

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

陈立立 余 岩 何兴金*

(四川大学生命科学学院, 成都 610064)

摘要: 喜旱莲子草(*Alternanthera philoxeroides*)是苋科莲子草属的一种多年生草本植物, 原产于南美洲, 19世纪末侵入我国以后, 经过50年左右的停滞期, 在我国中部和南部的广大区域迅速蔓延传播, 已成为我国分布最广、危害最为严重的杂草之一, 目前分布范围仍在扩大。本研究基于大量的标本分布数据, 使用生态位模型(GARP)对其在中国的潜在扩散区域进行了预测。结果表明: 喜旱莲子草抗逆性较强, 坡度、汇流累积量、年均温、年降雨量对其分布影响较大; 而海拔、日照等对其分布影响较小。目前, 喜旱莲子草的潜在入侵区仍大于实际分布区, 因此, 预测该物种还将会继续扩散。容易被入侵的地区包括了除青海、西藏、四川西部、新疆南部、甘肃西部、吉林、黑龙江、内蒙古北部以及海南以外的中国大部分地区, 其中陕西、山西以及甘肃东南部不仅属于最易被入侵的地区, 且邻近地区已被入侵, 因此应采取紧急措施防止喜旱莲子草侵入和扩散。

关键词: *Alternanthera philoxeroides*, 生态位模型, 外来入侵植物, 分布

Historical invasion and expansion process of *Alternanthera philoxeroides* and its potential spread in China

Lili Chen, Yan Yu, Xingjin He*

College of Life Sciences, Sichuan University, Chengdu 610064

Abstract: *Alternanthera philoxeroides* is a perennial herbaceous amphibious aquatic weed of the family Amaranthaceae, native to South America. It was first found in Shanghai, China in 1892. After a stagnant phase of 50 years (1890s–1940s), *A. philoxeroides* spread rapidly throughout areas of central and southern China, and the range is still expanding. It is one of the most harmful and widely distributed alien species in mainland China. We applied Genetic Algorithm for Rule-Set Production (GARP) ecological niche modeling to predict the species' potential range in China on the basis of occurrence points within colonized areas where *A. philoxeroides* had reached equilibrium. Environmental factors such as slope, flow accumulation, mean annual temperature, annual precipitation greatly influenced the size of *A. philoxeroides*'s potential range, while parameters such as solar radiation and elevation had little impact. Areas that we predict to have potential for invasion were still larger than those areas that had been invaded. Therefore, *A. philoxeroides* is predicted to continue to expand in China. Most Chinese provinces excluding Tibet, Qinghai, western Sichuan, southern Xinjiang, western Gansu, north-eastern Inner Mongolia, Jilin, Heilongjiang and Hainan are likely to be invaded. Because they are adjacent to areas that had been invaded, Shaanxi, Shanxi and south-eastern Gansu were most liable to be invaded; hence urgent measures should be taken there to prevent this species from further spreading.

Key words: *Alternanthera philoxeroides*, GARP, alien invasive plant species, potential distribution range

喜旱莲子草(*Alternanthera philoxeroides*)又称空心莲子草、水花生、革命草, 英文名为Alligator

收稿日期: 2008-08-09; 接受日期: 2008-11-11

基金项目: 国家自然科学基金支持项目(30670146)和国家科技基础条件平台项目(2005DKA21403)

*通讯作者 Author for correspondence. E-mail: xjhe@scu.edu.cn

weed, 即鳉鱼草, 是一种原产于南美洲的苋科莲子草属多年生草本植物。目前已经在热带、亚热带和暖温带地区广泛归化(包括美国、澳大利亚、新西兰、东南亚各国、印度和中国等多个国家和地区)(Julien *et al.*, 1995)。由于它生长迅速, 适应于多种生境, 且难以清除, 常常形成单一的优势群落, 排挤本地植物, 还能危害农田(包括水田和旱田)和鱼塘, 堵塞河道, 对入侵地的生物多样性、生态系统以及社会经济造成很大的威胁, 是世界公认的恶性杂草之一(林冠伦和杨益众, 1990; 张格成等, 1993; Julien *et al.*, 1995; 李振宇和解焱, 2002), 2003年被列入中国环保总局公布的《中国第一批外来入侵物种名单》。

对于喜旱莲子草已有的研究主要集中在生物学特征(Kay & Haller, 1982; Sosa *et al.*, 2004; 潘晓云等, 2006)、对环境因子的生理生态适应(Li & Ye, 2006; 潘晓云等, 2006; Geng *et al.*, 2007)、入侵机制(Sosa *et al.*, 2004; 潘晓云等, 2007)以及生物、化学防治(Julien & Broadbent, 1980; Buckingham, 1996; Sosa *et al.*, 2004)等方面。然而, 当前已有的各种防除手段都难以彻底有效地治理喜旱莲子草(潘晓云等, 2007), 因此预防其入侵比入侵后控制其大规模爆发更为有效且经济(Waage & Reaser, 2001)。目前有关喜旱莲子草在我国的入侵和扩散历史的报道非常简略并且缺乏系统性, 对其在我国潜在分布区的研究也很匮乏, 因此十分有必要对喜旱莲子草在中国的潜在分布区进行预测, 以帮助有关部门制定合理的防治措施, 防止它在更大范围内扩散并造成危害。

物种分布预测在生物地理学、进化生物学、生态学、保护生物学和外来入侵种管理等方面都有着广泛的应用(Fleishman *et al.*, 2001; Peterson & Vieglais, 2001; Fertig & Reiners, 2002; Scott *et al.*, 2002)。GARP (Genetic Algorithm for Rule-set Production) 模型是根据物种的已知分布数据和环境数据来运行产生不同规则的集合, 以此来判断物种的生态需求, 进而预测物种的潜在分布(Stockwell & Peters, 1999)。这一模型是一种基于检验假设的分布预测模型, 可以有效模拟物种生态位, 并以地图的形式呈现出这些预测结果, 是目前最准确的物种潜在分布区预测方法之一。

本文主要以喜旱莲子草在中国的标本分布数据为基础, 采用GARP 生态位模型, 通过Desktop

Garp 1.1.6 (Scachetti-Pereira, 2002) 对喜旱莲子草进行了生态位模型预测, 以期对未来喜旱莲子草可能入侵的地区提出预警。

1 材料和方法

1.1 喜旱莲子草标本数据来源

在我国, 喜旱莲子草的遗传多样性极低, 很可能是来自同一基因型的无性克隆(Xu *et al.*, 2003; Ye *et al.*, 2004; Wang *et al.*, 2005; Li & Ye, 2006)。在相同的生长条件下, 采自我国不同地区的喜旱莲子草, 以及同一地点的水生生境和陆生生境的喜旱莲子草, 在生长形态和生物量分配模式上没有显著差异(Geng *et al.*, 2007), 其形态变异是同一基因型对不同环境条件的表型可塑性的表现形式(Li & Ye, 2006; 潘晓云等, 2006; Geng *et al.*, 2007)。然而在世界范围内, 喜旱莲子草存在多种生态型, 在叶片形状、茎的粗细以及开花期等方面都存在显著差异, 显示出其对各自地理环境的适应(Pedersen, 1967, 1999; Sosa *et al.*, 2004; 潘晓云等, 2006)。因此, 若依据世界范围内喜旱莲子草的分布数据进行预测, 则会导致预测范围过大, 故本文中主要依据其在中国的分布数据进行预测。

喜旱莲子草在中国的标本分布数据主要来源于国家自然科技资源平台教学标本资源共享平台(<http://mnh.scu.edu.cn>)的34所标本馆和中国数字植物标本馆(<http://www.cvh.org.cn>, 包括13所标本馆), 囊括了所有目前可收集到的国内数据。进一步从中筛选采集地点和时间信息完整的数据, 并参考国内的相关报道和文献资料, 收集喜旱莲子草的实际分布资料。标本和文献记录都是物种在某地生长的有力证据, 但是由于喜旱莲子草的扩散初期主要由人为因素造成(人工引种栽培), 因此本文只选取了记录中明确标记为野生的218个分布点, 并假定标本和文献记录时间为其最早入侵的时间(王瑞, 2006)。对于已有明确记录的地点, 之后出现的入侵记录不予重复采用, 最终获得不重复的64个分布县。喜旱莲子草在世界范围内的分布来源于世界生物多样性信息机构(global biodiversity information facility, GBIF)的记录, 用以确定喜旱莲子草在世界范围内分布的经纬度范围。

1.2 喜旱莲子草入侵历史过程重建

参照国家测绘局地名研究所1:100万地名数据

库确定喜旱莲子草分布地的经纬度坐标,从而获得其实际地理分布范围。从国家基础地理信息系统(<http://nfgis.nsdi.gov.cn/>)下载获得1:400万的中国行政区划图,作为喜旱莲子草潜在分布区分析的底图。利用ArcGIS软件,从1940年起,以县作为空间单位就每10年出现的分布地点在地图上进行绘制,得到反映喜旱莲子草在中国扩散过程的一系列分布地图(图1)。

1.3 入侵地点数量随时间变化曲线绘制

以县为单位,从1930年起每5年统计喜旱莲子草标本分布县的数量。由于喜旱莲子草为杂草,生存适应能力强,所以一旦该种在某地出现记录,便认为在该地区至今仍有分布,重复出现的分布县名不重复计数。统计得到的数据用Excel作分布县数量随时间变化的曲线。

1.4 喜旱莲子草的生态位模型预测

本文采用的环境数据集包括亚洲范围内的气温、海拔、湿度等14个环境因子(见表1),其中温度、降水、海拔数据取自Berkeley大学Worldclim下载中心(Hijmans *et al.*, 2004),其余采用Desktop Garp自带的数据包(<http://www.lifemapper.org/desktopgarp>)。环境因子的分辨率为0.1°。

在选取最优的环境因子时,首先将14个环境因子一起进行1,000次模型运算,所获得的遗漏误差的平均值为0.9386(基础遗漏误差)。然后使用刀切法(Jackknife)依次省略每一个环境因子,创建14组不同的环境因子组。在使用Desktop Garp时,50%的数据用于建立模型,至少使用20个点作为训练数据(training data)。创建模型规则时反复运算1,000次或者按照结果收敛的情况而终止。对于每组环境因子重复创建100次模型,共计创建1,400个模型。最后分析每一组环境因子与遗漏误差(omission error)之间的关系,如果一个环境因子的缺失导致遗漏误差显著降低(低于基础遗漏误差的95%),则该环境因子将不被包含在最终的分析中。反之,如果一个环境因子的缺失导致遗漏误差高于基础遗漏误差,则认为这一因子对预测结果的准确度影响显著。每个环境因子缺失时所获得的遗漏误差的平均值列在表1中。

在最终分析中,重复创建1,000次模型,创建模型规则时重复运算次数最大值(max iteration)设为10,000,收敛极限(convergence limit)为0.01,规则类

型(rule types)使用默认设置,生成ARC格式的图层。运算完毕后,选取所有零误差的预测中预测面积与实际分布面积最接近的100个模型,即最优模型。然后利用ArcGIS的空间扩展模块(spatial analyst tools),将预测结果进行叠加。叠加的结果为每一个栅格的数值在0–100之间,这个数值代表100个预测模型中该栅格适合生长喜旱莲子草的模型数量。我们将每一栅格适合生长的模型数量的百分比称为重叠值(overlap value, OV),重叠值越大表示该栅格的环境参数越适合物种的生存。因此,根据重叠系数的大小可以将预测的区域划分为:威胁严重区($OV \geq 90\%$),适宜生长区($70\% < OV \leq 90\%$),可以生长区($50\% < OV \leq 70\%$)和不适生长区($OV < 50\%$)。最后将预测图与中国行政区图以及实际分布点相叠加,得到喜旱莲子草在中国的潜在分布区图。

2 结果和讨论

2.1 喜旱莲子草在中国的入侵扩散过程

根据标本记录、文献报道和实地考察获得的数据,在地理信息系统软件下完成了喜旱莲子草在我国的历史分布图(图1)。该种1892年开始出现在上海附近的岛屿,20世纪30年代在上海被日军作为马饲料栽培(李振宇和解焱,2002)。国内目前最早的标本为1930年在上海采到的,1934年在浙江宁波发现了喜旱莲子草,40年代在江苏南京和浙江杭州也发现了这一物种。到了50年代初期,江、浙、沪等省(市)逐步推广为猪羊饲料,60–70年代进一步被引入我国长江流域及南方各省(林冠伦和杨益众,1990),逸为野生并广泛传播。50年代相继在四川夹江、重庆北碚、江西贵溪,60年代在湖北武汉、安徽合肥及广东肇庆,70年代在青海西宁、陕西南郑、云南昆明、湖南岳阳、福建福州和厦门、广西贺县以及山东微山等地,80年代在北京、河北鹿泉,90年代在湖南的中部和南部相继采到喜旱莲子草的标本。最近7年内,山东济南、河南信阳、甘肃酒泉、贵州安顺等地也出现喜旱莲子草的记录。海南省虽未见喜旱莲子草的标本和报道,但根据本文作者对当地林业部门工作人员的调查结果,海南已有零星植株分布。

由图1可以看出,在我国喜旱莲子草有逐步从东部沿海向内陆扩散的趋势。30–40年代,喜旱莲子草集中分布在长江下游的上海、浙江、江苏一带,这

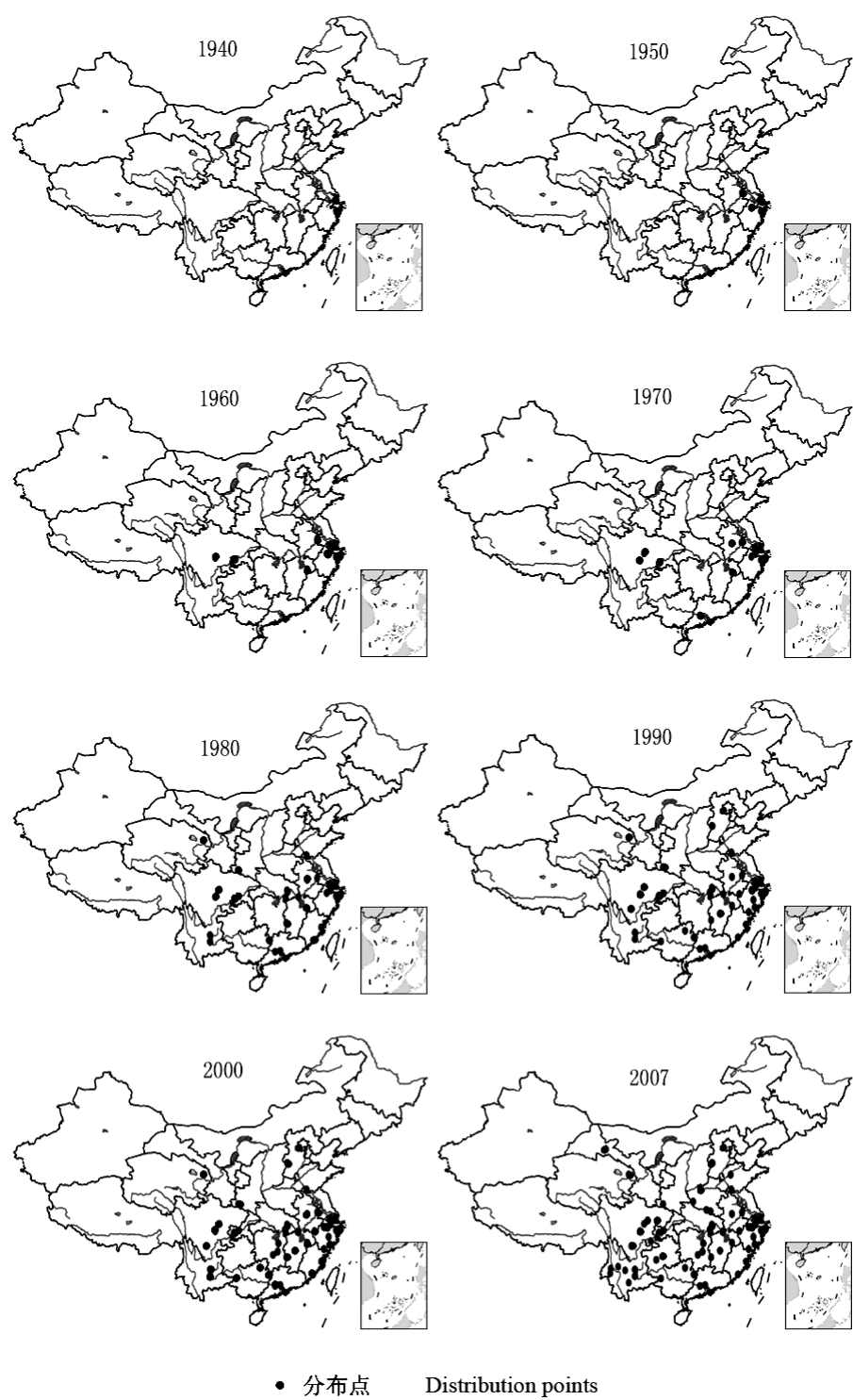


图1 喜旱莲子草在中国的分布动态图
Fig. 1 Historical invasion and expansion process of *Alternanthera philoxeroides* in China

一阶段的扩散速度相对较慢; 50–60年代侵入长江流域的内陆省份如江西、湖北、安徽、重庆和四川, 以及南部沿海的广东。由于50年代以后的广泛栽培, 喜旱莲子草在当地经过一段时期的适应, 逸为野生后在70年代广为扩散, 南至云南、广西、福建, 北至青海、陕西、山东都已有喜旱莲子草的分布;

表1 影响喜旱莲子草分布区预测的生态位模型参数
Table 1 Environmental parameters influencing the prediction of distribution of *Alternanthera philoxeroides*

环境因子 Environmental parameters	影响 Effect	遗漏误差 Omission error	是否采用 Contain or not
坡度 Slope	显著 Significant	1.2125	+
汇流累积量 Flow accumulation	显著 Significant	1.1438	+
年均温 Mean annual temperature (1961–1990)	显著 Significant	1.1307	+
年降雨量 Annual precipitation (1961–1990)	显著 Significant	1.1087	+
水汽压 Water vapour pressure (1961–1990)	一般 Limited	0.9353	+
极端低温 Minimum temperature (1961–1990)	一般 Limited	0.9335	+
极端高温 Maximum temperature (1961–1990)	一般 Limited	0.9263	+
水流方向 Flow direction	一般 Limited	0.9259	+
雨日频率 Wet days (1961–1990)	一般 Limited	0.9157	+
地形指数 Topographic index	一般 Limited	0.9063	+
坡向 Aspect	一般 Limited	0.8989	+
霜日频率 Frost days (1961–1990)	一般 Limited	0.8958	+
太阳辐射 Solar radiation (1961–1990)	误差 Uninfluential	0.6018	–
海拔 Elevation	误差 Uninfluential	0.5726	–

+ 和–分别表示该环境因子包含或不包含在最终的分析中
+ and – indicate that the environmental parameters are included or excluded respectively in the final analysis.

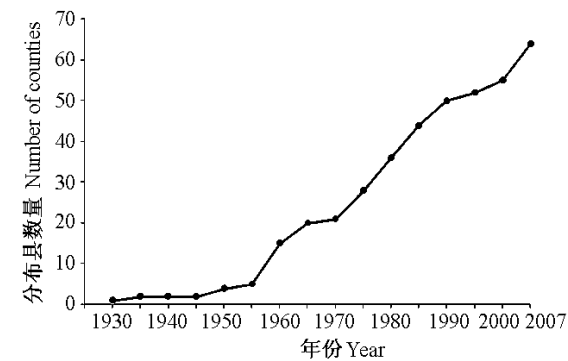


图2 喜旱莲子草在中国入侵地点数量随时间变化曲线
Fig. 2 Changes of the number of invaded counties with time

80–90年代, 除在已入侵地区的邻近区域继续蔓延, 还扩散至北京和河北; 进入21世纪以后, 又进一步扩散至贵州、甘肃和河南, 覆盖了南方所有省份和北方部分地区, 并表现出继续向北方蔓延的趋势。

入侵物种进入新的区域及种群建立后的一段时间内, 往往很少或不发生扩散, 这个阶段称为停滞期。停滞期过后, 入侵物种的分布区会出现大规模的扩散, 只有当种群扩散的空间内出现天然屏障(如高山、海洋等)时, 这种扩散才会减缓, 随后逐渐接近某一特定的水平, 这就达到了饱和期(Williamson, 1996; Shigesada & Kawasaki, 1997)。由喜旱莲子草在中国入侵地点数量变化曲线(图2)可

以发现, 喜旱莲子草在中国的扩散经历了两个主要阶段: 第一阶段为从19世纪末开始出现记录到20世纪中叶, 喜旱莲子草的扩散处于停滞期, 分布集中在最早侵入的上海和浙江。在这一阶段, 喜旱莲子草主要在区域尺度上进行传播, 人类对繁殖体的引入和传播是其扩散的主要原因, 因此呈现出图1中自东向西的逆长江水流的传播格局。第二阶段为20世纪50年代中后期至今, 喜旱莲子草分布地名数量增长非常迅速, 分布范围逐渐由长江下游扩散至中国南方各省及北方部分地区, 这一阶段可以认为是喜旱莲子草的快速扩散阶段, 主要在流域尺度上进行传播。在这一阶段, 影响其在流域尺度(中小支流)上扩散的主要因素是各种环境因子, 这将在下文加以详细讨论。目前喜旱莲子草的扩散并没有出现减缓的迹象, 在全国范围来看还没有进入饱和期, 在一段时期内仍呈持续较快的扩散趋势。

2.2 影响喜旱莲子草分布的环境因子分析

表1中列出了14个环境因子对喜旱莲子草分布区预测的影响。其中坡度、汇流累积量、年均温、年降雨量这4个环境因子的遗漏误差值最大, 对分布预测的影响最为显著。坡度与该栅格内的水流速度相关; 而汇流累积量的大小代表着河流上游有多少个栅格的水流方向最终汇流经过该栅格, 其数值越大, 则该区域越易形成地表径流。坡度和汇流累

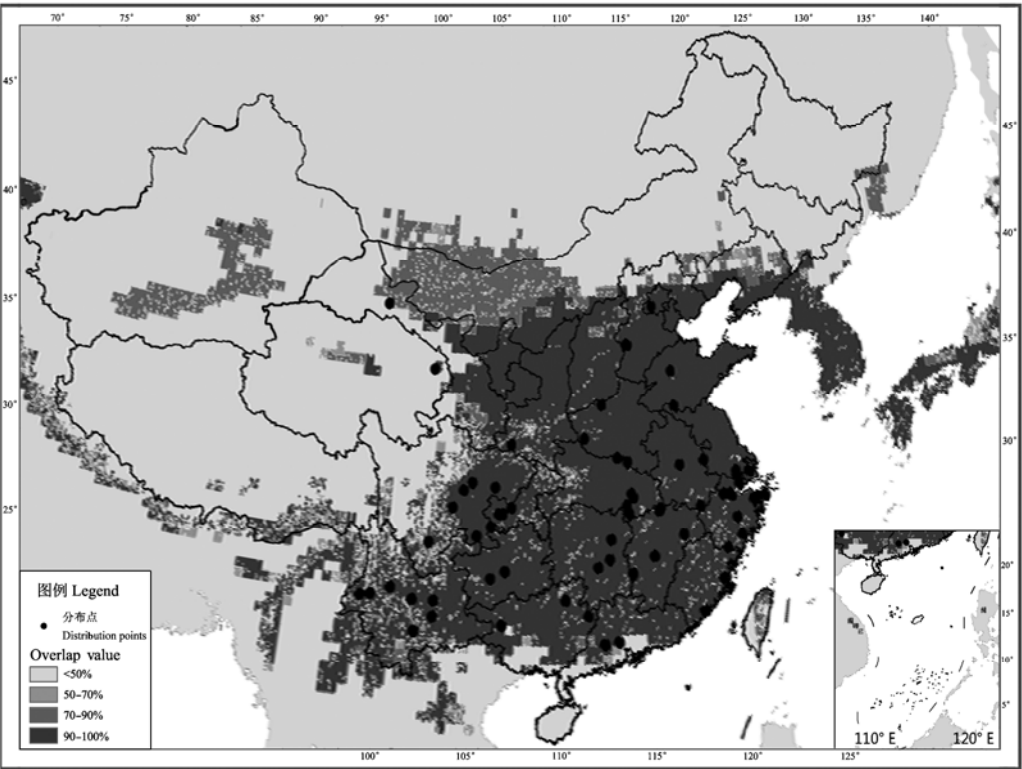


图3 生态位模型预测喜旱莲子草在我国的适生区图
Fig. 3 Potential range prediction for *Alternanthera philoxeroides* applied GARP ecological niche model

积量对喜旱莲子草分布的影响较大,这与潘晓云等(2007)指出的河流网络系统是喜旱莲子草传播扩散的重要载体,其生长和扩散都依赖流动水体的特征相吻合。喜旱莲子草是偏湿生的两栖类植物,水分对其种群更新和生长起重要作用(Shen *et al.*, 2005)。有研究表明,针对不同的水分环境,喜旱莲子草能够产生与之相应的生态类型(陶勇和江明喜, 2004),对水因子变化具有丰富的表型可塑性反应(Li & Ye, 2006; 潘晓云等, 2006; Geng *et al.*, 2007),也一定程度上说明了对喜旱莲子草进行流域管理是控制其扩散的关键(潘晓云等, 2007)。

温度对喜旱莲子草分布的影响相对复杂,在本研究中,极高温和极低温的遗漏误差都小于基础遗漏误差0.9386(表1)。根据已有的报道,喜旱莲子草对极高温和极低温具有较强的抗逆性。当冬季温度降至0℃以下时,其水面或地上部分已冻死,但水中和地下的根茎仍保持活力。春季温度回升至10℃时,越冬的水下或地下根茎即可萌发(娄远来等,

2002),这也是喜旱莲子草能在我国北方地区越冬存活的重要原因。喜旱莲子草是一个热性的物种,在本文的预测结果中,超过40°N的区域只有很少的一部分属于它的适生区,环境因子中平均温度的遗漏误差明显高于基础遗漏误差。在世界范围内,其分布的纬度范围为37.7°S至39.9°N (global biodiversity information facility, GBIF),说明了平均温度对喜旱莲子草的分布影响较大,与本文的预测结果一致。

喜旱莲子草对日照和海拔具有很强的适应力。有报道指出,喜旱莲子草喜光,但也可以在光照为10%全日照的遮荫环境下存活(Longstreth & Mason, 1984; Longstreth *et al.*, 1985)。光强对喜旱莲子草种群生物量、叶面积和丛高的影响非常显著,但却不影响它的出芽率和生物量分配模式(潘晓云, 2005; Shen *et al.*, 2005),这一生长特性是它可以在各种光照条件下定居、拓展并形成单优势种群落的一个重要原因(潘晓云, 2005)。喜旱莲子草对海拔的适应性

较广,可生长于海拔0–2,700 m间(林冠伦等,1990;李扬汉等,1998)。

综上所述,在这14个环境因子中,坡度、汇流累积量、年均温和年降雨量对喜旱莲子草分布影响较大,而日照和海拔影响最小,其他8个环境因子影响程度一般。

2.3 喜旱莲子草在中国潜在分布区的预测

本文使用了喜旱莲子草在中国的标本分布数据对其潜在分布区进行了生态位模型预测。由图3可以看出,喜旱莲子草在中国的适生区非常广泛,但目前的实际分布范围小于预测的严重威胁区($OV \geq 0.9$),因此仍有继续扩散的空间。该预测结果与喜旱莲子草在我国已入侵地区的地理生态式样基本相符。由图3可以看出,已经入侵的地区除了青海、甘肃的两个入侵点外,均被预测为严重威胁区域($OV \geq 0.9$)。我国南方地区包括云南、贵州、四川东部、重庆、广东和广西除南部以外的大部分地区以及湖南、湖北、江西、安徽、福建、浙江、江苏,北方地区包括宁夏、甘肃东南部、陕西、山西、河南、河北大部分地区、山东、内蒙古南部以及辽宁南部,都是喜旱莲子草入侵的严重威胁区($OV \geq 0.9$)。在此区域中,甘肃东南部、宁夏、陕西、山西、内蒙古南部以及辽宁南部尚未遭到入侵,其中陕西、山西以及甘肃东南部,因靠近已被入侵的地区,应予以特别关注,加强管理,防止喜旱莲子草在这些区域大规模扩散。而新疆南部、甘肃西部、青海、西藏、四川西部、吉林、黑龙江、内蒙北部的大部分地区以及海南被预测为喜旱莲子草的非适生区($OV < 0.5$),这些区域相对安全,即使已有零星的植株出现(如青海和海南),也难以形成大规模入侵。

致谢: 感谢中国科学院植物研究所植被与环境变化国家重点实验室桑卫国老师,在本文完成过程中对Desktop Garp软件的使用和相关数据的下载给予的帮助和指导!

参考文献

- Buckingham GR (1996) Biological control of alligatorweed, *Alternanthera philoxeroides*, the world's first aquatic weed success story. *Castanea*, **61**, 232–243.
- Fertig W, Reiners WA (2002) Predicting presence/absence of plant species for range mapping: a case study from Wyoming. In: *Predicting Species Occurrences: Issues of Accuracy and Scale* (eds Scott JM, Heglund PJ, Morrison ML, Haufler JB, Raphael MG, Wall WA, Samson FB), pp. 483–489. Island Press, Washington, DC.
- Fleishman E, MacNally R, Fay JP, Murphy DD (2001) Modeling and predicting species occurrences using broad-scale environmental variables: an example with butterflies of the Great Basin. *Conservation Biology*, **15**, 1674–1685.
- Geng YP, Pan XY, Xu CY, Zhang WJ, Li B, Chen JK, Lu BR, Song ZP (2007) Phenotypic plasticity rather than locally adapted ecotypes allows invasive alligator weed to colonize a wide range of habitats. *Biological Invasions*, **9**, 245–256.
- Hijmans RJ, Cameron SE, Parra JL, Jones PG, Jarvis A (2004) *The WorldClim Interpolated Global Terrestrial Climate Surfaces*. Version 1. 3. Available at <http://bioge.berkeley.edu> (June 2008)
- Julien MH, Broadbent JE (1980) The biology of Australian weeds. 3. *Alternanthera philoxeroides* (Mart.) Griseb. *Journal of the Australian Institute of Agricultural Science*, **46**, 150–155.
- Julien MH, Skarratt B, Maywald GF (1995) Potential geographical distribution of alligator weed and its biological control by *Agasicles hygrophila*. *Journal of Aquatic Plant Management*, **33**, 55–60.
- Kay SH, Haller WT (1982) Evidence for the existence of distinct alligator weed biotypes. *Journal of Aquatic Plant Management*, **20**, 37–41.
- Li J, Ye WH (2006) Genetic diversity of alligator weed ecotypes is not the reason for their different responses to biological control. *Aquatic Botany*, **85**, 155–158.
- Li YH (李扬汉) (1998) *Weeds of China* (中国杂草志), pp.81–82. China Agriculture Press, Beijing. (in Chinese)
- Li ZY (李振宇), Xie Y (解焱) (2002) *Invasive Alien Species in China* (中国外来入侵种). China Forestry Publishing House, Beijing. (in Chinese)
- Lin GL (林冠伦), Yang YZ (杨益众) (1990) Studies on biology and control of *Alternanthera philoxeroides*. *Journal of Yangzhou University (Agriculture and Life Sciences Edition)* (扬州大学学报(农业与生命科学版)), **11**(2), 57–62. (in Chinese with English abstract)
- Longstreth DJ, Bolanos JA, Goddard RH (1985) Photosynthetic rate and mesophyll surface area in expanding leaves of *Alternanthera philoxeroides* grown at two light levels. *American Journal of Botany*, **72**, 14–19.
- Longstreth DJ, Mason CB (1984) The effect of light on growth and dry matter allocation patterns of *Alternanthera philoxeroides* (Mart.) Griseb. *Botany Gazette*, **145**, 105–109.
- Lou YL (娄远来), Deng YY (邓渊钰), Shen JD (沈纪冬), Li YH (李亚浩) (2002) Research on *Alternanthera philoxeroides* in China. *Jiangsu Agricultural Sciences* (江苏农业科学), (4), 46–48. (in Chinese)
- Pan XY (潘晓云) (2005) *Canopy Constant: Growth Responses of Invasive Alternanthera philoxeroides to Shade, Density and Disturbance* (冠层恒定型: 喜旱莲子草对遮荫、密度

- 和干扰的生长反应). Post-doctoral Research Report, Fudan University, Shanghai. (in Chinese with English abstract)
- Pan XY (潘晓云), Liang HZ (梁汉钊), Sosa AJ, Geng YP (耿宇鹏), Li B (李博), Chen JK (陈家宽) (2006) Patterns of morphological variation of alligator weed (*Alternanthera philoxeroides*): from native to invasive regions. *Biodiversity Science* (生物多样性), **14**, 232–240. (in Chinese with English abstract)
- Pan XY (潘晓云), Geng YP (耿宇鹏), Sosa AJ, Zhang WJ (张文驹), Li B (李博), Chen JK (陈家宽) (2007) Invasive *Alternanthera philoxeroides*: biology, ecology and management. *Acta Phytotaxonomica Sinica* (植物分类学报), **45**, 884–900. (in Chinese with English abstract)
- Pedersen TM (1967) Studies in South American Amaranthaceae. *Darwiniana*, **14**, 430–463.
- Pedersen TM (1999) Amaranthaceae (*Catalogo de las plantas Vasculares de la Argentina*). II. In: *Monographs in Systematic Botany from the Missouri Botanical Garden* (eds Zuloaga FO, Morrone O). Missouri Botanical Garden, St. Louis, Missouri, USA.
- Peterson AT, Vieglais DA (2001) Predicting species invasions using ecological niche modeling: new approaches from bioinformatics attack a pressing problem. *BioScience*, **51**, 363–371.
- Scott JM, Heglund PJ, Morrison ML, Haufler JB, Raphael MG, Wall WA, Samson FB (2002) *Predicting Species Occurrences: Issues of Accuracy and Scale*. Island Press, Washington, DC.
- Scachetti-Pereira R (2002) Desktop Garp Lawrence, Kansas: University of Kansas Center for Research. <http://www.lifemapper.org/desktopgarp/> (October 2006)
- Shen JY, Shen MQ, Wang XH, Lu YT (2005) Effect of environmental factors on shoot emergence and vegetative growth of alligator weed (*Alternanthera philoxeroides*). *Weed Science*, **53**, 471–478.
- Shigesada N, Kawasaki K (1997) *Biological Invasions: Theory and Practice*. Oxford University Press, Oxford.
- Sosa AJ, Julien M, Cordo HA (2004) New research on alligator weed (*Alternanthera philoxeroides*) in its South American native range. In: *Proceedings of the XI International Symposium on Biological Control of Weeds* (eds Cullen JM, Briese DT, Kriticos DJK, Lonsdale WM, Morin L, Scott JK), pp. 180–185. CSIRO Entomology, Canberra.
- Stockwell D, Peters D (1999) The GARP modelling system: problems and solutions to automated spatial prediction. *International Journal of Geographic Information Systems*, **13**, 143–158.
- Tao Y (陶勇), Jiang MX (江明喜) (2004) Study on anatomical structure adaptation of stem of *Alternanthera philoxeroides* (Mart.) Griseb to various water condition. *Journal of Wuhan Botanical Research* (武汉植物学研究), **22**, 65–71. (in Chinese with English abstract)
- Waage JK, Reaser JK (2001) A global strategy to defeat invasive species. *Science*, **292**, 1486.
- Wang BR, Li WG, Wang JB (2005) Genetic diversity of *Alternanthera philoxeroides* in China. *Aquatic Botany*, **81**, 277–283.
- Wang R (王瑞) (2006) *Historical Reconstruction of Invasion and Expansion and Potential Spread of Some Threatening Invasive Species in China* (我国严重威胁性外来入侵植物入侵与扩散历史过程重建及其潜在分布区的预测). PhD dissertation, Institute of Botany of the Chinese Academy of Sciences, Beijing. (in Chinese with English abstract)
- Williamson M (1996) *Biological Invasions*. Chapman and Hall, London.
- Xu CY, Zhang WJ, Fu CZ, Lu BR (2003) Genetic diversity of alligator weed in China by RAPD analysis. *Biodiversity and Conservation*, **12**, 637–645.
- Ye WH, Mu HP, Cao HL, Ge XJ (2004) Genetic structure of the invasive *Chromolaena odorata* in China. *Weed Research*, **44**, 129–135.
- Zhang GC (张格成), Li JX (李继祥), Chen XH (陈秀华) (1993) Mainly biological characteristics of *Alternanthera philoxeroides*. *Weed Science* (杂草科学), (2), 10–12. (in Chinese)

(责任编辑: 李博 责任编辑: 周玉荣)