

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica



第 33 卷 第 22 期 Vol.33 No.22 **2013**

中国生态学学会
中国科学院生态环境研究中心
科学出版社

主办
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 33 卷 第 22 期 2013 年 11 月 (半月刊)

目 次

前沿理论与学科综述

- 利用分布有/无数据预测物种空间分布的研究方法综述 刘 芳,李 晟,李迪强 (7047)
- 景观服务研究进展 刘文平,宇振荣 (7058)
- 土壤呼吸组分分离技术研究进展 陈敏鹏,夏 旭,李银坤,等 (7067)

个体与基础生态

- 平茬高度对四合木生长及生理特性的影响 王 震,张利文,虞 毅,等 (7078)
- 不同水分梯度下珍稀植物四数木的光合特性及对变化光强的响应 邓 云,陈 辉,杨小飞,等 (7088)
- 水稻主茎节位分蘖及生产力补偿能力 隗 溟,李冬霞 (7098)
- 基于辐热积法模拟烤烟叶面积与烟叶干物质产量 张明达,李 蒙,胡雪琼,等 (7108)
- 耕作方式和秸秆还田对华北地区农田土壤水稳性团聚体分布及稳定性的影响
..... 田慎重,王 瑜,李 娜,等 (7116)
- 不同光照强度下兴安落叶松对舞毒蛾幼虫生长发育及防御酶的影响 鲁艺芳,严俊鑫,李霜雯,等 (7125)
- 南方小花蝽在不同空间及笼罩条件下对西花蓟马的控制作用 莫利锋,郅军锐,田 甜 (7132)
- 浮游植物对溶解态 AI 的清除作用实验研究 王召伟,任景玲,闫 丽,等 (7140)
- 卧龙巴郎山川滇高山栎群落植物叶特性海拔梯度特征 刘兴良,何 飞,樊 华,等 (7148)
- 春夏季闽江口和兴化湾虾类数量特征 徐兆礼,孙 岳 (7157)
- 嗜食性端足类强壮藻钩虾对贫营养湖三种大型海藻的摄食选择性 郑新庆,黄凌风,李元超,等 (7166)

种群、群落和生态系统

- 4 种农业措施对三化螟种群动态的控制作用 张振飞,黄炳超,肖汉祥,等 (7173)
- 黄土高原沟壑区森林带不同植物群落土壤氮素含量及其转化 邢肖毅,黄懿梅,安韶山,等 (7181)
- 基于诊断学的生态系统健康评价 蔡 霞,徐颂军,陈善浩,等 (7190)
- 稻田生态系统中植硅体的产生与积累——以嘉兴稻田为例 李自民,宋照亮,姜培坤 (7197)
- 自由搜索算法的投影寻踪模型在湿地芦苇调查中的应用 李新虎,赵成义 (7204)
- 贺兰山不同海拔典型植被带土壤微生物多样性 刘秉儒,张秀珍,胡天华,等 (7211)
- 内蒙古典型草原灌丛化对生物量和生物多样性的影响 彭海英,李小雁,童绍玉 (7221)
- 黄土丘陵沟壑区 80 种植物繁殖体形态特征及其物种分布 王东丽,张小彦,焦菊英,等 (7230)
- 基于 MAXENT 模型的贺兰山岩羊生境适宜性评价 刘振生,高 惠,滕丽微,等 (7243)
- 太湖湖岸带浮游植物初级生产力特征及影响因素 蔡琳琳,朱广伟,李向阳 (7250)

景观、区域和全球生态

艾比湖地区土壤呼吸对季节性冻土厚度变化的响应…………… 秦 璐,吕光辉,何学敏,等 (7259)

田间条件下黑垆土基础呼吸的季节和年际变化特征…………… 张彦军,郭胜利,刘庆芳,等 (7270)

资源与产业生态

光核桃遗传资源的经济价值评估与保护 …………… 张丽荣,孟 锐,路国彬 (7277)

棉花节水灌溉气象等级指标…………… 肖晶晶,霍治国,姚益平,等 (7288)

研究简报

云南红豆杉人工林萌枝特性…………… 苏 磊,苏建荣,刘万德,等 (7300)

赣中亚热带森林转换对土壤氮素矿化及有效性的影响…………… 宋庆妮,杨清培,余定坤,等 (7309)

学术信息与动态

2013 年 European Geosciences Union 国际会议述评 …………… 钟莉娜,赵文武 (7319)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 276 * zh * P * ¥90.00 * 1510 * 30 * 2013-11



封面图说: 山坡岩羊图——岩羊属国家二级保护动物,因喜攀登岩峰而得名,又名石羊。贺兰山岩羊主要分布于海拔 1500—2300m 的山势陡峭地带,羊群多以 2—10 只小群为主。生境适宜区主要为贺兰山东坡(宁夏贺兰山国家级自然保护区)的西南部,而贺兰山西坡(内蒙古贺兰山国家级自然保护区)也有少量分布。贺兰山建立国家级自然保护区以来,随着保护区环境的不断改善,这里岩羊的数量也开始急剧增长,每平方公里的分布数量现居世界之首,岩羊的活动范围也相应扩大到低山 900 米处的河谷。贺兰山岩羊生境选择的主要影响因子为海拔、坡度及植被。

彩图及图说提供:陈建伟教授 北京林业大学 E-mail: cites.chenjw@163.com

DOI: 10.5846/stxb201207171015

刘芳, 李晟, 李迪强. 利用分布有/无数据预测物种空间分布的研究方法综述. 生态学报, 2013, 33(22): 7047-7057.

Liu F, Li S, Li D Q. The review of methods for mapping species spatial distribution using presence/absence data. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(22): 7047-7057.

利用分布有/无数据预测物种空间 分布的研究方法综述

刘 芳¹, 李 晟², 李迪强^{1,*}

(1. 中国林业科学研究院森林生态环境与保护研究所, 国家林业局森林生态环境重点实验室, 北京 100091;

2. Department of Forest & Wildlife Ecology, University of Wisconsin-Madison, 209 Russell Labs,
1630 Linden Drive University of Wisconsin-Madison Madison, WI 53706-1598, USA)

摘要: 详细的物种地理分布信息是生态学研究 and 制定保护策略的基础。相比较于直接估测种群数量, 获取物种分布的有/无数据更为实用。因此, 利用分布有/无数据并结合环境变量建立模型预测物种空间分布的方法在近年来得到了长足发展, 并被广泛应用。利用分布有/无数据预测物种分布, 关键的步骤包括: 1) 构建总体概念模型, 2) 收集物种分布有/无数据, 并准备环境变量图层; 3) 选择合适的统计模型和算法, 以及 4) 对模型进行评估。概念模型提出研究假设, 并确定数据收集及模型方法。收集物种分布数据有系统调查及非系统调查方法。筛选并准备与物种分布相关的环境变量, 利用 GIS 工具处理, 使之成为符合模型条件的具有合适的空间尺度的数字化图层。利用环境变量和物种分布有/无数据, 选择合适的方法及软件建立模型, 并对模型进行检验和评估。总结了用于构建物种分布模型的不同算法和软件。针对以上各个环节, 阐述利用物种分布有/无数据进行研究所需要的技术细节, 以期望为读者提供借鉴。

关键词: 有/无数据; 物种分布模型; 取样; 模型评估

The review of methods for mapping species spatial distribution using presence/absence data

LIU Fang¹, LI Sheng², LI Diqiang^{1,*}

1 Institute of Forest Ecology, Environment, and Protection, Chinese Academy of Forestry, Key Laboratory of Forest Ecology and Environment, State Forestry Administration, Beijing 100091, China

2 Department of Forest & Wildlife Ecology, University of Wisconsin-Madison, 209 Russell Labs, 1630 Linden Drive University of Wisconsin-Madison Madison, WI 53706-1598, USA

Abstract: Detailed species geographical distribution is fundamental to ecology management and conservation strategies. Compared with the considerable effort needed for direct population estimates, obtaining presence/absence data are more practical and economically effective, so the methods on mapping species distribution with presence/absence data and related environmental variables have been well developed in recent decades with broad implications. The key steps for species distribution modeling using presence/absence data include: 1) develop the conceptual model, 2) collect presence/absence data and prepare environmental variable layers, 3) select statistic model and algorithm, and 4) run the model and conduct model evaluation. Conceptual models propose the hypothesis of the research and build outlines for data preparation and statistical methods. Systematic sample and non-systematic sampling are used to collect presence/absence data. Related

基金项目: 国家“十二五”科技支撑课题资助项目(2013BAC09B02)

收稿日期: 2012-07-17; 修订日期: 2013-07-28

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: lidq@caf.ac.cn

environmental variables are selected and georeferenced by GIS tools to be used in species distribution models at a proper scale. We summarized the algorithms and software that have been used to develop species distribution models combining presence/absence data and environmental variables. Assessment of model performance is crucial for implicating the results generated by those models. This paper reinvented the details of techniques for the above steps of species distribution models. We expect that this paper will show readers some revelation on how to use species distribution models.

Key Words: Presence-absence data; species distribution model; sampling; model assessment

准确的物种分布地图或者栖息地适宜性是环境相关研究、资源管理以及保护规划等许多方面所必需的^[1],如生物多样性评估、保护区设计、栖息地管理和恢复、物种保护规划、种群生存力分析、环境风险评估、入侵种的管理、群落及生态系统模型以及预测全球气候变化对物种和生态系统的影响等均需要物种分布图^[2]。近年来,利用物种分布有/无的数据并结合环境变量建立模型对物种分布进行预测的方法,在物种保护规划和管理上的应用越来越广泛^[3-5]。这种方法所采用的数理模型被称为生态位模型、栖息地适宜性模型或物种分布模型等,本文将统一使用物种分布模型这一名称。广义上的物种分布模型包括定量模型和基于规则的模型,本文将只讨论其中的定量模型,因为这类模型在生态学研究 and 物种保护中应用最为广泛。这些模型尤其适用于在较大的空间尺度上分布的物种^[4],其基本原理是:在一个合适的空间尺度上,区域内有某物种出现的地点占整个区域的比例可以反映该物种种群分布大小,对其分布范围的变化进行监测就可以得到该物种种群变化的信息^[6-7]。物种分布模型的方法多样,研究人员如何从众多的模型中选择合适的方法存在一定的困难。

利用物种分布有/无数据建立模型预测物种分布,最先应用于一些狩猎物种上^[8];后来也广泛应用于鸟类^[9]、大型兽类(例如狼(*Canis lupus*)^[10]和棕熊(*Ursus arctos*)^[11]等)、小型兽类^[12]、两栖类^[13]、蝴蝶^[14]等物种的研究上,在真菌类^[15]和植物的分布研究上也有所应用^[16-17]。物种分布模型在物种的生态学及进化生物学上有着广泛的应用:1)可以用来研究物种分布与环境变量之间的关系^[12];2)研究物种可以生存的栖息地特征,从而确认目标物种可能高度利用的栖息地^[18];3)分析物种分布随时间变化如何变化,对于濒危物种来说人们对于其栖息地的萎缩比较感兴趣,而对于入侵物种来说,人们对于其栖息地的扩张更为关注;4)预测物种在将来环境变化,尤其是气候变化条件下的分布变化^[19],从而分析气候变化对物种分布潜在的影响;5)研究相近物种的分布在生态学 and 地理分布上的分化^[20];6)也有些研究者试图将物种出现频率和物种种群丰度联系起来,从而推断物种种群动态^[1,21]。

利用物种分布有/无数据预测分布,关键的步骤包括构建概念模型,收集物种分布有/无的数据,选择合适的方法建立模型,以及评估模型的精度^[22](图1)。首先,需要构建总体概念模型,也即构建物种分布与环境变量之间的关系函数,并确定将要使用的建模方法。收集物种分布有/无数据有系统调查及非系统调查方法。在野外调查时,可以将几个物种的调查结合起来进行,在投入相似的资金、时间、人力的情况下收集更多物种的信息。利用GIS工具将影响物种分布的环境变量数字化,通过AIC或者BIC等指标筛选最优的变量组合。然后,选择合适的算法建立模型,利用环境变量和物种分布有/无的结果来构建模型,并对模型进行检验和评估。本文将针对以上各个环节的技术细节进行综述。

1 物种分布模型

1.1 构建总体概念模型

构建物种分布模型的第一步,就是构建总体概念模型^[22],即:综合考虑研究对象的生物学特征以及对资源的需求,提出物种分布与环境变量之间的关系假设,确定所用模型的类型及算法,选择具有生物学意义的环境变量,设计数据收集方案,为模型的运算及评估做准备。

与物种分布模型最相关的生态学理论是生态位概念^[16,23]。Elton将生态位定义为“生物在栖息地所占据

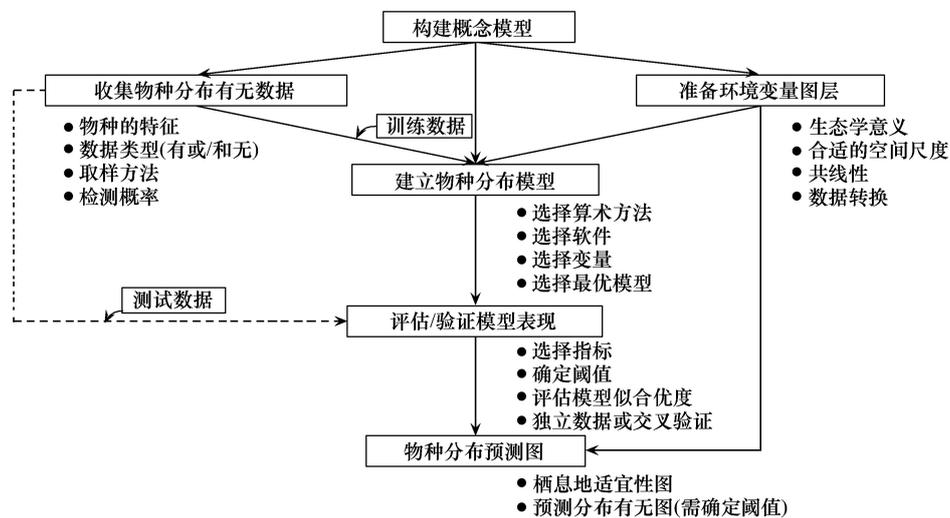


图 1 利用物种分布有无数据建立物种分布模型的步骤及其技术细节

Fig.1 The steps and technique details of species distribution models using presence-absence data

的空间单元”^[24],而 Hutchinson 将生态位定义为“一个物种生存和繁殖所需要的环境”^[25],更进一步区分了“基础生态位”(即不考虑种间关系下的物种对环境的反应)和“现实生态位”(即包含了种间相互作用下的物种可以生存和繁殖的真实的的环境维度)^[26]。现实生态位一般是基础生态位的子集。物种分布模型强调物种对环境的需求,尤其是影响物种分布的非生物环境因素,评估其基础和现实生态位^[2]。将限制物种分布的环境因子,尤其是较大的空间尺度上的气候数据,以及物种分布有无的数据置入模型,所获得结果应是基础生态位^[27],在此基础上进一步考虑物种的扩散特征、干扰因素以及资源因素,所获取的结果更接近于现实生态位^[23,26]。物种分布模型利用环境变量与已知的物种分布点间的关系,建立反应关系式,再利用该反应关系式,推断未调查区域物种出现概率,将出现概率放到地理空间上显示,则表现为物种的栖息地适宜性或潜在分布范围。

1.2 准备物种分布及环境数据

建立物种分布模型,需要同时准备物种分布有无数据以及相关的环境数据。概念模型提出了影响物种分布的因素,包括非生物环境、生物间相互作用、物种本身的特性(如扩散特点)以及社会经济因素。非生物环境一般包括地形因素(如海拔、坡度、坡向等)、气候因素(如年降水量、年均温、降水及气温季节变动率等)、地理因素(如土壤类型、pH 值等),生物因素则包括植被类型、人为干扰类型及强度及种间相互作用(如竞争、捕食、协作等)^[2]。筛选并准备这些因素,利用 GIS 工具处理,使之成为符合模型条件的具有合适的空间尺度的数字化图层。环境变量的选择一般是基于专家知识^[28]以及数据的可得性。

物种分布有/无的数据,可以通过系统取样的方式获取,也可以通过非系统的方式从调查报告、博物馆以及标本馆收集。很多研究者利用系统取样的方式获取研究区域内物种分布有/无的信息,从而建立模型预测未调查地区的物种出现概率^[29-30]。首先,将研究区域划分为一定大小的调查单元^[4],可以依据物种的生物学特征(如家域面积)人为划分面积相等的网格^[31],也可以根据自然形成的栖息地斑块^[32]或行政管理区划单位^[33]划分调查单元。然后,对所有调查单元或抽取部分调查单元进行实地调查(如样线调查、红外相机调查等),获取物种有/无信息。取样时可依据环境的梯度分层取样,以使数据更具有代表性。

通过观察物种实体或痕迹,可以比较容易确定物种在某地是有分布的,但是确定一个物种在某地是没有分布却不是那么容易,这是因为在一个地点观察不到物种出现,可能是因为调查方法没有检测到这个物种的存在,而该物种在此地点实际上是存在的;也就是说由于调查方法的限制物种的检测概率不可能达到 100%^[4]。因此收集物种分布有/无信息的关键问题之一就是评估所选调查方法对该物种的检测概率,如果在数据分析和构建模型时忽略了不完美检测的客观事实,将使构建的模型估算参数时出现偏差,从而导致对物

种分布情况得出错误的推断,进而导致管理者做出错误的管理决定^[34]。为了改进这个问题,研究者一方面需要改进数据收集方法以尽量提高检测概率(如在短时间内对调查单元进行重复调查),另外一方面也需要利用统计学方法对实际的检测概率进行评估和计算,以保证能够得到无偏差的参数估计^[4]。

利用重复调查方法对同一个调查单元收集物种分布有/无信息的方式包括:1)多次分散调查;2)多个观察者独立调查;3)同一观察者多次调查(每次调查间隔一定时间);4)在一个较大的景观单元内调查多个地点^[4]。

在一个季节内重复调查,有效的取样设计包括以下3种方式^[35]:1)标准方式,即所有取样的调查单元都重复调查同样多的次数;2)双重取样设计,即只在一部分已取样的调查单元内进行一定次数的重复调查,其他的取样单元只调查1次;3)排除设计,即对调查单元设定最大重复调查次数(如 K 次),如果没有发现物种出现则重复调查 K 次之后停止调查,但是一旦发现物种出现就停止调查。MacKenzie 和 Royle^[36]认为第3种重复调查方法最为有效,因为一旦发现物种存在就可以确认物种在该调查单元内是有分布的,而不必继续花费力气进行重复调查。

除了以上所述通过系统取样的方式收集到的物种分布有/无的信息之外,近年来从博物馆或植物标本馆获得的物种分布记录^[37]也用于物种分布模型中。其中某些数据可以在网络上获取(如全球生物多样性信息组织(The Global Biodiversity Information Facility)提供了3.2亿条物种分布记录,网址为<http://www.gbif.org/>),但这些数据并不是通过系统取样获得的,而且往往只有物种有分布的记录,因此不能推断物种无分布的信息;但是,正确利用这样的数据可以用来分析生物多样性的格局^[5]。

一般来说,同时利用物种分布有和/无的信息构建模型,得到的结果比仅用物种分布有的信息的模型的精度要高^[38],虽然也有例外。因此,在两种数据均可得的情况下,可以优先考虑使用二者同时建模的方法,如Logistic 回归、MARS、GDM等(表1)。在仅有物种分布有的信息可用的情况下,如果利用与物种出现点具有同样偏差的环境背景数据作为“伪不出现数据(Pseudo-absence data)”构建模型,可以提高模型的精度^[39]。

模型的表现与物种分布数据的数量正相关^[30,40],即:物种分布的记录越多,模型的预测表现越好。但是物种分布数据又受到调查工作的限制。有些研究表明,将至少50—100个有物种分布的记录置入模型就可得到可接受的结果^[40-42],甚至有些研究仅利用30个物种分布记录就得到了可接受的结果^[5,43]。Coudon 和 Gégout 利用人造数据的模拟实验也表明,利用 logistic 回归要较为准确的评估物种的反应方程,至少需要50个物种出现的观察数据^[44]。

1.3 构建模型

为了利用物种分布有/无的信息来预测其在更大范围内的分布状况,很多技术已被用来建立预测模型,依据算法不同,物种分布模型可以分为统计学模型,机器学习模型以及其它模型^[2](表1)。统计学模型包括广义线性模型(GLM)^[45],广义加性模型(GAM)^[26],多元自适应回归样条(MARS)^[46],多重判别分析(MDA)^[47]等;机器学习模型包括人工智能网络(ANN)^[48],分类回归树(CART)^[26],基于遗传算法的模型^[48]。另外还有多元距离模型(MD)^[5]以及基于专家知识的模型^[50]。

选择模型的方法需要综合考虑自变量及因变量的类型(定量或分类)、物种分布数据的类型以及研究者对于物种分布数据与环境变量之间关系的数学假设(表1)以及研究者的使用经验^[2]。在物种分布有无数据均可得的情况下,最常用的方法是广义线性模型中的 Logistic 回归模型。也就是通过 Logistic 回归将物种出现和不出现数据与环境或栖息地变量联系起来,从而预测一定区域里物种出现概率^[50]。Logistic 回归模型已广泛用来预测濒危脊椎动物的出现和栖息地利用^[47,51],狩猎物种(game species)的分布范围^[8],以及植物的空间分布格局^[52]。此外,还有一些模型用来分析仅有物种出现的数据,比如 BIOCLIM^[53]、ENFA^[30]、DOMAIN^[54]、GARP^[49]以及 MAXENT^[55]等,其中表现比较好的有 MAXENT 和 GARP 等^[5,43],而 ENFA 模型则可以区分出物种生态位与环境背景,并且能给出环境变量对物种分布的影响^[2]。基于距离算法的模型,只能利用定量的环境变量,而且不能给出环境变量对物种分布影响的评估^[2]。表1系统总结了利用有/无数据及只用物种有分布的数

据建立模型的方法所利用的物种分布数据类型、环境变量类型以及模型所用的反应函数。

当环境或栖息地变量比较多时,选择哪些变量来构建模型就成为一个关键问题,也即从若干候选模型中选出最佳模型来。信息测量指标常被用来比较不同模型的优劣^[56]。其中一种著名的信息测量指标是 Akaike 信息标准(为 AIC,公式 1)^[27]。

AIC 的定义为^[57]:

$$\text{AIC} = -2\log \text{Likelihood} + 2K \quad (1)$$

式中,log Likelihood 是模型的估计最大似然值的自然对数,K 为模型中自变量的数目。

其它条件不变的情况下,AIC 值越小,表示模型的拟合优度越高。将所有模型按照 AIC 的值从低到高排列起来,并计算每个模型的 AIC 值与所有模型中最小的 AIC 的差值,记为 ΔAIC 。Burnham 和 Anderson^[58]认为 $\Delta\text{AIC} < 2$ 的模型是等效的最佳模型。但是当样本量较少时(如 $n/K \leq 40$ 时),应该利用 AIC_c (公式 2) 值比较模型^[58]。

$$\text{AIC}_c = -2\log \text{Likelihood} + 2K + 2K(K+1)/(n-K-1) \quad (2)$$

Akaike 权重(公式 3)是用来比较模型的另一个常用的指标,其值可以反应某候选模型成为最优模型的相对概率^[58]。相比较于 ΔAIC 和 AIC_c ,Akaike 权重更易于解释模型的优势,同时也可以用于评估单个变量对模型的贡献率。

$$\text{Akaike 权重} = \omega_i = \frac{\exp(-0.5 \text{AIC}_i)}{\sum_{r=1}^R \exp(-0.5 \text{AIC}_r)} \quad (3)$$

式中,R 为候选模型的数目。

还有一种使用的越来越多的信息标准,叫做贝叶斯信息标准(BIC)^[59]。BIC 适用于模型中自变量的数目较低的情况^[60]。

1.4 评估模型精度

很多物种分布模型给出的结果是 0—1 的值,被解释为物种出现概率^[61]或者栖息地适宜性^[30]。在环境保护和野生动物管理实践中,物种分布有/无的信息比直接的预测出现概率值更直观和实用^[62];另一方面,在对模型预测准确性进行评估时往往需要将物种预测出现概率值转化为物种是否出现的结果,从而通过对比预测的分布有/无与对应的观察结果有/无之间的匹配程度来评估模型的预测表现^[63]。因此,需要确定物种出现概率的一个阈值,预测出现概率高于阈值就认为预测结果是物种会出现,否则,就认为预测结果是物种不会出现^[63]。评估模型精度的很多指标是与阈值相关的。

确定阈值的方法可分为主观和客观两种方式^[63]。主观的方式一般随意选择一个数值作为阈值,比如很多人选择 0.5 作为阈值将物种预测出现概率划分为物种分布出现或不出现^[47,63]。也有研究者选择 0.3^[64]或者 0.05^[40]作为阈值。但是选择 0.5 作为阈值是有问题的,特别是当物种分布有和无的数据量不一致的时候^[65]。因此需要采用某些客观标准来选择最佳的阈值,主要的原理是选择的阈值能使观察值和预测值之间的吻合度最大化。基于不同的预测表现指标,有多种方法可以用来确定最佳阈值^[62]。例如,选取使敏感度与特异度之和达到最大时的阈值作为最佳阈值^[63,66]。利用受试者工作特征曲线(ROC 曲线)来确定阈值也越来越受到重视^[3,50]。

阈值的确定也和模型应用目的相关,可以通过考察错误否定率(FNC)和错误肯定率(FPC)的代价矩阵来确定阈值^[3];如果模型用来确立保护区,那么 $\text{FNC} > \text{FPC}$,需要用特异性来评估模型预测能力;如果模型用来预测濒危物种的栖息地,那么 $\text{FNC} < \text{FPC}$ ^[44],因此要用敏感性作为评估模型预测能力的指标。

一旦通过确定预测概率的阈值而将预测结果分为有/无两类,可以建立一个 2×2 的交互表来比较预测情况和实际观察结果(图 2)。从观察结果与预测结果 2×2 分类表中,可以得出用来评估模型预测准确性的一系列指标(表 2)^[62]。其中,广泛使用的指标是 Kappa、总的预测准确率(OPS)和 TSS^[62]。Kappa 指数依赖于取

表 1 利用物种分布有-无数据或仅利用物种分布的数据建立模型预测物种分布的方法总结 (表格主要在参考文献[2,5]的基础上增添而成)
Table 1 Summary of techniques using species presence-absence data or presence-only data to predict species distributions (The table was modified from reference [2,5])

方法 Method	模型类型及解释 Class of model and explanation	物种数据类型* Species Data type	环境变量 Predictors	因变量 Response variable	响应函数 Response function	软件 Software	参考文献 References
统计学模型 Statistical model							
GLM	广义线性模型 Generalized linear models	PA	定量的, 分类的	定量的, 分类的	参数线性, 多项式, 分段线性函数	R and S-plus, GARASP 附加软件	[45]
GAM	广义可加模型 Generalized additive models	PA	定量的, 分类的	定量的, 二分类的	利用回归、样条法等使曲线平滑	R and S-plus, GARASP 附加软件, SPSS, PRESENCE	[26]
BRUTO	广义可加模型的快速操作 Generalized additive models	PA	定量的, 分类的	定量的, 二分类的	与 GAM 同	R and S-PLUS, mda package	[68]
GDM	广义差异模型 Generalised dissimilarity modelling	PA	定量的, 分类的	定量的, 分类的	非线性矩阵回归	ArcView and S-plus, R 中的 GDM package	[18]
MARS	多元自适应回归样条 Multivariate adaptive regression splines	PA	定量的, 分类的	定量的, 分类的	分段线性回归	R 的 mda package	[46]
MDA	多重判别分析 Multiple discriminant analysis	PA	定量的	分类的	最大似然法, 距离判别法, 贝叶斯判别法等	S-PLUS, R	[47]
ENFA	生态位因素分析 Ecological Niche Factor Analysis	P	定量的, 分类的	定量的, 分类的	马氏距离法	BIOMAPPER	[30]
CE	气候包络模型 Climatic envelope model	P	定量的, 分类的	定量的, 分类的	欧式距离法, 马氏距离法等	DIVA-GIS 中的 BIOCLIM 模型	[53]
OM	占据模型 Occupancy model	PA	定量的, 分类的	分类的	基于不完美的检测概率推算占据率	PRESENCE	[36]
机器学习模型 Machine learning model							
ANN	人工神经网络 Artificial neural networks	PA	定量的, 变量的	多元分类的	基于神经元传导理论	多种软件如 STATISTICA Neural Networks 和 SPECIES	[48,68]
CART	分类回归树 Classification and regression trees	PA	定量的, 分类的	定量的, 多元分类的	二分类递归分割	S-PLUS [69]	
GARP	遗传算法 Genetic algorithms for rule production	PA 或 P	定量的, 分类的	二分类的	迭代算法	DesktopGarp	[49]
MAXENT	最大熵原则 Maximum entropy	PA 或 P	定量的, 分类的	二分类的	非线性反应函数	Maxent	[55]
其它 Others							
MD	多元距离模型 Multivariate distance	P	定量的	分类的	最大似然法	LIVES 或 DOMAIN	[5,54]
专家方法	基于专家知识的模型 Expert-based model	PA 或 P	定量的, 分类的	定量的, 分类的	反应函数由专家知识确定		[70]

* 数据类型: P: 只使用有物种分布的地点的数据; PA: 同时使用有物种分布和无物种分布地点的数据

样比例((A+C)/n),而 TSS 不依赖于取样的偏差而且能保留 Kappa 指数的优点,因而比 Kappa 指数更有优势^[71]。

近年来,使用与阈值无关的指标来衡量模型的精度也很普遍^[2],其中最常用的指标是受试者操作曲线下面积(AUC)。AUC 在 0.5—0.7 说明模型表现较差,0.7—0.9 说明表现一般,高于 0.9 说明模型表现良好^[63]。因为 AUC 值与阈值无关,也经常用来比较不同物种分布模型的表现^[5,43]。

	观察物种出现	观察物种不出现	
预测物种出现	A	B	A + B
预测物种不出现	C	D	C + D
	A + C	B + D	A + B + C + D

图 2 观察结果与预测结果 2×2 分类表

Fig. 2 The 2×2 classification table of observed presence and absence of a species and the predicted presence or absence of a species

ABCD 为各类型调查单元的数量,总的取样量为 A+B+C+D

表 2 由预测结果二分类变量得出的评估模型准确性的指标

Table 2 Indices for assessing the predictive performance of species distribution models

指标 Index	计算公式 Formula
总正确率 Overall prediction success (OPS)	$\frac{A + D}{A + B + C + D}$
预测物种出现正确率 Precision	$A / (A + B)$
敏感度 Sensitivity	$A / (A + C)$
特异度 Specificity	$D / (B + D)$
错误肯定率 False positive rate	$B / (B + D)$
错误否定率 False negative rate	$C / (A + C)$
Kappa	$\frac{(A + D) - [(A + C)(A + B) + (B + D)(C + D)] / n}{n - [(A + C)(A + B) + (B + D)(C + D)] / n}$
发生比 Odds ratio	$(AD) / (CB)$
归一化互信息 Normalized mutual information, NMI	$\frac{-A \ln A - B \ln B - C \ln C - D \ln D + (A + B) \ln(A + B) + (C + D) \ln(C + D)}{n \ln n - [(A + C) \ln(A + C) + (B + D) \ln(B + D)]}$
真实能力统计值 True skill statistic	1-maximum (sensitivity + specificity)

A 为正确预测物种出现的调查单元数目,B 是错误预测物种出现的数目,C 是错误预测物种不出现数目,D 是正确预测物种不出现数目,n (=A+B+C+D)是调查单元总数目

1.5 模型验证

使用独立数据验证模型的预测表现是利用物种分布有/无的数据建立预测模型的关键步骤之一^[50]。如果不能或者没有使用独立数据对模型的预测表现进行评估,那么这种模型就没有太大的应用价值^[72]。但是,一般调查数据的样本量不可能很大,因此也就没有足够多的独立的数据来评估模型预测表现^[50]。在独立数据缺乏时,研究者可将一套数据分成两部分,一部分数据用来建立模型(称为训练数据),一部分数据用来检验模型预测表现(称为检验数据)。Verbyla 和 Litaitis 提出了训练数据与检验数据的比例应为 1/(1+ $\sqrt{p-1}$)的经验法则,式中 p 为环境变量的个数^[71]。有些研究者建议在建立模型的过程中使用全部的调查数据,但是在评估模型预测准确性时将数据以一定的方式分成几部分^[73]或进行重采样。最流行的数据重取样方式包括拔靴法(Bootstrapping),K 折交叉检验(K-fold Cross-validation),以及刀切法方法^[50,74]。拔靴法最早由 Efron 提出^[75],基本方法是从总体样本中选取多个子样本出来,通过对子样本的研究推断总体样本特征,抽取出来的子样本在下次重采样时将被放回总体样本中去。K 折交叉检验的做法是,将数据平均分成 K 等份,每次从中抽取 K-1 份来建立模型,剩下的 1 份用来预测,共需重复这样的步骤 K 次。刀切法最早由 Quenouille 提出^[76],具体做法是:对于样本量为 n 的数据,每次剔除一个个例,用剩下的 n-1 个个例来评估模型的参数,重复这样的步骤 n 次,得到模型参数估计的平均值。K 折交叉检验适用于数据量比较充分的情况,而刀切法是其中的一个特例。在数据比较稀少的情况下,研究者经常使用拔靴法来对数据重取样^[2]。

物种分布模型的预测表现主要可以通过两个方面进行评估:一是模型拟合优度,即模型预测值与观察值

之间的拟合程度;二是模型预测准确度,最简单最常用的指标包括总的预测正确率(表 2)、Kappa 指数以及模型能够正确区分物种分布有或无的能力^[3,50]。模型的区分能力一般以 AUC 的值作为指标,其值越接近于 1,表示模型区分物种分布有或无的能力越良好。

2 结论及讨论

利用物种分布有/无数据建立模型预测空间分布,是一项较新的、发展迅速的且已在多个动植物类群广泛应用的方法。物种分布模型既可以使用物种分布有和无的数据,也可以仅利用物种分布有的数据^[38]。因为确认物种无分布往往是困难的或者需要付出巨大的努力来调查,当前仅利用物种有的信息来建立模型预测分布的应用更为广泛。博物馆、标本馆的动植物分布信息,保护区监测取得的动植物点位,以及各种科学调查(特别是无线电及 GPS 颈圈以及红外照相机的广泛使用)所取得分布数据,均可以用于物种分布模型,以获得物种在较精细的尺度上的空间分布格局。物种分布模型能够用很少的数据得到较好的预测结果^[77],节省了时间、精力及费用,得到的结果较为可靠,可为保护管理计划提供科学依据。

物种分布模型如果能够将生物间的相互作用(如竞争、捕食、协作等)以及物种自身的生物学特点(如迁移能力、生活史等)以及人类的干扰等信息考虑进来,则可以提高模型的精度以甄别物种现实生态位的能力^[26,78]。种间作用会限制物种对生态位的利用。而物种迁移能力影响到物种对潜在生境的利用能力。人类活动的干扰会压缩物种的生存空间,进一步限制其生态位空间。

物种分布模型还可用于检验进化生物学中的假设^[79-80],如分类地位相近的分类群对气候条件的容忍性是否相似。系统进化的生态位保守性假设指物种倾向于通过稳定的自然选择在进化历史上保留其基础生态位的特征^[81]。因此,可以利用物种分布模型,结合物种的历史或化石分布数据以及大尺度的气候变量,推测其分布范围的变化,从而界定物种,尤其是甄别形态学特征相似的物种^[76,82]。这一类结合系统进化和生物气候模型的方法已被命名为“系统进化气候模型”^[83]。

物种分布模型获得的当前的物种分布范围或者栖息地适宜性,可为未来的监测提供本底数据^[2]。定期的采用同一套系统方法预测物种分布范围的变化,可以衡量人类活动对物种及生态系统的影响程度。气候变化影响野生动物的地理分布、物候(如鸟类迁徙)、种群大小等^[84],是国际上研究者和生物多样性管理者所关注的热点问题之一。物种分布模型可以利用物种分布有和/或无的数据预测当前和未来气候条件下濒危物种分布范围的变化。如 Turner 等^[85]通过模型预测,发现气候变化可能使温带森林丧失 48%的面积,并使栖息于其中的 15%的物种受到威胁。在全球气候变化的背景下,生物多样性的保护的策略必须考虑气候变化的影响,制定动态的而非静态的保护策略框架^[86]。物种分布模型可为这一框架提供预测的依据。将物种扩散或者迁徙的机制与物种分布模型结合,能够改善对气候变化下物种分布范围变化的预测^[87]。

References:

- [1] Nielsen S E, Johnson C J, Heard D C, Boyce M S. Can models of presence-absence be used to scale abundance? Two case studies considering extremes in life history. *Ecography*, 2005, 28(2): 197-208.
- [2] Franklin J. *Mapping Species Distributions: Spatial Inference and Prediction*. Cambridge: Cambridge University Press, 2010.
- [3] Fielding A H, Bell J F. A review of methods for the assessment of prediction errors in conservation presence/absence models. *Environmental Conservation*, 1997, 24(1): 38-49.
- [4] MacKenzie D I. What are the issues with presence-absence data for wildlife managers?. *Journal of Wildlife Management*, 2005, 69(3): 849-860.
- [5] Elith J, Graham C H, Anderson R P, Dudík M, Ferrier S, Guisan A, Hijmans R J, Huettmann F, Leathwick J R, Lehmann A, Li J, Lohmann L G, Loiselle B A, Manion G, Moritz C, Nakamura M, Nakazawa Y, Overton J M M, Peterson A T, Phillips S J, Richardson K, Scachetti-Pereira R, Schapire R E, Soberón J, Williams S, Wisz M S, Zimmermann N E. Novel methods improve prediction of species' distributions from occurrence data. *Ecography*, 2006, 29(2): 129-151.
- [6] Trenham P C, Koenig W D, Mossman M J, Stark S L, Jagger L A. Regional dynamics of wetland-breeding frogs and toads: turnover and synchrony. *Ecological Applications*, 2003, 13(6): 1522-1532.
- [7] Weber D, Hintermann U, Zangger A. Scale and trends in species richness: considerations for monitoring biological diversity for political purposes. *Global Ecology and Biogeography*, 2004, 13(2): 97-104.
- [8] Straw J A Jr, Wakeley J S, Hudgins J E. A model for management of diurnal habitat for American woodcock in Pennsylvania. *The Journal of*

- Wildlife Management, 1986, 50(3): 378-383.
- [9] Franco A M A, Brito J C, Almeida J. Modelling habitat selection of Common Cranes *Grus grus* wintering in Portugal using multiple logistic regression. *Ibis*, 2000, 142(3): 351-358.
- [10] Mladenoff D J, Sickley T A, Wydeven A P. Predicting gray wolf landscape recolonization: logistic regression models vs. new field data. *Ecological Applications*, 1999, 9(1): 37-44.
- [11] Pyare S, Berger J. Beyond demography and delisting: ecological recovery for Yellowstone's grizzly bears and wolves. *Biological Conservation*, 2003, 113(1): 63-73.
- [12] Ball L C, Doherty P F Jr, McDonald M W. An occupancy modeling approach to evaluating a Palm Springs ground squirrel habitat model. *Journal of Wildlife Management*, 2005, 69(3): 894-904.
- [13] Knapp R A, Matthews K R, Preisler H K, Jellison R. Developing probabilistic models to predict amphibian site occupancy in a patchy landscape. *Ecological Applications*, 2003, 13(4): 1069-1082.
- [14] Mac Nally R, Fleishman E. A successful predictive model of species richness based on indicator species. *Conservation biology*, 2004, 18(3): 646-654.
- [15] Dreisbach T A, Smith J E, Molina R. Challenges of modeling fungal habitat: when and where do you find chanterelles//Scott J M, Heglund P J, Morrison M L, eds. *Predicting Species Occurrence: Issues of Accuracy and Scale*. Washington DC: Island Press, 2002: 475-481.
- [16] Austin M P, Nicholls A O, Margules C R. Measurement of the realized qualitative niche: environmental niches of five *Eucalyptus* species. *Ecological Monographs*, 1990, 60(2): 161-177.
- [17] Zuo W Y, Lao N, Geng Y Y, Ma K P. Predicting species' potential distribution—SVM compared with GARP. *Journal of Plant Ecology*, 2007, 31(4): 711-719.
- [18] Ferrier S. Mapping spatial pattern in biodiversity for regional conservation planning: where to from here? *Systematic Biology*, 2002, 51(2): 331-363.
- [19] Skov F, Svenning J C. Potential impact of climatic change on the distribution of forest herbs in Europe. *Ecography*, 2004, 27(3): 366-380.
- [20] Graham C H, Ron S R, Santos J C, Schneider C J, Moritz C. Integrating phylogenetics and environmental niche models to explore speciation mechanisms in dendrobatid frogs. *Evolution*, 2004, 58(8): 1781-1793.
- [21] Stanley T R, Royle J A. Estimating site occupancy and abundance using indirect detection indices. *The Journal of Wildlife Management*, 2005, 69(3): 874-883.
- [22] Guisan A, Lehmann A, Ferrier S, Austin M, Overton J M C, Aspinall R, Hastie T. Making better biogeographical predictions of species' distributions. *Journal of Applied Ecology*, 2006, 43(3): 386-392.
- [23] Guisan A, Thuiller W. Predicting species distribution: offering more than simple habitat models. *Ecology Letters*, 2005, 8(9): 993-1009.
- [24] Elton C S. *Animal Ecology*. Chicago: University of Chicago Press, 1927.
- [25] Hutchinson M F. *Methods of generation of weather sequences*//Bunting A H, ed. *Agricultural Environments: Characterization, Classification and Mapping*. Wallingford: CAB, International, 1987: 149-157.
- [26] Austin M P. Spatial prediction of species distribution: an interface between ecological theory and statistical modelling. *Ecological Modelling*, 2002, 157(2/3): 101-118.
- [27] Soberón J, Peterson A T. Interpretation of models of fundamental ecological niches and species' distributional areas. *Biodiversity Informatics*, 2005, 2: 1-10.
- [28] Hirzel A H, Le Lay G. Habitat suitability modeling and niche theory. *Journal of Applied Ecology*, 2008, 45(5): 1372-1381.
- [29] Cawsey E M, Austin M P, Baker B L. Regional vegetation mapping in Australia: a case study in the practical use of statistical modelling. *Biodiversity and Conservation*, 2002, 11(12): 2239-2274.
- [30] Hirzel A, Guisan A. Which is the optimal sampling strategy for habitat suitability modelling. *Ecological Modelling*, 2002, 157(2/3): 331-341.
- [31] Liu F, McShea W, Garshelis D, Zhu X J, Wang D J, Gong J E, Chen Y P. Spatial distribution as a measure of conservation needs: an example with Asiatic black bears in south-western China. *Diversity and Distributions*, 2009, 15(4): 649-659.
- [32] Barlow A C D, Ahmed M I U, Rahman M M, Howlader A, Smith A C, Smith J L D. Linking monitoring and intervention for improved management of tigers in the Sundarbans of Bangladesh. *Biological Conservation* 2008, 141(8): 2032-2040.
- [33] Sargeant G A, Sovada M A, Slivinsk C C, Johnson D H. Markov chain Monte Carlo estimation of species distributions: a case study of the swift fox in western Kansas. *Journal of Wildlife Management*, 2005, 69(2): 483-497.
- [34] Tyre A J, Tenhumberg B, Field S A, Niejalke D, Parris K, Possingham H P. Improving precision and reducing bias in biological surveys: estimating false-negative error rates. *Ecological Applications*, 2003, 13(6): 1790-1801.
- [35] Azuma D L, Baldwin J A, Noon B R. *Estimating the occupancy of spotted owl habitat areas by sampling and adjusting for bias*. Berkeley, CA: US Dept. of Agriculture, Forest Service, Pacific Southwest Research Station, 1990.
- [36] MacKenzie D I, Royle J A. Designing occupancy studies: general advice and allocating survey effort. *Journal of Applied Ecology*, 2005, 42(6): 1105-1114.
- [37] Graham C H, Ferrier S, Huettman F, Moritz C, Peterson A T. New developments in museum-based informatics and applications in biodiversity analysis. *Trends in Ecology and Evolution*, 2004, 19(9): 497-503.

- [38] Brotons L, Thuiller W, Aratjo M B, Hirzel A H. Presence-absence versus presence-only modelling methods for predicting bird habitat suitability. *Ecography*, 2004, 27(4): 437-448.
- [39] Phillips S J, Dudík M, Elith J, Graham C H, Lehmann A, Leathwick J, Ferrier S. Sample selection bias and presence-only distribution models: implications for background and pseudo-absence data. *Ecological Applications*, 2009, 19(1): 181-197.
- [40] Cumming G S. Using habitat models to map diversity: pan-African species richness of ticks (Acari: Ixodida). *Journal of Biogeography*, 2000, 27(2): 425-440.
- [41] Stockwell D R B, Peterson A T. Effects of sample size on accuracy of species distribution models. *Ecological Modelling*, 2002, 148(1): 1-13.
- [42] Loiselle B A, Jørgensen P M, Consiglio T, Jiménez I, Blake J G, Lohmann L G, Montiel O M. Predicting species distributions from herbarium collections: does climate bias in collection sampling influence model outcomes?. *Journal of Biogeography*, 2008, 35(1): 105-116.
- [43] Wisz M S, Hijmans R J, Li J, Peterson A T, Graham C H, Guisan A. Effects of sample size on the performance of species distribution models. *Diversity and Distributions*, 2008, 14(5): 763-773.
- [44] Coudun C, Gégout J C. Quantitative prediction of the distribution and abundance of *Vaccinium myrtillus* with climatic and edaphic factors. *Journal of Vegetation Science*, 2007, 18(4): 517-524.
- [45] Guisan A, Weiss S B, Weiss A D. GLM versus CCA spatial modeling of plant species distribution. *Plant Ecology*, 1999, 143(1): 107-122.
- [46] Moisen G G, Fresco T S. Comparing five modelling techniques for predicting forest characteristics. *Ecological Modelling*, 2002, 157(2/3): 209-225.
- [47] Manel S, Dias J M, Ormerod S J. Comparing discriminant analysis, neural networks and logistic regression for predicting species distributions: a case study with a Himalayan river bird. *Ecological Modelling*, 1999, 120(2/3): 337-347.
- [48] Patterson D. *Artificial Neural Networks*. Singapore: Prentice Hall, 1996.
- [49] Stockwell D, Peters D. The GARP modelling system: problems and solutions to automated spatial prediction. *International Journal of Geographical Information Science*, 1999, 13(2): 143-158.
- [50] Pearce J, Ferrier S. Evaluating the predictive performance of habitat models developed using logistic regression. *Ecological Modelling*, 2000, 133(3): 225-245.
- [51] Brito J C, Crespo E G, Paulo O S. Modelling wildlife distributions: logistic multiple regression vs overlap analysis. *Ecography*, 1999, 22(3): 251-260.
- [52] Augustin N H, Cummins R P, French D D. Exploring spatial vegetation dynamics using logistic regression and a multinomial logit model. *Journal of Applied Ecology* 2001, 38(5): 991-1006.
- [53] Busby J R. BIOCLIM—a bioclimate analysis and prediction system//Margules C R, Austin M P, eds. *Nature Conservation*. Victoria, Australia: CSIRO, 1991: 64-68.
- [54] Carpenter G, Gillison A N, Winter J. DOMAIN: a flexible modelling procedure for mapping potential distributions of plants and animals. *Biodiversity and Conservation*, 1993, 2(6): 667-680.
- [55] Phillips S J, Anderson R P, Schapire R E. Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling*, 2006, 190(3/4): 231-259.
- [56] Wang J C, Guo Z G. *Logistic Regression Model — Methods and Applications*. Beijing: China Higher Education Press, 2001.
- [57] Akaike H. A Bayesian extension of the minimum AIC procedure of autoregressive model fitting. *Biometrika*, 1979, 66(2): 237-242.
- [58] Burnham K P, Anderson D R. *Model Selection and Multi-Model Inference: A Practical Information-Theoretic Approach*. 2nd ed. New York: Springer, 2002.
- [59] Schwarz G. Estimating the dimension of a model. *Annals of Statistics*, 1978, 6(2): 461-464.
- [60] Anderson D R, Burnham K P, White G C. AIC model selection in overdispersed capture-recapture data. *Ecology* 1994, 75(6): 1780-1793.
- [61] Scott J M, Heglund P, Morrison M L. *Predicting Species Occurrences: Issues of Accuracy and Scale*. Washington: Island Press, 2002.
- [62] Liu C R, Berry P M, Dawson T P, Pearson R G. Selecting thresholds of occurrence in the prediction of species distributions. *Ecography*, 2005, 28(3): 385-393.
- [63] Manel S, Williams H C, Ormerod S J. Evaluating presence-absence models in ecology: the need to account for prevalence. *Journal of Applied Ecology*, 2001, 38(5): 921-931.
- [64] Robertson M P, Caithness N, Villet M H. A PCA-based modelling technique for predicting environmental suitability for organisms from presence records. *Diversity and Distributions*, 2001, 7(1/2): 15-27.
- [65] Cramer J S. *Logit Models from Economics and Other Fields*. Cambridge: Cambridge University Press, 2003.
- [66] Cantor S B, Sun C C, Tortolero-Luna G, Richards-Kortum R, Follen M. A comparison of C/B ratios from studies using receiver operating characteristic curve analysis. *Journal of Clinical Epidemiology*, 1999, 52(9): 885-892.
- [67] Hastie T, Tibshirani R, Buja A. Flexible discriminant analysis by optimal scoring. *Journal of the American statistical association*, 1994: 1255-1270.
- [68] Pearson R G, Dawson T P, Berry P M. SPECIES: a spatial evaluation of climate impact on the envelope of species. *Ecological Modelling*, 2002, 154: 289-300.
- [69] Austin M P. Spatial prediction of species distribution: an interface between ecological theory and statistical modelling. *Ecological modelling*, 2002,

- 157: 101-118.
- [70] Murray J V, Goldizen A W, O'Leary R A, et al. How useful is expert opinion for predicting the distribution of a species within and beyond the region of expertise? A case study using brush-tailed rock-wallabies *Petrogale penicillata*. *Journal of Applied Ecology*, 2009, 46: 842-851.
- [71] Allouche O, Tsoar A, Kadmon R. Assessing the accuracy of species distribution models: prevalence, kappa and the true skill statistic (TSS). *Journal of Applied Ecology*, 2006, 43(6): 1223-1232.
- [72] Verbyla D L, Litvaitis J A. Resampling methods for evaluating classification accuracy of wildlife habitat models. *Environmental Management*, 1989, 13(6): 783-787.
- [73] Rencher A C. *Methods of Multivariate Analysis*. New York: Wiley, 1995.
- [74] Shao J, Tu D S. *The Jackknife and Bootstrap*. New York: Springer, 1995.
- [75] Efron B. Bootstrap methods; another look at the jackknife. *The Annals of Statistics*, 1979, 7(1): 1-26.
- [76] Quenouille M H. Approximate tests of correlation in time-series. *Journal of the Royal Statistical Society, Series B: Methodological*, 1949, 11(1): 68-84.
- [77] Pearson R G, Raxworthy C J, Nakamura M, Peterson A T. Predicting species' distributions from small numbers of occurrence records: a test case using cryptic geckos in Madagascar. *Journal of Biogeography*, 2007, 34(1): 102-117.
- [78] Chase J M, Leibold M A. *Ecological Niches: Linking Classical and Contemporary Approaches*. Chicago: Chicago University Press, 2003.
- [79] Ree R H, Moore B R, Webb C O, Donoghue M J. A likelihood framework for inferring the evolution of geographic range on phylogenetic trees. *Evolution*, 2005, 59(11): 2299-2311.
- [80] Peterson A T, Nyari A S. Ecological niche conservatism and Pleistocene refugia in the thrush-like mourner, *Schiffornis* sp., in the neotropics. *Evolution*, 2008, 62(1): 173-183.
- [81] Wiens J J, Graham C H. Niche conservatism: integrating evolution, ecology, and conservation biology. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 2005, 36: 519-539.
- [82] Bond J E, Stockman A K. An integrative method for delimiting cohesion species: finding the population-species interface in a group of Californian trapdoor spiders with extreme genetic divergence and geographic structuring. *Systematic Biology*, 2008, 57(4): 628-646.
- [83] Yesson C, Cullham A. Phyloclimatic modeling: combining phylogenetics and bioclimatic modeling. *Systematic Biology*, 2006, 55(5): 785-802.
- [84] Walther G R, Post E, Convey P, Menzel A, Parmesan C, Beebee T C J, Fromentin J M, Hoegh-Guldberg O, Bairlein F. Ecological responses to recent climate change. *Nature*, 2004, 416(6879): 389-395.
- [85] Turner W R, Oppenheimer M, Wilcove D S. A force to fight global warming. *Nature*, 2009, 462(7271): 278-279.
- [86] Hannah L. A global conservation system for climate-change adaptation. *Conservation Biology*, 2009, 24(1): 70-77.
- [87] Thuiller W, Albert C, Araújo M B, Berry P M, Cabeza M, Guisan A, Hickler T, Midgley G F, Paterson J, Schurr F M, Sykes M T, Zimmermann N E. Predicting global change impacts on plant species' distributions: future challenges. *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics*, 2008, 9(3/4): 137-152.

参考文献:

- [17] 左闻韵, 劳逆, 耿玉英, 马克平. 预测物种潜在分布区——比较 SVM 与 GARP. *植物生态学报*, 2007, 31(4): 711-719.
- [85] 王济川, 郭志刚. *Logistic 回归模型——方法与应用*. 北京: 中国高等教育出版社, 2001.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol.33, No.22 Nov., 2013 (Semimonthly)
CONTENTS

Frontiers and Comprehensive Review

- The review of methods for mapping species spatial distribution using presence/absence data
..... LIU Fang, LI Sheng, LI Diqiang (7047)
- A research review of landscape service LIU Wenping, YU Zhenrong (7058)
- Progress on techniques for partitioning soil respiration components and their application in cropland ecosystem
..... CHEN Minpeng, XIA Xu, LI Yinkun, MEI Xurong (7067)

Autecology & Fundamentals

- Effect of different stubble height treatments on the annual growth index and physiological characteristics of *Tetraena mongolica*
in two growing seasons WANG Zhen, ZHANG Liwen, YU Yi, et al (7078)
- Photosynthetic characteristics of an endangered species *Tetrameles nudiflora* under different light and water conditions
..... DENG Yun, CHEN Hui, YANG Xiaofei, et al (7088)
- The compensation capacity of tillering and production of main stem nodes in rice WEI Ming, LI Dongxia (7098)
- Simulation of leaf area and dry matter production of tobacco leaves based on product of thermal effectiveness and photosynthetically
active radiation ZHANG Mingda, LI Meng, HU Xueqiong, et al (7108)
- Effects of different tillage and straw systems on soil water-stable aggregate distribution and stability in the North China Plain
..... TIAN Shenzhong, WANG Yu, LI Na, et al (7116)
- Effects of the *Larix gmelinii* grown under different light intensities on the development and defensive enzyme activities of *Lymntria*
dispar larvae LU Yifang, YAN Junxin, LI Shuangwen, et al (7125)
- Biological control efficiency of *Orius similis* Zheng (Hemiptera: Anthocoridae) on *Frankliniella occidentalis* (Pergande) under
different spatial and caged conditions MO Lifeng, ZHI Junrui, TIAN Tian (7132)
- Preliminary study on scavenging mechanism of dissolved aluminum by phytoplankton
..... WANG Zhaowei, REN Jingling, YAN Li, et al (7140)
- Leaf-form characteristics of plants in *Quercus aquifolioides* community along an elevational gradient on the Balang Mountain in
Wolong Nature Reserve, Sichuan, China LIU Xingliang, HE Fei, FAN Hua, et al (7148)
- Comparison of shrimp density between the Minjiang estuary and Xinhua bay during spring and summer
..... XU Zhaoli, SUN Yue (7157)
- The feeding selectivity of an herbivorous amphipod *Ampithoe valida* on three dominant macroalgal species of Yundang Lagoon
..... ZHENG Xinqing, HUANG Lingfeng, LI Yuanchao, et al (7166)

Population, Community and Ecosystem

- Effects of four different agricultural prevention and control measures on rice yellow stem borer *Tryporyza incertulas* (Walker)
(Lepidoptera: Pyralidae) ZHANG Zhenfei, HUANG Bingchao, XIAO Hanxiang, et al (7173)
- Soil nitrogen concentrations and transformations under different vegetation types in forested zones of the Loess Gully Region
..... XING Xiaoyi, HUANG Yimei, AN Shaoshan, et al (7181)
- Ecosystem health assessment based on diagnosis CAI Xia, XU Songjun, CHEN Shanhao, et al (7190)
- The production and accumulation of phytoliths in rice ecosystems; a case study to Jiaying Paddy Field
..... LI Zimin, SONG Zhaoliang, JIANG Peikun (7197)
- Application of a free search-based projection pursuit model in investigating reed in wetlands LI Xihu, ZHAO Chengyi (7204)

- Soil microbial diversity under typical vegetation zones along an elevation gradient in Helan Mountains
..... LIU Bingru, ZHANG Xiuzhen, HU Tianhua, et al (7211)
- Effects of shrub encroachment on biomass and biodiversity in the typical steppe of Inner Mongolia
..... PENG Haiying, LI Xiaoyan, TONG Shaoyu (7221)
- Research on diaspore morphology and species distribution of 80 plants in the hill-gully Loess Plateau
..... WANG Dongli, ZHANG Xiaoyan, JIAO Juying, et al (7230)
- Habitat suitability assessment of blue sheep in Helan Mountain based on MAXENT modeling
..... LIU Zhensheng, GAO Hui, TENG Liwei, et al (7243)
- Characteristic of phytoplankton primary productivity and influencing factors in littoral zone of Lake Taihu
..... CAI Linlin, ZHU Guangwei, LI Xiangyang (7250)
- Landscape, Regional and Global Ecology**
- Responses of soil respiration to changes in depth of seasonal frozen soil in Ebinur Lake area, arid area of Northwest China
..... QIN Lu, LV Guanghui, HE Xuemin, et al (7259)
- Seasonal and annual variation characteristic in basal soil respiration of black loam under the condition of farmland field
..... ZHANG Yanjun, GUO Shengli, LIU Qingfang, et al (7270)
- Resource and Industrial Ecology**
- Economic evaluation and protection of *Amygdalus mira* genetic resource ZHANG Lirong, MENG Rui, LU Guobin (7277)
- Meteorological grading indexes of water-saving irrigation for cotton XIAO Jingjing, HUO Zhiguo, YAO Yiping, et al (7288)
- Research Notes**
- Sprouts characteristic structure of *Taxus yunnanensis* plantation SU Lei, SU Jianrong, LIU Wandu, et al (7300)
- The effects of forest conversion on soil N mineralization and its availability in central jiangxi subtropical region
..... SONG Qingni, YANG Qingpei, YU Dingkun, et al (7309)

《生态学报》2014 年征订启事

《生态学报》是由中国科学技术协会主管,中国生态学学会、中国科学院生态环境研究中心主办的生态学高级专业学术期刊,创刊于 1981 年,报道生态学领域前沿理论和原始创新性研究成果。坚持“百花齐放,百家争鸣”的方针,依靠和团结广大生态学科工作者,探索生态学奥秘,为生态学基础理论研究搭建交流平台,促进生态学研究深入发展,为我国培养和造就生态学科人才和知识创新服务、为国民经济建设和发展服务。

《生态学报》主要报道生态学及各分支学科的重要基础理论和应用研究的原始创新性科研成果。特别欢迎能反映现代生态学发展方向的优秀综述性文章;研究简报;生态学新理论、新方法、新技术介绍;新书评价和学术、科研动态及开放实验室介绍等。

《生态学报》为半月刊,大 16 开本,280 页,国内定价 90 元/册,全年定价 2160 元。

国内邮发代号:82-7,国外邮发代号:M670

标准刊号:ISSN 1000-0933 CN 11-2031/Q

全国各地邮局均可订阅,也可直接与编辑部联系购买。欢迎广大科技工作者、科研单位、高等院校、图书馆等订阅。

通讯地址:100085 北京海淀区双清路 18 号 电 话:(010)62941099; 62843362

E-mail: shengtaixuebao@rcees.ac.cn 网 址: www.ecologica.cn

本期责任副主编 杨志峰 编辑部主任 孔红梅 执行编辑 刘天星 段 靖

生 态 学 报

(SHENGTAI XUEBAO)

(半月刊 1981 年 3 月创刊)

第 33 卷 第 22 期 (2013 年 11 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 33 No. 22 (November, 2013)

编 辑 《生态学报》编辑部
地址:北京海淀区双清路 18 号
邮政编码:100085
电话:(010)62941099
www.ecologica.cn
shengtaixuebao@rcees.ac.cn

主 编 王如松
主 管 中国科学技术协会
主 办 中国生态学学会
中国科学院生态环境研究中心
地址:北京海淀区双清路 18 号
邮政编码:100085

出 版 科 学 出 版 社
地址:北京东黄城根北街 16 号
邮政编码:100717

印 刷 北京北林印刷厂
发 行 科 学 出 版 社
地址:东黄城根北街 16 号
邮政编码:100717
电话:(010)64034563
E-mail: journal@cspg.net

订 购 全国各地邮局
国外发行 中国国际图书贸易总公司
地址:北京 399 信箱
邮政编码:100044

广告经营 京海工商广字第 8013 号
许 可 证

Edited by Editorial board of
ACTA ECOLOGICA SINICA
Add: 18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
Tel: (010)62941099
www.ecologica.cn
shengtaixuebao@rcees.ac.cn

Editor-in-chief WANG Rusong
Supervised by China Association for Science and Technology
Sponsored by Ecological Society of China
Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS
Add: 18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China

Published by Science Press
Add: 16 Donghuangchenggen North Street,
Beijing 100717, China

Printed by Beijing Bei Lin Printing House,
Beijing 100083, China

Distributed by Science Press
Add: 16 Donghuangchenggen North
Street, Beijing 100717, China
Tel: (010)64034563
E-mail: journal@cspg.net

Domestic All Local Post Offices in China
Foreign China International Book Trading
Corporation
Add: P.O.Box 399 Beijing 100044, China



ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 90.00 元