

## 基于 GARP 的加拿大一枝黄花在中国的分布区预测

余 岩, 陈立立, 何兴金

(四川大学生命科学学院, 四川 成都 610064)

**摘要:** 加拿大一枝黄花 (*Solidago canadensis*) 原产北美, 是在中国大陆危害最严重的入侵植物之一。本研究基于大量已有分布点数据, 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: 极端低温、年均温对加拿大一枝黄花的分布限制较小, 而坡度、坡向、年降雨量、雨日频率、汇流累积量、水流方向、极端高温和霜日频率对其分布影响显著。加拿大一枝黄花的潜在入侵区远大于目前的实际分布区, 因此仍会继续在中国扩散; 中国中南部和东北部是加拿大一枝黄花最易形成入侵的地区, 应采取措施防止其入侵。

**关键词:** 生态位模型; 入侵植物; 分布; 加拿大一枝黄花; 预测

中图分类号: Q 948

文献标识码: A

文章编号: 0253-2700 (2009) 01-057-06

### Potential Distributions of *Solidago canadensis* (Asteraceae) in China as Predicted by GARP

YU Yan, CHEN Li-Li, HE Xing-Jin<sup>\*\*</sup>

(1 College of Life Sciences, Sichuan University, Chengdu 610064, China)

**Abstract:** *Solidago canadensis* L. is a perennial plant of the family Asteraceae, native to North American. It is one of the most harmful alien species in mainland China. This research 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. The results indicated that: Environmental factors such as Slope, aspect, annual precipitation, wet days, flow accumulation, flow direction, maximum temperature and frost days greatly influenced the size of *S. canadensis*'s potential range, while parameters such as minimum temperature and mean annual temperature had little impact. Areas that we predict to have potential for invasion were still larger than those areas that had been invaded. Therefore, *S. canadensis* is predicted to continue to expand in China. Northeast and south-central China was most liable to be invaded; hence urgent measures should be taken there to prevent this species from further spreading.

**Key words:** GARP model; Invasive alien plant; Distributional area; *Solidago canadensis*; Predict

加拿大一枝黄花 (*Solidago canadensis* L.) 为菊科 (Asteraceae) 一枝黄花属植物, 又称为“黄莺花”、“麒麟草”、“幸福草”; 株高 1.5~3.0 m, 花期九到十月, 果期十二月。其既可以通过根茎的克隆生长进行无性繁殖, 又可以通过异花传粉进行有性生殖, 平均每株可形成两万多粒种子

(Hartnett and Abrahamson, 1979), 具有超强的繁殖力。加拿大一枝黄花原产北美, 曾作为观赏植物而被引种至世界各地, 后逸生为恶性杂草, 现已入侵至欧洲, 大洋洲, 美洲, 以及亚洲的部分地区 (董梅等, 2006; Lodge, 2001)。1935 年首次作为一种观赏植物引入上海, 逸生后扩散迅速

基金项目: 国家自然科学基金支持项目 (30670146); 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

收稿日期: 2008-07-07, 2008-12-24 接受发表

作者简介: 余岩 (1986-) 男, 在读研究生, 主要从事植物系统进化的研究。

(李博等, 2001), 目前在浙江、江苏、安徽、江西、湖北、上海、云南、台湾、四川、辽宁等省均有分布(郭水良, 1995; Jin 等, 2004; 李振宇和解焱, 2002)。加拿大一枝黄花喜好偏酸性、低盐碱的砂壤土和壤土, 岸堤、沼泽、滩涂、路边、荒地等是其最主要的入侵生境(郭水良和方芳, 2003; 黄华和郭水良, 2005), 入侵后严重破坏当地的生态环境, 对我国的生物安全造成了巨大威胁。

前人对加拿大一枝黄花做过多方面的研究, 主要集中在其危害与防治、化感作用及其机理、生理生态特性、化学成分等方面(郭水良, 1995; 郭水良和方芳, 2003; Jin 等, 2004; 黄华, 2005; 陆建忠, 2005)。在入侵预测方面, 陆建忠等(2007)使用相同气候方法(climat match)对加拿大一枝黄花的潜在分布区进行过预测, 但其研究以原产地气候数据为预测基础, 得出的结果与目前实际分布有所差异。

生态位模型 GARP (Genetic Algorithm for Rule-set Production), 是利用物种的已知分布数据和环境数据运行产生不同组合的模型来判断物种的生态需求, 然后预测物种潜在分布的方法(Stockwell and Peters, 1999; Higgins 等, 1996, 1999)。本文以加拿大一枝黄花在世界范围内, 尤其是中国范围内目前的分布数据为基础, 通过 Desktop Garp 1.1.6 (Scachetti-Pereira, 2002) 对加拿大一枝黄花在中国的地理分布进行了预测分析。

## 1 材料和方法

利用国家自然资源资源平台教学标本平台 (<http://mnh.scu.edu.cn>) 34 所高校标本馆的标本数据, 中国数字植物标本馆 (<http://www.cvh.org.cn>) 13 所标本馆的标本记录以及世界生物多样性信息机构 (Global biodiversity information facility, GBIF) 的记录, 参考国内的相关报道和文献资料, 收集加拿大一枝黄花的实际分布点资料。标本和文献记录都是物种在某地生长的有力证据, 但是由于加拿大一枝黄花的扩散过程主要由人为因素造成(人工栽培逸生, 运输途中逸生)(董梅等, 2006), 因此本文只选取了记录中的野生分布点, 共计 5604 个, 其中中国不重复的分布点 75 个。国内分布点的经纬度由国家测绘局地名研究所 1:100 万地名数据库获取。分布分析的底图为 1:400 万的中国行政区划图, 从国家基础地理信息系统网站 (<http://nfgis.nsd.gov.cn>) 下载获得。

分析所用的环境数据集包括气温、海拔、湿度等 14 个环境因子。其中温度、降水、海拔数据取自 Berkeley 大学 Worldclim 下载中心 (Hijmans 等, 2004; Weng and Zang, 2006), 其余采用软件自带的数据包 (Institute of Gazetteer Research, 1994)。温度、降雨、海拔等气候指标以经纬度为单位计算, 分辨率为  $0.1^\circ$ ; 地形信息、汇流累计量和水流方等流域指标以地理栅格为单位计算。

在使用 Desktop Garp 时, 每次运算随机选取 50% 的数据用于建立模型, 剩下 50% 的数据用于验证模型误差。创建模型规则时反复运算 1000 次或者按照结果的收敛而终止。在选取最优的环境因子时, 首先将 14 个环境因子一起进行 1000 次模型运算, 所获得的遗漏误差的算术平均值即为基础遗漏误差。然后使用刀切法 (Jack-knife) 依次省略每一个环境因子, 创建 14 组不同的环境因子组。对于每组环境因子重复创建 100 次模型, 共计创建 1400 个模型。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  $\times 95\%$ ), 则该环境因子将不被包含在最终的分析中 (王瑞, 2006)。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影响显著。

在最终分析中, 重复创建 1000 次模型, 创建模型规则时重复运算次数最大值 (Max iteration) 设为 5000, 收敛极限 (Convergence limit) 为 0.01, 规则类型 (Rule types) 使用默认设置, 并生成 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的面积最接近的 100 个模型, 即为最优模型。然后利用 ArcGIS 的空间扩展模块 (Spatial Analyst Tools), 将最优模型的预测结果进行等权重叠加。叠加后, 每一个栅格的数值为 0~100 之间, 这个数值代表 100 个预测模型中该栅格适合生长加拿大一枝黄花的模型数量。我们将每一栅格适合生长的模型数量所占的百分比称为重叠值 (Overlay Value, OV), 重叠值越大表示该栅格的环境参数越适合加拿大一枝黄花生存。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 ( $OV > 90\%$ ), 适宜生长区 ( $70\% < OV < 90\%$ ), 可以生长区 ( $50\% < OV < 70\%$ ) 和不适生长区 ( $OV < 50\%$ )。

## 2 结果

### 2.1 环境因子选择及模型选择

14 个环境因子共同进行模型运算所获得的基础遗漏误差为 1.8601。选取最优模型时 14 组环境因子所获得的遗漏误差的平均值列在表 1 中。其中极端低温和年均温会增加遗漏误差, 降低模型预测的准确性。因此, 这两个环境因子在

最终的分析中被删除。使用剩余的 12 个环境因子建立 1000 个模型，预测加拿大一枝黄花的潜在分布区。从 1000 个模型中筛选出的 100 个最优模型。以独立外部检验数据集为基础的卡方检验显示这 100 个模型在统计上都高度显著 ( $P <$

0.01)，即模型的预测能力远远好于随机模型 (Kriticos and Randall, 2001)。最终获得的 100 个最优模型的遗漏误差的平均值为 0.794，远小于基础遗漏误差。模型预测图与中国行政区图以及实际分布点叠加的结果保存于图 1 中。

表 1 生态位模型参数

Table 1 Environmental parameters

环境因子 Environmental parameters	影响 Effect	遗漏误差 Omission error	状态 Contain
坡度 Slope	显著 Significant	2.2317	+
坡向 Aspect	显著 Significant	1.9482	+
年降雨量 Annual precipitation (1961-1990)	显著 Significant	1.9347	+
雨日频率 Wet days (1961-1990)	显著 Significant	1.9251	+
汇流累积量 Flow accumulation	显著 Significant	1.9165	+
水流方向 Flow direction	显著 Significant	1.9061	+
极端高温 Maximum temperature (1961-1990)	显著 Significant	1.8759	+
霜日频率 Frost days (1961-1990)	显著 Significant	1.8627	+
太阳辐射 Solar radiation (1961-1990)	一般 General	1.8554	+
水汽压 Water vapour pressure (1961-1990)	一般 General	1.8361	+
地形指数 Topographic index	一般 General	1.8229	+
海拔 Elevation	一般 General	1.8093	+
极端低温 Minimum temperature (1961-1990)	误差 Uninfluential	1.7556	-
年均温 Mean annual temperature (1961-1990)	误差 Uninfluential	1.6989	-

+ 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

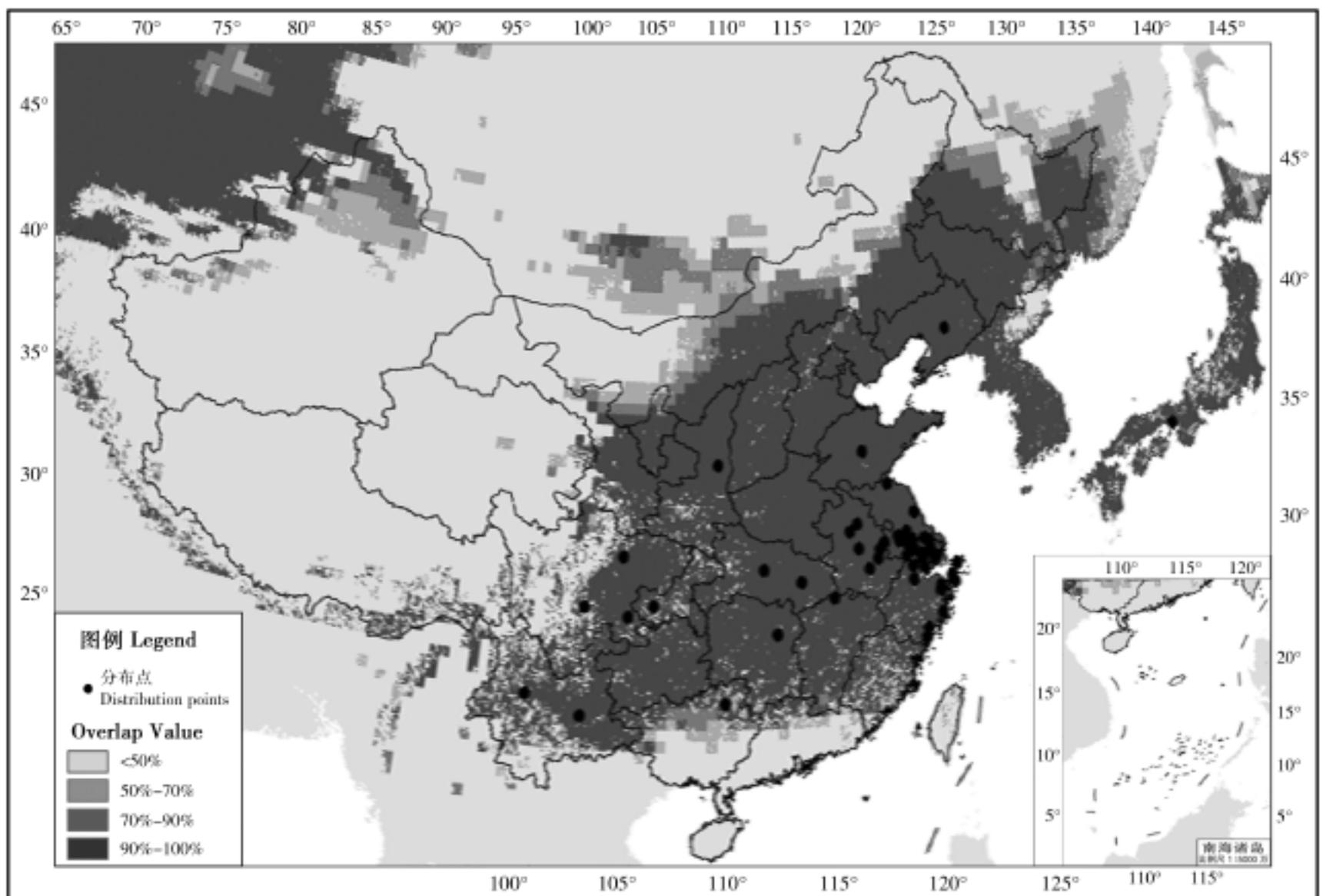


图 1 生态位模型预测加拿大一枝黄花在我国的适生区图

Fig. 1 Potential range prediction for *Solidago canadensis* applied GARP ecological niche model

## 2.2 潜在分布区的预测

由图 1 可以得出, 我国的中部和东北部的暖温带、中温带和寒温带区域, 尤其是华中地区, 是加拿大一枝黄花入侵的高危区域 ( $OV = 0.9$ )。四川东部、贵州、云南、重庆、广东和广西北部、湖南、湖北、江西、安徽、福建、浙江、江苏、宁夏、甘肃东南部、陕西、山西、河南、河北、山东、内蒙中部和东部的部分地区、辽宁、吉林东部甚至黑龙江南部都属于高危区域, 新疆北部也有小块的适生区 ( $OV = 0.5$ )。可以说, 整个长江流域, 东经  $105^{\circ}$  到  $125^{\circ}$ , 北纬  $40^{\circ}$  到  $25^{\circ}$  的广大陆地, 都有可能遭到入侵。而中国西部和最南端则被预测为加拿大一枝黄花的非适生区 ( $OV < 0.5$ )。

## 3 讨论

### 3.1 环境因子分析

#### 3.1.1 环境因子与无性繁殖的关系

加拿大一枝黄花无性繁殖力极强, 在较短的时间内能迅速在定居点扩展, 使其周围的植物很快退出竞争 (吴竞仑等, 2005)。其无性繁殖与水分关系密切, 适宜的土壤湿润度有利于其发达的地下块状茎向四周延伸, 从而进行无性繁殖进而扩大种群。表 1 中列出了 14 个环境因子对加拿大一枝黄花分布预测的影响。可以发现, 影响最显著的前六个环境因子全部与水相关: 坡度影响当地的水热分配, 且与该栅格内的水流速度相关; 坡向会影响光照和降水; 而汇流累积量代表其上游有多少个栅格的水流方向最终汇流经过该栅格。夏季的 6~8 月份是加拿大一枝黄花营养生长和克隆增殖的旺盛期, 在这一时期, 充足的降雨量与较高的雨日频率可以直接促进其快速进行无性繁殖 (黄华和郭水良, 2005)。刁春友和强胜 (2008) 在加拿大的调查发现, 土壤含水量对加拿大一枝黄花的营养生长具有极大影响。国内的调查也表明 (董莹雪等, 2007; 吴降星等, 2006): 在山区较少发现加拿大一枝黄花有大片入侵种群存在, 这可能是由于干旱的山坡、林地湿度不够、降水不足, 限制了其繁殖, 这些地区可以认为是不易受到入侵的生境; 而平坦的荒地、路边、水边等湿润、开阔的地段则是其主要入侵生境 (郭水良和方芳, 2003)。

#### 3.1.2 环境因子与有性繁殖的关系

加拿大一枝黄花有性繁殖产生的种子量很大, 每株可结籽数万粒, 通过风媒传播, 是其入侵的重要方式。在自然条件下, 加拿大一枝黄花种子在 3 到 10 月间均可萌发, 4 到 5 月份气候适宜, 雨水充沛, 是种子萌发的高峰期 (黄华和郭水良, 2005)。在这一时期, 与水相关的环境因子对其影响较大, 充足的降雨量与较高的雨日频率能大大提高种子的萌发率。加拿大一枝黄花最早在 9 月中下旬开始开花, 11 月底至 12 月中旬果实成熟, 在这一时期, 霜日频率对其结实影响最大。较高的霜日频率会严重降低植株的结实率, 从而导致加拿大一枝黄花次年的出苗率显著降低 (董梅等, 2006)。

从以上分析可以看出, 水份对于加拿大一枝黄花的有性和无性繁殖的影响都十分显著, 中国西部的温带地区降雨偏少, 有大片的荒漠和盐碱地, 因此被预测为加拿大一枝黄花的非适生区; 而大多数雨水充沛的地区都是较易被入侵的地区。这一特点也可以在加拿大一枝黄花的防治中加以利用: 例如在湿润的地段对其进行重点防治; 在干旱少雨的季节对其进行拔除和清理。

#### 3.1.3 对环境因子的抗逆性

加拿大一枝黄花之所以能够快速扩散, 与其对恶劣环境的抗逆性是分不开的。无论成体还是幼苗, 加拿大一枝黄花对多种不良环境因素都有较强的抗性。在本文研究的 14 个环境因子中, 太阳辐射 (Solar radiation) 和海拔 (Elevation) 对预测结果无显著影响, 而极端低温和年均温甚至会造成预测误差。孙晓方等 (2008) 的研究表明: 加拿大一枝黄花可通过调节形态、生长、光合生理等特征来适应生长环境的光变化, 对光强的适应范围较宽, 同时对低弱光强具有一定的可塑性。在本文所获取的标本中, 加拿大一枝黄花分布的海拔范围为 70~1900 m (重庆金佛山), 说明我国大部分地区海拔并不能限制其生长。姚坚等 (2007) 的研究发现, 在最低气温达  $-2.4^{\circ}\text{C}$  的低温冷害天气, 加拿大一枝黄花无任何冻害发生, 植株仍正常生长, 仅新出土的幼苗在生长速度上有所减缓, 可见其对低温的抗性极强。同时, 加拿大一枝黄花之所以能够在多处爆发, 除了本身抗逆性较强之外, 也与人为因素密不可分。人类

的运输使其可以轻易的跨越各种天然屏障；而大规模的栽培也为其适应周边环境创造了条件。因此，要杜绝其大规模爆发和复发，还应加大防控力度，严禁在易入侵地区（及周边地区）贩售和种植加拿大一枝黄花。

虽然加拿大一枝黄花对很多环境因子具有极强的抗性，但是郭水良和方芳（2003）的同工酶谱实验证明，加拿大一枝黄花在高温下受到的损害较低温大。由表 1 也可以看出，极端高温对预测结果影响显著。根据原产地的分布数据，加拿大一枝黄花离赤道最近分布点的纬度为 N 24.5129°，最远为 N 53.9330°，可见亚热带和温带气候比热带更有利于其的生长。本文的预测结果表明：中国南端的亚热带和热带地区最大温度过高，被预测为加拿大一枝黄花的非适生区；而东北三省除最北端外都为其适生区。黄华和郭水良（2005）的研究发现，加拿大一枝黄花茎和叶的能量在暑期高温干旱季节向地下部分转移，因此尽管高温和干旱对加拿大一枝黄花影响较大，但也要防止其通过无性繁殖恢复种群。

### 3.2 潜在分布区分析

加拿大一枝黄花的生态位模型的预测结果与其在我国已入侵地区的地理生态式样基本相符，所有已经入侵的地区均被生态位模型预测为威胁严重区域（OV 0.9）。在最终选定的 100 个模型中，外部遗漏误差的平均值仅为 0.794，说明预测结果准确度较高。这一结果显示出生态位模型在我国的入侵生物预测中具有广泛的应用前景，应当加以推广。

由分布预测图（图 1）可以看出，加拿大一枝黄花在中国的适生区非常广泛，分布远没有达到饱和，仍可继续扩散。由于近年的人工引种栽培，天然屏障无法有效阻止加拿大一枝黄花的扩散。因此一旦其逸生至适合的生境中，就会快速的入侵到周边地区，由城镇向四周的郊野、荒地扩散，最终严重破坏当地的生态环境。但是其作为一种有较大经济价值的观赏花卉，有关部门可以根据当地特点区别对待。对于图中所示的加拿大一枝黄花的入侵高危区域（OV 0.9），必须严格禁止种植和销售加拿大一枝黄花，加大防控力度，以防形成大规模入侵。而对于图中所示的非适生区（OV < 0.5），虽然这些区域相对安全，

即使有逸生的植株也难以形成入侵，但是仍不能放松警惕，应严格控制其销售规模与范围，以防其扩散到临近易入侵的地区。

陆建忠等（2007）对加拿大一枝黄花分布预测的结果和本文有一些差异。山东，河北，辽宁等地都没有被包括在其预测的最小分布范围内，湖南南部以及陕西和山西的大部分地区甚至未包括在其最大预测分布范围内。这一误差产生的原因可能是：陆建忠等的预测是以北美的气候数据为基础，而加拿大一枝黄花从 1935 年至今曾被多次引进，在长期的栽培和逸生中已经产生了较高的种内遗传多样性（马森，2003），从而进一步适应了当地生态环境。若继续使用原产地的气候数据和标本分布，则会导致预测范围偏小。因此对加拿大一枝黄花（及其他入侵生物）的分布预测，应以入侵地本地的分布和环境数据为基础（Williamson, 1996, 2001），而并非原产地。另一方面，所选环境因子和预测算法的不同也是误差产生的重要因素。在未来的研究中，应当从分子和细胞等角度对加拿大一枝黄花在原产地和入侵地的特性进行更深入的探讨，进一步探索其入侵机制；在分布预测方面，应当加入更多的环境因子，使用更优化的算法，为加拿大一枝黄花乃至其他外来生物的入侵做出更准确的预警。

### 【参 考 文 献】

- 刁春友，强胜，2008. 加拿大一枝黄花在加拿大发生状况考察 [J]. 植物检疫, 22 (2): 123—125
- 吴降星，刘桂良，陈永亭，2006. 浙东沿海地区加拿大一枝黄花发生规律与防治技术初探 [J]. 安徽农学通报, 12 (4): 114—115
- 姚坚，费子宝，杨晓琴等，2007. 湖州市加拿大一枝黄花生物学特性与防控对策初探 [J]. 浙江农业科学, 1: 89—90
- Dong M (董梅), Lu JZ (陆建忠), Zhang WJ (张文驹) et al., 2006. Canada goldenrod (*Solidago canadensis*): an invasive alien weed rapidly spreading in China [J]. *Acta Phytotaxonomica Sinica* (植物分类学报), 44 (1): 72—85
- Dong YX (董莹雪), Ma L (马玲), Wu HR (吴海荣) et al., 2007. Quantitative Survey on Distribution and Occurrence of *Solidago canadensis* in East China [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences* (安徽农业科学), 35 (27): 8563—8565
- Guo SL (郭水良), 1995. Studies on the origin, spread and bioecological characteristics of exotic weeds [J]. *Guihaia* (广西植物), 1 (1): 89—95

- Guo SL (郭水良), Fang F (方芳), 2003. Physiological adaptation of the invasive plant *Solidago canadensis* to environments [J]. *Acta Phytocologica Sinica* (植物生态学报), 27 (1): 47—52
- Hartnett DC, Abrahamson WG, 1979. The effects of stem gall insects on life history patterns in *Solidago canadensis* [J]. *Ecology*, 60: 910—917
- Higgins SI, Richardson DM, Cowling RM, 1996. Modeling invasive plant spread: the role of plant-environment interactions and model structure [J]. *Ecology*, 77 (7): 2043—2054
- Higgins SI, Richardson DM, Cowling RM, 1999. Predicting the landscape — scale distribution of alien plants and their threat to plant diversity [J]. *Conservation Biology*, 13: 303—313
- Hijmans RJ, Cameron SE, Parra JL *et al.*, 2004. The WorldClim Interpolated Global Terrestrial Climate Surfaces. Version 1.3. Available at <http://biogeo.berkeley.edu>
- Huang H (黄华), Guo SL (郭水良), 2005. Study on reproductive biology of the invasive plant *Solidago canadensis* [J]. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 25 (11): 2795—2803
- Institute of Gazetteer Research, 1994. Gazetteer of China (中国地名录) [M]. Beijing: China Map Press
- Jin L, Gu YJ, Xiao M *et al.*, 2004. The history of *Solidago canadensis* invasion and the development of its mycorrhizal associations in newly-reclaimed land [J]. *Functional Plant Biology*, 31 (10): 979—986
- Kriticos D, Randall R, 2001. A comparison of systems to analyse potential weed distributions [M]. Collingwood, Victoria, Australia: CSIRO publishing, 61—67
- Li B (李博), Xu PS (徐炳声), Chen JK (陈家宽), 2001. Perspectives on general trends of plant invasions with special reference to alien weed flora of Shanghai [J]. *Biodiversity Science* (生物多样性), 9 (4): 446—457
- Li ZY (李振宇), Xie Y (解焱), 2002. Invasive Alien Species in China (中国外来入侵种) [M]. Beijing: Forestry Publishing House
- Lodge DM, Williams S, Macisaac HJ *et al.*, 2006. Biological invasions: recommendations for U. S. policy and management [J]. *Ecological Applications*, 16 (2): 2035—2054
- Lu JZ (陆建忠), Qiu W (裘伟), Chen JK (陈家宽) *et al.*, 2005. Impact of invasive species on soil properties: Canadian goldenrod (*Solidago canadensis*) as a case study [J]. *Biodiversity Science* (生物多样性), 13 (4): 347—356
- Lu JZ (陆建忠), Weng ES, Wu XW *et al.*, 2007. Potential distribution of *Solidago canadensis* in China [J]. *Acta Phytotaxonomica Sinica* (植物分类学报), 45 (5): 670—674
- Ma M (马淼), 2003. Invasion Biology of *Solidago canadensis* [D]. Ph. D. Dissertation. Shanghai: Fudan University
- Scachetti-Pereira R, 2002. Desktop Garp. Lawrence, Kansas: University of Kansas Center for Research. <http://www.lifemapper.org/desktop-garp> (October 2006)
- Stockwell D, Peters D, 1999. The GARP modeling system: problem and solutions to automated spatial prediction [J]. *International Journal of Geographic Information Systems*, 13 (2): 143—158
- Sun XF (孙晓方), He JQ (何家庆), Huang XD (黄训端) *et al.*, 2008. Growth characters and chlorophyll fluorescence of goldenrod (*Solidago canadensis*) in different light intensities [J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica* (西北植物学报), 28 (4): 0752—0758
- Wang R (王瑞), 2006. Historical reconstruction of invasion and expansion and potential spread of some threatening invasive species in China [D]. Beijing: Graduate University of Chinese Academy of Sciences
- Weng ES, Zang G, 2006. Modeling distribution changes of vegetation in China under future climate change [J]. *Environmental Modelling and Assessment*, 11 (1): 45—58
- Williamson M, 1996. Biological invasions [M]. London: Chapman and Hall, 61—99
- Williamson M, 2001. Can the impact of invasive plants be predicted? Plant invasions: species ecology and ecosystem management [M]. Leiden: Backhuys Publishers, 11—19
- Wu JL (吴竞仑), Li YF (李永丰), Wang YZ (王一专) *et al.*, 2005. Plant community in growth areas of *Solidago canadensis* in southern jiangsu province [J]. *Jiangsu Journal of Agricultural Sciences* (江苏农业学报), 21 (3): 176—179