

外来木本植物入侵的生态预测与风险评价综述

郑景明¹, 李俊清¹, 孙启祥², 周金星²

(1. 北京林业大学省部共建森林培育与保护教育部重点实验室, 北京 100083;
2. 中国林业科学研究院林业研究所, 国家林业局林木培育重点实验室, 北京 100091)

摘要:外来植物引种导致的入侵已经成为当前生物多样性保育和引种工作面临的一个紧要研究课题。综述了木本植物入侵的生态预测和生态风险评价方面的国内外相关研究进展。首先介绍了目前国内外木本植物引种的概况, 对木本植物入侵的生态预测基本原理做了较为详细的总结。目前比较被认可的生态预测途径主要包括编辑入侵植物名录利用入侵历史纪录预测、物种特征作为入侵的预测指标、繁殖体压力作为建群概率的决定性因素、环境匹配作为入侵潜力的预测工具及专家意见等, 并对物种特征进行了归类和分析。物种特征指标主要包括物种的繁殖和快速生长性状指标、对入侵地区局部条件和干扰体系的适应性指标、生物地理分布指标等, 并指出在生态预测中单独使用这些指标是不严谨的, 而应当多途径互相结合验证。同时还简介了 WRA 等几个应用较为广泛的实用性植物入侵风险评价系统。分析了目前国内外在木本植物入侵的生态预测方面面临的一些困难, 包括入侵机理的复杂性导致的预测难度增大和可信性下降, 所用数据库标准的不统一和更新的困难等, 指出在进行木本植物引种的生态预测和风险评价研究的同时, 必须加强相关法律法规建设, 重视入侵机理研究, 完善相关的数据库。出于实际情况的限制, 可以借鉴国际上实用性杂草风险分析和有害生物风险分析的方法, 逐步建立我国的入侵风险评价系统, 以满足目前对木本植物入侵的预测和风险评价的需求。

关键词:木本植物引种; 入侵; 生态预测; 风险分析

文章编号: 1000-0933(2008)11-5549-12 中图分类号: Q143 文献标识码: A

Review of ecological prediction and risk analysis on woody plant invasion

ZHENG Jing-Ming¹, LI Jun-Qing¹, SUN Qi-Xiang², ZHOU Jin-Xing²

1 The Key Laboratory for Silviculture and Conservation of Ministry of Education, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

2 Forestry Institute of the Academy of Forestry, Key Laboratory of Forest Tree Breeding of State Forestry Administration, Beijing 100091, China
Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(11): 5549 ~ 5560.

Abstract: Invasion by introduced plants is an emerging problem to biodiversity conservation and species introduction. This paper reviewed the theories and advances in ecological prediction and risk analysis of invasion by introduced woody plants. Current status of woody plant introduction both home and abroad were summarized, followed by discussions on fundamental theories of ecological prediction of invasion by introduced plants. Some commonly accepted pathways of invasion prediction were discussed, including compilation of invader checklist by the invasion history in other regions, use of species traits as predictors of invasiveness, propagule pressure as determinants of invasion probability, climate-matching as prediction tools of invasion potential, and conference of specialist's opinions etc. In trait-based prediction of invasiveness, major predictors could be categorized into three types, including breeding and fast growth attributes, adaptation to local environments and disturbance regimes, and biogeography distribution index. In terms of discussion on the proper use of criteria, the authors

基金项目:国家林业科技支撑计划资助项目(2006BAD03A15);北京市教委资助项目(JD100220648);国家自然科学基金资助项目(30870231)

收稿日期:2007-12-10; **修订日期:**2008-09-16

作者简介:郑景明(1971~), 黑龙江省鸡西市人, 博士, 主要从事入侵生态和恢复生态研究. E-mail: zhengjm@bjfu.edu.cn

Foundation item: The project was financially supported by Ministry of Science and Technology of China (No. 2006BAD03A15), Beijing Education Committee(No. JD100220648), National Natural Science Foundation of China(No. 30870231)

Received date:2007-12-10; **Accepted date:**2008-09-16

Biography: ZHENG Jing-Ming, Ph. D., mainly engaged in invasion ecology and restoration ecology. E-mail: zhengjm@bjfu.edu.cn

think that the abovementioned pathways should be used integrally. Meanwhile, some practical risk assessment systems such as WRA were briefly described. At the end of the paper, difficulties in ecological prediction on introduced woody plants were identified, i. e., theoretical complexity of plant invasion which confuses the prediction and lower its credibility, different standards adopted by checklists and floras in different regions which pose difficulty in interpretation of predicting results and update of the database. The authors advocate establishing related laws and regulations, enforcing invasion mechanism research, and improving database of introduced woody plants. Given practical limitations, methodologies from weed risk assessment and pest risk analysis should be adopted for developing practical risk assessment systems to meet the urgent needs for ecological prediction in China.

Key Words: introduced woody plant; invasion; ecological prediction; risk assessment

生物入侵已成为导致世界生物多样性丧失的第二位因素,引起了各国政府和科学家的高度重视^[1,2]。早期的入侵生态学研究多数是入侵自然和半自然生态系统的草本植物,但是出于对外来木本植物入侵草原^[3,4]、湿地^[5,6]、非洲硬叶灌木生态系统^[7,8]、天然林^[9,10]等生态系统的关注,针对木本植物入侵的机理研究越来越多。另外很重要的一方面原因是,人类有意引种外来种导致入侵事件的广泛发生和巨大影响引起了世界各国的重视,对外来木本植物入侵风险的研究逐渐增多^[11~13]。目前我国植物入侵种已被研究和记载的常见种共 76 属 108 种,其中 50% 以上为有意引种^[14]。与草本植物入侵种存在很多偶然带入的情况不同,大多数入侵性木本植物都是人类引种的产物,即使当时对引种可能会带来一些麻烦有所预料,但出于经济等方面的原因还是进行了引种。在全球经济发展迅速、物种交流频繁的今天,对于木本植物引种所导致的入侵风险必须提高认识和加强研究,这不但有利于防范木本植物引种带来的入侵风险,同时还能丰富入侵生态学理论,从这个角度说,预测木本植物入侵有着重要的理论及实际意义。

如何对外来植物乃至木本植物的入侵进行生态预测和风险评价? 外来种入侵的机理是非常复杂的,外来植物入侵不但涉及外来种本身的一些特征,还涉及到外来种与所处生物、非生物环境之间的交互作用,乃至环境对入侵过程的反馈机制,因此对于外来种的预测和风险评价中必然存在一些不确定的因素和很多困难,从而需要更多的研究。本文试图概述目前木本植物入侵的现状,总结目前预测木本植物入侵的生态学途径和指标,简要介绍国内外外来植物入侵风险评价系统研究现状,并对该领域存在的问题进行讨论。

2 木本植物入侵的现状

物种的自然扩散自古皆然,然而速度非常缓慢,可是由于人类活动全球化程度的提高,外来种到达新区域的速度大大加快,在过去的 500a 里,尤其是近 200a 来,全球入侵物种的数目增加了几个数量级^[15]。目前就分布而言,在世界的各个角落几乎都存在外来种,南极洲也不例外,自 20 世纪以来不断有外来植物引入^[16]。美国自哥伦布发现新大陆以来,已经有 2000 多种植物成功建群^[17];墨西哥过去 400a 中引入的植物中有 4000 余种已经归化,南非的外来植物约 800 种,欧洲许多国家外来植物数量达几百种^[18,19]。笼统推算,在未来全球植物引种的对象中,将有近 1000 余种危害严重的潜在入侵性植物还没有被发现^[20]。木本植物由于具有的重要经济价值,其有意引种比例高于其他植物,如在英国,只有 35 种乔木和高灌木种被认定是本地种,而非本地的木本植物(包括已经归化和尚未归化的)则多达 900 余种^[21]。有意引种木本植物而造成入侵的最知名的例子恐怕是在全世界推广松树和桉树作为用材林树种而造成的入侵,此外不少用于改良土壤、园林绿化用的各种引种的乔灌木也造成了入侵,例如乌柏(*Sapium sebiferum*)原是中国本地种,自 18 世纪作为观赏树种引入美国后,沿美国海岸线迅速扩大生长范围,被列入美国最不需要的 12 种植物之一^[22]。再如怪柳(*Tamrix* spp.)原来是欧亚地区的本地种,约 100a 前作为装饰植物、防风林、水土保持植物引种到北美,近 50a 怪柳属植物传遍美国西部 23 个州的干旱和半干旱地区,几乎所有水系附近的多年生植被群落都受到入侵^[23]。

对于全球木本植物的入侵规模,除了少数拥有完善数据库和评价体系的国家如美国、澳大利亚等,目前多数国家因种种原因很少有准确的统计结果,尤其在亚洲温带和热带地区。加之研究者的术语不统一、外来种

的入侵时滞等原因,只能从一些研究中一窥全球入侵性木本植物的数量、分类分布、用途、来源地等方面的概况。

国际混农林业研究中心的 MPTS 数据库(其中包括 2000 余种用于混农林业的植物种的信息),其中 7% 物种在一定环境中表现出入侵性,1% 物种在半数以上的记录中被认为是入侵种^[24]。在 Binggeli^[25] 根据有关研究文献建立的本本植物入侵种数据库中,世界范围内有 653 种入侵性木本植物,分别属于 110 科 315 属,各物种的入侵性程度不同,其中 184 种(25%)被认为具有高度入侵性。在数量众多的入侵性木本植物中,多数是通过园艺、林业、农业等行业特意引入种植的。例如,在上述具有高度入侵性的 184 种木本植物中,从引入目的看,18% 用于林业,27% 用于防护林、遮荫和其他景观用途,其中乔木(高度大于 15m)占 25%。Weber^[26] 在其编辑的环境杂草数据集中,对 448 个重要自然环境入侵种进行了全面的描述。根据这一数据集,从不同角度统计得到如下结论:生活型方面,24.4% 灌木、19.2% 乔木、16.7% 多年生草本植物、10.7% 多年生禾草;其中几乎一半的本本入侵种表明该类植物的入侵风险很大。引入途径方面,只有 19.2% 没有明确的商业用途,可认为是无意引入的,57.2% 是作为装饰植物引入,13.2% 引入用于控制水土流失和改善土壤。

FAO 对世界林业树木的入侵情况的总结中,编辑了包括 1121 种木本植物数据集,其中被划分为入侵性的乔木或木本灌木共计 433 种,还有 74 种被认为已归化的。其中林业使用木本植物中,282 种被认为是入侵种,40 种被认为已归化但非入侵种。在这些被认定是入侵种的物种中,203 种用于混农林业,292 种用于环境改善等^[15]。根据这一项目目前比较全面的总结,入侵种在 7 个地理区域(欧洲、非洲、澳洲、北美、南美、太平洋地区、亚洲)都存在。非洲最多(87 种),最少为欧洲(12 种)和亚洲(14 种)。但是,绝大多数物种只是在一个地理区域是入侵种,即使是最具入侵性的树种发生入侵的国家也远远少于其引种的国家。大多数入侵种的原分布区包括亚洲,极少数入侵种原分布区包括太平洋地区。

我国是植物引种较多的国家,截止到 1970 年,我国共引种外来植物 837 种隶属于 267 科,约占栽培植物总数的 25%~33%^[27]。树木引种数量也很大,据 1983 年的数据统计,我国已引进外来树种 85 个科 570 种^[28],而最新的统计数据则表明,我国引种树种已达 1700 多种(包括品种)^[29]。然而目前对国内的入侵性木本植物数量尚未见到权威的统计结果。虽然有研究表明,我国目前已确定有 188 种入侵植物,其中 7 种木本植物都是林业或园林部门有意引入的,并因此给林业等部门造成巨大的经济损失^[30],但是这可能只是我们目前所知的极少表现出某种入侵征候的本本入侵植物的数量,鉴于未来我国对环境问题的重视和将更多地承办国际性会议如园艺博览会,奥运会等,国家势必加大对绿化造林、城市美化等方面的投入,从国外引种不可避免而且强度将增大,如仅北京在近 6~8a 就引种了 128 种木本植物用于林业生产和园林化^[31]。虽然引入的外来种不一定会成为入侵种,但考虑到多数木本植物的长寿性和危害严重性等问题,对木本植物的入侵进行生态预测和生态风险评价研究将是非常必要而迫切的。

3 木本植物入侵的生态预测指标

什么样的物种会成为入侵种?这个问题可能在人们观察到生物入侵现象之后就一直思考的,早期对外来种入侵的研究也将其列为一个课题(如 SCOPE)。对外来植物入侵的生态预测研究一直受到科学家和各国政府的关注,但是人们逐渐发现这其实并不是一个简单的问题,很多看起来与入侵性相关的指标其实缺乏严格的理论依据和一贯的案例支持^[32]。学者认为,虽然不能找到一个预测外来植物入侵的通用的理论或标准,但是基于现有的知识和经验,通过合适的方法还是能够预测较小分类范围和地理区域的外来物种的入侵可能性^[33]。为了解外来木本植物入侵的生态预测的原理,下面对与外来植物入侵生态预测的主要途径进行初步分析,同时对一些常用的指标进行介绍。虽然下列案例中的对象有些可能是泛指的外来植物而不只是外来木本植物,但其原理对木本植物入侵生态预测研究仍具有重要借鉴意义。

3.1 编辑入侵植物名录利用入侵历史纪录预测

某物种在其自然分布区之外的其他地区曾经有过入侵的记录,则它在另外地区入侵成功的可能性也会很大,因为已经证明在某地区具有入侵性的物种,很可能因为其拥有的某些特性增大其在其他地区成为成功的

入侵种的风险^[34]。因此,从实用的角度出发,利用过去的入侵记录预测其未来的入侵可能是非常重要的,几十年前美国农业部就认可了这一点,很多外来植物的入侵性判断都是基于 Reed 编辑的一个包括 1200 种具有杂草性并会在美国归化的物种名单,该名单上的物种在原分布区和新分布区的表现主要来自他国的文献^[35]。曾经有过入侵历史现在被认为是目前植物入侵性的生态预测中最为可靠的指标^[36],除非有其他明确的证据,否则不应该轻率地否定这个结论,这对于广泛引种的木本植物尤其适用。基于这样的判断,可以充分利用地方性的入侵种名单、杂草志及一些植物志中所记载的信息,对所研究对象作出初步的判断。有很多这样的“黑名单”可供借鉴,如 Holm 等^[37]编辑的世界 100 种最坏的杂草名单,Weber^[26]编辑的全球环境杂草集,我国学者李振宇和谢焱^[38]编著的中国入侵物种名录等。目前专门针对入侵性木本植物的名单主要有全球针叶树种入侵名录^[39]和以热带地区为主的全球木本入侵种名录^[25]。这些名单对于提高外来木本植物入侵的生态预测准确率也应该有极大的帮助。

但是对于预测在原分布地外表现没有记录的物种,即某些“新”外来种,入侵历史这项指标并不适用。因此,通过入侵历史预测外来植物的入侵性存在局限性,可能对未来的入侵种预测提供一个“近视”的视角,因为许多没有入侵历史的物种会经常被忽视。同时应当注意的是,有些区域性的入侵种名单可能并不十分可靠。如 Pysěk^[29]利用两个比较完善外来植物数据库,对捷克的外来植物进行了入侵性评价的实际验证工作。这两个数据库分别是 1973 和 1998 年由同一组人员按相同的方法编制而成,因为其中有外来种的具体分布位置的信息,作者对比了近 30a 期间 28 个外来植物种的入侵性分类是否正确,发现 39.3% 的入侵种分类正确而 60.7% 原定入侵种的定性可认为是失败的。

3.2 物种特征作为入侵的主要预测指标

预测外来木本植物的入侵最常用也是最基本的指标还是物种的生活史性状,即植物生命过程中某些特定性状的组合。入侵生态学中早期出现的名词入侵性(invasiveness)也暗示着这种差别,例如在生物入侵研究的 SCOPE 项目中,入侵性作为一个重要命题激励了很多科学家进行这一领域的探索。尤其是因为生物的一些性状,如环境忍耐性,生活史特征等,对于没有入侵性历史的物种也同样具有预测方面的价值,所以基于性状的生态预测方法目前在越来越多的分类群和生态系统中得到应用,也越来越成为预测建群可能性、传播和影响的可靠向导^[3]。

关于植物入侵性相关性状的最早概括当属贝克目录。贝克目录针对农田和野地杂草的情况,总结出了“理想杂草(the ideal weed)”一些特征,主要体现在种子发芽、幼苗生长、有性成熟期、授粉方式、种子生产、无性繁殖能力、对气候和土壤变异具有强的忍耐性、是否具有特殊的反式竞争等方面^[40]。但后来有相当多的学者质疑这个标准,理由是从一些入侵种中总结的性状有时候不一定在其他入侵种中发现,实际的观察中往往存在不符合这些规律的入侵植物;而且贝克目录偏重于在农田和荒野地中发生的杂草的性状,但植物入侵种实际上还包括很多人工引种的草本和木本植物,被入侵的生境类型远远超过这两种类型。最近二十余年来,基于性状的分析已经用于很多陆生植物入侵的生态预测,途径预测准确率已经有很大的提高^[2]。多数研究认为与木本植物入侵性有关的性状主要集中在下面几个方面:

3.2.1 物种的繁殖、生长和传播性状指标

植物的生活史,主要包括繁殖、传播、生长几个方面的性状组合。目前木本植物入侵性预测方面比较被认可的生活史指标包括:小种子重量、短的有性繁殖成熟期,无脊椎动物传播、无性繁殖能力、能否与某些本地种如菌根菌、授粉昆虫等形成互利关系等方面^[34],如一些研究指出,克隆繁殖的树木和一些固氮木本植物具有高度入侵性^[41];较短的有性繁殖成熟期、较长的花期和果期及不需要特别的种子萌发条件是一些木本入侵植物的特点^[42];常见鸟类对种子的传播、较长的花期和多种子的果实等都与木本植物的入侵性有关^[43,44]。幼苗相对生长速度与木本植物的入侵性密切相关^[45,46];比叶面积可以很好地预测外来木本植物的入侵性,并且该指标有很好的生理生态学解释^[47]。Rejmánek 等对全球松属植物的入侵性预测研究中,逐步判别分析筛选指标,最后的预测公式中 3 个指标是:最短成熟时间,种子大小年平均间隔时间,平均种子重量^[48]。虽然该项

研究范围只限于松属植物,但这是目前已知的最成功的入侵性预测研究(100%准确率)。总体上说,多数研究对无性繁殖特征和种子大小两个指标都有肯定的态度,植物高度则基本被否定^[49],而对其他生活史指标的选择不同的研究中则具有很大不同^[50]。应当指出的是,入侵是个多步骤的过程,与某一步相关的性状往往对其他步骤不一定重要,而建群的可能性同传播的可能性相比,两者的相关性可能完全不同^[2]。

3.2.2 对入侵地区局部条件和干扰体系的适应性指标

多数外来植物入侵性的预测研究主要采用的生活史指标,而往往很少包括详细的生理生态适应指标,因为这类指标的准确信息通常难以获得。但有研究者认为,虽然大尺度上繁殖方面的性状可能与入侵成功有重要的相关性,对于较小范围内,入侵种与非入侵种的这类指标则不再有明显差异,应当考虑局部环境的特征,而且此时生理生态因子更为重要^[45]。在对美国新罕布什尔州的外来入侵木本植物进行预测研究中,采用了大量的生理、形态、繁殖、生长所需条件各类指标,通过逐步筛选发现,最后保留下来一些指标主要是对植物对局部环境条件的适应性指标,如最小土壤 pH 值、最低温度、土壤肥力、耐阴性等^[45]。这种观点实际上在各项研究中不同程度地表现出来,如 Tucker 和 Richardson 对南非的高山硬叶灌木群落的入侵木本植物进行预测时,着重提出了物种对该生态系统的盛行火干扰体系的生活史适应的重要性(指标包括幼年期长度、成株火后存活率、土壤种子库有效持续时间)^[7]。实际上,这相当于考虑当地特定的局部物种库和生态系统特性对于外来种的抵抗作用(即群落可入侵性方面),应当针对不同的研究区域提炼具体的生境特征和本地群落特征指标,有利于针对具体的小范围生境取得更精细的预测框架和更准确的预测结果^[51]。

3.2.3 生物地理分布指标

根据引种理论和实践,特定区域引种成功率较高的情况是可以理解的,因为引种成功的前提是气候相似性,或者两地的物种起源有某些关联性。在入侵性预测方面,这一推理同样成立。很多情况下,外来物种的自然地理分布区越宽,其平均局部丰度越高。在同一个属内,较重要的杂草有着较宽的自然分布^[41]。Goodwin 等研究 165 对入侵加拿大外来植物和同属本地种,发现只有在原产地的分布区大小能很好判别是否入侵种(70%准确率),从而认为这一指标比生物性状要更可靠^[49]。虽然对一些入侵种和属的研究支持这一结论,但也有的外来种的情况不是如此^[32]。

但是单纯采用生物学性状预测植物的入侵性也存在一些问题。入侵的发生不仅与物种的生物特性有关,同时还与生物-环境的交互作用有关。有的物种在原分布地并没有表现出具有入侵潜力的性状,但在新的生态环境中其表现则完全不一样了,产生这种差异往往并不涉及生活史性状的改变。同时,区域环境的时空变异、外来种入侵的时滞现象及入侵过程中可能存在的快速进化,都可能影响到具体物种的生活史性状指标的测定^[50],所以这种途径的预测能力与能得到多少有关某物种和所入侵环境的特性方面的信息成正比。尽管存在很多问题和困难,基于性状的入侵预测还是有很大吸引力,因为它提供了一个关于入侵潜力的客观方法,被一些研究者认为预测外来种入侵性的最科学的方式^[52]。

3.3 繁殖体压力作为建群概率的决定性因素

繁殖体压力是对释放到一个区域的外来种个体数量的综合测度^[53]。它包括一次释放的物种个数的绝对值(繁殖体大小)和释放事件的具体次数(繁殖体数目),两者的增加都会导致繁殖体压力的增大。一些研究表明,引入种的建群概率一般随着释放事件的频率和释放个体数(繁殖体压力)的增加而增大^[54],频繁引种的木本植物更容易成为入侵种^[55]。4 种入侵树木的研究表明,采用繁殖体压力结合环境因子可以更准确地推断在大尺度空间上的入侵过程^[56]。

繁殖体压力可以指从最初入侵源向外自然扩散所释放的个体,也可指人类协助外来种到达一个新地区的力度。根据“十数定律”,外来种繁殖体从传入到建群到扩散危害各个阶段的转化比例都只有十分之一左右^[32],因此可以理解,繁殖体压力对于传入繁殖体的存活概率有重要的影响。同时,不同基因型的个体多次传入会对外来种群的遗传多样性增加有帮助,因而繁殖体压力 and 外来种建群成功有着密切的相关性^[52]。尽管繁殖体压力与入侵成功关系非常复杂,但一些简单的繁殖体压力指标的使用已经表明能提高预测能力从而

为管理者降低入侵风险提供了建议。例如,市场出现频率是指示外来园艺植物逸野的重要指标^[57],进出湖泊的船次数就可以预测外来水生生物入侵概率等^[58,59]等。由于引种记录的不完整等原因,目前对外来木本植物繁殖体压力的相关研究报道较少,有待进一步加强以增强入侵预测能力。

3.4 环境匹配作为入侵潜力的预测工具

对外来植物而言气候是影响其生存的最重要的环境因素之一。外来物种被引入到一个与其原产地在气候方面相似的地区往往会增大其建群的机会或生长更加旺盛^[60]。如果引入地区的气候条件与外来植物的原产地气候相近,则该物种在新的环境中很容易完成生活史,进一步成为一个人入侵种。许多地区现在的外来入侵种大部分来自气候相似的原分布区,如有研究表明,大量原来分布于地中海盆地边缘的植物种,现已在与其气候相似的智利沿海等其他4个地区归化了;而且在这几个地区之间的物种入侵也十分普遍^[61]。再如北美是我国木本植物引种最大的源地(500多种),两地的气候相似性是引种成功的重要前提^[62],但有趣的是,东亚有很多木本植物在北美成为入侵种,而北美向东亚输送的木本入侵种却很少报道^[63]。其他环境因素包括经纬度、海拔、地形等方面。

评估一个新环境和原生环境的相似程度也是进行风险分析的一个合理的起点。一个物种的生态位可较容易地用可量化的物理和化学因子的坐标轴确定,并产生其在地球的另外一处的分布图。这类工具能很快实现,并可有力地用于分析气候和其他非生物因子对生物分布范围的限制方面的作用。环境匹配的标准方法(也称生态位模拟)包括传统的多变量统计方法(如判别分析、多元回归、逻辑斯蒂回归),通常与GIS耦合,近期常用的方法包括CLIMEX, GARP等,而且相应得软件也容易获得和使用^[64]。但应当知道,这些环境匹配工具有至少两个固有的缺陷。其一,环境匹配假定外来生物在新环境中没有发生进化。其次,没有考虑新环境中的生物交互作用对外来种的影响。这对于预测结果的准确性有一定的影响。

在外来种入侵机理研究中,生物交互作用可能是最需要了解但目前却了解最少的方面。例如,通常认为本地群落对于外来种入侵成功具有生物抵抗作用,本地物种多样性较高的群落其生物抵抗作用越强,其可入侵性(invasibility)越低,然而大量关于本地群落多样性与群落可入侵性关系的研究得出的结论却有很大不同甚至相反^[65]。而关于互利等正向的种间作用对外来种入侵的影响目前也知之甚少^[66]。可能正是由于生物交互作用的复杂性,及预测研究的对象物种和群落类型多样,外来种入侵的预测中通常不涉及本地群落特征,而通过气候、地形、干扰体系、环境物理特征等间接地反映出来^[45,51]。

除上述4个途径之外,专家意见对于更准确地完成生态预测的程序和结果的检验具有不可忽视的作用,应当在上述途径之中得到很好的贯彻才能取得科学的结论^[2,64]。

4 外来植物入侵的生态风险评价系统简介

外来植物入侵的生态风险评价是指通过对影响区域内外来植物特性及其生态系统的调查,运用科学的方法预测外来植物入侵的趋势和其可能对生态系统的成份、结构、功能等方面产生的各种不利影响^[67]。风险评价可以为人们提供对入侵的可能性、入侵结果方面的更深刻的洞察力,从而为制定管理策略和相关政策提供依据。入侵的生态风险评价最主要的是客观和准确,即希望能根据物种和所处环境的相关信息,采用构建数量化模型的方式对外来种成为入侵种的概率进行估计,从而可以针对一个地区的外来种的入侵风险做出准确预测。因此评价系统的理论和技术要求都较高,除了必须能区分已广泛传播难以全面控制的入侵种和能采取措施遏制或根除的物种目标之外,系统本身必须达到的标准包括:①技术上完善;②包含其中的一些测度可以在几个国家应用,或即使不能通用也能被本土化;③对给定国家突出某些特定的风险问题,如该国独有的风险;④有预防功能(很多未知的东西必须在投入/产出分析中有所强调)^[56]。

外来物种能否入侵,只有通过风险评价才能确认,因此,研制量化外来种入侵风险评价系统受到各国政府广泛关注。国际自然保护同盟IUCN提出了引种的指导标准,一些学者也在科学文献中提出了入侵风险评价方面的讨论和框架,一些更具生态学意义的模型研究或系统的研制目前还未进入实际运作阶段^[68]。目前实用的风险评价方法是基于某种形式的打分系统,即基于一些生物特性和环境信息,采取打分法对外来种进

行风险评价,虽然其科学依据似乎不是非常确切,但使用效果较好。下面简介国内外几个植物入侵风险评价系统,这些针对特定国家或地区研制的系统显然没有特意考虑区分木本或草本,而应用对象范围更广的有害生物风险评价系统,如中国国家质检总局和美国动植物健康检验局的 PRA 系统^[63,69],则不在此讨论。

4.1 国外外来植物入侵风险评价系统

在生物入侵比较严重,相关研究开展较早的几个国家,如澳大利亚、美国和新西兰,已经开发出了一些比较成功的外来植物入侵风险评价模型,并得到了政府的认可和较为广泛的应用,此外还有少数国家和地区也在研发。

4.1.1 澳大利亚杂草风险评价系统 WRA

现在使用的风险评价系统中最先进的要数澳大利亚检验检疫局(AQIS)开发的杂草风险评价系统(Weed Risk Assessment (WRA) system)^[70]。澳大利亚植物引种协议包括 3 个层次:

- (1) 参考禁止和允许引种的名录确定物种身份及其在澳大利亚的分布
- (2) 如果该物种不在名单之上而且还没有建立,进入 WRA 进行风险评价,可能的结果包括“接受”“拒绝”“进一步评估”,接受和拒绝的物种被加入名单。
- (3) 对需要进一步评估的物种,通过大田或温室种植实验直接确定其入侵潜力。

WRA 系统 1995 年建成,1997 年被 AQIS 正式采用,构成了澳大利亚植物引种协议的第 2 层,已经用于 600 种植物的评价,并推广到新西兰^[56]。它包括两大部分的问题:待评物种的历史/生物地理(13 个问题)、生物/生态(36 个问题)。每一部分至少有一个最少数量的问题要回答,答案主要是:是、否、不知道,据此给出分数。最后根据分数决定一种植物应被接受引入、拒绝引入或需要进一步评估。进一步评估可能只是做更详细的文献收集以回答更多的问题;经济上的成本/效益分析以确定进入的风险;或进入后的野外条件下的实验性评价。最后一种评价的程序还需要更多的研究,主要的问题是实验的范围一般不够大重复不够多不足以达到预期目标。

4.1.2 中欧地区环境杂草入侵潜力评价程序

Weber 等研发了一个适用于中欧地区的环境杂草生态风险评价系统,主要针对自然环境的植物入侵种^[71]。该系统先进行了一个预评过程即确定物种属性,物种是否发生在有风险地区;是否仅是农田发生的杂草,以筛掉一些不适合评价的对象,随后进入风险评价。该入侵植物风险评价系统的主要指标则基本上与 WRA 的指标类似,主要包括:气候匹配;是否欧洲本地种;在欧洲的地理分布;在全球的分布范围;其他地区是否为农田杂草;是否有同属入侵种;种子生产力和繁殖;无性生长;传播模式;生活型;物种生境;局部种群密度等 12 个问题。研究者采用 47 个中欧温带成功入侵种数据和瑞士 193 个不能成功定居的外来植物数据,对该系统进行了评价,结果正确预测入侵种的准确率为 77%,而正确预测非入侵种的准确率是 62%,全部对象的预测准确率为 65%。虽然准确率稍低,但作者认为主要是由于样本量不够所致。因为目前欧洲地区少见类似系统,该系统所采用的指标体系相对澳大利亚系统要简单,并且进行了很好的准确度和可靠性的分析,由此可以认为该系统还是有很大的借鉴意义和改进余地。

4.1.3 南非的外来植物专家系统 APES

APES(Alien Plant Expert System)系统开发用于评价南非的硬叶灌木生态系统(fynbos)中的潜在外来入侵植物^[7]。系统的规则主要根据是将外来木本植物在本地区的入侵窗口和限制其广泛传播的障碍方面的经验证据定量化表示,流程包括 6 个模块:

- (1) 比较待测物种的原分布区的环境和硬叶灌木生态系统两者间的大尺度环境条件;
- (2) 待测物种的种群特征和生境的专化;
- (3) 物种传播;
- (4) 物种的种子生产;
- (5) 物种的种子捕食;

(6) 物种生活史对硬叶灌木生态系统火干扰体系的适应。

每一个模块包括一系列问题。物种被归类为低风险或进入下一个模块。这一系统设计只将主导林冠层的入侵种定位为高风险,有效地强调了对该生态系统的结构和功能具有最大威胁的优先性。该系统主要应用于特定区域和生态系统对象,虽然可以修改后用于其它对象,但其精度可能会有所下降。

4.1.4 新西兰生物成功排序模型 BSR

新西兰环境保护部门已经采用了 BSR(biological success rating)模型,评估已经在本国出现但还没有入侵的植物的风险^[72]。这个模型包括以下评价内容:

(1) 处于潜在风险的群落类型

(2) 对生态系统的潜在影响

(3) 生物成功排序,包括 6 个方面的打分:①成熟速度;②自然下种能力;③种子库的持续性;④传播的有效性;⑤建立/生长的速度;⑥无性繁殖。总分相加就是生物性成功排序值。

(4) 其他信息(如火风险、竞争能力和对管理活动的抵抗力,归化的年代,在其他国家成为有害生物时的生物气候分区等)

4.2 我国外来植物入侵风险评价系统简介

我国在生物入侵研究领域起步较晚,自 20 世纪末和 21 世纪初开始大量出现对外来种入侵理论的研究,为外来植物风险评价系统的研发打下了基础。相关部门分别组织开展了风险评估体系研究,如中国科学院、国家环保总局、农业部、国家林业局及一些地方单位^[74],并取得初步的成果,这些系统就其指标选取和判定方法而言,更接近有害生物风险评价程序。

4.2.1 中国科学院制定的外来植物入侵风险指数评估体系

根据现有外来植物入侵种的普遍特点建立,可用于“外来物种引入许可证体系”过程的评估,也可以用于当地管理部门管理外来物种,进行早期预警等。该体系主要包括 7 个方面的指标:①繁殖和扩散;②遗传特征;③有害特征;④适应性特征;⑤物种类型;⑥被控制特点;⑦入侵历史。每个单项赋值的高低,反映了这个单项的不同风险程度,以及引起入侵可能性的权重大小。将每个问题的得分合计,如果超过 20 分,就表示需要禁止引入及野外释放该物种。评估值为 5 分以下可以引入;5~10 分应适当限制引入的目的、区域、数量和次数;10~20 分应严格限制引入的目的、区域、数量和次数,并且引入后必须有足够措施限制其逃逸和扩散,并加强监测^[38]。

4.2.2 原国家环保总局制定的外来植物杂草化风险评估体系

认为外来物种入侵是由众多自然因素和社会经济因素共同作用的结果。其入侵风险主要来自 4 个方面:自身因素、环境因素、人为因素和入侵后果。因此,该指标体系分为目标层、准则层和指标层 3 个层次。目标层是外来入侵植物的风险,它由 4 个准则层指标计算获得。准则层由入侵性、适生性、建立种群及扩散的可能性和危害性组成,分别由相应的指标层指标计算获得。指标层包括 21 个相应的指标及适用参数的量化依据。每个单项赋值的高低,反映了这个单项的不同风险程度,以及引起入侵可能性的大小,各参数和指标的权重相同。设定外来植物杂草化的风险性为 4 个指标层得分的总和,如果得分大于 61,该植物应禁止引入;得分为 29.5~61,必须严格限制引入的目的、区域、数量和次数,并且引入后必须有足够措施限制其逃逸和扩散,并加强监测。得分 11~29.5,应适当限制引入的目的、区域、数量和次数;得分小于 11 的植物可以引入,但应记录在案^[30]。

4.2.3 厦门市外来植物入侵风险评价指标体系

参考国内外经验,针对厦门的区域特点提出了厦门市外来植物入侵风险评价的指标体系框架与方法。指标体系由 6 个一级指标,17 个二级指标构成。6 个一级包括:①传入的可能性;②定植的可能性;③扩散的可能性;④入侵史与物种型;⑤已入侵分布情况 5 危害与影响;⑥防治的可行性。指标体系各级指标的权重采用层次分析法加以确定,对 17 个二级指标进行了详细的分级描述,对相应的描述等级规定了不同的评价分值。

某一外来植物通过 17 个二级指标的评价,其得分总和(即 6 个一级指标的得分总和)便是最终的评价得分。设定其评价风险等级标准为:评价得分 0~30,风险可接受,允许引进;30~60,有一定的风险,需要进一步的获取相关信息或采取防范监控措施;60~100,入侵风险高,不可接受,禁止引进^[73]。

5 木本植物入侵的生态预测和风险评价研究中的问题和展望

引种木本植物而造成入侵已经成为一些国家和地区的重要环境问题。之所以人们没能及早发现和及时控制一些外来种的入侵,一个重要原因是外来木本植物成为入侵种的潜伏期较长。如 Kowarik 研究了德国布兰登堡的 184 种已知引入时间的木本入侵种,发现入侵的时滞平均 147a,其中灌木平均 131a,乔木平均 170a,而最长可达近 400a^[74]。对于外来种入侵可能造成危害的认识则是在近几十年才逐渐明确,而目前世界各国多数木本植物引种时间还不超过 200 年,可能很多引种的木本植物入侵性还没有表现出来^[21]。另外一个重要的原因是人们对于引种的入侵风险认识不够,如美国黑果稠李(*Prunus serotina*)自北美引入欧洲的最早记录为 1623a,至今几百年时间里,德国等国家或地区对其从早期大量种植到现在投巨资防治,人们对它的认识从有用的非木材树种、森林有害物种、可控制的入侵种、已经难以被拒绝物种的过程,可以作为反思对外来木本植物引种的认识,加强入侵生态风险评价的反面案例^[75]。我国一些地区对于引种火炬树(*Rhus typhina*)、杨树(*Populus* spp.)等目前也存在争议,通过大力宣传入侵种的危害提高认识,加强法律法规方面的建设工作是防范外来木本植物引种导致入侵的首要任务。

目前外来木本植物入侵的生态预测和风险分析还存在一些困难,其中最重要的就是入侵发生机理的不明确。例如,目前对于外来种入侵的机理,有假说认为是由于外来种在新的地区失去了原分布地的生物控制作用,从而导致其能量投入从防御天敌方面释放出来,从而产生更强的竞争力^[76]。还有研究者认为,外来种与本地种的杂交过程是形成入侵的主要刺激^[77],很多外来种会在入侵过程中发生快速进化^[78],如果外来种在新地区发生遗传方面的变化或生态位改变,那么入侵性的预测基础也就不牢固了。虽然这些假说的普适性目前还没有得到证明,但是无疑降低了入侵生态预测的可信度或者说增加了预测难度。因此,加强外来木本植物的入侵机理研究非常重要,尤其是控制性实验的研究,可为外来种入侵的生态预测提供基本的参数和理论支持,对于更好地进行生态预测十分关键。

其他方面的困难还包括来自相关物种在原产地和引入地的表现方面信息的获得,如准确的引种时间、入侵发生的范围和危害程度等。虽然一些对入侵问题比较重视的发达国家,如美国和欧洲一些国家或地区,有着建立比较早的物种数据库,但是不同地区和不同时间建立的数据库中对于外来种的入侵地位的界定往往有较大的差异,有些数据库的信息质量不高^[79];更重要的是,在一些经济不发达的国家或地区在引种时往往不愿意考虑入侵的问题,也根本没有记录相关信息的数据库,这些无疑会妨碍对外来种入侵的进行生态预测。数据库的更新同样存在问题,甚至有人建议这些应当由联合国建立专门的机构来运作^[34]。因此,建立国际统一标准的物种数据库,并加强基于此的本地种和外来种、入侵性外来种和非入侵性外来种的比较研究,加强相似气候区域的物种库的比较研究,必定会极大的推动入侵的生态预测工作的开展。我国在该方面的工作也刚刚起步,一些专门的入侵种数据库建设工作也已经初具规模^[29,64,80],但是该方面还有待提高到与国际上先进国家接轨的水平。

虽然存在很多问题和困难,但是木本植物引种导致的入侵广泛发生的现实要求必须提出解决之道。考虑到木本植物生物学特性和引种的经济效益等原因,进行专门的风险评价研究是必要的,可以暂时避开一些不可操作的环节,采用物种特性分析结合专家意见的方式,充分利用现有的国际和国内资源建设实用的风险评价系统。借鉴 WRA 等入侵植物风险评价系统和国内外有害生物风险评价系统的研究成果,研制适合我国或某一生物气候区的外来木本植物入侵风险评价系统也是可行的。我国早在 1980 年代质检总局就开展了有害生物风险评价研究,近年相关部门开展了外来植物入侵风险分析方面的研究,国家林业局针对外来木本植物的风险评价组织了专项研究工作,提出从繁殖与扩散特性、遗传特性、有害特性、生态适应能力、控制方式、入侵历史等几个方面评价外来种的入侵潜力,制定外来树种入侵性评价的标准和指标体系^[29],但目前尚未见

公开发表的成果。相信随着对本国植物入侵性研究的深入开展,建成一个符合我国情况的外来木本植物入侵风险评价系统将为期不远。

References:

- [1] Wicove D S, Rothstein D, Dubow J, *et al.* Quantifying threats to imperiled species in the United States, *Bioscience*, 1998, 48: 607—615.
- [2] Lodge D M, Willams S, Macisaac H J, *et al.* Biological invasions: recommendations for U. S. policy and management. *Ecological Applications*, 2006, 16: 2035—2054.
- [3] Scholes R J, Archer S R. Tree grass interactions in savannas. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 1997, 28: 517—544.
- [4] Van Auken O W. Shrub invasions of North American semiarid grasslands. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 2000, 31: 197—215.
- [5] Cronk J K and Fennessey M S. *Wetland plants: biology and ecology*. New York: CRC Press LLC, 2001.
- [6] Le Maitre D C, van Wilgen B W, Gelderblom, *et al.* Invasive alien trees and water resources in South Africa: case studies of the costs and benefits of management. *Forest Ecology and Management*, 2002, 160: 143—159.
- [7] Tucker K C and Richardson D M. An expert system for screening potentially invasive alien plants in South African fynbos. *Journal of Environmental Management*, 1995, 44: 309—338.
- [8] Higgins S I, Richardson D M, Cowling R M. Modeling invasive plant spread: The role of plant-environment interactions and model structure. *Ecology*, 1996, 77: 2043—2054.
- [9] Simberloff D, Reiva M A, Nunez M. Gringos en el bosque: introduced tree invasion in a native *Nothofagus/Austrocedrus* forest. *Biological Invasions*, 2002, 4: 35—53.
- [10] Hunter J C, Mattice J A. The spread of woody exotic into the forests of a northeastern landscape, 1938—1999. *Journal of the Torrey Botanical Society*, 2002, 129: 220—227.
- [11] Petit R J, Bialozyt R, Garnier-Gere P, *et al.* Ecology and genetics of tree invasions: from recent introductions to Quaternary migrations. *Forest Ecology and Management*, 2004, 197: 117—137.
- [11] Richardson D M. Forestry trees as invasive aliens. *Conservation Biology*, 1997, 12: 18—26.
- [12] Reichard S H, White P. Horticulture as a pathway of invasive plant introductions in the United States. *Bioscience*, 2001, 51:103—113.
- [13] Wittenberg R, Cock M. *Invasive alien species: a toolkit of best prevention and management practices*. CAB International, Wallingford, Oxon, UK, 2001.
- [14] Qiang S, Cao X Z. Survey and analysis of foreign weeds in China. *Journal of Plant Resource and Environment*, 2000, 9: 34—38.
- [15] Drake J A, Mooney H A, di Castri F, *et al.* *Biological invasions: a global perspective*. Chichester: John Wiley and Sons, 1989.
- [16] Smith L. Introduced plants in Antarctica: potential impacts and conservation issues. *Biological Conservation*, 1996, 76: 135—146.
- [17] Office of Technology Assessment, United States Congress. *Harmful non-indigenous species in the United States*. OTA-F-565. U. S. Washington D. C. : Government Printing Office, 1993.
- [18] Vitousek P M, D'Antonio C M, Loope L L, *et al.* Biological invasions as global environmental change. *American Scientist*, 1996, 84: 468—478.
- [19] Davis M A. Biotic globalization: does competition from introduced species threaten biodiversity? *Bioscience*, 2003, 53: 481—489.
- [20] Rapaport E. Tropical vs. temperate weeds: a glance into the present and future. In: Ramakrishnan P S ed. *Assessment and management of plant invasions*. New York: Springer. P. , 1991, 215—227.
- [21] Peterken G F. Ecological effects of introduced tree species in Britain. *Forest Ecology and Management*, 2001, 141: 31—42.
- [22] Simann E, Rogers W E. Changes in light and nitrogen availability under pioneer trees may indirectly facilitate tree invasions of grasslands. *Journal of Ecology*, 2003, 91: 923—931.
- [23] Brock J H. *Tamarix* spp. (salt cedar), an invasive exotic woody plant in arid and semi-arid riparian habitats of western USA. In: deWaal L C, *et al.* eds. *Ecology and management of invasive riverside plants*. Chichester: John Wiley and Sons, 1994. 27—43.
- [24] Haysom K A, Murphy S T. The status of invasiveness of forest tree species outside their natural habitat: a global review and discussion paper. Forest Health and Biosecurity Working Paper FBS/3E. Forestry Department. FAO, Rome, 2003.
- [25] Binggeli P. A taxonomic, biogeographical and ecological overview of invasive woody plants. *Journal of Vegetation Science*, 1996, 7: 121—124.
- [26] Weber E. *Invasive plant species of the world. A reference guide to environmental weeds*. Wallingford: CABI Publishing, 2003.
- [27] Xie X F. *Plant introduction*. Beijing: Science Press, 1994.
- [28] Wu Z L. *Introduction of foreign trees in China*. Beijing: Science Press, 1983.
- [29] Zheng Y Q, Zhang C H. Current status and progress of studies in biological invasion of exotic trees. *Scientia Silvae Sinicae*, 2006, 42(11): 114—122.

- [30] Xu H G, Wang J M, Qiang S, Wang L J. Alien species invasion, bio-safety, and genetic resources. Beijing: Science Press, 2004.
- [31] Cong L, Liu Y. The analysis about present situation of introduced woody plants from foreign countries into Beijing. Chinese Gardening, 2004, 12: 44—48.
- [32] Williamson M. Biological invasions. London: Chapman & Hall, 1996.
- [33] Mack R N. Predicting the identity and fate of plant invaders: emergent and emerging approaches. Biological Conservation, 1996, 78: 107—121.
- [34] Rejmánek M. Invasive plants: approaches and predictions. Austral Ecology, 2000, 25: 497—506.
- [35] Reed C F. Economically important foreign weeds: Potential problems in the United States. Washington D. C.: Agricultural Handbook no. 498. U. S. Department of Agriculture, 1977.
- [36] Daehler C C, Carino D A. Predicting invasive plants: prospect for a general screening system based on current regional models. Biological Invasions, 2000, 2: 92—102.
- [37] Holm L G, Plucknett D L, Pancho J V, *et al.* The Worlds Worst Weeds. Honolulu: University Press of Hawaii, 1977.
- [38] Li Z Y and Xie Y. Invasive alien species in China. Beijing: Forestry Publishing House, 2002.
- [39] Richardson D M, Rejmánek M. Conifers as invasive aliens: a global survey and predictive framework. Diversity and Distributions, 2004, 10: 321—331.
- [40] Baker H G, Stebbins G L. The Genetics of Colonizing Species. New York: Academic Press, 1965.
- [41] Daehler C C. The taxonomic distribution of invasive angiosperm plants: ecological insights and comparison to agricultural weeds. Biological Conservation, 1998, 84: 167—180.
- [42] Reichard S H, Hamilton C W. Predicting invasion of woody plants introduced into North America. Conservation Biology, 1997, 11: 193—203.
- [43] Renne I J, Barrow W C, Randall L A, *et al.* Generalized avian dispersal syndrome contributes to Chinese tallow tree (*Sapium sebiferum*, Euphorbiaceae) invasiveness. Diversity and Distributions, 2002, 8: 285—295.
- [44] Cadotte M W, Lovett-Doust J. Ecological and taxonomic differences between native and introduced plants of south-western Ontario. Ecoscience, 2001, 8: 230—238.
- [45] Frappier B, Eckert R T. Utilizing the USDA PLANTS database to predict exotic woody plant invasiveness in New Hampshire. Forest Ecology and Management, 2003, 185: 207—215.
- [46] Grotkopp E, Rejmánek M, Rost T L. Toward a causal explanation of plant invasiveness: seedling growth and life-history strategies of 29 pine species. The American naturalist, 2002, 159: 396—419.
- [47] Lake J C, Leishman M R. Invasion success of exotic plants in natural ecosystems: the role of disturbance, plant attributes and free from herbivores. Biological Conservation, 2004, 117: 215—226.
- [48] Rejmánek M, Richardson D M. What attributes make some plant species more invasive? Ecology, 1996, 77: 1655—1661.
- [49] Goodwin B J, McAllister A J, Fahrig L. Predicting Invasiveness of Plant Species Based on Biological Information. Conservation Biology, 1999, 13: 422—426.
- [50] White P S, Schwarz A. Where do we go from here? The challenges of risk assessment for invasive plants. Weed Technology, 1998, 12: 744—751.
- [51] Zalba S M, Sonagliani M I, Compagnoni C A, *et al.* Using a habitat model to assess the risk of invasion by an exotic plant. Biological Conservation, 2000, 93: 203—208.
- [52] Kolar C S, Lodge D M. Progress in Invasion Biology: Predicting Invaders. Trends in Ecology and Evolution, 2001, 16: 199—204.
- [53] D'Antonio C M. Ecosystem resistance to invasion and the role of propagule supply: a California perspective. Journal of Mediterranean Ecology, 2001, 2: 233—245.
- [54] Groves R H, Panetta F D, Virtue J G. Weed risk assessment, Melbourne, CSIRO Publishing, 2001.
- [55] Menges E S. Population viability analyses in plants: challenges and opportunities. Trends in Ecology and Evolution, 2000, 15: 51—56.
- [56] Rouget M, Richardson D M, Milton S J, *et al.* Predicting invasion dynamics of four alien Pinus species in a highly fragmented semi-arid shrub land in South Africa. Plant Ecology, 2004, 152: 79—92.
- [57] Dehen-Schmutz K, Touza J, Perrings C, *et al.* The Horticultural Trade and Ornamental Plant Invasions in Britain. Conservation Biology, 2007, 21: 224—231.
- [58] Schneider D W, Ellis C D, Cummings K S. A transportation model assessment of the risk to native mussel communities from zebra mussel spread. Conservation Biology, 1998, 12: 788—800.
- [59] Bossenbroek J M, Nekola J C, Kraft C E. Prediction of long-distance dispersal using gravity models: zebra mussel invasion of inland lakes. Ecological Applications, 2001, 11: 1778—1788.
- [60] Prinzing A, Durka W, Klotz S, *et al.* Which species become aliens? Evolutionary Ecology Research, 2002, 4: 385—405.

- [61] Pauchard A, Cavieres L A, Bustamante R O. Comparing alien plant invasions among regions with similar climates: where to from here? *Diversity and distributions*, 2004, 10: 371—375.
- [62] Wang H R, Jiang Z P, Li Y J. Changing patterns: tree introduction and phytogeography. Beijing: Forestry Publishing House, 2005, 254—262.
- [63] Guo Q F. Perspectives on trans-Pacific biological invasions. *Acta Phytocologica Sinica*, 2002, 26(6): 724—73.
- [64] Xu R M. Biological invasions—data gathering, quantitative analysis and early warning. Beijing: Science Press, 2003.
- [65] Zheng J M, Ma K P. Advances in Relationship between Biodiversity and Invasiveness in Plant Communities. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2006, 17 (7): 1338—1343.
- [66] Richardson D M, Allsopp N, D'Antonio C, *et al.* Plant invasions — the role of mutualisms. *Biological Review*, 2000, 75: 65—93.
- [67] Ma Y, Shen Z Y. Exotic plant invasion and its ecological risk assessment. *Chinese Journal of Ecology*, 2006, 25 (8): 983—988.
- [68] Stohlgren T J, Schnase J L. Risk Analysis for Biological Hazards: What We Need to Know about Invasive Species. *Risk Analysis*, 2006, 26: 163—173.
- [69] Committee on the Scientific Basis for Predicting the Invasive Potential of Nonindigenous Plant and Plant Pests in the United States. Predicting invasions of nonindigenous plant and plant pests. Washington D C: National Academy Press, 2002.
- [70] Pheloung P C, Williams P A, Halloy S R. A weed risk assessment model for use as a biosecurity tool evaluating plant introductions. *Journal of Environmental Management*, 1999, 57: 239—251.
- [71] Weber E, Gut D. Assessment the risk of potential invasive plant species in central Europe. *Journal of Nature Conservation*, 2004, 12: 171—179.
- [72] Owen S J, Timmins S M, West C J. Scoring the weediness of New Zealand s ecological weeds. *Proceedings: Eleventh Australian Weed Conference*, Melbourne: Weed Science Society of Victoria Inc. 1996, 529—531.
- [73] Ou J, Lu C Y. The Research of Alien Plants Risk Assessment System in Xiamen Municipality. *Journal of Xiamen University (Natural Science)*, 2006, 45(6): 883—888.
- [74] Kowarik I. Time lags in biological invasions with regard to the success and failure of alien species. In: Pysek P, Prach K, Rejmanek M, *et al.* eds. *Plant Invasions. General Aspects and Special Problems*. Amsterdam: SPB Academic Publishing, 1995. 15—38.
- [75] Starfinger U, Kowarik I, Rode M, *et al.* From desirable ornamental plant to pest to accepted addition to the flora? — The perception of an alien tree species through the centuries. *Biological Invasions*, 2003, 5: 323—335.
- [76] Blossey B, Notzold R. Evolution of increased competitive ability in invasive nonindigenous plants: a hypothesis. *Journal of Ecology*, 1995, 83, 887—889.
- [77] Ellstrand N C, Schierenbeck K A. Hybridization as a stimulus for the evolution of invasiveness in plants? *Proceedings of the National Academy of Sciences of USA*, 2000, 97: 7043—7050.
- [78] Lee C E. Evolutionary genetics of invasive species. *Trends in Ecology and Evolution*, 2002, 17: 386—391.
- [79] Pyšek P, Richardson D M, Williamson M. Predicting and explaining plant invasions through analysis of source area floras: some critical considerations. *Diversity and Distributions*, 2004, 10: 179—187.
- [80] Wan F H, Zheng X B, Guo J Y. Biology and management of invasive alien species in agriculture and forestry. Beijing: Science Press, 2005.

参考文献:

- [14] 强胜,曹学章. 中国异域杂草的考察与分析. *植物资源与环境学报*, 2000, 9 (4): 34—38
- [27] 谢孝福. 植物引种学. 北京: 科学出版社, 1994
- [28] 吴中伦. 国外树种引种概论. 北京: 科学技术出版社, 1983
- [29] 郑勇奇, 张川红. 外来树种生物入侵研究现状与进展. *林业科学*, 2006, 42(11): 114—122
- [30] 徐海根, 王健民, 强胜, 王长永. 外来种入侵、生物安全、遗传资源. 北京: 科学出版社, 2004.
- [31] 丛磊, 刘燕. 北京市国外树木引种现状分析. *中国园林*, 2004, 12: 44—48
- [38] 李振宇, 谢焱. 中国入侵种. 北京: 林业出版社, 2002.
- [62] 王懿然, 江泽平, 李延峻. 格局在变化——树木引种与植物地理. 北京: 中国林业出版社, 2005. 254—262
- [63] 郭勤峰. 跨太平洋生物入侵研究展望. *植物生态学报*, 2002, 26(6): 724—73.
- [64] 徐汝梅. 生物入侵——数据集成、数量分析与预警. 北京: 科学出版社, 2003.
- [65] 郑景明, 马克平. 植物群落多样性与可入侵性关系研究进展. *应用生态学报*, 2006, 17(7): 1149—1156.
- [67] 马晔, 沈珍瑶. 2006. 外来植物的入侵机制及其生态风险评价. *生态学杂志*, 25 (8): 983—988
- [73] 欧健, 卢昌义. 厦门外来植物入侵风险评价指标体系的研究. *厦门大学学报(自然科学版)*, 2006, 45(6): 883—888.
- [80] 万方浩, 郑小波, 郭建英. 重要农林外来入侵种的生物学与控制. 北京: 科学出版社, 2005.