,陈伟 等. 广州薇甘菊潜在空间分布预测分析[J]. 中南林业科技大学学报,2010,30(5):128-133.
- [32] Nielsen C, Hartvig P, Kollmann J. Predicting the distribution of the invasive alien *Heracleum mantegazzianum* at two different spatial scales. [J]. Diversity & Distributions, 2008, 14(2):307-317.
- [33] Hao C, Chen L J, Albright T P. Predicting the potential distribution of invasive exotic species using GIS and information-theoretic approaches: A case of ragweed (*Ambrosia artemisiifolia* L.) distribution in China [J]. Chinese Science Bulletin, 2007, 52(9):1223-1230.
- [34] Kriticos D J, Sutherst R W, Brown J R, et al. Climate change and the potential distribution of an invasive alien plant: *Acacia nilotica* ssp. indica in Australia [J]. Journal of Applied Ecology, 2003, 40(1):111-124.
- [35] 陈新美,雷渊才,张雄清 等. 样本量对 MaxEnt 模型预测物种分布精度和稳定性的影响[J]. 林业科学,2012,48(1):53-59.
- [36] 张渊媛. 入侵植物与自然和社会因子的关系及对自然保护区的影响分析[D]. 北京:中央民族大学,2011.
- [37] Fridley J D, Stachowicz J J, Naeem S, et al. The invasion paradox: reconciling pattern and process in species invasions. [J]. Ecology, 2007, 88(1):3-17.
- [38] Brothers T S, Spingarn A. Forest fragmentation and alien plant invasion of central Indiana old-growth forests [J]. Annales De Dermatologie Et De Vénéréologie, 1992, 6(1):91-100.
- [39] Shea K, Chesson P. Community ecology theory as a framework for biological invasions [J]. Trends in Ecology & Evolution, 2002, 17(4):170-176.
- [40] Honnay O, Verheyen K, Hermy M. Permeability of ancient forest edges for weedy plant species invasion [J]. Forest Ecology & Management, 2002, 161(1):109-122.
- [41] 陈建业,段昌群,于福科 等. 云南公路外来入侵植物现状与防治对策[J]. 植物检疫,2010,24(5):38-41.
- [42] Hao C, Chen L J, Albright T P. Predicting the potential distribution of invasive exotic species using GIS and information-theoretic approaches: A case of ragweed (*Ambrosia artemisiifolia* L.) distribution in China [J]. Chinese Science Bulletin, 2007, 52(9):1223-1230.

Adaptivity of Major Terrestrial Invasive Plants in Different Habitats in Hainan Province

LI Jiahao¹, LI Donghai¹, ZHAO Ruibai¹, YANG Xiaobo¹,
LUO Wenqi¹, ZHANG Kai¹, WU Tingtian¹, GAO Boyu¹

(Institute of Tropical Agriculture and Forestry, Hainan University, Haikou, Hainan 570228, China)

Abstract: Environmental data and the data of the invasive plants from field sampling were analyzed by using MaxEnt and ArcGIS to predict the distributions of suitable adaptivity areas for six major invasive plants, *Chromolaena odorata*, *Praxelis clematidea*, *Mimosa pudica*, *Conyza sumatrensis*, *Wedelia trilobata*, *Lantana camara*, in Hainan Province, China. Results showed that the adaptivity of the 6 major invasive plants tended to decrease gradually from coastal areas to inland areas, which might be due to difference in climatic distribution, to high elevation, or to the change of landuse types. Jackknife analysis showed that land use types were highly associated with the area of the suitable habitats of the invasive plants and were hence the most important environmental factors affecting the distribution of the six terrestrial invasive plants. Moreover, the area of suitable habitats of different invasive plants is also influenced by elevation, slope aspect, annual range of temperature, and seasonal variation of rainfall. Further analysis using Jackknife method also showed that the adaptivity of the 6 invasive plants was very high in the habitats of the surroundings of the village, the urban construction land and other construction lands like those in salt mine, industrial area, factories, mills, stoneworks, and higher in the habitats of woodland and grassland, but rather weak in the forested land (natural or artificial forests with canopy closure of >30%) and grassland with high vegetation coverage (Natural grassland, improved grassland and cut-and-carry grassland with a vegetation coverage of >50%).

Keywords: terrestrial invasive plants; MaxEnt; habitat types; environmental factors