

应用能量利用特性对外来植物入侵潜力的判别分析研究

宋莉英^{1,2}, 彭少麟^{2*}

1. 华南师范大学生命科学学院/广东省高等学校生态与环境科学重点实验室, 广东 广州 510631;

2. 中山大学有害生物控制与资源利用国家重点实验室, 广东 广州 510275

摘要: 判别分析是多元统计分析中判断研究对象所属类型的一种重要方法。以华南地区 5 种主要入侵植物及其伴生或近缘的本地种为研究对象, 测定了它们的生物量建成成本 (construction cost, CC) 和比叶面积 (special leaf area, SLA), 并以此作为判别因子尝试建立入侵种和本地种的判别模型。结果表明, 入侵种和本地种之间的平均 CC 和 SLA 存在显著差异。以 CC 和 SLA 作为判别因子建立的判别模型进行回代检验, 总的预测正确率为 82.6%, 判别效果较好。其中 CC 的判别函数系数较大, 表明它在判别分析中起到了较为重要的作用, 进一步证明了植物的能量利用特性是影响外来种入侵潜力的重要因素。利用此判别模型可以根据任何一种外来植物的 CC 和 SLA 来定量判断该物种入侵潜力的大小, 为有效评价外来植物入侵潜力提供了新的定量方法; 但由于所获得数据的不全面, 该模型还存在不足, 有待在今后的研究中进一步完善。

关键词: 外来植物; 入侵潜力; 判别分析; 生物量建成成本; 比叶面积

中图分类号: Q948

文献标识码: A

文章编号: 1674-5906 (2009) 02-0582-04

生物入侵不仅严重威胁着当地的生物多样性、生态系统的结构和功能^[1], 而且给社会经济发展带来重大的经济损失^[2]。有鉴于生物入侵造成的巨大危害, 很多国家的学者都相继开展了对外来物种入侵风险评价的研究, 对外来物种的引入进行严格的控制。目前, 大多数研究是根据一些被公认的入侵种生物学特征、物种来源地和目的地的生物气候特征以及进化史, 对生物入侵作定性的预测^[3]。比较成熟的有澳大利亚的杂草风险评估系统^[4], 它是由物种生物地理、物种不受欢迎的特征、生物学或生态学特征等方面的一系列的问题库构成的。

近些年来, 有学者尝试通过一定的统计学方法定量的研究外来物种的入侵性^[5-8]。Scott等^[5]利用多元回归预测从南非引入到澳大利亚的物种成为杂草的可能性。Rejmánek等^[6]利用判别分析对松树进行的研究表明, 根据幼年期阶段、平均种子产量等特征能够很好地区分入侵种和非入侵种。这些定量的研究方法能够弥补根据定性方法进行预测的缺陷, 并取得了很好的效果。国内有关外来种入侵风险的预测, 主要采取一些定性的方法^[9-13], 采用统计学方法对外来物种的入侵性进行定量预测的报道还较少。

植物的生长都涉及到能量利用过程, 能量可以作为有机体间进行比较的基本单位^[14]。生物量建成成本 (construction cost, CC) 是指合成单位生物量所需消耗的能量^[15], 能够反应植物的能量利用特性

和生活史策略^[16]。已有的研究表明, 入侵植物的生物量建成成本低于本地植物^[17-21]。本研究以华南地区 5 种主要入侵植物及其伴生或近缘的本地种为研究对象, 利用植物的生物量建成成本、比叶面积 (special leaf area, SLA) 等生理特性指标, 建立入侵种和本地种的判别模型。一方面, 进一步证明植物的能量利用特性与其入侵潜力的关系; 另一方面, 从方法学上, 尝试通过建立数学模型定量地判断外来植物的入侵潜力, 为入侵种的防治和管理提供依据。

1 材料和方法

1.1 植物材料的培养和数据采集

选取华南地区主要入侵植物薇甘菊 (*Mikania micrantha* H.B.K.), 三裂叶蟛蜞菊 (*Wedelia trilobata* (L.) Hitchc.), 五爪金龙 (*Ipomoea cairica* (L.) Sweet), 空心莲子草 (*Alternanthera philoxeroides* (Mart.) Griseb), 飞机草 (*Eupatorium odoratum* L.); 以及 3 个本地植物种鸡矢藤 (*Paederia scandens* (Lour.) Merr.), 蟛蜞菊 (*Wedelia chinensis* (Osbeck.) Merr.), 厚藤 (*Ipomoea pescaprae* L.)。薇甘菊、三裂叶蟛蜞菊、五爪金龙、鸡矢藤均采自广州中山大学校园内; 飞机草采自湛江; 蟛蜞菊采自肇庆鼎湖山; 厚藤采自珠海淇澳岛。扦插繁殖, 成苗后移栽到花盆里, 每盆 3 株作为 1 个重复。每个物种设 3 个重复, 其中蟛蜞菊 2 个重复。所有的植物材料在植物生长室内培养生长。控制生长室内光照、温度、

基金项目: 教育部重大资助项目(704037); 广东省自然科学基金资助项目(8451063101000535); 中国博士后科学基金资助项目(20080440766)

作者简介: 宋莉英 (1978 年生), 女, 博士, 主要从事入侵生态学研究。E-mail: liying_song@126.com

*通讯作者: 彭少麟 (1956 年生), 男, 广东省特聘教授, 博士, 博士生导师。E-mail: lsspsl@mail.sysu.edu.cn

收稿日期: 2009-04-17

湿度条件一致。光照周期 16 h，光照强度 400 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ；温度白天维持 28 $^{\circ}\text{C}$ ，夜晚 20 $^{\circ}\text{C}$ ；相对湿度控制在 50%。培养时间为 3 个月。培养期间保证足够的水肥营养。

收获后测定植物的比叶面积和生物量建成成本。每个物种收集 15–20 片新鲜、健康叶片，利用 Licor-3100A (Li-6400, Li-Cor, Lincoln, USA) 测量叶面积。这些叶片经 60 $^{\circ}\text{C}$ 烘干 72 h 称重，计算比叶面积 (SLA, $\text{m}^2\cdot\text{kg}^{-1}$)。生物量建成成本 (CC, $\text{g glucose}\cdot\text{g biomass}^{-1}$) 的计算按照 Williams 等^[15]的方法， $\text{CC} = [(0.06968\Delta\text{H}_c - 0.065) (1 - \text{Ash}) + 7.5 (k \text{ N}/14.0067)] / \text{E}_G$ 。 ΔH_c ：去灰分热值；Ash：灰分含量；N：有机氮浓度； E_G ：生长效率，不同物种的生长效率为 0.87^[22]； k ：N 的氧化态形式（若为 NO_3^- ， $k = +5$ ；若为 NH_4^+ ， $k = -3$ ）。采用流动注射分析仪 (QC8000, Lachat, USA) 测定土壤中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的含量。对于每个样品，先以 NH_4^+ 和 NO_3^- 作为 N 的氧化态分别计算，再按照土壤中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的比例，求加权平均值作为 CC。

受试的植物材料在生长室内培养生长。生长的环境条件、水肥条件控制一致，可以排除从野外采样由于环境条件的差异而引起的 SLA 和 CC 的变化，能够反映物种间的真实差异^[23]。

1.2 判别分析

数据的统计分析采用 SPSS 11.5 (SPSS, Chicago, USA)。参照卢纹岱等^[24]和刘润幸^[25]的方法。

1.2.1 指标的选取

已有的研究表明，入侵种的建成成本显著低于本地种^[17-21]，说明较低的建成成本可能是影响植物入侵的重要因素之一。另外，选取了容易测得的比叶面积作为指标。比叶面积也是影响植物入侵的一个重要因素^[26]。有研究表明，入侵种与本地种相比其 SLA 相对较大^[27-28]。因此，本研究选择 CC 和 SLA 这 2 项生理生态指标建立判别分析模型。

1.2.2 数据描述

两组判别分析首先假定两组原始样本属于不同的总体，一组为入侵种，本研究选取 5 个植物种；另一组为本地种，选取了 3 个植物种。每个物种有 3 个重复。其中，本地种蟛蜞菊仅有 2 个重复。因此，本研究共有 23 个样本。

两组多元变量的平均值在统计上应有显著差异，否则判别没有意义。因此，对两组数据的建成成本和比叶面积的均值作比较（表 1）。结果说明，入侵种和本地种的 CC 和 SLA 存在显著差异。

在大多数多元分析中，变量之间的相互依赖关

表 1 判别分析的入侵种和本地种群组间生物量建成成本 (CC) 和比叶面积 (SLA) 的均值比较

Table 1 Group means of biomass construction cost and specific leaf area between invasive and native species

变量	入侵种	本地种	重要值
CC/($\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)	1.22±0.02	1.29±0.01	0.010
SLA/($\text{m}^2\cdot\text{kg}^{-1}$)	54.03±4.89	35.89±1.25	0.015

数据表示平均值±SE

系对结果影响很大，因而，有必要考察所预测变量之间的相关性。结果表明，CC 与 SLA 的相关性仅有 0.329，相关系数不大，各变量间相互独立。因此，选用 CC 与 SLA 来建立判别函数是可行的。

1.2.3 判别方法

SPSS 软件提供的判别方法主要有全模型法 (independent together method) 和逐步判别法 (stepwise method)。本文采用全模型法，认为所有的自变量 (CC 和 SLA) 都能对观测量特性提供丰富的信息，因而，将判别的原始变量全部进入判别方程，建立全模型。

本研究采用 CC 作为判别因子，旨在探讨能量利用特性对外来种入侵潜力的影响；同时，采用较少的判别因子，仅选用 CC 和 SLA 两个指标，也有利于在应用中操作。

2 结果与分析

2.1 判别模型的建立

采用 SPSS 软件进行判别分析，表 2 给出了分类函数系数，即 Fisher 线性判别函数系数，根据此表可建立分类判别函数如下：

$$\begin{cases} f_1(x) = -0.247 \times \text{SLA} + 383.753 \times \text{CC} - 227.554 \\ f_2(x) = -0.360 \times \text{SLA} + 415.059 \times \text{CC} - 261.709 \end{cases}$$

其中，CC 的判别函数系数较大，因此，它在判别分析中起到了较为重要的作用。

建立判别规则：

$$\begin{aligned} G(x) &= f_1(x) - f_2(x) \\ \begin{cases} \text{若 } G(x) \geq 0, \text{ 则 } x \in f_1 \\ \text{若 } G(x) < 0, \text{ 则 } x \in f_2 \end{cases} \end{aligned}$$

对于某一外来植物，测定了其 CC 和 SLA 个生理生态参数，分别计算 $f_1(x)$ 和 $f_2(x)$ ，根据判别规则求出 $G(x)$ 。如果 $G(x) \geq 0$ ，则该外来物种入侵潜力较强，反之，这一外来物种入侵潜力较弱。

表 2 分类函数系数
Table 2 Classification coefficients

类型	SLA	CC	常数
1 (入侵种)	-0.247	383.753	-227.554
2 (本地种)	-0.360	415.059	-261.709

2.2 判别效果的检验

判别效果的检验可以采用内部检验符合率和

外推检验符合率两种。本研究采用华南地区5种主要入侵植物和本地植物的原始数据资料进行回代检验,即将原始各变量值代入判别函数模型,根据判别规则将其重新分类,比较判别的结果与实际类别的结果,结果见表3。原分类为1类入侵种中,有3个错判为本地种;原分类为2类本地种的,有1个错判为入侵种。对入侵种的预测正确率为80%,对本地种的预测正确率为87.5%,总的预测正确率为82.6%。

表3 判别结果
Table 3 Classification Results

	原类型	预测类型数量		总数
		1.00(入侵种)	2.00(本地种)	
计数	1.00 (入侵种)	12	3	15
	2.00 (本地种)	1	7	8
%	1.00 (入侵种)	80.0	20.0	100.0
	2.00 (本地种)	12.5	87.5	100.0

总的预测正确率为82.6%。

3 讨论

判别分析是多元统计分析中判断研究对象所属类型的一种重要方法。应用判别分析,首先要根据被观察对象的各种指标,按照所确定的判别准则,用数学原理和统计分析方法,建立判别函数;然后按照所确定的判别函数来判别任一待判对象应归属哪一个类别。本研究采用判别分析的方法,尝试根据入侵植物的能量利用特性,来判别外来种的入侵潜力。McDowell^[20]曾采用光合特性指标饱和光合速率 (A_{max}), 最大羧化速率 (V_{max}), 最大电子传递速率 (J_{max}) 和SLA、叶片[N]作为判别因子,可将悬钩子属 (*Rubus*) 的两个入侵种和两个本地种很好的判别为两类,48个样本中仅有2例错判。本研究根据对华南地区5种主要入侵植物和3个本地种共计23个样本的能量利用特性分析,选取CC和SLA两个指标,建立了入侵种和本地种的判别模型。进行回代验证,对入侵种的预测正确率为80%,对本地种的预测正确率为87.5%,判别效果较好。

在判别分析中,CC 的判别函数系数较大,表明它在判别分析中起到了较为重要的作用。我们以前的研究表明,薇甘菊的入侵成功与其较低的生物量建成成本有关^[21]。入侵种具有较低的生物量建成成本表明它对能量利用的效率较高,仅需要较少的能量来构建生物量,可以将更多的能量投资到其他竞争策略^[29]。本研究的结果进一步证明了能量利用特性是影响外来植物入侵潜力的重要因素。

本研究以生物量建成成本和比叶面积作为判别因子,建立了入侵种和本地种的判别模型。利用此模型,可以根据任何一种外来植物的生物量建成

成本和比叶面积这两个生理生态指标,判断该物种成为入侵种的可能性,为外来种的安全引入提供依据和建议。本研究从方法学上尝试将数量模型引入到判别外来种的入侵潜力的研究中,与传统定性的方法相比不失为一种有益的探索。但是,物种入侵的预测是一个十分复杂的问题。目前的这些定量预测方法,将物种入侵的不同阶段作为一个整体考虑的。而事实上,在入侵的不同阶段,其入侵行为及表现出来的特征并不相同^[8]。由于所获得数据的不完备和不全面,该模型还存在一些不足,有待在今后的研究中进一步完善。

参考文献:

[1] MACK R N, SIMBERLOFF D, LONSDALE W M, et al. Biotic invasions: causes, epidemiology global consequences and control[J]. Ecological Applications, 2000, 10(3): 689-710.

[2] PIMENTEL D, LACH L, ZUNIGA R, et al. Environmental and economic costs of non-indigenous species in the United States[J]. Bioscience, 2000, 50(1): 53-65.

[3] 徐汝梅, 叶万辉. 生物入侵: 理论和实践[M]. 北京: 科学出版社, 2003: 82.

XU Rumei, YE Wanhui. Biological Invasion: Theory and Application[M]. Beijing: Science Press, 2003: 82.

[4] PHELOUNG P C, WILLIAMS P A, HALLOY S R. A weed risk assessment model for use as a biosecurity tool evaluating plant introductions[J]. Environment Management, 1999, 57: 239-251.

[5] SCOTT J K, PANETTA F D. Predicting the Australian weed status of southern African plants[J]. Journal of Biogeography, 1993, 20: 87-93.

[6] REJMANEK M, RICHARDSON D M. What attributes make some plant species more invasive?[J]. Ecology, 1996, 77: 1655-1661.

[7] REICHARD S H, HAMILTON C W. Predicting invasions of woody plants introduced in North America[J]. Conservation Biology, 1997, 11(1): 193-203.

[8] KLOAR C S, LODGE D M. Ecological predictions and risk assessment for alien fishes in North America[J]. Science, 2002, 298: 1233-1236.

[9] 蒋青, 梁忆冰, 王乃杨, 等. 有害生物危险性评价指标体系的初步确定[J]. 植物检疫, 1994, 8(6): 331-334.

JIANG Qing, LIANG Yibing, WANG Naiyang, et al. Primary studies on pest risk assessment index system[J]. Plant Quarantine, 1994, 8(6): 331-334.

[10] 季良. 检疫性有害生物危险性评价[J]. 植物检疫, 1994, 8(2): 100-105.

JI Liang. Pest risk assessment of quarantine species[J]. Plant Quarantine, 1994, 8(2): 100-105.

[11] 范京安, 赵学谦. 农作物外来物种风险评价体系与方法研究[J]. 植物检疫, 1997, 11(2): 75-81.

Fan Jing'an, Zhao Xueqian. Studies on pest risk assessment system of exotic crops[J]. Plant Quarantine, 1997, 11(2): 75-81.

[12] 向言词, 彭少麟, 任海, 等. 植物外来种的生态风险评价和管理[J]. 生态学杂志, 2002, 21(5): 40-48.

XIANG Yanci, PENG Shaolin, REN Hai, et al. Management and ecological risk assessment of exotic plants[J]. Chinese Journal of Ecology, 2002, 21(5): 40-48.

- [13] 欧健, 卢昌义. 厦门市外来植物入侵风险评价指标体系的研究[J]. 厦门大学学报: 自然科学版, 2006, 45(6): 883-888.
OU Jian, LU Changyi. The research of alien plants risk assessment system in Xiamen municipality[J]. Journal of Xiamen University: Natural Science, 2006, 45(6): 883-888.
- [14] GRIFFIN, K L. Calorimetric estimates of construction cost and their use in ecological studies[J]. Functional Ecology, 1994, 8: 551-562.
- [15] WILLIAMS K, PERCIVAL F, MERINO J, et al. Estimation of tissue construction cost from heat of combustion and organic nitrogen content[J]. Plant, Cell and Environment, 1987, 10: 725-734.
- [16] P'YANKOV VI, IVANOV LA, LAMBERS H. Plant construction cost in the Boreal species differing in their ecological strategies[J]. Russian Journal of Plant Physiology, 2001, 48(1): 81-88.
- [17] BARUCH Z, GOMEZ J A. Dynamics of energy and nutrient concentration and construction cost in a native and two alien C₄ grasses from two neotropical savannas[J]. Plant and Soil, 1996, 181: 175-184.
- [18] BARUCH Z, GOLDSTEIN G. Leaf construction cost, nutrient concentration, and net CO₂ assimilation of native and invasive species in Hawaii[J]. Oecologia, 1999, 121(2): 183-192.
- [19] NAGEL J M, GRIFFIN K G. Construction cost and invasive potential: comparing *Lythrum salicaria* (Lythraceae) with co-occurring native species along pond banks[J]. American Journal of Botany, 2001, 88(12): 2252-2258.
- [20] MCDOWELL S C L. Photosynthetic characteristics of invasive and noninvasive species of *Rubus* (Rosaceae)[J]. American Journal of Botany, 2002, 89: 1431-1438.
- [21] SONG L Y, NI G Y, CHEN B M, et al. Energetic cost of leaf construction in the invasive weed *Mikania micrantha* H.B.K. and its co-occurring species: implications for invasiveness[J]. Botanical Studies, 2007, 48(3): 331-338.
- [22] PENNING DE VRIES F W T, BRUNSTING A H M, VAN LAAR H H. Products, requirements and efficiency of biosynthesis: a quantitative approach[J]. Journal of the Oretical Biology, 1974, 45: 339-377.
- [23] VILLAR R, ROBLETO J R, JONE Y D, et al. Differences in construction costs and chemical composition between deciduous and evergreen woody species are small as compared to differences among families[J]. Plant, Cell and Environment, 2006, 29(8): 1629-1643.
- [24] 卢纹岱, 朱一力, 沙捷, 等. SPSS for Windows 从入门到精通[M]. 北京: 电子工业出版社, 1997.
LU Wendai, ZHU Yili, SHA Jie, et al. SPSS for Windows: from Induction to Familiarity[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 1997.
- [25] 刘润幸. SPSS 10.0 医学统计方法与应用(下册)[M]. 广州: 广东人民出版社, 2001.
LIU Runxing. SPSS 10.0 Medical Statistic Method and Application[M]. Guangzhou: Guangdong Peoples Publishing House, 2001.
- [26] HAMILTON M A, MURRAY B R, CADOTTE M W, et al. Life-history correlates of plant invasiveness at regional and continental scales[J]. Ecology Letter, 2005, 10: 1066-1074.
- [27] DENG X, YE W H, FENG H L, et al. Gas exchange characteristics of the invasive species *Mikania micrantha* and its indigenous congener *M. cordata* (Asteraceae) in South China[J]. Botany Bulletin of Academia Sinica, 2004, 45: 213-220.
- [28] SHARON M L E, LEONEL D A, SILVEIRA L S. Growth and gas exchange responses of Brazilian pepper (*Schinus terebinthifolius*) and native South Florida species to salinity[J]. Berlin: Trees, 2005, 19(2): 119-128.
- [29] NAGEL J M, HUXMAN T E, GRIFFIN K L, et al. CO₂ Enrichment reduce the energetic cost of biomass construction in an invasive desert grass[J]. Ecology, 2004, 85(1): 100-106.

A discriminant analysis in evaluating invasive potential using energy-use properties

Song Liying^{1,2}, Peng Shaolin^{2*}

1. Key Laboratory of Ecology and Environmental Science in Guangdong Higher Education/College of Life Science, South China Normal University, Guangzhou 510631, China; 2. State Key Laboratory of Biocontrol, Zhongshan University, Guangzhou 510275, China

Abstract: Discriminant analysis is an important method in multivariate statistic analysis to distinguish whatever type an individual should belong to. The present study were to examine the biomass construction cost (CC) and specific leaf area (SLA) of five noxious invasive species in South China (*Mikania micrantha*, *Wedelia trilobata*, *Alternanthera philoxeroides*, *Eupatorium odoratum* and *Ipomoea cairica*) and three indigenous co-occurring species or congeners (*Paederia scandens*, *Wedelia chinensis* and *Ipomoea pescaprae*), and develop a discriminant model to distinguishing invasive and native species. Taken five invasive species as a group, there were substantial differences in CC and SLA between invasive and native groups. Using CC and SLA as variables, the discriminant analysis clearly differentiated between the groups of invasive and native species, with 82.6% of original grouped cases correctly classified. In particular, CC was the more powerful variables in the discriminant analysis because of its larger standardized canonical discriminant function coefficient, suggesting that energy-use properties are important factors influencing invasive potential. Meanwhile, this discriminant model provided a new quantitative method to evaluate the invasive potential of an alien plant if only two known variables (CC and SLA), which was helpful to better predict and control invasive species. However, this model was still defective because of limited data collected from present study, and further studies on a larger set of species were necessary for improving this model.

Key words: alien species; invasive potential; discriminant analysis; biomass construction cost; specific leaf area